

1 Szilárdtest-világítás 2017

(Forrás: *www.doe – DOE SSL Program, “2017 Suggested Research Topics Supplement: Technology and Market Context,”* edited by James Brodrick, Ph.D., 2017. szeptember; Fordította és szerkesztette: Surguta László)

JOGI NYILATKOZAT

Ez a jelentés az Egyesült Államok kormányának egyik ügynöksége által támogatott munka eredménye. Sem az Egyesült Államok kormánya, sem annak bármely ügynöksége, vagy azok munkatársai, vállalkozói, alvállalkozói, vagy azok alkalmazottai sem vállalnak semmiféle – kifejezett vagy beleértett – garanciát vagy jogi felelősséget a közölt információk, készülékek, termékek vagy eljárások pontosságáért, teljességéért vagy hasznosságáért, illetve nem állítják azt, hogy azok használata nem sért esetleg magántulajdonban lévő jogokat. A jelentésben adott kereskedelmi termékekre, eljárásra vagy szolgáltatásra kereskedelmi névvel, védjeggyel, gyártóval vagy másképp történő hivatkozás nem jelenti szükségképpen annak az Egyesült Államok kormánya vagy bármely ügynöksége, vállalkozója vagy annak alvállalkozója általi jóváhagyását, ajánlását vagy támogatását. A szerzőknek a jelentésben kifejtett nézetei és véleményei nem feltétlenül fejezik ki vagy tükrözik az Egyesült Államok kormánya vagy bármely ügynöksége nézeteit és véleményét.

A jelen kiadvány a forrásra való hivatkozás esetén részben vagy egészében sokszorosítható oktatási vagy non-profit célokra a szerzői jog tulajdonosának külön engedélye nélkül, amennyiben hivatkozás történik a forrásra a következőképpen: „DOE SSL Program, “2017 Suggested Research Topics Supplement: Technology and Market Context,” edited by James Brodrick, Ph.D.”

VEZETŐI ÖSSZEFOGLALÓ

A szilárdtest-világítás (SSL) technológiája és ára jelentősen javult az elmúlt évtizedben, s olyan pontot ért el, ahol majdhogyanumanyai világítási alkalmazás tekintetében már a legjobb választásnak bizonyul. A szilárdtest-világítási technológia nyilvánvaló energiamegtakarítást kínál, csökkent a teljes tulajdonlási költségeket és még a világítási teljesítőképesség terén is javult a hagyományos világítástechnikai termékekkel összevetve. De még így is a fényemittáló diódás világításra való áttérés piaca és technológiája korai fázisában van. Habár a LED-es világítástechnológia előrehaladásának sebessége igen látványos, a folyamatban lévő kutatás és fejlesztés segítségével még mindig jelentős fejlődést lehet elérni a fényforrások fényhasznosítása terén, és ezt meg is kell tenni. Ha a LED-termékek elérnék az USA SSL programjának közép- és hosszútávú

fényhasznosítási céljait, akkor az Egyesült Államok évente 5,1 kvadrillió Btu (angol hőegység) energiát lenne képes megtakarítani 2035-re (1 Btu = 1055 joule).

A világítási teljesítőképesség más aspektusait – a színminőséget, az optikai szabályozást, a fény hatékony továbbítását és a világításnak az épületekbe való integrálását – is lehetne még javítani – további energiamegtakarítás elérése mellett. A világítástechnikai termékek olyan új funkcióit fejlesztették ki, amelyekre a korábbi világítástechnológiákkal nem volt mód, és amelyek új alkalmazásokat tesznek lehetővé, növelve a világítási rendszerek értékét. Például a fehér fény színárnyalatainak beállítása új előnyöket tesz lehetővé – a világítást hozzáigazítva az ember fiziológiai reakcióihoz. Az érzékelő, vezérlő és kommunikációs eszközök integrálása folytán a világítási rendszerek részeivé válhatnak a Tárgyak Internetének (IoT), amely az adatok kinyerése és elemzése folytán óriási további értéket jelent a világítási rendszerek számára.

A szerves fényemittáló diódák (OLED) technológiája még mindig kihívásokkal néz szembe, ami a költségsökkentést és a laborszinten produkált nagy fényhasznosítások elérését illeti a kereskedelmi termékekénél is. A technológia azonban igen értékes előnyöket kínál a felületi fényesség, a formatényező és a világítás hatékony szolgáltatása terén, amit ki lehetne egészíteni LED-es világítási megoldásokkal. Amíg a LED fényforrások eredendően kicsik és nagy fényűek, az OLED-ek nagyok és diffúz fényt bocsátanak ki, ami azt jelenti, hogy igen közel lehet elhelyezni őket a világítási feladathoz anélkül, hogy kellemetlen káprázást okozna. Az OLED-eket igen olcsó, folyamatos, roll-to-roll (R2R = „hengerről hengerre”) típusú leválasztási eljárással lehet előállítani, ezzel kompenzálva e kisebb fényű fényforrásokkal járó anyagköltséget.

A technológiai fejlesztésekkel párhuzamosan a gyártók azon dolgoznak, hogy olyan termékeket állítsanak elő, amelyekkel fel lehet váltani a világászerte felszerelt „foglatok” óriási számában a hagyományos világítástechnikai termékeket. Becslések szerint a világon 45 milliárd lámpafoglalat található [2], és ez a szám várhatóan tovább fog növekedni a népesség, a fejlődő világ építőiparának és az új világítási alkalmazások – például a beltéri kertészet – növekedésével. E lámpafoglalatokat „megtölteni” igencsak nagy kihívás, ugyanakkor

Jelen dokumentum az Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériuma által 2015-ben készített tanulmány (l. a HOLUX Hírek 142-148. számaiban), valamint annak 2016. évi aktualizálásához (l. a HOLUX Hírek 161-167. számaiban) készített „Solid-State Lighting 2017, Suggested Research Topics Supplement: Technology and Market Context” címmel megjelent újabb kiegészítésén alapul. – A Szerk.

persze lehetőséget teremt egyre értékesebb energia- és költségsökkentő világítástechnikai termékek és rendszerek előállítására. Emellett az SSL technológia kedvező alkalmat teremt az amerikai gyártási infrastruktúra fejlesztéséhez az SSL termékek hosszú távú létrehozása érdekében.

A szilárdtest-világítás lehetőségei és kihívásai általánosságban az alábbiak:

- A rendszer-hatékonyság javítása
- A világítási alkalmazások jobb megismerése az előállított fény hatékonyságának optimalizálása érdekében
- Tökéletesített gyártási technológiák a szilárdtest-világítási termékek számára, amelyek csökkentik a költségeket, ugyanakkor javítják a termékek minőségét és konzisztenciáját, és ösztönzik a hazai munkahelyteremtést.
- Az elfogadás akadályainak csökkentése.

A jelen dokumentum ismerteti ezeket a lehetőségeket, és kiemeli azokat a kritikus K+F témákat, amelyek szükségesek a fejlesztések megvalósításához. A tanulmány emellett kiegészíti a „2017. évi javasolt szilárdtest-világítási kutatási témák” című anyagot, amely felsorolja azokat a speciális kutatási témákat, amelyeket az USA Energiaügyi Minisztériuma (DOE) SSL programjának akadémiai, országos laboratóriumai és iparági érdekeltjei támogatásra ajánlottak. A DOE SSL programja továbbra is agresszív teljesítőképességi és költség-célokat határoz meg a LED és OLED világítási technológiák számára, és K+F finanszírozási és kutatási tevékenységeket folytat e célok elérésének támogatására. A DOE finanszírozási támogatása erőforrásokat biztosít a nagy kihívásokkal teli alap- és tudományos kutatások kezelésére. Az egyik ilyen probléma a LED-ekben lejátszódó áramsűrűség-esés vagy a „zöld rés” hatékonyság jobb megismerése és megoldása, amelyre az iparág egyedül képtelen volt. A támogatás lehetővé tette az ipar számára, hogy kockázatos technológiai területekre lépjen, ilyen pl. a kvantumpont-integráció a LED termékekbe vagy az OLED fénykivonási technológiák fejlesztése, amelyek meghaladják egy vállalat belső K+F tevékenységének lehetőségeit.

[1] DOE SSL Program: „Energy Savings Forecast of Solid-State Lighting in General Illumination Applications”, 2016. szept. (https://energy.gov/sites/prod/files/2016/09/f33/energysavingsforecast16_2.pdf)
[2] P. Smallwood: „The Future of a Disrupted Lighting Market”, *Strategies in Light*, Anaheim, Kalifornia, 2017.

A DOE támogatása kulcsfontosságú a szilárdtest-világítási technológia végső lehetőségeinek kibontakoztatásához – ideértve a fényforrás- és rendszer-hatásfok maximalizálását, az alacsony árakat, az optimalizált fényhasznosítást és a kapcsolódási és vezérlő rendszerekbe való beépítést.

A DOE SSL programja kidolgozott egy átfogó K+F stratégiát a LED és OLED technológia fejlesztésének támogatására a maximálisan elérhető energiamegtakarítás érdekében. A jelen kiegészítő tanulmány a 2016 szeptemberében és októberében megrendezett kerekasztal-megbeszélések és a DOE 2017 januárjában tartott SSL K+F workshopján kapott információk szakértői feldolgozásával készült. A terv tükrözi a szilárdtest-világítás érdekeltjeinek azokkal a kiemelt K+F témákkal kapcsolatos véleményeit, amelyek javítani fogják a fényhasznosítást, lebontják az elfogadással szembeni korlátokat és hozzáadott értéket teremtenek a szilárdtest-világítással kapcsolatosan. A tanulmányban szó lesz a változó félben lévő világítástechnikai piacról, valamint azoknak a LED és OLED technológiáknak kritikus fontosságú K+F igényeiről, amelyek az SSL értékláncan keresztül jelentkeznek.

A kerekasztal- és workshop-megbeszélések során talált legfontosabb K+F kihívások a következők:

LED-alapú világítás K+F javaslatai

- Emitter-anyagok – a spektrum egészében emittáló anyagok, amelyek fejlődést igazolnak a csúcs fényhasznosítás és a nagy meghajtóáramoknál és magas hőmérsékleteknél adódó stabil fényhasznosítás tekintetében. Ideértve az új eszközstruktúrákat, pl. az alagúteffektusú LED-eket is.
- Lefelé konvertáló anyagok – keskeny vörös, zöld és állítható fehér lefelé konvertáló anyagok. Javított mátrix-integrálás és optikai vezérlés a lefelé konvertáló mátrix szinten.
- Tokozás – LED-csomagok tokozóanyagai és fénypor-mátrixai, amelyek magasabb működési hőmérsékleteket, nagyobb fényáramot és fénykivonást tesznek lehetővé a LED-ek számára a LED-csomag stabilitásának veszélyeztetése nélkül.
- Nagy fényhasznosítású prototípusok –, amelyek maximális fényhasznosítást érnek el és további lámpatest-funkciókat integrálnak a LED-csomagba, pl. érzékelőket, csatlakoztathatóságot, tápegységet, optikai funkciókat stb. tartalmazó összetett LED-modulok formájában.
- Fejlett LED-es világítás – teljesen új, optimalizált koncepciójú lámpatestek vagy világítási rendszer-architektúrák, amelyek élvezik a LED-ek egyedülálló tulajdonsá-

gainak előnyeit a jobb fényhasznosítás, jobb teljesítőképesség, a csatlakoztathatóság és a jobb világítástechnikai értékek – pl. az emberre kifejlesztett fiziológiai előnyök – demonstrálására.

- Teljesítményelektronika – fejlesztések a LED-ek tápforrásai terén, amelyek lehetővé teszik a meghajtók nagy hatékonyságát többcsatornás rendszerek és a teljes működési tartomány esetén. Idetartoznak a rendszer-megbízhatósággal, a formatényezővel és a kritikus komponensekkel kapcsolatos fejlesztések is.
- Tökéletesített gyártás – új technológiák és eljárások, amelyek lehetővé teszik az igényes világítási termékek gyártását kis számú összetevővel és megfelelő rugalmassággal a világítási termékek széles választékának létrehozásához.

OLED-alapú világítás K+F javaslatai

- Stabil, nagy fényhasznosítású, fehér fényű eszközök – olyan emitterrendszerekre (azaz emitterekre, gazda- és transzport-anyagokra) vonatkozó kutatás, amelyekkel egyszerre lehet hosszú élettartamot és nagy fényhasznosítást elérni, különösen a kék emitterek terén, vagy olyan OLED réteg-anyagokkal (azaz átlátszó vezető anyagokkal, töltésgeneráló és más rétegekkel) kapcsolatos kutatás, amelyekkel növelni lehet az OLED rétegek optikai és elektromos teljesítőképességét.
- Gyártástechnológiák – új eljárásokra és fejlesztésekre van szükség az anyagleválasztás, az eszközgyártás vagy a tokozás terén a nagy teljesítőképességű OLED paneleknél.
- Fénykivonás és fényhasznosítás – olyan új megoldások feltárása, amelyek lehetővé teszik a panel fényhasznosításának jelentős javulását a szerves rétegben/anódban a hullámvezetős üzemmódokban becsapódott fény kivonásával és/vagy a felületi plazmonikus veszteségek csökkentésével.
- OLED-es prototípus világítási programok – be kell mutatni olyan OLED-es világítási programokat, amelyek kiemelik az OLED-es világítástechnológia képességeit. Az OLED-es programokat kombinálni kell egy vagy több, egyedi meghajtó elektronikával ellátott, nagy teljesítőképességű OLED panellel, hogy nagy fényhasznosítású, hosszú élettartamú rendszereket lehessen készíteni.

Világítással kapcsolatos (LED-es és OLED-es) K+F javaslatok

- A fény élettani hatásai – meg kell ismerni az emberek fénnel kapcsolatos fiziológiai reakcióit, ami lehetővé teszi, hogy olyan világítástechnikai termékek készül-

jenek, amelyek javítják a közérzetet, növelik a teljesítőképességet és minimalizálják az elektromos világítás negatív hatásait, ugyanakkor energiát takarítanak meg.

- Világítási alkalmazások hatásfoka – a fény hatékony előállítására, vezérlésére és felhasználására vonatkozó kutatás speciális világítási alkalmazások esetén.

1 Bevezetés

Az Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériuma (DOE) Szilárdtest-világítási (SSL) programja az USA 2005. évi energiapolitikai törvénye 912. szakaszában megfogalmazott kongresszusi irányelv alapján készült, amely utasította a minisztériumot arra, hogy „*támogassa a fehér fényt emittáló diódákon alapuló modern szilárdtest-világítási technológiákkal kapcsolatos kutatási, fejlesztési, bemutatási és kereskedelmi alkalmazási tevékenységeket.*”

A DOE Szilárdtest-világítási programja egy átfogó K+F stratégia a szilárdtest-világítási technológia eredményeinek támogatására és az energiamegtakarítások maximalizálására. A K+F program speciális célja a következő:

2025-re kifejleszteni olyan modern szilárdtest-világítási technológiákat, amelyek a hagyományos világítási technológiákkal összehasonlítva jóval nagyobb energiahatékonyságúak, hosszabb élettartamúak és versenyképes árúak – 50%-os termérendszer-fényhasznosítást célozva meg – megfelelő alkalmazási spektrum mellett.

Az energiamegtakarítások maximalizálása érdekében a DOE SSL K+F programja azokat az alapvető K+F témákat támogatja, amelyek az egész értékláncra alkalmazható előnnyel járnak, és ez olyan K+F tevékenység, amely tipikusan nem végezhető el a világítástechnikai iparon belül. A DOE által támogatott K+F elősegíti a mögöttes fizikai jelenségek megértését, teljesen új technikai és gyártási megközelítéseket vizsgál, új technológiákkal csökkenti a fejlesztési kockázatot és/vagy segít tisztázni olyan alkalmazási előnyöket, amelyek kiegészítik és növelik a szilárdtest-világítás energiamegtakarítási potenciálját.

A jelen – *SSL 2017 Suggested Research Topics Supplement: Technology and Market Context* című (korábban: *DOE SSL R&D Plan elnevezésű*) dokumentum évente aktualizálásra kerül, és a DOE többéves MYPP programjának (*DOE SSL Multi-Year Program Plan*) és 2015 előtt publikált ütemtervének egységesítése. (A korábbi dokumentumok a következő címen érhetők el: <http://energy.gov/eere/ssl/technology-roadmaps>.) A DOE szilárdtest-

világítási K+F terve elemzést, kontextust és irányt nyújt a szilárdtest-világítási technológia továbbfejlesztése és az energiamegtakarítás növelése érdekében folyó K+F tevékenységekhez. A jelen tanulmány tükrözi a DOE szilárdtest-világítási céljai irányába történt előrehaladást és azokat a változó K+F prioritásokat, amelyek a legnagyobb hatást gyakorolják a program céljainak elérésére. A programot meghatározó jogszabályokra és irányelvekre vonatkozó részletek itt nem szerepelnek, de megtalálhatók az SSL honlapján (<https://energy.gov/eere/ssl/about-solid-state-lighting-program> és <https://energy.gov/eere/ssl/partnerships>).

2 A szilárdtest-világítás hatásai

A szilárdtest-világítás óriási lehetőséget kínál a világítás hatásfokának, teljesítőképességének és értékének javításához az új alkalmazások és előnyök megteremtése folytán. A LED- és OLED-eszközökkel kapcsolatos kezdeti motiváció a nagy fényhasznosítás ígérete és a félvezetők gyártási folyamatainak felhasználási lehetősége volt. Az iparági szakértők úgy vélték, hogy a LED-ekre a félvezetőipar tömeggyártási technológiáit, az OLED-ekre pedig a roll-to-roll (R2R) feldolgozási technológiákat lehet majd alkalmazni. Bár még mindig sok a fejleszteni való, a szilárdtest-világítás már elkezdte beváltani ezeket az ígéreteket, hiszen folyamatosan demonstrálja ezt a hagyományos fényforrásokot meghaladó fényhasznosításával, csökkenő teljes tulajdonlási költségével, amelyek észszerű idő alatti megtérülést és új tulajdonságokat tesznek lehetővé – ideértve a fény spektrumának állíthatóságát, a tökéletesített vezérléseket és a csatlakoztathatóságot. Ezek a tulajdonságok hozzájárultak a szilárdtest-világítás gyors elfogadásához, ami máris jelentős energiamegtakarításokat eredményez. A fényforrások nagyobb fényhasznosítása mellett a szilárdtest-világítás hatékonyabb abban a tekintetben is, hogy akkor és ott szolgáltat fényt, amikor és ahol arra szükség van – további energiamegtakarítási szintet érve el ezzel, amit még csak most kezdenek igazán értékelni. A szilárdtest-világítási technológia fejlődésével világossá vált, hogy hatása sokkal több, mint csupán az energiamegtakarítás. Megvan a lehetőség arra is, hogy jótékony hatást gyakoroljon a környezetre, a kerteszetekre, a közlekedés biztonságára, az emberi egészségre és a termelékenységre, amelyek mindegyike megvalósítható, miközben jelentős mennyiségű energiát lehet megtakarítani a hagyományos világítási technológiákhoz képest.

A szilárdtest-világítás beváltja ugyan az energiamegtakarításra és az új világítási értékekre vonatkozó ígéreteit, de további K+F tevékenységre van szükség ahhoz, hogy ezek az ígérek teljes mértékben realizálódjanak. A következő fejezetekben a szilárdtest-világítás kulcsfontosságú hatásait fogjuk megvitatni.

2.1 Miben különbözik a szilárdtest-világítás a hagyományos fényforrásoktól?

A LED vagy az OLED fényforrások által előállított fény ugyanolyan, mint bármely más, általunk észlelhető fény. A szilárdtest-fényforrásoknak azonban van néhány kulcsfontosságú tulajdonsága, amely egy sereg olyan új érték előtt nyitja meg az utat, amelyekre korábban nem volt lehetőség. A LED-alapú világítás legfontosabb tulajdonságai a következők:

- **A fény spektrumának szabályozása:** A LED-ek és a fényporok a látható fény teljes spektrumában képesek fényt emittálni – beleértve az UV és IR tartományokat is. A különböző LED-ek és/vagy fényporok kombinációja megteremti a lehetőséget arra, hogy a spektrumokat a kívánságoknak és az alkalmazásnak megfelelően alakítsuk ki, s így az adott alkalmazáshoz éppen megfelelő fény spektrumot hozzuk létre.

- **Fényerősség szabályozása:** A LED-ek természetüknél fogva dimmelhetők, és a többcsatornás LED-es fényforrások lehetővé teszik az egyes – esetleg különböző színű vagy különböző irányokba állított – LED-ek fényének szabályozását is. Így lehetővé válik bizonyos LED-es világítási termékeknél a fény spektrumának vagy irányának beállítása.

- **Optikai fényeloszlás:** A LED-ek fényárama, kis mérete és irányított fénye azt jelenti, hogy a LED-es világítástechnikai termékek optikai fényeloszlása jól kontrollálható viszonylag olcsó optikákkal, ami lehetővé teszi, hogy a fény csak oda jusson el, ahol az adott alkalmazáshoz arra szükség van.

Az OLED-ek fényének spektrumát és erősségét is lehet szabályozni. További tulajdonságaik a következők:

- **Kis fénysűrűség:** Az OLED fényforrások kis fénysűrűsége folytán közel helyezhetők el a megvilágítandó tárgyakhoz, ami javítja a világítás teljesítőképességét, és a fényt nagyobb hatékonysággal lehet eljuttatni a világítási feladathoz – kápráztatás kialakulása nélkül.

- **Karcú formatényező:** Az OLED fényforrások nagyon vékonyak lehetnek, és potenciálisan illeszthetők vagy hajlíthatók, így új világítási rétegek és elhelyezések kialakítására alkalmasak.

A szilárdtest-világítási termékek mindezeket a fontos tulajdonságokat képesek igazolni, miközben nagy fényhasznosítási szintekkel rendelkeznek – jóval meghaladva a hagyományos fényforrásokkal elérhető szinteket. E tulajdonságok a hatásfok új aspektusait teszik lehetővé a megfelelő (spektrumú) fény megfelelő helyre (optikai vezérlés), a megfelelő időben (fényerősség szabályozása) való eljuttatása tekintetében. A tulajdonságok új világítási képességeket is lehetővé tesznek, amelyek az emberi egészséggel és termelékenységgel kapcsolatos élettani hatásokkal függenek össze, megfelelő spektrumú fényt juttatva el megfelelő időben maximalizálják a kerteszetek növénytermesztését, biztonságosabban teszik az utakat és még számos más, igen értékes világítási alkalmazást tesznek lehetővé.

2.2 Energiamegtakarítások

A LED-es világítás a hagyományos világítástechnológiákhoz képesti jobb fényhasznosításával máris jelentős energiát takarít meg a világítás felhasználói számára. A jelenlegi LED-es világítástechnikai termékek olyan formatényezővel, fényeloszlásokkal és fényáram-szintekkel rendelkeznek, amelyek lehetővé teszik a meglévő, alacsonyabb hatékonyságú, hagyományos világítási termékek közvetlen cseréjét, ezáltal gyors bevezetést eredményezve a jelentős energiamegtakarítás érdekében. Noha a szilárdtest-világítás teljesítőképessége máris jelentős energiamegtakarításokhoz vezetett, még mindig van mit javítani a fényhasznosításon mind a LED, mind az OLED technológia esetén, amint azt a 4. és 5. fejezetben ki fogjuk fejteni.

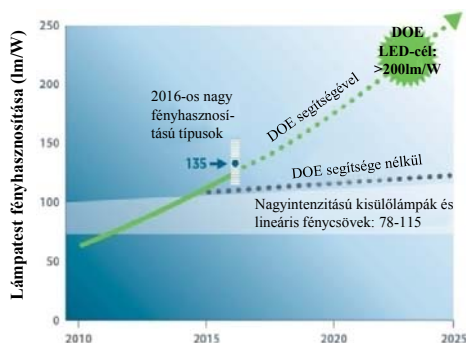
A szilárdtest-világításból származó energiamegtakarítások új generációja olyan alkalmazási hatékonyságból fog származni, amit úgy lehet a legegyszerűbben jellemezni, hogy a fényt a fényforrásból hatékony módon juttatjuk el a világítási feladathoz. Az alkalmazás hatékonyságánál azonban azt is figyelembe kell venni, hogy a fény spektruma mennyire felel meg az adott világítási alkalmazáshoz, és azt a képességet is, hogy mennyire lehet a fényforrást aktívan szabályozni az energiaszint minimalizálása érdekében, amikor nincs szükség a fényre. Az energiamegtakarítások végső tényezője az elfogadás. A fogyasztóknak vásárolniuk és használniuk kell a szilárdtest-világítási fényforrásokat, hogy energiát takarítsanak meg. Mint bármely új technológia bevezetésénél – különösen a világítástechnikai piac méreti okán – az elfogadás előtt aka-

dályok jelennek meg. Az energiamegtakarítás e három aspektusát – a fényforrás fényhasznosítását, az alkalmazás hatékonyságát és az elfogadás akadályait – a következő fejezetekben fogjuk tárgyalni.

2.2.1 Fényforrások fényhasznosítása

Bizonyos típusaik 150 lm/W-ot meghaladó fényhasznosításával a LED-termékek nagyobb fényhasznosításúak lehetnek, mint az izzólámpák, a halogénlámpák, a kompakt fénycsövek, a lineáris fénycsövek és a nagyintenzitású kisülőlámpák. A vevők azonban gyakran választják az olcsóbb, kisebb fényhasznosítású termékeket a csúcsminőségű, de drágábbak helyett. A 2.1 táblázat a 2016-ban rendelkezésre álló csúcsminőségű és a tipikusan megvásárolt szilárdtest-világítási termékek árát és teljesítőképességét hasonlítja össze, a 2.2 táblázat pedig a kategóriájukban legjobb hagyományos világítástechnológiák árát és teljesítőképességét mutatja. A két táblázatból az látszik, hogy a legjobb paraméterű LED-termékek már nagyobb fényhasznosításúak ugyan a bevált technológiáknál, de magasabbak a beszerzési áraik. Másrészt pedig a 2016-ban tipikusan megvásárolt, olcsóbb árfekvésű LED-termékeknek alacsonyabb volt a fényhasznosítása, mint a kategóriájukban legjobb hagyományos világítástechnológiájú versenytársaiké. Ez azt mutatja, hogy van még mit tenni annak érdekében, hogy párhuzamosan növelni lehessen a LED-termékek fényhasznosítását és csökkenteni az árakat, hogy vonzóbbá tehesük azokat a nagyközönség számára. A fényhasznosítás/költségsökkentés kompromisszumok mellett a LED-es világítástechnikai gyártók választgatják azt is, hogy a fényhasznosítás helyett az élettartamot, a színminőséget, a fénycsöveket és egyéb teljesítőképességi jellemzőket részesítik előnyben.

A LED-alapú szilárdtest-világítási termékek teljesítőképessége és ára tekintetében



2.1 ábra – A LED-es és az elterjedt nagyintenzitású fényforrásokkal és lineáris fénycsövekkel üzemelő mennyezeti rácsos lámpatestek fényhasznosítási adatainak összehasonlítása (Forrás: LED Lighting Facts® Product Database, 2016)

	Legjobb paraméterű termékek*			Tipikus termékek**		
2016-os szilárdtest-világítási termék	Fényhasznosítás (lm/W)	Ár (USD/klm)	Üzemi élettartam (L70) † (óra)	Fényhasznosítás (lm/W)	Ár (USD/klm)	Üzemi élettartam (L70) † (óra)
Ø60mm-es LED-lámpa (szabályozható, 2700K)	100	14	25 000	79	9	22 000
PAR38-as LED-lámpa (3000K)	88	20	25 000	68	18	25 000
T8-as LED-cső (4000K)	149	13	50 000	109	8	50 000
Ø15cm-es LED-es mélysugárzó (3000K)	86	80	50 000	58	26	50 000
60cm x 120cm-es LED-es rácsos mennyezeti lámpatest (3500K)	129	51	50 000	100	27	50 000
LED-es csarnokvilágító lámpatest (4000K)	136	21	60 000	113	14	60 000
LED-es útvilágító lámpatest (5000K)	118	37	60 000	103	27	50 000
OLED-es lámpatest (3000K) † †	–	–	–	43	756	40 000

2.1 táblázat – A legjobb paraméterű és a tipikus szilárdtest-világítási termékek összehasonlítása

Megjegyzések:

*A „legjobb paraméterű” termékek fényhasznosításának jellemzésére vagy az Energy Star® minősítésű termékek (Ø60mm-es LED-lámpa, a PAR 38-as és a Ø15cm-es LED-es mélysugárzó esetén), vagy a DesignLights Consortium által minősített (a LED-cső, a rácsos mennyezeti és az útvilágító lámpatest esetén) 90. százalékosztályát használtuk fel, majd vettük az ehhez a fényhasznosításhoz tartozó termékek átlagárát.

**A Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) által végzett fogyasztói felmérés azt mutatta, hogy a válaszadók több mint 80%-a az 1. kvartilis vagy az alatti áron és 90%-nál többben a mediánnak megfelelő vagy az alatti áron vásároltak lámpát. A felmérésből az is kitűnik, hogy a középérték és a medián bizonytalan mérőszám, amely a vásárlási eloszlás „farkát” reprezentálja, és hogy a LED-lámpák esetén a karakterisztikus ár a webről származó adataik 1. kvartilise [3]. Ezen értékelés alapján a LED-ek esetén az 1. kvartilist használtuk a tipikus beszerzési ár jellemzésére és az ehhez az árhoz illeszkedő termékek átlagos fényhasznosítását tüntettük fel.

† A nem szilárdtest-világítási technológiák esetén az élettartam-értékek a termék meghibásodás miatti élettartam-végét jelenti. Mivel a LED-eknél fokozatos fényáram-csökkenés megy végbe a katasztrofális meghibásodás mellett, a LED és az OLED termékek üzemi élettartamára az L70-es értékeket adtuk meg, azaz azt az időtartamot, amikor a termékek fényárama kezdeti értékük 70%-ára esik le [3].

†† Az Acuity Brands Luminaires 5 Chalina OLED-paneles, szálcsiszolt nikkelből készült függesztékére vonatkozik, amely 2017. májusában a Home Depot-ból volt beszerezhető (a termék 2015-ben jelent meg a piacon [4]).

Terméktípus	Fényhasznosítás (lm/W)	CCT korrelált színhőmérséklet (K)	Üzemi élettartam (óra)	Ár (USD/klm)
Ø60mm-es izzólámpa	15	2760	1 000	0,63
Ø60mm-es halogénlámpa	20	2750	8 400	2,50
Ø60mm-es izzólámpát helyettesítő kompakt fénycső	70	2700	12 000	2
Ø60mm-es izzólámpát helyettesítő kompakt fénycső (szabályozható)	70	2700	12 000	10
Lineáris fénycsőrendszer*	108	4100	25 000	4
Nagyintenzitású nagyteljesítményű lámparendszer*	115	3100	15 000	3
Nagyintenzitású kisteljesítményű lámparendszer*	104	3000	15 000	4

2.2 táblázat – A kategóriájukban legjobb hagyományos világítástechnológiák ára és teljesítőképessége

*Tartalmazza az előtétek veszteségeit

még jelentős fejlődési lehetőségek vannak. A 4.1 fejezetben ismertetett elemzés azt mutatja, hogy a 255 lm/W elérhető fényhasznosítási cél a LED-csomagok esetében, ami 225 lm/W körüli lámpatest-fényhasznosítást tenne lehetővé. A laboratóriumi és a kereskedelmi LED-csomagok esetén már kitűnő haladás volt tapasztalható e cél elérésének útján.

A 2.1 ábrából az látható, hogy a LED-es lámpatestek akár 100 lm/W javulást is mutathatnak az elterjedt technológiákkal elérhető legjobb fényhasznosításokhoz képest. Az OLED-technológia még mindig gye-
rekipőben jár, de „ígéri” a nagy fényhasznosítást és az alacsony költségeket, valamint az új lehetőségeket a formatényező és a fénycsövek tekintetében.

Az 5.1.1 fejezet azt elemzi, hogyan lehetne az OLED-technológiával 190 lm/W-ot elérni – alacsony fényerősségű és kis kápráztatású fényforrás kínálata mellett.

2.2.2 Felhasználási hatások

A lámpa és a lámpatest fényhasznosítása fontos mutatója a világítási rendszer energiahatékonyságának, de „nem mondják el a teljes történetet”.

[3] DOE SSL Program: „Lifetime of White LEDs”, 2009. szept. (https://betterbuildingssolutioncenter.energy.gov/sites/default/files/attachments/lifetime_wh_ite_leds.pdf)

[4] Home Depot: „Chalina 5-Panel Brushed Nickel OLED Pendant”, 2017. máj. <http://www.homedepot.com/p/Acuity-Brands-Chalina-5-Panel-Champagne-OLED-Pendant-CHALINA-PM-OLED1-5P-345LM-30K-120-CHP/205919528>

A lámpatestek teljes hatásfokának definíciójához az is hozzátartozik, hogy a lámpatest a fényt milyen hatásfokkal juttatja el a célterületre, milyen hatékonyan illeszkedik a kibocsátott fény színe a világítási feladat igényeihez és milyen hatékonyan lehet a fény erősségét szabályozni. Minden világítási alkalmazásnak megvannak a saját követelményei, és az alkalmazás hatékonyságát az határozza meg, hogy a világítási rendszer milyen hatékonyan képes ezeket a követelményeket teljesíteni.

A tipikus beltéri világításnál a világítás célja, hogy lehetővé tegye a látást, a látás-élességet és esetleg a nem vizuális élettani stimulációkat. A beltéri világítás feladata az alkalmazástól függően ennél sokkal összetettebb is lehet – olyan követelményekkel kiegészülve mint a nagyfokú szín-hűség, a bizonyos fényszínekre beállítható spektrum stb. Más alkalmazások egyéb más célokat jelölnek ki a világítás számára. A kültéri világításnál gyakran az úttest és a gyalogosok biztonsága a döntő. A kertészetek világításánál a cél, hogy az tápanyagot és jelzést biztosítson a növényeknek a hatékony növekedés érdekében. Az alkalmazás hatékonyságának maximalizálásához három további fejlesztésre van szükség, mivel a hatékony fényforrás egyedül nem elég. Ezeket összegezzük itt és részletezzük majd a tanulmány további részeiben. Először is az alkalmazás követelményeinek alaposabb megértése – beleértve azoknak az élettani válaszait is, akiket a fényhatás éri (részletesebben l. a 3.3 fejezetben), amely döntő fontosságú ahhoz, hogy teljes mértékben kihasználhassuk a szilárdtest-világítási technológiák képességeit az optimalizált világítás hatékonysága és az energiamegtakarítás érdekében. Másodszor: a fény optikai eloszlásának (spektrális eloszlás, fényerősség, térbeli eloszlás) (alkalmasint valósidejű) hozzáigazítása az adott világítási feladathoz, hogy elő lehessen állítani az alkalmazás által megkívánt fénytípust, és oda lehessen azt irányítani, ahol arra szükség van. Harmadszor: olyan új mérési eljárások kidolgozása, amelyek fontosak az alkalmazás hatékonyságának maximalizálásához, hogy a fényt valóban hozzá lehessen szabni – ugyancsak lehetőleg valósidejűben – az alkalmazáshoz. Ez a harmadik fejlesztés különösen fontos, mert segíthet a másik kettő kidolgozásában. Az előzetes mérések segíthetnek az építésznek és a mérnöknek még intelligensebb tervezési rendszerek/komponensek kialakításában, amelyekkel hozzá lehet „szabni” a fényt az alkalmazáshoz.

A fényforrás fényhasznosításának az alkal-

mazás hatékonyságához való hozzáillesztésével jelentősen növelni lehetne az alkalmazás hatásfokát, ami olyan előny, amely jóval túlmutat az energiamegtakarításon. Például a fény spektrális eloszlásának jobb hozzáigazítása az emberek nappali/éjszakai cirkadián ritmusához javíthatná az alvási folyamatokat, amit nem lehet egyszerűen az „alkalmazás hatékonyságának” növekedésével mérni.

2.2.3 Az energiamegtakarítás korlátai

A szilárdtest-világítási termékek csak akkor képesek energiamegtakarításra és csak akkor tudják növelni a termelékenységet, ha fel is szerelik őket. Noha a szilárdtest-világítási technológia energiamegtakarítási és alkalmazási előnyei már jól ismertek, a fogyasztóknak meg is kell bizonyosodniuk arról, hogy a technológia valóban beváltja-e az energiamegtakarítással és a megbízhatósággal kapcsolatos ígéreket, és valóban kompatibilis-e a meglévő lámpatestekkel és kapcsolókkal. Ezenkívül az energiatakarékos világítási termékek ára nem feltétlenül megfizethető a felhasználók számára. Dolgoznak a beszerzési ár, a megbízhatóság és a kompatibilitás alkotta jelenlegi akadályok leküzdésén, és a fogyasztók egyre nagyobb bizalommal tekintenek erre a technológiára. Az alábbiakban röviden áttekintjük ezeket a szempontokat.

• **Beszerzési ár** – A szilárdtest-világítási termékek elfogadásának legnagyobb akadálya a LED-ek és OLED-ek magas ára volt, noha az árak az elmúlt néhány év során gyorsan csökkentek. A szilárdtest-világítási termékek még most is drágábbak a izzólámpáknál, de a lecserelésükre alkalmas standard termékek ára már 2-3 USD-re csökkent. Ezek az olcsóbb termékek azonban – noha jobbak a hagyományosaknál – az alacsonyabb árért kisebb fényhasznosítással, rövidebb élettartammal, gyengébb fényeloszlással és/vagy rosszabb színminőséggel fizetnek. A LED-termékek azonban még a valamivel magasabb árak dacára is nyilvánvaló módon csökkentik a teljes tulajdonlási költségeket, ha figyelembe vesszük a termékekkel kapcsolatos energia- és karbantartási költségeket.

• **Megebízhatóság** – A LED-es világítás-technikai termékek egyértelműen jóval nagyobb megbízhatóságúak a hagyományos világítástechnológiáknál, noha az egyes LED-termékek a felhasznált olcsóbb anyagok, konstrukciók vagy gyártási eljárások okán esetleg nem elégitik ki a felhasználó megbízhatósággal kapcsolatos elvárásait. A LED-technológia hosszú élettartamához új technikákra van szükség az

élettartam megbecsléséhez és kommunikálásához. A LED-ek élettartamának megadásához a 70%-os fényáram-csökkenési pontot használják. Ez a pont azonban csak a LED-fényforrás paramétercsökkenését veszi számításba és nem vesz figyelembe más, akár valószínűbb meghibásodási okot – például a tápegység meghibásodását. (l. részletesebben a 3.1.3 fejezetben.)

• **Kompatibilitás** – A szilárdtest-világítási termékek első generációjának kompatibilisnek kell lennie a meglévő épületi infrastruktúrával és vezérlőkkel, hogy lehetővé tegyék a technológia gyors elfogadását, hogy gyorsabban megkedveljék a fogyasztók és növelni lehessen komfortjukat. A LED-termékeknek azonban különböző a fényszintjük, az optikai eloszlásuk és színminőségük, ami bonyolíthatja a lecserelési folyamatot. Ezenkívül esetleg nem is kompatibilisek az összes meglévő dimmerrel vagy tápegységgel (előtéttel). Végül is olyan új formátványzókat és világítási elrendezéseket fognak bevezetni, amelyek jobban illeszkednek a technológiához az alkalmazások előnyeinek maximalizálása és az energiamegtakarítás növelése érdekében. A DOE Szilárdtest-világítási K+F programja segítségével a Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) kutatói a GATEWAY program felhasználásával a LED-világítás kompatibilitásának számos aspektusát megvizsgálták, beleértve a dimmereket, a vezérlőket és az általános kompatibilitást is. (<https://energy.gov/eere/ssl/gateway-demonstration-special-reports>). A GATEWAY program javítja a fogyasztói bizalmat és ösztönzi az elfogadást azáltal, hogy dokumentálja az szilárdtest-világítási technológia egyes aspektusait, amelyek a technológia potenciális felhasználói számára információforrással szolgálnak.

• **A technológia megértetése és a bizonytalanság** – Számos olyan szituáció adódott, ahol a LED-világításnak a környezetre, az esztétikai megjelenésre vagy az élettani funkciókra kifejtett hatásával kapcsolatos aggodalmak késleltették vagy el is lehetetlenítették a szilárdtest-világítási rendszerek felszerelését. Spektrális és optikai vezérlésével azonban egyedül a LED-es az egyetlen olyan világítástechnológia, amelyet optimalizálni lehet a környezeti hatások minimalizálása és a negatív fiziológiai hatások mérséklése érdekében. Az aggodalmak enyhítéséhez és a megfelelő termék kiválasztásához e szempontok jobb megértésére van szükség az alkalmazások szintjén. A LED-világítás rugalmasságát kínál a világítási teljesítőképesség megőrzéséhez vagy javításához, miközben energiamegtakarításról is gondoskodik.

Noha ezek az akadályok hátráltathatják az elfogadást, a LED-es világítástechnológia gyorsan növeli a piaci részesedését, hiszen nem reprezentálnak alapvető korlátozásokat a szilárdtest-világítási technológia számára, inkább egyfajta normális ellenállást jelentenek egy nagy, jól körülbástyázott piac megzavarásával szemben. Mivel a LED- és az OLED-technológia tovább javul és „érik”, ezeknek a korlátoknak a jelentősége egyre inkább csökkenni fog.

2.3 Gyártás és munkahelyek az Egyesült Államokban

Az Egyesült Államok fontos szerepet játszik a világ világítástechnikai gyártásában, amióta csak Thomas Edison 1890-ben megalapította az Edison General Electric vállalatot, amely azután két évvel később összeolvadt a Thomson-Houston Company-val, létrehozva a mai General Electric-et [5]. Az Egyesült Államok világítástechnikai ipara születésétől kezdve valamennyi világítástechnológiával foglalkozik – az izzólámpától a kompakt fénycsővekig, a lineáris fénycsővektől a nagyintenzitású kisülőlámpákig –, és most az ipar ismét változik, tolódik a szilárdtest-világítás felé.

2.3.1 Belföldi világítástechnikai gyártás

A DOE 2017-ben a kaliforniai Long Beach-en megrendezett szilárdtest-világítási workshopjának volt egy „Gondolkodjunk előre a hazai szilárdtest-világítási gyártásról” című szekciója is, amely összehozta a vezető amerikai gyártókat, hogy megvitassák, miként pozícionálják magukat a jövőben. A gyártók közötti közös kapocs az volt, hogy a LED-világítás oly sok választást tett lehetővé – pl. a CRI színvisszaadási index, a CCT korrelált színhőmérséklet, a fényszabályozás, a színárnyalatok beállítása, a csatlakoztatás stb. tekintetében –, és hogy kielégíthessék a vevői elvárásokat, képeseknek kell lenniük arra, hogy gyorsan előállítsák pontosan azt, amire a vevőknek szükségük van. A szekcióban résztvevő gyártók különböző módon közelítették meg ezt a problémát, de az általános trend az, hogy egyedi, adott vevői megrendelésekre szabott világítási rendszereket kell készíteni. Ez a megközelítés előnyös az amerikai piacot ellátó hazai gyártók számára, mivel ehhez az kell, hogy a lámpatest-gyártás a végfelhasználó közelében történjen.

2.3.2 Az amerikai világítástechnikai gyártás állapota

A DOE szilárdtest-világítási K+F programja hamar felismerte, hogy koncentrált

fellépés nélkül az Egyesült Államoknak a szilárdtest-világítási technológiában betöltött vezető szerepe nem fog szükségképpen megjelenni a hazai gyártási tevékenységekben és munkahelyekben. 2009-ben a DOE kezdeményezte a haladó szilárdtest-világítási gyártás kutatás-fejlesztésének támogatását, amely idővel belekerült az évente megrendezett szilárdtest-világítási K+F megbeszélések napirendjébe, és egy évente frissített szilárdtest-világítási K+F ütemtervet adott ki. (2015 óta a szilárdtest-világítási workshop beleolvadt az éves szilárdtest-világítási K+F workshopba, és a szilárdtest-világítási gyártási ütemterv frissítéseit a jelen dokumentum tartalmazza. A 2014. augusztusi végleges szilárdtest-világítási gyártási K+F ütemterv a következő címen található: https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_mf_g_roadmap_aug2014.pdf.)

A DOE szilárdtest-világítási K+F programja 2009 óta számos olyan fejlett gyártási K+F projektet támogatott, amely új gyártóeszközök, új gyártási eljárások és új szilárdtest-világítási termékek kifejlesztését tette lehetővé. A DOE szilárdtest-világítási programja szilárdtest-világítási K+F-re vonatkozó részének célja a szilárdtest-világítási termékek költségének csökkentése, termékkonzisztenciájuk javítása és a hazai szilárdtest-világítási gyártási infrastruktúra és olyan gyártási képességek ösztönzése, amelyek támogatják a hazai gyártást és munkahelyteremtést. Napjainkban a DOE szilárdtest-világítási K+F programjának segítségével az Egyesült Államok igen versenyképes a szilárdtest-világítási termékek tervezése és gyártása terén [6]. A folyamatban lévő támogatás segíteni fog abban, hogy az USA megőrizze vezető szerepét a szilárdtest-világítási technológia terén, ami növelni fogja a nagy értékű szilárdtest-világítási termékek gyártását az Egyesült Államokban.

A LED-chipek és LED-csomagok szintjén a két legjelentősebb gyártó világviszonylatban is az Egyesült Államokban van: a Cree és a Lumileds. Amíg ezek a gyártócégek a tokozási tevékenységük túlnyomó részét az Egyesült Államokon kívül végzik, a nagy értékű termékeik teljesítőképességét meghatározó gyártási folyamatokat – a LED-lapok szerves fémgőzleválasztással (MOCVD) végzett kristálynövesztése – az Egyesült Államokban történik. Ez a folyamat érzékeny, szabadalmi oltalom alatt álló lépéseket tartalmaz, így a szabadalmi oltalom elvesztése erodálhatná a hazai LED-gyártók által élvezett versenyelőnyt a LED-ek fényhasznosítása és a gyártási kihatás terén. A félvezetők

tokozásának ellátólánca és infrastruktúrája már évtizedek óta szilárd módon Ázsiában van. A LED-tokozáshoz szükséges speciális eljárások technológiai fejlesztései – különösen az automatizált lapkaszintű csomagolás terén – elősegíthetnék azt, hogy a LED-csomagolás is az Egyesült Államokba kerüljön, de e technológiák fejlesztéséhez áttörésekre lenne szükség a K+F terén.

A legnagyobb hazai világítástechnikai gyártók közül sokan gyártósoraik termelését teljesen átváltják szilárdtest-világítási technológiára. Ehhez a váltáshoz az szükséges, hogy alkalmazottaik a fémmegmunkálásról és az eddigi gyártási készségeikről az elektronikára, az optikára, a hőelvezetésre és a rendszerintegrációra váltsanak át. A csatlakoztatott világítás további bevezetésével szoftverekkel, áramkörtervezéssel és kommunikációs protokollokkal kapcsolatos ismeretekre is szükségük van a tervezéssel és gyártással foglalkozó alkalmazottaknak. Az Egyesült Államokban mindig is volt egy jelentős csoport a kisebb lámpatestgyártókból, akik jelen voltak a világítástechnikai piacon a legnagyobb gyártók mellett. Amint a LED-ek stabilizálódnak és beérnek, ezek a vállalatok készen beszerezhető LED-csomagokkal és modulokkal folytathatják a lámpatest-termékek fejlesztését. A LED-es világítástechnológia lehetőséget teremt a kisebb lámpatest-gyártóknak arra, hogy specializált és differenciált világítástechnikai termékeket fejlesszenek ki a világítási piac szinte korlátlan számú kis szegmensé számára.

A szilárdtest-világítási technológia és az alkalmazások új lehetőségeinek (pl. csatlakoztatott világítás, kertészeti világítás és fiziológiai válaszokkal összefüggő világítás) megjelenésével nagyobb gyártási kapacitásra és e területekkel kapcsolatos szakudással rendelkező világítástechnikai szakemberekre lesz szükség. A szilárdtest-világítás néhány éven belül várhatóan meghatározó világítástechnológiává válik, és a gazdaság világítási szektorában valamennyi munkahely szilárdtest-világítási lesz. 2015-ben úgy becsülték, hogy 327 288 embert fognak foglalkoztatni „hatékony világítással” kapcsolatos munkakörben az Egyesült Államokban [7].

[5] GE: „Thomas Edison & the History of Electricity”, (<https://www.ge.com/about-us/history/thomas-edison>)

[6] DOE SSL Program: „DOE Solid-State Lighting Program: Modest Investments, Extraordinary Impacts”, 2017. jan. (https://energy.gov/sites/prod/files/2017/01/f34/ssl-overview_jan2017.pdf)

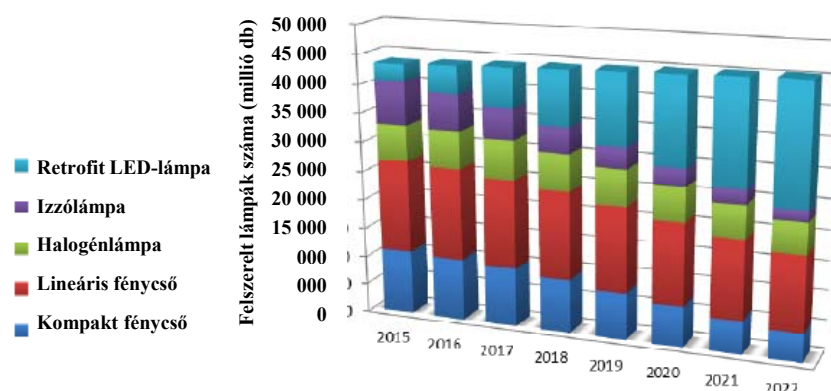
[7] BW Research: „U.S. Energy and Employment Report”, Department of Energy, 2016

A szilárdtest-világítási technológiára való piaci áttéréssel azonban a „hagyományos” és az „energiatakarékos” világítási feladatok közötti különbség többé már nem fog fennállni. E munkakörökbe már nem csupán a terméktervezési és gyártási, hanem a világítástervezési, a specifikációs, a beszerzési és az értékesítési szakma is beletartozik.

2.4 A környezet fenntarthatósága

A szilárdtest-világítási rendszerek nagyobb hatékonysága az előrejelzések szerint jelentős mennyiségű energiát fog megtakarítani, amint az a 2.9 ábrán látható. E megtakarításoknak közvetlen jótékony hatása lesz az Egyesült Államok energia-költség-megtakarítására és az energiabiztonság javulására [8]. Ezenkívül a spektrum, az optikai eloszlás és a kibocsátott fényerősség szabályzásának új lehetőségei minimalizálhatják a mesterséges világításnak az ökoszisztémára kifejtett hatását.

A DOE támogatásával 2013-ban elvégzett életciklus-elemzés (LCA) azt mutatta, hogy a LED-termékek a hagyományos világítással összehasonlítva csökkentik az életciklus alatti teljes energiafelhasználást, ideértve a termék gyártása, szállítása és használata alatti energiafogyasztást [8]. A LED-ek fényhasznosításában és élettartamában tapasztalható folyamatos javulás durván meg fogja felezni az életciklus alatti energiafogyasztást az öt évvel ezelőtti LED-termékekéhez képest. Az LCA tanulmány azt is kimutatta, hogy a szilárdtest-világítás anélkül képes csökkenteni a világításra fordított energiát és fenntartani a teljesítményképeségi szinteket, hogy nagymennyiségű mérgező vagy korlátozott mennyiségben előforduló anyagot használjon fel. (A LED-ek drámai módon képesek csökkenteni a világításhoz használt ritkaföldfémeket a DOE „Kritikus anyagok stratégiájával” összhangban (http://energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FIN_AL_Full.pdf)). A LED-ekhez és OLED-ekhez a fénycsöves világítástechnikával szemben nincs szükség higanyra vagy ólomra, és sokkal hatékonyabban tudják hasznosítani a ritkaföldfémeket. A DOE LCA tanulmánya azt is kimutatta, hogy a levegőre, az erőforrásokra, a vízre és a talajra kifejtett hatások tekintetében a LED-alapú szilárdtest-világításnak messze kisebb a negatív hatása, mint a hagyományos világításnak, és a LED-technológia javulásával ez a hatás kisebb lesz a kompakt fénycsövekénél is. Az LCA tanulmány arra a következtetésre jutott, hogy a LED-alapú szilárdtest-világítás már a világítás fenntarthatóságában is előrelépést



2.2 ábra – A világszerte felszerelt lámpafoglatok alakulása világítástechnológiák szerint – (Forrás: Philip Smallwood, Strategies Unlimited, Strategies in Light, Anaheim, Kalifornia, 2017. március [2])

Alkalmazási terület	LED-ek részaránya 2016-ban (%)	Felszerelt LED eszközök* (millió db)	Energiamegtakarítás 2016-ban (Tbtu)
Izzólámpabúrák	13,5	436	99,1
Dekorációs	6,7	58,9	10,3
Írányított fényű	15,3	82,4	37,9
Írányított fényű, kis típusok	47,6	21,0	35,6
Mélyugárzók	19,8	137	92,5
Lineáris lámpatestek	6,0	68,0	62,0
Csarnokvilágítók	9,4	8,6	46,4
Teljes beltéri világítás	12,3	812	384
Útvilágítás	28,3	12,5	14,9
Parkoló garázsok	32,5	8,5	14,4
Parkolók	26,2	7,1	18,6
Épületek külső világítása	31,2	18,1	14,0
Teljes kültéri világítás	29,7	46,1	61,9
Egység	7,7	15,6	12,4
Csatlakoztatott vezérlések	<0,1	4,0	11,4
Mindösszesen**	12,6	874	469

2.3 táblázat – Felszerelt LED-lámpák és energiamegtakarítások alkalmazások szerint

(Forrás: DOE SSL Program Adoption of Light Emitting Diodes in Common Lighting Applications, 2017. aug. [16])

*A felszerelt darabszámok a 2016-ban felszerelt LED-lámpák és LED-es lámpatestek teljes számát mutatják.

**Kerekített értékek

jelent, és az előnyök tovább fognak növekedni, amint a hatékonyság tovább javul. Bár a LED-alapú szilárdtest-világítási termékek már bizonyítják a jobb fenntarthatóságot, újabb erőfeszítéseket lehet tenni a környezeti hatások további korlátozása érdekében. Az alábbiakban bemutatunk a LED-es világítástechnikai iparban folyó néhány kezdeményezést:

- **Az éjszakai fények ökológiai hatásainak csökkentése.** Például a LED-termékek spektrumának beállítása lehetővé tette a kültéri világítás olyan beállítását, amely minimalizálja a tengeri teknősök keltetésének megzavarását (<http://www.myfwc.com/wildlifehabitats/managed/sea-turtles/lighting/>). A fény optikai eloszlásának vezérlése szabályozóeszközök használatával együtt minimalizálhatná az éjszakai fények vándorlómadarakra kifejtett hatását is, amelyeket megzavar az éjszakai világítás. A fény állatokra gyakorolt hatásainak további tisztázása és a LED-termékek egyéb lehetőségeinek feltérképezése érdekében a DOE 2016. áprilisában állatokkal

foglalkozó kutatók, LED technológusok és a fény hatásait kutató szakemberek részvételével megbeszélést szervezett, hogy megvitassák az állatok reakcióját a fényre. A megbeszélésről összefoglaló jelentés készült (<https://energy.gov/eere/ssl/downloads/2016-animal-responses-light-meeting-report>).

- **A kültéri világításból származó fényszennyezés minimalizálása.** A DOE szilárdtest-világítási K+F programja nemrégiben közzétett egy tanulmányt „A LED-es útvilágításnak az égbolt parázslására kifejtett hatásának vizsgálata” címmel (https://energy.gov/sites/prod/files/2017/05/f34/2017_led-impact-sky-glow.pdf). A jelentés elemezte a tipikus LED-es útvilágítás spektrális energiasűrűsége, a teljes fény és a tipikus útvilágításból felfelé kibocsátott fény mennyiség csökkenté-

[8] DOE SSL Program: „Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products”, 2013. ápr. (http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/lca_factsheet_apr2013.pdf)

sének hatását az égbolt parázslására. A jelentés azt találta, hogy noha a széles (fehér) spektrumú világítás jobban szétterül az atmoszférában, a LED-technológia által lehetővé váló kisebb fényerősségek és a felfelé irányuló fénykibocsátás kiküszöbölése látható módon csökkenti az égbolt parázslását.

• **„Anyagtalanítás”, avagy a szilárdtest-világítási termékekhez felhasznált anyagok mennyiségének csökkentése.** Átgondolt, új tervezéssel megvan a lehetőség a LED-ekhez szükséges anyagok csökkentésére – különösen az energiaigényesek, például az alumínium esetén.

• **A termék életciklusának megértése,** hogy lehetővé váljon a lámpatestek vagy az alkatrészek újbóli felhasználása, újrahasznosítása vagy visszanyerése a termék élettartamának végén [9].

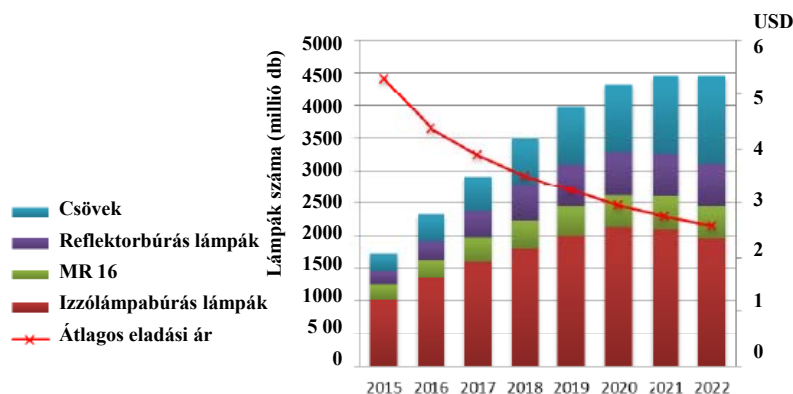
• **A gyártás hatékonyságának javítása** a kihozatalok javításával, az anyagok hasznosításával és a berendezések energia-kihasználásával.

2.5 A világpiac

A szilárdtest-világítási termékek óriási globális lehetőségekkel rendelkeznek. Az energiaárak növekedése és az energiafüggetlenség iránti óhaj okán a globális világítástechnikai piac az energiahatékony fényforrások felé tolódik el. A világítástechnikai ipar még a feltörekvő gazdaságokban is – például Indiában – már szinte teljes mértékben a szilárdtest-világítással kapcsolatos K+F tevékenységre és új gyártólétesítményekre koncentrál. A LED-ek fogyasztói elfogadása a fényminőségben bekövetkezett javulásoknak és az árcsökkenéseknek köszönhetően növekedett. Számos vezető világítástechnikai vállalat arról számolt be, hogy bevételeiknek több mint 50%-át a LED-lámpák és a LED-es lámpatestek reprezentálják – köztük pl az Acuity Brands (67%), az OSRAM (65%), a Philips (61%), a Hubbell (55%) és a Zumtobel (73%) [10] [11] [12] [13] [14]. A Strategies Unlimited úgy becsülte, hogy 2016 végére a világsszerte felszerelt lámpafoglalatok 11%-ába LED-lámpák kerültek. Amint az a 2.2 ábrából látható, becsléseik szerint 2022-re ez a szám el fogja érni az 50%-ot [2].

A 2.3 ábra a LED-lámpák lámpatípusonkénti értékesítésének várható növekedését és átlagos eladási árak várható csökkenését mutatja.

Az átlagos eladási árak csökkenése miatt a LED-lámpák értékesítéséből származó bevételek várhatóan 2019-ben 12 milliárd USD körüli csúcsot fognak elérni. Az eladott darabszámokban várható csúcs



2.3 ábra – Globális LED-lámpaszállítások lámpatípusok szerint

(Forrás: Philip Smallwood, Strategies Unlimited, Strategies in Light, Anaheim, Kalifornia, 2017. márc. [2])

Alkalmazási területek

Kiskereskedelem

Vendéglátás

Lakossági fogyasztás

Architekturalis világítás

Egészségügyi intézmények

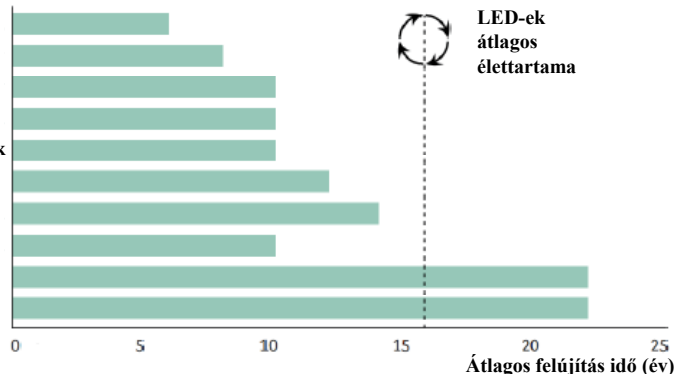
Irodák

Ipari létesítmények

Lakások

Út- és utcavilágítás

Sportlétesítmények



2.4 ábra – A világítási alkalmazások felújítási ciklusai – A LED-ek hosszú élettartama a piacot a LED-es lámpatestek – irányába tolja el – A felújítási ciklusok fontosabbá válnak, mint a technológia élettartama (Forrás: Boston Consulting Group, „How to Win in a transforming Lighting Industry”, 2015. nov. [15])

tükrözi a hosszabb élettartamot. A 2.4 ábra azt mutatja, hogy a LED-ek üzemi élettartama a legtöbb alkalmazási területen most hosszabb a világítási rendszerek átlagos felújítási időtartamánál.

A fényforrások és lámpatestek piacain zajló intenzív áverseny sok vállalatot arra kényszerített, hogy komplett világítási rendszereket és szolgáltatásokat kezdjen el kínálni. A Boston Consulting Group elemzése a 2.5 ábra szerinti előrejelzésben azonban azt mutatja, hogy a lámpatestek értékesítése 2020-ig a legnagyobb bevételi forrás marad, és a szilárdtest-alapú lámpatestek fogják dominálni [15].

A Strategies Unlimited szerint az általános világítási alkalmazásokra szánt LED-csomagokból származó bevételek 2016-ra 7%-kal, 5,7 milliárd USD-re nőttek, míg a LED-es világító feliratok értékesítése 8%-kal, 2,2 milliárd USD-re, a gépjárműveknél felhasznált LED-lámpáké pedig 9%-kal, 2,1 milliárd USD-re emelkedett. E három alkalmazási terület piacai 2021-ig növekedni fognak, amint az a 2.6 ábrából látható [2].

[9] C. Chipalkatti: „SSL Systems: Opportunity for Sustainability Beyond Energy Savings”, DOE SSL Technology Development Workshop, Portland, OR, 2015

[10] Acuity Brands: „Acuity Brands Reports Fiscal 2017 Second Quarter Results”, 2017. ápr. 4. (<http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=130194&p=irol-newsArticle&ID=2259665>)

[11] OSRAM: „Growth Momentum Continues in the Second Quarter”, 2017. máj. 3. (http://www.osram-group.com/~media/Files/Osram/Investor%20Relations/Quarterly%20Results/2017_Q2/osram-2017-q2-earnings-release.pdf)

[12] Philips Lighting: „Philips Lighting reports improvement in comparable sales growth, continued increase in operation profitability and free cash flow”, 2017. ápr. 21. (http://www.lighting.philips.com/static/quarterlyresults/2017/q1_2017/philips-lighting-first-quarter-results-2017-report.pdf)

[13] U.S. Department of Energy: „SSL Postings”, 2017. márc. 22. (https://energy.gov/sites/prod/files/2017/03/f34/postings_03-22-17.pdf)

[14] Zumtobel Group AG: „Q1-Q3 2015/16 Results”, 2017. márc. (https://www.zumtobelgroup.com/download/Zumtobel_Group_AG_Q3_Report_16_17_EN.pdf)

[15] Boston Consulting Group: „How to Win in a Transforming Lighting Industry”, 2015. nov. (<https://www.bcgperspectives.com/Images/BCG-How-to-Win-in-a-Transforming-Lighting-Industry-Nov-2015.pdf>)

[16] DOE SSL Program: „Adoption of Light-Emitting Diodes in Common Lighting Applications”, 2017. aug. (https://energy.gov/sites/prod/files/2017/08/f35/led-adoption-jul2017_0.pdf)

2.5.1 Egyesült Államok

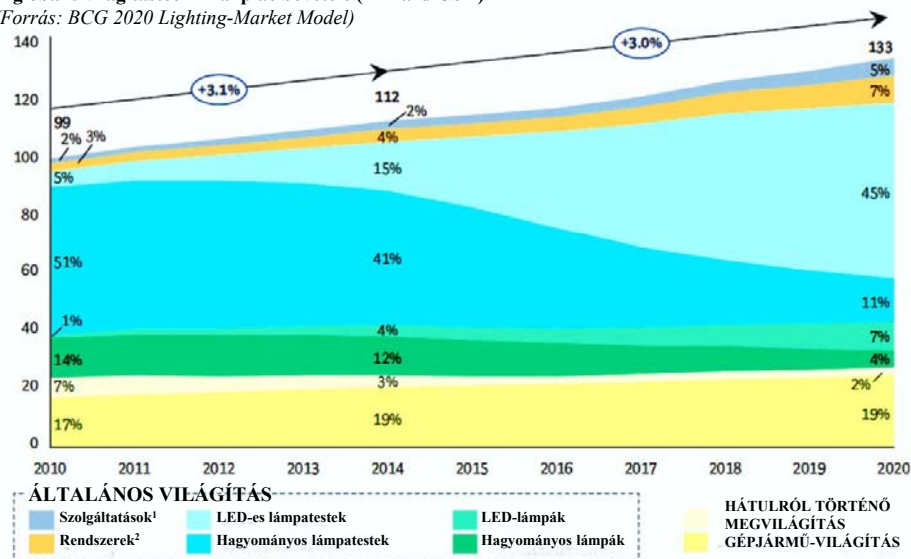
A DOE szilárdtest-világítási programja számos olyan elemzést támogat, amelyek az a célja, hogy megvizsgálja a szilárdtest-világításnak az USA világítástechnikai piacára gyakorolt hatását. A DOE minden évben váltakozva jelentet meg „pillanatfelvételt” a felszerelt LED-ek jelenlegi helyzetéről (legutóbb 2017. augusztusában „A fényemittáló diódák elfogadása a szokásos világítási alkalmazások területén” címmel) és az USA jövőbeli világítástechnikai piacára vonatkozó előrejelzést (legutóbb, a 2016. szeptemberében kiadott „A szilárdtest-világítás energiamegtakarítási előrejelzései az általános világítás területén” címmel). Mindkettő szolgál inputokkal a másik számára. Noha az USA világítástechnikai piacról magas szintű áttekintést nyújtunk a következőkben, érdemes elolvasni a teljes jelentést is a következő címen: <http://energy.gov/eere/ssl/market-studies>.

Helyzet

2016 végére összesen 874 millió LED-es rendszert szereltek fel az Egyesült Államokban, több mint kétszer annyit, mint 2014-ben. Ez 469 trillió Btu energiamegtakarítást eredményezett, ami kb. évi 4,7 milliárd USD költségmegtakarításnak felel meg [16]. A 2.3 táblázat részletesen ismerteti a felszerelt rendszereket és az alkalmazások szerinti energiamegtakarításokat. A legutóbbi fejlődés dacára, hosszú utat kell még megtenni, amint azt a 2.7 ábra mutatja. Majdnem valamennyi beltéri alkalmazás 20%-nál alacsonyabb LED-részarányt mutat, a lineáris és csarnokvilágító lámpatesteknél pedig ez az arány kisebb mint 10%.

Több mint 3 milliárd A-típusú búraba szerelt típusával az általános világítási lámpák az Egyesült Államokban felszerelt összes fényforrásnak közel a felét teszik ki, a felszerelt fényforrások nagy száma azonban nem jelenti szükségképpen közvetlenül a legjobb lehetőséget az energiamegtakarításokra. Amint az a 2.8 ábrából látható, az energiamegtakarítási lehetőség függ a felszerelt világítási rendszerek számától, üzemeltetési idejétől és a LED-ek által a velük összehasonlítható meglévő világítástechnológiákhoz képest kínált nagyobb fényhasznosítástól. Emiatt az olyan alkalmazások mint például a lineáris lámpatestek és a kereskedelmi és ipari létesítményekben elterjedten használt és hosszú élettartamú csarnokvilágítók alacsonyabb számuk ellenére hasonló vagy nagyobb energiamegtakarítást jelentettek, mint az A-típusú búrájú lámpák 2015-ben (1,1

A globális világítástechnikai piac bevétele (milliárd USD)
(Forrás: BCG 2020 Lighting-Market Model)



Megjegyzés: A LED-es lámpatestekben használt LED-es elektronika szerepel a LED-es lámpatestek teljes piaci értékesítésében, a fizikai jellegű szolgáltatások azonban nem.

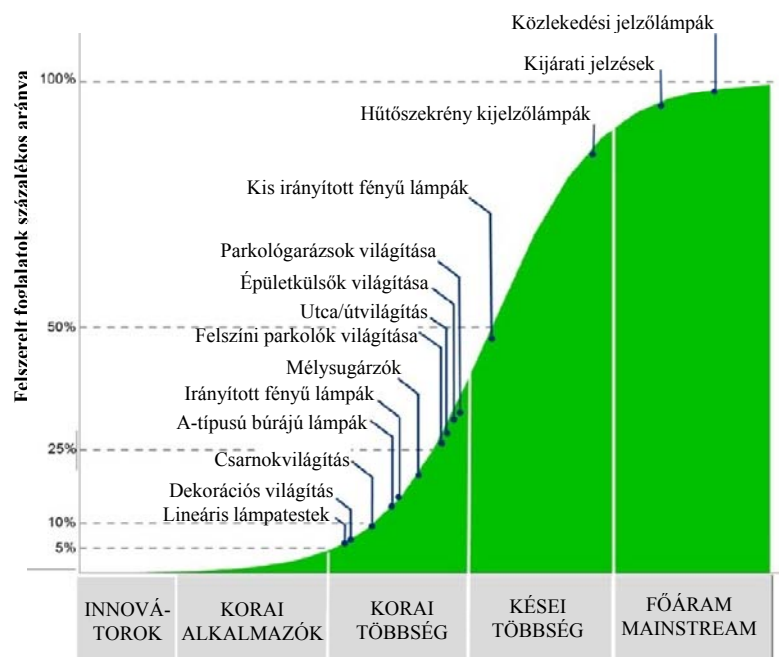
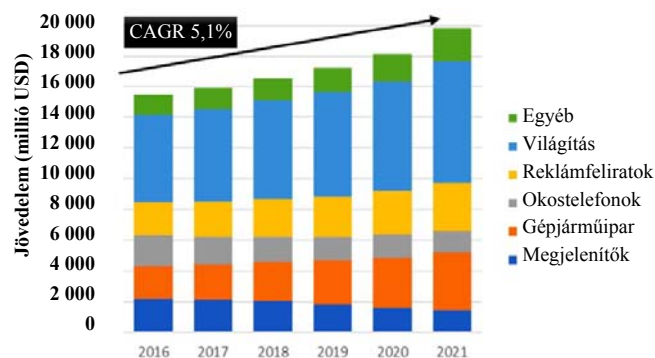
¹A szellemi jellegű (pl. adattechnológiai és rendszerintegrációs) szolgáltatásokat beleértve

²Csak a rendszer hozzáadott értékét tartalmazza, a rendszerben lévő lámpákat és lámpatesteket nem.

2.5 ábra – A világítás globális bevétele 2010 és 2020 között

(Forrás: Boston Consulting Group: „How to Win in a Transforming Lighting Industry”, 2015. nov. [15])

2.6 ábra – A LED-csomagok 2016 és 2021 közötti értékesítési bevételei és összesített éves növekedési rátája (CAGR) alkalmazási területek szerint (Forrás: Philip Smallwood, Strategies Unlimited Strategies in Light, Anaheim, Kalifornia, 2017. márc. [2])



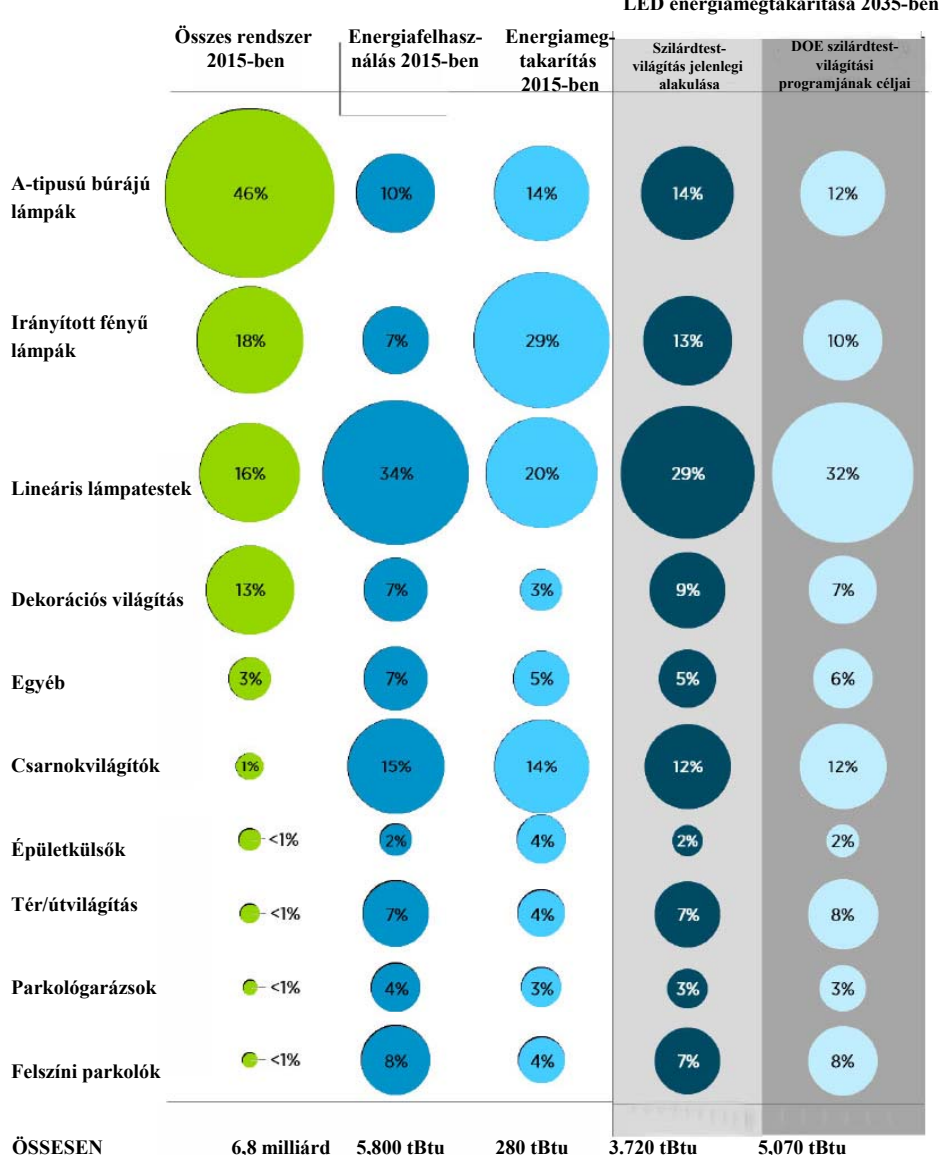
2.7 ábra – A LED-es világítás százalékos részesedése a különböző alkalmazási területeken (Forrás: DOE SSL Program, Adoption of Light Emitting Diodes in Common Lighting Applications, 2017. aug. [16])

milliárd, illetve 90 millió darab a 3 milliárd darabbal összevetve), és kisebb volt esetükben a LED-ek részaránya is (3,2%, ill. 3,7% a 6,0%-hoz képest). A lineáris és csarnokvilágító lámpatestekkel felépített rendszerek várhatóan jelentősen hozzájárulnak a jövőbeli LED-es energiamegtakarításhoz (részletesen l. a következő fejezetben), ezért a program kulcsfontosságú alkalmazásokként azonosította őket.

Előrejelzés

A LED-ek alkalmazására vonatkozó előrejelzések az Egyesült Államokra nézve hasonlóak a globális előrejelzésekhez, amelyek szerint a LED-ek kis, de növekvő részesítést tesznek ki a világítási piacnak. A DOE 2016-os szilárdtest-világítási előrejelzése szerint a szilárdtest-világítás 2035-re az Egyesült Államokban felszerelt világításoknak akár 86%-át is elérheti [1]. A DOE szilárdtest-világítási forgatókönyve a DOE szilárdtest-világítási célkitűzéseinek eléréséből származó agresszív ár- és paraméter-előrejelzéseken alapulnak. 2035-re a DOE szilárdtest-világítási programja célkitűzéseinek elérése évi összesen 5,1 kvadrillió Btu energiamegtakarítást eredményezne [1]. Amint az a 2.9 ábrából látható, ez 75%-kal nagyobb energiamegtakarítást reprezentál a szilárdtest-világítás nélküli forgatókönyvhöz képest.

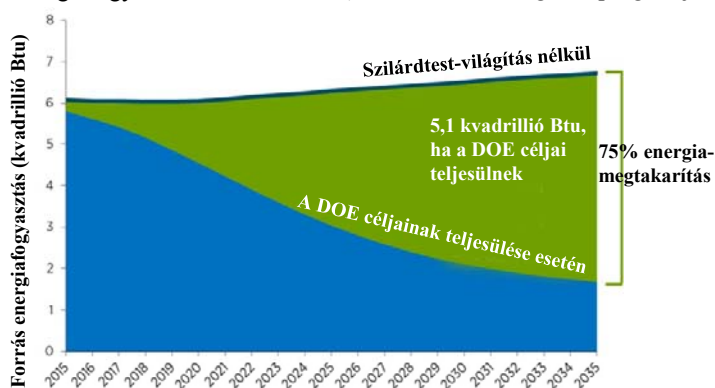
A 2.10 ábra a 2015 és 2035 közötti halmozott energiamegtakarításokat mutatja a jelenlegi helyzet és a DOE szilárdtest-világítási programjának célkitűzéseire alapuló forgatókönyv esetén. Ha a DOE szilárdtest-világítási programjának célkitűzése teljesülnek, a LED-ek 2035-re 20 kvadrillió Btu energiamegtakarítást elérését tennék lehetővé, amely az Egyesült Államok otthonai egy éves energiaigényének 90%-át tudnák fedezni. Ez is mutatja, hogy a szilárdtest-világítás páratlan lehetőséget kínál az elektromos energiafogyasztás csökkentésére, s ezáltal



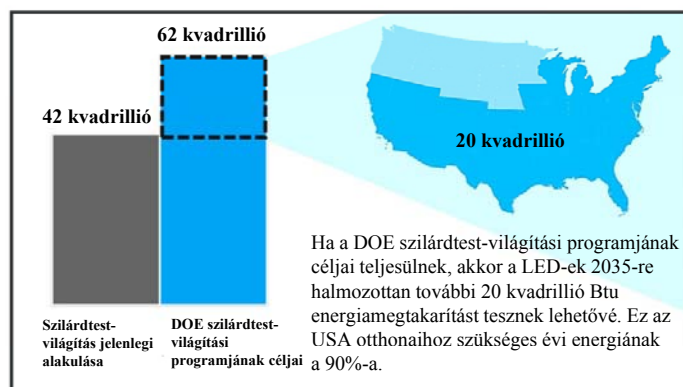
2.8 ábra – A felszerelt világítási rendszerek, az energiafogyasztás és a LED-ek energiamegtakarítása az Egyesült Államokban 2015-ben (Forrás: DOE SSL Program: „Energy Savings Forecast of Solid-State Lighting in General Illumination Applications”, 2016. szept. [1])

pénz megtakarítására és a lakások energia-biztonságának javítására. Azt is mutatja, hogy milyen fontosak a DOE szilárdtest-világítási programjának K+F prioritásai és

mérőföldkövei ahhoz, hogy segíteni lehessen az agresszív ár- és teljesítő-képesség-javulást.



2.9 ábra – A DOE szilárdtest-világítási programjának energiamegtakarítási előrejelzése az Egyesült Államokra 2015 és 2035 között (Forrás: DOE SSL Program: „Energy Savings Forecast of Solid-State Lighting in General Illumination Applications”, 2016. szept. [1])



2.10 ábra – Az Egyesült Államok halmozott becslált energiamegtakarítása 2015 és 2035 között (Forrás: DOE SSL Program: „Energy Savings Forecast of Solid-State Lighting in General Illumination Applications”, 2016. szept. [1])

MELLÉKLET

6.1 táblázat – A LED-ek alkalmazás szerint felosztott al-piacainak összefoglalója illusztrációkkal [16]

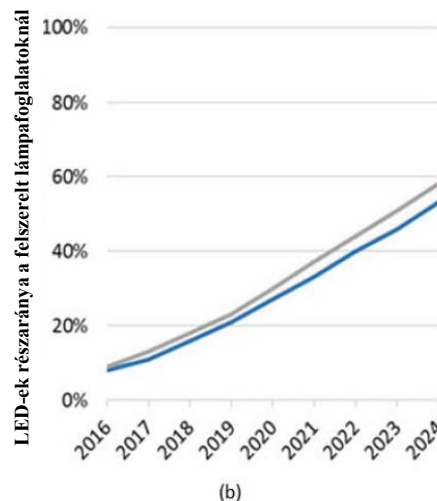
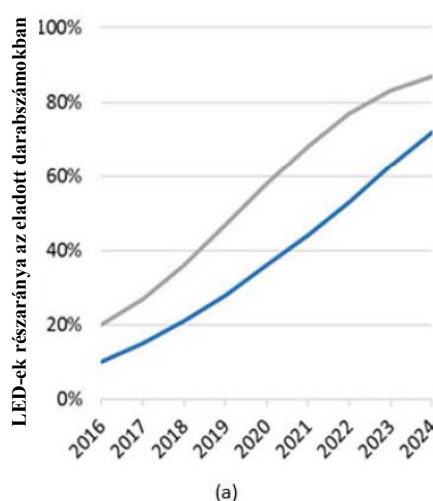
Alkalmazás	Típus	Leírás	Példák
A-típusú búrájú lámpák	Lámpa	E27 fejű, A-típusú búrájú lámpa	
Dekorációs világítás	Lámpa és lámpatest	Gömb, gyertya, lág formájú, globe és bármilyen más dekorációs búraforma, ill. beépített csillárok, egyágú függesztékek falikarok, lámpások és rejtett világítás	
Irányított fényű világítás	Lámpa és lámpatest	Reflektor- (R), domború reflektor- (BR), parabolikus reflektor (PAR) lámpák, ill. sínlámpák és beépített sínes lámpatestek	
Kis méretű irányított fényű lámpák	Lámpa	Multifzettás reflektor- (MR) lámpák	
Mélyugárzók	Retrofitkészlet és lámpatest	Mélyugárzó retrofitkészletek és beépített mélyugárzók	
Lineáris lámpatestek	Lámpa, retrofitkészlet és lámpatest	T12, T8 és T5 fénycsövek helyettesítői, ill. a hagyományos fénycsöves lámpatestek (tükrös-rácsos lámpatestek, függesztékek, Fényszalagok és szekrény alatti lámpatestek)	
Csarnokvilágítók alacsony és magas helyiségekhez	Lámpa és lámpatest	Nagyteljesítményű retrofitlámpák és beépített csarnokvilágítók	
Egyéb beltéri világítás	Nincs megkülönböztetés	Különleges fejű (pl. fűzér lámpákhoz, mini kétfejű lámpákhoz stb. alkalmas) típusok, hordozható, speciális és tartalékvilágítási (fehér fényű) lámpatestek, fényfüzerek és fényszalagok	
Felszíni parkolók	Lámpa és lámpatest	Nagyteljesítményű retrofitlámpák és felszíni parkolókban és parkológarázsok felső szintjén használt lámpatestek	
Parkológarázsok	Lámpa és lámpatest	Retrofitlámpák és -lámpatestek fedett parkológarázsokhoz	
Utak, utcák világítása	Lámpa és lámpatest	Retrofitlámpák és -lámpatestek utca- és útvilágítási alkalmazásokhoz	
Épületkülsők világítása	Lámpa és lámpatest	Homlokzatokba felszerelt, spot-, architektúrális, fényár- és falilámpák, poller (bollard) és lépcső/járda-világítók – a napelemes termékek kivételével	
Egyéb kültéri világítás	Nincs megkülönböztetés	Lámpák és lámpatestek feliratok, stadionok, fehér hirdetőtáblák és repülőterek világítására	

2.5.2 Európa

Az Information Handling Services Markit Ltd. (IHS) becslése szerint 2016-ban a lámpaeladások 20%-a, a lámpatest-eladások 10%-a volt LED-alapú Európában, ugyanakkor az Európában felszerelt lámpáknak 8%-a, a lámpatesteknek pedig 9%-a volt LED-es. Az IHS előrejelzései az értékesítésre és a tényleges felszerelésre nézve 2024-ig a 2.11 ábrán láthatók. A LED-ek értékesítése darabszám tekintetében várhatóan a lámpák 72%-át, a lámpatestek 87%-át fogja elérni 2024-re. Ezek az eladási számok hozzá fognak járulni a LED-ek növekvő számához a felszerelt lámpafoglatokban – így várhatóan a lámpáknál 53%, a lámpatesteknél 58% lesz LED-es 2024-re [17]. Az Európai Unió rendeletei segítettek „tisztára seperni az utat” a LED-ek előtt. Az izzólámpák EU-n belüli értékesítésének korlátozásait először 2009-ben vezették be; a halogénlámpákkal azonban kivételt tettek [18]. Ez a kivétel az irányított fényű lámpákra 2016 szeptemberében már megszűnt, a nem irányított fényűekre pedig 2018. szept. 1-jei hatállyal fog megszűnni [19].

A lámpagyártást Európában hagyományosan az Osram, a Philips és a Zumtobel Thorn üzletága dominálta. Amíg a Zumtobel a szilárdtest-világításra való áttérést meglévő vállalati struktúráján belül igyekszik levezényelni, az Osram és a Philips jelentős átszervezéseket hajtott végre. A lámpatest üzletág igen széttagolt, a tíz legnagyobb gyártó a piacnak csak 50%-nál kisebb részét mondhatja magáénak.

Az Osram Licht általános világítási üzletágát (Ledvance) eladta egy kínai konzorciumnak, amelynek meghatározó tagja az MLS Lighting [20]. A 2016-os pénzügyi évben a Ledvance 1,9 milliárd eurós (kb. 1,7 milliárd USD) bevételt realizált, míg az Osram megmaradt üzletágai 3,8 milliárd eurót (kb. 3,4 milliárd USD-t) [20, 21]. Ami a jövőt illeti, az Osram jelentős befektetéseket eszközöl a kutatás-fejlesztésbe, és LED-chip gyártását bővíti Malajziában [22]. A Philips bejelentette szándékát, hogy eladja a Lumileds üzletágban meglévő 80%-os részesedését, amely LED-chipek gyártásával foglalkozik és magában foglalja a Philips gépjármű-világítási üzletágát is [23]. A fennmaradó világítástechnikai érdekeltségeit a 20%-os tulajdon nyilvános részvényeladásával választja le. Az eredeti tőzsdei bevezetés óta az anyavállalat, a Royal Philips 55%-ra csökkentette részesedését a Philips Lighting-ban [23].



2.11 ábra – A szilárdtest-világítási piac várható alakulása Európában: (a) eladott darabszám, (b) felszerelt darabszám (Forrás: IHS Markit: „IHS Markit Lighting Intelligence Service: Lighting”, 2017 [17])

Az európai kutatási és fejlesztési együttműködés nagy részét az EU által finanszírozott hetedik keretprogram (FP-7) és a Horizont 2020 program keretében koordinálták. (http://cordis.europa.eu/home_en.html). A tipikus projektek az ipar és az egyetemek vagy kutatóintézetek bevonásával alakulnak ki, és körülbelül három évig tartanak.

A 2.4 táblázat azoknak az európai szilárdtest-világítási projekteknek a listáját közli, amelyek az elmúlt évben aktívak voltak (a finanszírozási szintek az EU euróban kifejezett hozzájárulásai – a 2017. máj. 1-jei állapot szerint 1 euró = 1,09 USD volt).

Ezek a K+F programok betekintést engednek azokba az európai prioritásokba, amelyek magukban foglalják a LED és az OLED anyagokat, valamint az új világítási értékek integrálását a rendszerekbe.

2.5.3 Kína

Kína számos fontos szerepet játszik a világítástechnika ipar átalakításában. Villamosenergia-fogyasztása körülbelül 50%-kal magasabb, mint az Egyesült Államoké. A kínai kormányt erősen foglalkoztatják a villamosenergia-termelés környezeti hatásai, valamint a további erőművek építésének költségei [24, 25]. Kína villamosenergia-fogyasztásának mintegy 14%-át használják világításra, ami arra ösztönzi, hogy az energiahatékony világítástechnikai termékek nagy fogyasztójává váljon [26]. Kína a LED-csomagok és LED-es világítástechnikai termékek jelentős gyártója,

amint azt a China Solid State Lighting Alliance (CSA) 2016-ban publikált jelentésében összegezte [27].

[17] IHS Markit: „IHS Markit Technology Intelligence Service: Lighting”, 2017.

[18] Official Journal of the European Union: „Commission Regulation No 244/2009,” 2009. márc. 18. (<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:076:0003:0016:en:pdf>)

[19] European Commission: „Phase-out of inefficient lamps postponed to 1 September 2018,” 2015. ápr. 17. (<https://ec.europa.eu/energy/en/news/phase-out-inefficient-lamps-postponed-1-september-2018>)

[20] LEDVANCE: „Chinese consortium completes acquisition of LEDVANCE”, 2017. márc. 3. (<https://www.ledvance.com/company/press/press-releases/2017/chinese-consortium-completes-acquisition-of-ledvance/index.jsp>)

[21] OSRAM: „OSRAM Completes Sale of LEDVANCE”, 2017. márc. 3. (<https://www.osram-america.com/en-us/newsroom/press-releases/Pages/OSRAM-Completes-Sale-of-LEDVANCE.aspx>)

[22] OSRAM: „Annual Report of OSRAM Light Group, Fiscal Year 2016”, 2016 (http://www.osram-group.de/~media/Files/O/OSram/Investor%20Relations/Annual%20Report/2016/2016_en_osram_annual_report.pdf)

[23] Philips Lighting: „Q1 2017 Quarterly Report”, 2017. ápr. 24. (<http://www.philips.com/static/qr/2017/q1/philips-first-quarter-results-2017-report.pdf>)

[24] National Energy Board: „2016 The Whole Society Electricity Consumption Increased by 5.0%”, 2017. jan. 16. (http://www.nea.gov.cn/2017-01/16/c_135986964.htm)

[25] Energy Information Administration: „Monthly Energy Review”, 2017. máj. (https://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/pdf/sec7_3.pdf)

[26] CSA Research: „Power Saving Demand Drives Market Growth Market Demand Extremely Imposable Space,” 2017. jan. 3. (<http://www.china-led.net/news/201701/03/36207.html>)

[27] China Semiconductor Lighting Network: „2016 China Semiconductor Lighting Industry Development White Paper officially released”, 2017. dec. 30. (<http://www.china-led.net/news/201612/30/36192.html>)

A LED-lámpák és LED-es lámpatestek gyártása 2016-ban 33%-kal, 8 milliárd darabra növekedett, és ennek a felét belföldön értékesítették [28]. A szilárdtest-világítás elfogadása az eladások tekintetében a 2015-ös 33%-ról 2016-ra 42%-ra nőtt, és a világításra használt villamos energia 140 TWh-val 800 TWh-ra csökkent [29]. 2016-ban az Egyesült Államokba irányuló LED-export 17%-kal, 2,4 milliárd USD-re növekedett, a LED-es világítás exportjának teljes bevétele pedig 10,6 milliárd USD volt [28]. Kína a LED-csomagok egyik fő beszállítója, beleértve az alacsony és közepes teljesítményű és a nagy fényű típusokat is. A LED-eladások várható emelkedése okán Kína minden bizonnyal új MOCVD (szerves fémgőz rétegleválasztó) gyártóeszközöket fog rendelni. Bár a teljes LED-gyártókapacitás többsége Kínában található, e kapacitás nagy része nem alkalmas világítási célú LED-ek gyártására, amelyek szigorúbb követelményeket támasztanak a fényhasznosítás, a konzisztencia és a megbízhatóság tekintetében, mint más alkalmazások, például a jelzőlámpák vagy a megjelenítők. A szilárdtest-világítási ipar konszolidációja 2016-ban folytatódott Kínában, ami általában javítja a LED-ek teljesítőképességét és növeli az innováció iránti érdeklődést.

A kínai gyártók erősen jelen vannak a LED-világítás gyártói értékláncának minden szintjén. A LED-chipek szintjén a LEDInside úgy becsüli, hogy megközelítőleg 2 milliárd USD értékű LED-chipet gyártottak Kínában [30]. A LED-csomagok szintjén a gyártók 7,5 milliárd USD értékű terméket állítottak elő, amelynek 75%-a kínai tulajdonú vállalatoknál készült. Noha Kínában a külföldi tulajdonú vállalatok által gyártott összes LED-csomag részesedése csak 25% körüli, ezeknek többségét világítási alkalmazásokra szánták. A lámpák és lámpatestek gyártása Kínában gyorsan növekszik – 2016-ban 34%-kal –, és most a CSA szerint megközelítőleg 30 milliárd USD-nek felel meg [31]. Az országos cél a világítástechnikai termékek gyártásának megduplázása a következő öt év során, ami évi 340 TWh energia-megtakarítást tenne lehetővé.

2.5.4 India

Indiának ambiciózus kereskedelmi és iparosítási programja van, amelyet súlyosan korlátoz a rendelkezésre álló villamosenergia szűköse volta. 2009-ben az indiai energiaügyi minisztérium az energiahatékony projektek megvalósításának elősegítésére megalapította az Energy Efficiency Services Limited-et (EESL) – az NTPC

Projekt neve	Támogatás (mill. euró)	Projektcélok
Open AIS	10,8	Értéknövelést elérni az épületek hatékonyabb felhasználása, a széndioxid-kibocsátás csökkentése révén, és növelni a komfortot és a jó közérzetet. A világítási rendszer zökkenőmentes és hatékony együttműködésének lehetővé tétele az épületek egyéb funkcióival (fűtés, szellőzés, légkondicionálás), valamint a biztonsági és beléptető rendszerekkel. A rendszerfelépítés bővíthetőségének és biztonságának garantálása.
HI-LED	3,5	A modern szilárdtest-világítás előnyeinek kiaknázása olyan innovatív LED-modulok kutatása segítségével, amelyek a fény teljes vezérlésének előnyeit élvezik. Olyan intelligencia beépítése, amely valószínűleg képes a spektrális tulajdonságok, valamint a pontos fény szabályozási képességek érzékeny finomhangolására
LBNL	3,15	Előrehaladás elérése a modern LED-eken túl – már ami a méretet (területet és vastagságot), a rugalmasságot, a fényhasznosítást, a világítás minőségét, a fénynyaláb alakítását, az élettartamot, a hozzáadott intelligenciát, a gyártást, valamint a gyártási/felszerelési költségeket illeti – olyan világításvezérlő struktúrák beépítésével, amelyek szerves fluoreszkáló festékeket tartalmazó, új, színváltoztató bevonatokkal, hűtési megoldásokkal, LED-chipekkel és az intelligens színérzékelő visszacsatolásokhoz multispektrális érzékelőkkel vannak ellátva.
LEDLUM	4,1	Nagy mértékben integrált, versenyképes költségű modultechnológiai platform kifejlesztése a közvetlenül az elektromos táphálózathoz csatlakoztatott szilárdtest-világítás számára. Az új platform a méretet 90%-kal, az anyagköltséget több mint 50%-kal és a veszteségeket 20%-kal kell hogy csökkentse a legmodernebb megoldásokhoz képest.
NANPHOM	1,5	Új módszerek kifejlesztése a nanofényporok emissziós jellemzőinek szabályozására, amelyek meghaladják a hagyományos optikákkal elérhető korlátokat olyan új optikai konstrukciókkal, amelyek összetett rétegeken, felületi textúrákon és szabályozott összetételű, méretű és alakú nanofényszóró anyagokon alapulnak.
SHINING	1,5	Oldatos eljárással készülő félvezetőkön alapuló, olcsó LED-ek kifejlesztése új perovszkita nanostruktúrák szintézisével fejlett, spektrográfiai jellemzés és eszközfejlesztés segítségével.
PHEBE	3,9	Innovatív, nagy fényhasznosítású kék emitterek kifejlesztése OLED-ekhez, amelyek nagy áttörést jelentenek az OLED-es világítás költséghatékonyságában. A fókusz a termikusan aktivált, késleltetett fluoreszcenciára (TADF) kell helyezni.
ALABO	3,9	Szerves elektronikus építőelemek kifejlesztése rugalmas hordozókon monolitikusan integrált gátfóliákkal fényelektromos panelek és OLED-ek hordozóiként.
Hyper OLED	4,0	Anyagok és illeszkedő eszközstruktúrák kifejlesztése innovatív, nagy teljesítőképességű, hiper fluoreszcens OLED-ek számára TADF molekuláris gazdák új, árnyékolt fluoreszcens emitterek kombinálásával, különösen nagy fény szinteken igen nagy fényhasznosítású, telített kék emissziót célzóva meg.
Excilight	3,9	Hálózat létrehozása 15 kezdő kutató képzéséhez az exciplex és a TADF emitterek fejlesztésében és alkalmazásában, akik közvetlenül felhasználhatják szakértelmüket jövőbeli pozíciókban.
FLEXO LIGHTING	4,4	Innovációk ösztönzése az OLED-világítás számára alkalmas anyagok, folyamatok és eszköztechnológia vonalán egy európai ellátólánc kiépítésének szándékával. A speciális célok: a panelköltség legyen 10 euro/km-nél kisebb, a fényhasznosítás haladjon meg a 100 lm/W-ot, az élettartam az 1000 órát az 5000 cd/m ² kezdeti fényssűrűség 97%-ánál, idővel is legyenek konzisztensek a szinkordináltak és a színvisszaadási index, és minimális legyen az anyagok és a világítási rendszerek környezeti hatása.
PI-SCALE	14,0	A meglévő infrastruktúrák integrálása az "európai rugalmas OLED-es kísérleti gépsorba", amely nyílt hozzáférésű üzemmódban fog működni, és az értéklánc mentén szolgálja a vevőket egyedi termékkonstrukciókkal, a feljavítási koncepciók érvényesítésével és a rendszer szintű rugalmas OLED-integrációval.

2.4 táblázat – Európai szilárdtest-világítási projektek 2016-ban és 2017-ben

Limited (India legnagyobb áramszolgáltatója), a Power Finance Corporation (PFC), a Rural Electrification Corporation (REC) és a villamos energia államok közötti átvételére szakosodott POWERGRID alkotta vegyesítőkezelésű vállalatot. Az elképzelés szerint az EESL irányítja a csere-lámpák és közvilágítási lámpatestek beszerzését és elosztását.

Az EESL által végzett helyi kísérleteket követően, 2015 januárjában Norendra Modi miniszterelnök országos programot indított a LED-alapú lakásvilágítás,

[28] China Semiconductor Lighting Network: „2016 China Semiconductor Lighting Industry Development White Paper (6): LED lighting market penetration to accelerate the first decline in exports of lighting products”, 2016. dec. 30. (<http://www.china-led.net/news/201612/30/36206.html>)

[29] China Semiconductor Lighting Network: „SA Research: Power Saving Demand Drives Market Growth Market Demand Extremely Imposable Space,” 2017. jan. 3. (<http://www.china-led.net/news/201701/03/36207.html>)

[30] L. Hou: „LED Industry Faces Structural Change as Chinese Packaging Suppliers Expand”, 2017. márc. 6. (http://www.ledinside.com/news/2017/3/led_industry_faces_structural_change_as_chinese_packaging_suppliers_expand)

kereskedelmi és utcai világítás számára, amely kulcsfontosságú elem az energia-hatékonyság felé vezető úton [32]. A projektnek négy fő célja volt:

1. A villamosenergia-kereslet és -ellátás közötti egyensúlyhiány csökkentése, ezáltal elkerülve az új erőművek szükségességét
2. A széntüzelésű erőművek légszennyezésre gyakorolt hatásának csökkentése a nagyobb városokban.
3. A villamosenergia-számlák terheinek csökkentése valamennyi indiai fogyasztó estén.
4. A világítástechnikai ipar serkentése új technológiák bevezetésével és új gyártási készségek elsajátításával.

Az új kormányzati program három alkalmazási területre fókuszál [33]:

1. Beépített meghajtóval ellátott retrofit-lámpák: főként a lakásvilágítási piacot célozva meg, ahol még mindig az izzólámpák dominálnak. A cél több mint 700 millió lámpa lecserélése a következő 3 év alatt.
2. Mélysugárzók – Megcélozva a bemutatótermeket, kirakatokat és irodákat, ahol a kompakt fénycsövek gyenge színminősége következtében ezeket az alkalmazási területeket a rossz fényhasznosítású halogénlámpák uralják. A cél: 50 millió LED-lámpát bevezetni ezekre a területekre.
3. Út- és utcavilágítás – A cél a meglévő 35 millió közvilágítási lámpa többségének lecserélése a következő néhány év alatt.

A program jól halad; több mint 237 millió LED-es cserelámpát osztottak szét az izzólámpák lecserélésére az EESL programja segítségével, amely lehetővé teszi a vevők számára, hogy minimális előleg lefizetésével vásároljanak, a többi pedig havi részletekben fizessék meg villanyszámlájukkal együtt [34]. A lámpákat az EESL egy tendersorozattal vásárolta meg, amelyeknek beszerzési ára 800 lm fényáramú lámpa esetén a 2014. januári 310 rúpiáról (5 USD-ről) 2016. márciusára 38 rúpiára (0,6 USD-re) csökkent [35]. Az eredmény: évi több mint 30 TWh energiamegtakarításra becsülhető [34].

A regionális és a helyi önkormányzatok is támogatták a LED-es útvilágítás és a fénycsövek cseréjének lebonyolítását. A LED-csöveket 200 és 250 rúpia (3-4 USD) közötti áron osztották el. Az útvilágítások felszerelését finanszírozzák és infrastrukturális kihívások lassították. 2017 májusára 2,1 millió útvilágítási lámpatestet szereltek fel. S noha ez kétszerese volt a 2016 májusáig felszerelt mennyiségnek, még igen messze van a Nodi miniszterelnök 2015-ös prog-

rogramjában kitűzött 35 millió darabos céltól [36].

A belföldi gyártást Indiában erősen ösztönzik, bár a legtöbb LED-chipet és LED-csomagot jelenleg importálják. India nagy kapacitással rendelkezik izzólámpák és kompakt fénycsövek gyártása terén, és ennek nagy részét most LED-termékek gyártására állítják át. A LED-lámpák jelenlegi gyártási kapacitása 300 millió db/hó körül, amelynek körülbelül a fele a kormányzat elosztási programjára van lekötvé [34]. Az EESL szerint 2017. március 31-ig az indiai világítástechnikai ipar több mint 330 millió LED-lámpát adott el [34].

2.5.5 Off-grid (hálózathozfüggetlen) közösségek a fejlődő világban

Manapság 1,2 milliárd olyan ember van a földön, aki nem jut hozzá villamos hálózathoz, és ezeknek körülbelül a fele Afrika Szaharától délre fekvő részein él, ahol a jó minőségű világítás telepítését korlátozzák a megbízható villamosenergia-források [37]. Sok család számára a napelemes világítás jelenti az elektromossághoz való hozzáférés belépési pontját. A napelemes táplálású szilárdtest-világítás megfizethető és hosszú távon még finansziális előnyökkel is kecsegtet, mivel a gyertyára vagy a petróleumra költött pénz megtakarításával lehetővé válik olyan kis naperőművek beszerzése, amelyek el tudják látni a világítást, a mobiltelefonok feltöltését és talán még a kis berendezések működtetését is.

A finansziális megtakarításokon kívül a napelemes LED-világítás jelentős környezeti és egészségügyi előnyöket is kínál. Az üzemanyag-alapú (pl. petróleumlámpás) világítás hozzájárul a légszennyezéshez, különösen veszélyes a tüzokozás és az üzemanyag toxicitása miatt, amely nagy mennyiségű nehéz részecskéket tartalmaz. Az Egyesült Nemzetek Környezetvédelmi Programja által kiadott 2014-es tanulmány kiemeli a biztonságosabb életkörülményeket és a foglalkoztatás új formáinak támogatását, mint az üzemanyag-alapú világításról a napenergiás szilárdtest-világításra való áttérés potenciális előnyeit [38]. Közelebről – egyes becslések szerint – 38 munkahelyet hoztak létre minden olyan hálózathozfüggetlen körülmények között élő 10 000 ember számára, akiknek a különálló, napelemes LED-es világítás megfelelő. Kiterjesztve ezt a számot a világszerte villamos energiát nélkülöző 112 millió háztartásra, amelyek nem valószínű, hogy nagy hálózatokhoz vagy mikrohálózatokhoz lennének csatlakoztathatók, vagy hogy meg tudnának fizetni drágább napelemes rendszereket, a napelemes LED-világítás

potenciálisan 2 millió új munkahelyet teremthet [39]. Ez a szám messze meghaladja az üzemanyag-alapú világítással kapcsolatos 150 000 munkahelyet, és a munkahelyek felét Afrikában hozhatná létre [39].

Miközben a napenergiával működő szilárdtest-világítás lehetőséget nyújt arra, hogy megbízható világítást nyújtson az emberek számára világszerte, e fejezet többi része az afrikai világításhoz való hozzáférés bővítésének kiterjesztésére fókuszál. A Nemzetközi Energiaügynökség (IEA) szerint 632 millió Szaharától délre fekvő afrikai területen élő állampolgár (a lakosság 65%-a) nem rendelkezik hozzáféréssel az elektromos hálózathoz, és az elektromos ellátás sokak számára megbízhatatlan [40]. A minősített, hálózathozfüggetlen szilárdtest-világítási termékek listája a Lighting Africa weboldaláról érhető el: <https://www.lightingafrica.org/products/>. A 2016-ban és 2017-ben felszerelt napelemek 23 és 230 lumen közötti fényáramot szolgáltatottak 3,9...18 órás időszak alatt, a feltöltés előtt. A rendszerek 1...36 db LED-et tartalmaznak és többnyire 3,2...3,7V-ot vesznek fel 470...4900 mAh

[31] China Semiconductor Lighting Network: „2016 China Semiconductor Lighting Industry Development White Paper (2): Application of structural adjustment, regional agglomeration characteristics become obvious”, 2016. dec. 30. (<http://www.china-led.net/news/201612/30/36200.html>)

[32] ELCOMA India: „PM Launches National Programme For LED-Based Home And Street Lighting”, 2015. jan. 7. (<http://www.elcomaindia.com/pm-launches-national-programme-for-led-based-home-and-street-lighting>)

[33] S. Sujan: „LED, the Future of Lighting in India,” in ISA International SSL Forum, Guangzhou, Kína, 2015

[34] EESL: „National Ujala Dashboard: Total LEDs distributed as on 26 May 2017”, Government of India Ministry of Power, 2017. máj. 26. (<http://www.ujala.gov.in/>)

[35] S. Awad: „Prices of LED bulbs drop to Rs 38”, 2016. okt. 10. (<http://powerwatchindia.com/price-of-led-bulbs-drops-to-rs-38/>)

[36] Energy Efficiency Services Limited: „SLNP Dashboard: Total Streetlight Completed as on May 9, 2017”, Government of India Ministry of Power, 2017. máj. 9. (<http://www.eeslindia.org/slntp/>)

[37] Lighting Global: „About Lighting Global”, 2016. (<https://www.lightingglobal.org/about/>)

[38] E. Mills: „Light for Life: Identifying and Reducing the Health and Safety Impacts of Fuel-Based Lighting”, United Nations Environment Programme, 2014. dec. (<http://evanmills.lbl.gov/pubs/pdf/light-for-life-2014.pdf>)

[39] E. Mills: „Job creation and energy savings through a transition to modern off-grid lighting, August Energy for Sustainable Development, vol. 33, pp. 155-166, 2016

[40] International Energy Agency: „WEO 2016 Electricity access database”, 2016 (<http://www.worldenergyoutlook.org/resources/energydevelopment/energyaccessdatabase/>)

tárolási kapacitású akkumulátorokból. A garancia 1 és 3 év között változik, és a legtöbb lámpa megőrzi a teljes feltöltésnél adódó fénysűrűségének 95%-át 2000 órányi üzemelés után is. A fénysűrűség 50 lm/W-tól 150 lm/W-ot meghaladó értékig változik, az átlag 100 lm/W-hoz közeli érték.

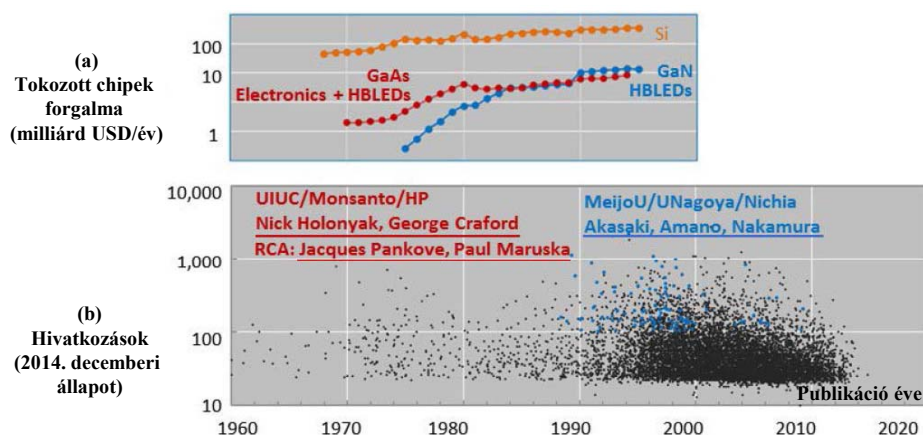
A minősített napelemes lámpák értékesítése jelenleg 4 millió db/év-re becsülhető [41]. A gyorsabb elfogadás fő akadályai az infrastruktúra kiépítéséhez és a potenciális vevők számára adandó kölcsönökhöz szükséges tőke szűkös volta. A napelemes panelek és akkumulátorok ára nem csökkent olyan gyorsan, mint a LED-es fénysűrűség. Ezért a szilárdtest-világítási ipar legnagyobb hozzájárulása az lenne, ha a LED-ek fénysűrűségét 200 lm/W fölé tudná növelni, ami megfelelne a panelek és akkumulátorok iránti igénynek, avagy megduplázná a napelemes lámpák fénysűrűségét.

A hálózathoz csatlakoztatott világítás esetén számos afrikai kormány korábban támogatta az izzólámpák lecseréléséhez a kompakt fénycsövek vásárlását az elektromos hálózatok terhelésének csökkentése érdekében. Jelenleg futnak programok a LED-világítás bevezetésének támogatására. Például az állami tulajdonban lévő Zambia Electricity Supply Corporation (ZESCO) becslése szerint ha valamennyi háztartás és ipar átállna LED-lámpákra, az ország a terhelését akár 200 MW-tal is tudná mérsékelni, ami energiadeficitük kb. 30%-át jelentené. A ZESCO összesen 20 millió USD-t fog költeni 5 millió darab ingyenes LED-lámpa szétosztására a hagyományos fénysűrűségeket lecseréléséhez 2017 első felében [42].

2.6 A tudomány, a technológia és a társadalmi haszon hathatós ciklusai

A szilárdtest-világítás technológiáinak fejlődési és felhasználási szakasza jelenleg is alakulóban lévő folyamat, és jó példát mutat azokra a pozitív kölcsönhatásokra, amelyek a tudományos megértés, az eszközök és a technológia fejlesztése és a társadalmi hasznosítás között van. Ezek a kölcsönhatások ritkán lineárisok, néha a tudományos megértés vezet és tesz lehetővé dolgokat, néha az eszközök és technológiák, néha pedig a társadalmi felhasználás és viselkedés. De amikor mindannyian kölcsönhatásba kerülnek és táplálják egymást, akkor erőteljes, hathatós, hatásos ciklusokat hoznak létre az előrehaladás és az innováció terén [43]. Ez különösen nyilvánvaló a félvezetők esetében.

A félvezetők tudományában, technológiá-



2.12. ábra – (a) A tokozott csipek forgalma félvezetőanyagok szerinti megoszlásban és (b) A gallium-nitrid (GaN) alapú anyagokkal kapcsolatos hivatkozások története a Science and Technology-ban megjelent publikációkban

Megjegyzések: (a) Sem a GaN, sem a GaAs adatok nem tartalmaznak lézerdőadatok.

(b) A látható LED-ekkel kapcsolatos első alapvető munkát GaAs és GaP anyagokkal Nick Holonyak és hallgatói végezték a University of Illinois-on, valamint a Monsanto-nál és a HP-nél George Craford és kollégái. A soron következő meghatározó munkát GaN-alapú anyagokon az RCA-nál Jacques Pankove, Paul Maruska és kollégái végezték. Akasaki, Amano és Nakamura Nobel-díjjal jutalmazott munkája az 1980-as évek végén és az 1990-es évek elején drámai változást hoztak ezen a területen. Munkájukat, amely robbanást indított el a kutatásban, a kék pontok reprezentálják

jában és társadalmi felhasználásában tapasztalható interaktív fejlődés átalakította és alakítja ma is a világegyetemről és a hatékony információtechnológiákról alkotott tudományos képünket, amelyek mindennapos életünkben és a társadalmi felhasználásban mindenütt jelen vannak.

A szilárdtest-világítás a félvezetők terén tapasztalható legújabb példája az ilyen hathatós ciklusoknak. A kék LED alapvető fontosságú feltalálását a kék LED-ek alapjául szolgáló félvezető anyagrendszer, az AlInGaN anyagok kémiaiájának és fizikájának mélyebb tudományos megértése követte. Ezután jött a gyors elfogadással járó óriási társadalmi előny is, ami viszont erős motivációt és platformot jelentett ennek az anyagrendszernek a további tudományos megértéséhez és technológiai fejlődéséhez. A tudomány és technológia és a kék LED piacának egyidejű fejlődését a 2.12 ábra mutatja.

Megjegyezzük, hogy a tudomány, a technológia és a társadalmi felhasználás e hathatós ciklusának szélesebb kontextusában a DOE szilárdtest-világítási K+F programja kicsi. Egyrészt erősen kell támaszkodnia a programon kívüli előrehaladások sikerére. Ugyanakkor kulcsfontosságú szerepet játszik a fontos fejlesztések katalizálásában az egész ciklus alatt, különösen azoknál, amelyek túl kockázatosak és túl korai fejlesztések ahhoz, hogy az egyes vállalatok támogathassák azokat, de potenciálisan „átalakító” jellegűek. A DOE szilárdtest-világítási programja döntő szerepet játszik a szilárdtest-világítási az SSL-megoldások teljesítményének vagy értéké-

nek korlátozásával kapcsolatos legfontosabb tudományos és technikai kihívások azonosításában.

2.6.1 A szilárdtest-világítás alapvető területei

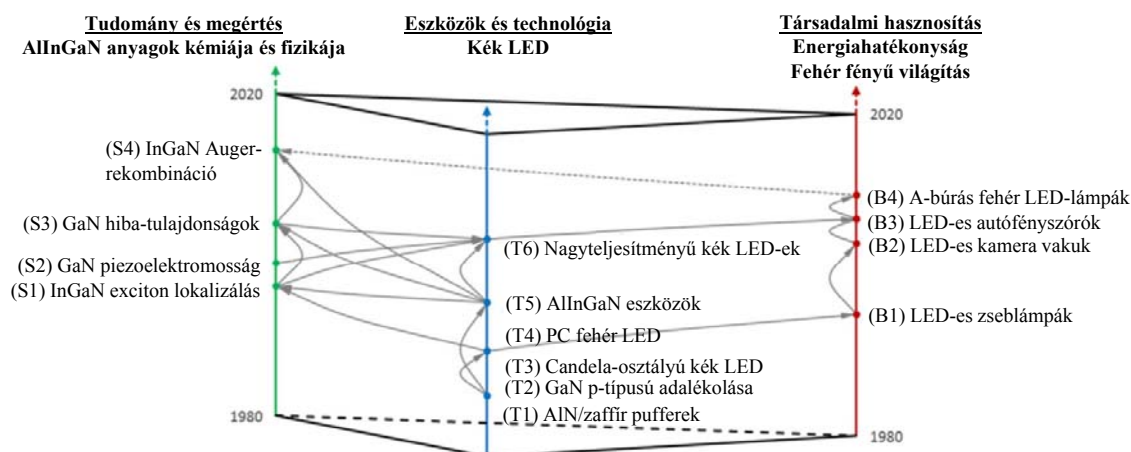
Az energiatakarékos fehér világítás (társadalmi felhasználás), a kék LED-ek (technológia) és az AlInGaN anyagok kémiaiája és fizikája (tudomány) területén a szilárdtest-világítás legfontosabb területein belüli hathatós ciklusokat a 2.13. ábra szemlélteti. A prizma három függőleges szára ezen alapvető területek legfontosabb eredményeihez tartozó idővonalakat adják. A baloldali zöld szár az alapvető tudomány és megértés – lényegében az AlInGaN anyagok kémiaiája és fizikája terén elért eredmények idővonala. A középső kék a kék LED-del kapcsolatos legfontosabb eszközök és technológiák terén elért eredményeké, a vörös szár pedig az emberi környezet megvilágításához használt fehér fényvel összefüggő társadalmi felhasználás és viselkedés idővonalát adja. Megjegyezzük, hogy az egyszerűség kedvéért az eredmények kiválasztásánál erősen válogattunk.

[41] Global Off-Grid Lighting Association and Lighting Global: „Global Off-Grid Solar Market Report: Semi-Annual Sales and Impact Data”, 2016

[42] D. Kaunda: „Power-short Zambia launches switch to 100 percent LED bulbs”, 2017. márc. 30. (<http://www.reuters.com/article/us-zambia-electricity-energy-idUSKBN172062>)

[43] V. Narayanamurti és T. Odumosu: „Cycles of Invention and Discovery: Rethinking the Endless Frontier, Harvard University Press, 2016

2.13 ábra – A szilárdtest-világítás virtuális tudományos, technológiai és szociális felhasználási ciklusai az alapvető területein: az energiahatékony fehér világítás (társadalmi hasznosítás), a kék LED-ek technológiája és az AlInGaN anyagok kémiaja és fizikája (tudomány) területén. Megjegyezzük, hogy az egyszerűség kedvéért rendkívül szelektív módon válogattunk az elért eredmények tekintetében.



Az eredmények feltüntetése azzal a munkával kezdődik, amelyet 2014-ben fizikai Nobel-díjjal jutalmaztak – annak ellenére, hogy ez a munka korábbi óriások fontos munkásságain alapul; s csak azokat a legfontosabb területekről származó következő eredményeket soroltuk fel, amelyeket a közösségeik nagy hivatkozási hatást gyakorló közleményekkel ismertek el, illetve most jól bevezetett termék kategóriák és piacok jellemzik. A dátumok hozzávetőlegesek, a kulcsfontosságú közlemények publikációinak vagy a fontos termék kategóriák bevezetésének dátumain alapulnak. Az 1980-as évek vége felé a szilícium (Si) és a periódusos rendszer „hagyományos” III-IV. oszlopába tartozó elemek technológiai már igen kifinomultakká váltak, bár a széles sávzélességű, a periódusos rendszer III. oszlopába tartozó elemeket és nitrogén-tartalmazó III-N ötvözetek nehezen kezelhetők maradtak. A legfontosabb kihívások a következők: nincs olyan hordozó, amelynek rácsszerkezete észszerű módon illeszkedne a gallium-nitrid (GaN)-hez, hogy a diszlokációs sűrűséget elfogadhatóan alacsony szinten lehessen tartani (láthatóan ez szükséges bárminylen kisebbségi töltéshordozójú eszköz esetén); és nincs megfelelő adalékolási folyamat kis lapellenállású p-rétegek számára. Valójában az 1980-as évekig a kihívások leküzdhetetlennek tűntek, és a legtöbb kutató el is hagyta a területet. Az 1980-as évek végén és az 1990-es évek elején azonban adott ennek a kutatási területnek: az alumínium-nitrid (AlN) és a gallium-nitrid (GaN) pufferrétegek kialakítása csökkentett diszlokációs sűrűségű zaffírhordozón [44]; és a GaN p-típusú magnézium-adalékolásának aktiválási módszere [45]. Ez a két áttörés két ugyancsak áttörést jelentő eszköztechnológiát eredményezett: a candela-osztályú kék LED-et és a fehér fényporkonverziós pc-LED-et [46, 47, 48].

Ez egyúttal gazdag kiegészítő GaN eszközszintézishez és feldolgozási technológiákhoz is vezetett, beleértve a kifinomult MOCVD epitaxiális eszközöket és folyamatokat is, amelyek ezek gyártásához szükségesek [49].

Ezek a korai eszköztechnológiák vezettek az olyan fehér fényű termékekhez mint a fehér LED-es zseblámpák és később a fehér LED-es kameravakuk. Ezek a fehér fényű termékek nem voltak elég nagy teljesítményűek, s bizonyára nem voltak „általános világítási” kategóriájúak, de fontos lépcsőknek tekinthetők az általános világítási célú fehér fény társadalmi hasznosítása felé vezető úton. Ugyanakkor ezek a korai eszköztechnológiák motiválták az AlInGaN anyagok kémiajának és fizikájának alaposabb tudományos megértését. És legalább olyan fontos volt az is, hogy lehetővé tették az anyagok és heterostrukturák gyártását, amelyeken egyre „tisztább” kísérleteket lehetett elvégezni, és hasonlóképpen tiszta tudományos értelmezést lehetett kapni. Valójában a modern félvezetőeszköz-technológiáknak az a képessége, hogy korábban rejtett jelenségekre derítsen fényt úgy, hogy tisztán tudományos témája lett a félvezető-tudomány és -technológia közötti hathatós ciklusnak. A Si és gallium-arszenid (GaAs) anyagokban és heterostrukturákban a képesség ultra nagy tisztaságú heterostrukturák előállítására lehetővé tette a nagy mobilitású, kétdimenziós elektrongázok előállítását, amelyek az integer és a frakcionális Hall-effektusok megfigyeléséhez – s két fizikai Nobel-díj sorozathoz – vezettek [50, 51, 52, 53]. Az indium-gallium-nitrid (InGaN) anyagokban hasonlóképpen Nobel-díjjal elismert áttörést jelentett a pufferrétegek és a GaN p-típusú adalékolása, amelynél az InGaN kvantumkút lumineszcenciájának váratlan ellenállását lehetett megfigyelni a defektekkel szemben, ami végül is az InGaN

exciton elhelyezkedésének tudományos magyarázatához vezetett [54].

Az InGaN exciton elhelyezkedésének mélyebb tudományos megértése a GaN piezoelektromosság és a GaN defekt tulajdonságok mélyebb tudományos megértését is eredményezte a lumineszcencia-tulajdonságok tekintetében [55, 56]. Ez a mélyebb tudományos megértés az AlInGaN eszközök szintézise és feldolgozási technológiája folyamatos előrehaladásával együtt azután új architektúrákat eredményezett a nagyteljesítményű kék LED-technológiák vonalán [57].

[44] H. Amano, N. Sawaki és I. Akasaki: „Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer”, *Applied Physics Letters*, vol. 48, no. 5, pp. 353-355, 1986.

[45] H. Armano, K. Hiramatsu és I. Akasaki: „P-type conduction in Mg-doped GaN treated with low-energy electron beam irradiation (LEEBI)”, *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 28, no. 12A, p. L2112, 1989

[46] S. Nakamura, S. Mukai és M. Senoh: „Candela class high brightness InGaN/AlGaIn double heterostructure blue light emitting diodes”, *Applied Physics Letters*, vol. 64, no. 13, pp. 1687-1689, 1994

[47] Y. Narukawa: „White-light LEDs”, *Optics and Photonics News*, vol. 15, no. 4, pp. 24-29, 2004

[48] J. Cho, J. H. Park, J. K. Kim és E. F. Schubert: „White light emitting diodes: History, progress, and future”, *Laser & Photonics Reviews*, 2017

[49] S. J. Pearton, J. C. Zolper, R. J. Shul és F. Ren: „GaN: Processing, defects, and devices”, *Journal of Applied Physics*, vol. 86, no. 1, pp. 1-78, 1999

[50] K. Von Klitzing: „The quantized Hall effect”, *Reviews of Modern Physics*, vol. 58, no. 3, p. 519, 1986

[51] H. L. Stormer: „Nobel lecture: the fractional quantum Hall effect”, *Reviews of Modern Physics*, vol. 71, no. 4, p. 875, 1999

[52] R. B. Laughlin: „Nobel lecture: fractional quantization”, *Reviews of Modern Physics*, vol. 71, no. 4, p. 863, 1999

[53] D. C. Tsui: „Nobel lecture: Interplay of disorder and interaction in two-dimensional electron gas in intense magnetic fields”, *Reviews of Modern Physics*, vol. 71, no. 4, p. 891, 1999

[54] S. Chichibu, T. Azuhata, T. Sota és S. Nakamura: „Spontaneous emission of localized excitons in InGaIn single and multiquantum well structures”, *Applied Physics Letters*, vol. 69, no. 27, pp. 4188-4190, 1996

Szinergikus tudomány és megértés

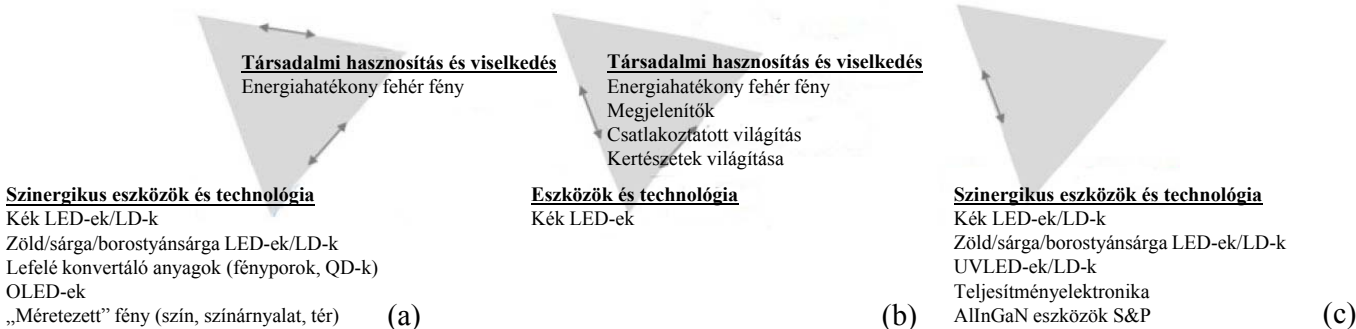
Szintudomány
ipRGC's

Szinergikus tudomány és megértés

AlInGaN anyagok kémiaja és fizikája
Félvezető heterostrukturák tudománya

Tudomány és megértés

AlInGaN anyagok kémiaja és fizikája



2.14 ábra – Tudomány, technológia és társadalmi hasznosítások szinergiája az alapvető szilárdtest-világításokkal:

(a) A fehér fény kölcsönös együttműködést mutat számos tudományterülettel az AlInGaN anyagok kémiaján és számos technológiával a kék LED-eken túl is
(b) A kék LED kölcsönhatásban van számos tudományterülettel az AlInGaN anyagok kémiaján és fizikáján és számos felhasználással a fehér fényen túl
(c) Az AlInGaN anyagok kémiaja és fizikája számos területtel van szinergikus kapcsolatban a kék LED-eken túlmenően.

Ezek a nagyteljesítményű kék LED technológiák a korábbi lépcsőfokoknak tekinthető fehér LED-termékekkel kombinálva nagyobb teljesítményű fehér fényű termékeket tettek lehetővé, így a fehér LED-es autófényszórólámpákat és az energiahatékony, A-bűrés fehér LED-lámpákat. A termékekkel és a piacokkal összefüggő lefelé irányuló költségnyomás nagy motivációt jelentett az egyre nagyobb áramsűrűségű kék LED-ek kifejlesztésére, a lumenenkénti költségek csökkentésére, és ez felhívta a figyelmet a hatásfokelésnek nevezett fizikai jelenségre. Ez a hibaokok korábbi megismerésével együtt ösztönözte azokat a tudományos kísérleteket, amelyek megállapították, hogy a hatásfokelés jelentős része az InGaN Auger-rekombinációjának tulajdonítható [58].

A tudomány, a technológia és a társadalmi hasznosítás közötti erőteljes ciklusok sokkal sűrűbbek, amint azt a 2.13 ábra mutatja, amelyen csak igen kevés eredményt tüntettünk fel. De még e kis számú eredményt szemlélve is látható, hogy milyen sűrű és fontos volt a kölcsönhatás. Ezenkívül – amint ezt a jelen tanulmányban mindenütt hangsúlyozzuk – a szilárdtest-világítás legfontosabb teendőit még alig sikerült elvégezni, még jelentős kihívások és lehetőségek fogják táplálni ezeket a ciklusokat a jövőben.

2.6.2 A szilárdtest-világítás alapvető területein túl

A 2.6.1 fejezet ismertette a szilárdtest-világítás alapvető területein belüli fontos ciklusokat: az általános világításra alkalmas, energiahatékony fehér fény (társadalmi hasznosítás), a kék LED-ek (technológia) és az AlInGaN anyagok kémiaja és fizikája (tudomány) terén. Valójában mindegyik központi terület saját maga is létrehozott új ciklusokat és szélesebb

kölcsönhatásokat, amelyek túlsordulnak a szilárdtest-világítás „magterületein”. Ezeket a szélesebb együttműködéseket a 2.14. ábrán látható három panel szemlélteti.

A fehér világítással kapcsolatos együttműködések

Ahhoz, hogy a fehér fényű világítás realizálhassa költséghatékonyasági és felhasználási lehetőségeit, a tudomány számos területét kellett feltárni az AlInGaN anyagok kémiaján és fizikáján, valamint a kék LED-ek technológiáján túl – amint azt a 2.14(a) ábrán látható. Megjegyezzük, hogy a tudomány együttműködési területei tekintetében az általános világításra használt fehér fény elsősorban a környezettel van kölcsönhatásban, de azután végső soron a két emberi fotoreceptorcsatorna egyikével is. E csatornák egyike az a vizuális képalkotó csatorna, amely az emberi szem foveájában található pálcikákból és csapokból származik, és amelynek tudománya kritikus fontosságú volt ahhoz, hogy megértsük, hogyan lehet legjobban „testre szabni” a fehér fény használatát. A második a nem vizuális csatorna, amely csak az elmúlt 15 évben felfedezett, eredendően fotoérzékeny retinális ganglionsejtekből épül fel [59].

A kölcsönhatásban álló technológiai területek tekintetében talán a legfontosabbak a zöld/sárga/borostyánsárga fény kibocsátásához alkalmas alternatív anyagok és architektúrák – akár a félvezetőkből történő közvetlen emisszióról, akár a hullámhosszának magasabb energiájú fotonok alacsonyabb energiaállapotba történő átmenetével előálló lefelé konvertálásával keletkező, indirekt emisszióról van is szó. A félvezetőkből származó közvetlen emisszió tekintetében számos előny származik a szilárdtest-világítás alapvető területéről, az AlInGaN anyagok révén.

Történetek előrelépések azonban a nem-AlInGaN anyagok területén is, különösen a szerves LED-eknél. Valójában az OLED-ek maguk is a tudomány és a technológia egymás közötti kölcsönhatásának hosszú történetéből származnak. A polimerek elektromos vezetőképességét 1862-ben Letheby mutatta ki, a szerves molekulák elektrolumineszcenciáját pedig Andre Bernanose figyelte meg az 1950-es években. Újabban kis szerves molekulákból származó fluoreszcenciával Ching Tang és

[55] O. Ambacher, J. Smart, J. R. Shealy, N. G. Weimann, K. Chu, M. Murphy, W. J. Schaff, L. F. Eastman, R. Dimitrov, L. Wittner és M. Stutzmann: „Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N- and Ga-face AlGaIn/GaN heterostructures”, *Journal of Applied Physics*, vol. 85, no. 6, pp. 3222-3233, 1999

[56] C. G. Van de Walle és J. Neugebauer: „First-principles calculations for defects and impurities: Applications to III-nitrides”, *Journal of Applied Physics*, vol. 95, no. 8, pp. 3851-3879, 2004

[57] M. R. Krames, O. B. Shchekin, R. Mueller-Mach, G. O. Mueller, L. Zhou, G. Harbers és M. G. Craford: „Status and future of high-power light-emitting diodes for solid-state lighting”, *Journal of Display Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 160-175, 2007

[58] J. Iveland, L. Martinelli, J. Peretti, J. S. Speck és C. Weisbuch: „Direct measurement of Auger electrons emitted from a semiconductor light-emitting diode under electrical injection: identification of the dominant mechanism for efficiency droop”, *Physical Review Letters*, vol. 110, no. 17, pp. 177-406, 2013

[59] G. C. Brainard, J. P. Hanifin, J. M. Greeson, B. Byrne, G. Glickman, E. Gerner és M. D. Rollag: „Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor”, *The Journal of Neuroscience*, vol. 21, no. 16, pp. 6405-6412, 2001

[60] C. W. Tang és S. A. Vanslyke: „Organic electroluminescent diodes”, *Applied Physics Letter*, vol. 51, no. 12, p. 913, 1987

[61] J. H. Burroughes, D. D. C. Bradley, A. R. Brown, R. N. Marks, K. MacKay, R. H. Friend, P. L. Burns és A. B. Holmes: „Light-emitting diodes based on conjugated polymers”, *Nature*, vol. 347, no. 6293, pp. 539-541, 1990

Steve Van Slyke állított elő fényt az Eastman Kodaknál 1987-ben [60], és 1990-ben hatékony fény előállításáról számolt be polimerekből egy Richard Friend és Jeremy Burroughes által vezetett csapat a Cambridge University-nél [61]. A fényhasznosítás további négyszeres javításához vezető utat 1998-ban a Princeton University és a University of Southern California közötti együttműködés demonstrálta; kimutatták, hogy a nehéz atomokat tartalmazó foszforeszkáló molekulák bevezetése triplet-gerjesztésekből származó fénykivonáshoz vezet [62]. A polimerek vezetőképeségének lényeges növeléséért 2000-ben Heeger, MacDiarmid és Shirakawa kémiai Nobel-díjat kapott „a vezető polimerek felfedezéséért és kifejlesztéséért.”

A hullámhosszak lefelé konvertálásával előálló indirekt emisszió tekintetében voltak előrelépések mind a „hagyományos” fényporanyagok, mind a feltörekvőben lévő kvantumpont anyagok terén. A hagyományos fényporanyagok közé tartozik az ittrium-alumínium-gránát (YAG), amelyet a katódsugárcsövekhez és a szcintillátorokhoz fejlesztettek ki az 1960-as és 70-es években, valamint a 2004-ben egy teljesen új anyagrendszerben (nitridoszilikátokban) kifejlesztett új vörös fénypor – mint kulcsfontosságú előrelépés [63]. A kvantumpont anyagoknak először pusztán tudományos érdekességük volt mint „mesterséges atomoknak”, amelyeknek diszkrét elektronikus állapotai voltak, és éles lumineszkáló átmenetek jöttek létre közöttük, most azonban már komolyan veszik a szilárdtestvilágításnál, különösen azért, mert hullámhosszuk hangolható és keskeny az emissziós vonalszélességük [64, 65, 66].

Váratlan módon ezek a fehér fényű világítás számára igen kíváncsú együttműködési területek igen kíváncsúak lettek a megjelenítők számára is – egy olyan társadalmi felhasználás számára, amely igen csak különbözik a megvilágításhoz szükséges fehér fénytől. Mivel a megjelenítők nagyobb lumenenkénti költséget képesek támogatni, mint az általános világítás, segítik az OLED-ek és a hullámhosszak kvantumpontos (QD) lefelé konvertálásának fejlesztését is. Várható, hogy amint az OLED-ek és a QD-k egyre jobban beépülnek a megjelenítőkbe, egyre kifinomultabbakká válnak, teljesítőképességük javul és gyártási költségeik csökkennek. Noha a fehér fényű világítás bizonyos szempontból sokkal igényesebb, mint a megjelenítők, alacsonyabb költségű fénypontokat és nagyobb fényáramokat igényel, a megjelenítőkben használt OLED-ek és a QD-k tanulási görbéi előnyt fognak élvezni

abból, ha esetleg ténylegesen felhasználják azokat a fehér fényű világításnál.

A kék LED-ek technológiájából származó együttműködések

A kék LED-ek technológiájának fejlődésével az AlInGaN anyagok kémiján és fizikáján túli tudományterületek és a fehér fényű világításra túli számos társadalmi hasznosítás is fontossá vált, amint azt a 2.14(b) ábra mutatja. A tudomány együttműködési területei vonatkozásában a kék LED-ek technológiája alapvetően az AlInGaN anyagokon alapuló félvezető eszköztechnológia, ezért az AlInGaN anyagok kémijával és fizikájával és a félvezető heterostrukturák tudományával való metszéspont kritikussá vált a kék LED-ek technológiája számára, amint azt a 2.6.1 fejezetben ismertettük.

A kék LED-ek technológiájának számos, egymást erősítő társadalmi felhasználása van, és ez a fő oka annak, hogy ilyen nagy hatású felfedezésként tartják számon. Az egyik ilyen nagy hatás természetesen az energiatakarékos általános világítási célú fehér fény. Az úton – amint azt a fentiekben ismertettük – az egyik fontos közbesző lépcsőfokot a sokféle méretű megjelenítő jelentette; a kis méretűek az okostelefonokhoz és a mobil alkalmazásokhoz, a közepes méretűek a tv-készülékekhez és a számítógépek monitoraihoz, a nagyobb méretűek pedig a kültéri videoképernyőkhöz. Mivel a LED-ek szilárdtest-világítási fényforrások, a világítás intelligenssé, „csatlakoztatottá” és a Tárgyak Internetének részévé vált [67]. A kertészetek világítása egy másik olyan alkalmazás, ahol a kék/fehér LED-ek elkezdenek teret nyerni, és amelynek fontossága jelentős mértékben növekszik, amint a városi lakossághoz közeli beltéri gazdálkodás egyre vonzóbbá válik.

Együttműködések az AlInGaN tudománnyal

Az AlInGaN anyagok kémija és fizikája esetén a lehetőségeik realizálásához ugyancsak fontos volt a kék LED-eken túli technológia számos területének feltárása, amint azt a 2.14(c) ábra mutatja. Megjegyezzük, hogy a társadalmi hasznosítás szélesebb területeit nem soroltuk fel, noha sok ilyen van. Mindenesetre még a technológia szélesebb területeivel kapcsolatos kölcsönhatások korlátozásával is igen nagyok a lehetőségek. A kék LED-ek kulcsfontosságú szilárdtest-világítási területe természetesen a legfontosabb kölcsönható technológia, de a kék lézerdiónak is van szinergikus jelentősége. Megjegyezzük,

hogy a kék lézerdíoda kritikus fontosságú volt az optikai tároláshoz (Blu-ray diszkekhez) – még akkor is, ha most a szilárdtest-világításnál veszik figyelembe. A kéktől eltérő hullámhosszakon sugárzó, de AlInGaN anyagokon alapuló fényemitterek is kölcsönös hasznot jelentenek. Ezek közé tartoznak a zöld/sárga/borostyánsárga és UV LED-ek, valamint a „zöld/sárga/borostyánsárga” hézagokat kitöltő és Stokes-veszteségek és UV nélküli fehér fényt előállító zöld/borostyánsárga/vörös lézerdíodák a gyártási és biocid alkalmazásokhoz. A teljesítmény- és az igen környezetbarát elektronika feltörekvő területeknek számítanak a GaN és az AlGaIn anyagok számára, amelyek mindketten előnyt élveznek az AlInGaN tudománnyal való átlapolódásuk folytán. Ez a terület egyszer majd összevethető lehet a kék LED-ekkel, ami a piac méretét és gazdagságát illeti – sokféle alkalmazás mellett: váltakozó- és egyenáramú tápegységek, DC/AC inverterek és teljesítménycsatlakozás a jövő intelligens táphálózata számára [68]. Végezetül megjegyezzük, hogy az AlInGaN eszközök szintézise és gyártástechnológiája egyaránt elősegíti az AlInGaN anyagok kémijának és fizikájának fejlődéséhez szükséges heterostrukturákat, de előnyöket is élveznek ebből.

[62] M. A. Baldo, D. F. O'Brien, Y. You, A. Shoustikov, S. Sibley, M. E. Thompson és S. R. Forrest: „Highly Efficient phosphorescent emission from organic electroluminescent devices”, *Nature*, vol. 395, no. 6698, p. 151, 1998

[63] U. Kyota, N. Hirosaki, Y. Yamamoto, A. Naito, T. Nakajima és H. Yamamoto: „Luminescence properties of a red phosphor, CaAlSiN₃: Eu²⁺, for white light-emitting diodes”, *Electrochemical and Solid-State Letters*, vol. 9, no. 4, pp. H22-H25, 2006

[64] A. P. Alivisatos: „Semiconductor clusters, nanocrystals, and quantum dots”, *Science*, vol. 271, no. 5251, p. 933, 1996

[65] B. D. Mangum, T. S. Landes, B. R. Theobald és J. N. Kurtin: „Exploring the bounds of narrow-band quantum dot downconverted LEDs”, *Photonics Research*, vol. 5, no. 2, pp. A13-A22, 2017

[66] K. T. Chimizu, M. Bohmer, D. Estrada, S. Gangwal, S. Grabowski, H. Bechtel, E. Kang, K. Vampola, D. Chamberlin, O. B. Shchekin és J. Bhardwaj: „Towards Commercial Realization of Quantum Dot based White LEDs for General Illumination”, *Photonics Research*, vol. 5, no. 2, pp. A1-A6, 2017

[67] E. F. Schubert és J. K. Kim: „Solid-state light sources getting smart”, *Science*, vol. 308, no. 5726, pp. 1274-1278, 2005

[68] J. Tsao, S. Chowdhury, M. Hollis, D. Jena, N. Johnson, K. Jones, R. Kaplar, S. Rajan, C. Van de Walle, E. Bellotti, C. Chua, R. Collazo, M. Coltrin, J. Cooper, K. Evans, S. Graham, T. Grotjohn, E. Heller, M. Higashiwaki, M. Islam, P. Juodawlkis, M. Khan, A. Koehler, J. Leach, U. Mishra, R. Nemanich, R. Pilawa-Podgurski, J. Shealy, Z. Sitar, M. Tadjer, A. Witulski, M. Wraback és J. Simmons: „Ultrawide-Bandgap Semiconductors: Research Opportunities and Challenges”, *Advanced Electronic Materials*, 2017.

3. Irányzatok a világításban

3.1 A világítás teljesítőképessége és formatervezése

A szilárdtest-világítás a tulajdonságok és a tervezési rugalmasság új dimenzióit kínálja. A szilárdtest-világítási termékeket lehet úgy konstruálni, hogy a látható fénynek majdnem bármilyen spektrumát képesek legyenek kibocsátani; a LED vagy OLED által kibocsátott spektrum dinamikus beállításának képessége az energiamegtakarításon túl a szilárdtest-világítás előtt számos funkció lehetőségét nyitja meg. A LED-ek színének és spektrumának állíthatósága két új alkalmazási lehetőséget tesz lehetővé: az egyik az emberi egészséggel, a másik a kertészetek világításával függ össze.

A LED-ek és az OLED-ek egyedülálló tulajdonságai olyan új világítási formatervezőket tesznek lehetővé, amelyek megváltoztatják a világítás épületekbe való integrálásának a módját. A szilárdtest-világítás nem korlátozódik a hagyományos búrák vagy lámpatestek méreteire, hanem új építési lehetőségeket tesz lehetővé, például DC mikrohálózatok felhasználását az AC/DC átalakítás veszteségeinek minimalizálására az egyes lámpatesteknél, vagy megújuló energiaforrások alkalmazását. Ezenkívül – félvezető fényforrásokról lévén szó – a szilárdtest-világítás megkönnyíti a csatlakoztatott világítás bevitelét az épületekbe. A világítási tulajdonságok tekintetében a szilárdtest-fényforrások veleszületett előnyökkel rendelkeznek: a LED fényforrások igen jól irányított optikai eloszlást biztosítanak, az OLED-ek pedig kis kápráztatású, kis fénysűrűségű fényforrásokról gondoskodnak.

Amint a termékfejlesztők, az építészek és a világítástervezők teljesen kihasználják majd a szilárdtest-világítási technológiák lehetőségeit, megjelenhetnek új termékformák, világítási elrendezések és konstrukcióbeépítési megközelítések, amelyek teljes mértékben optimalizálják a szilárdtest-világítási technológiát a fényforrások fényhasznosítása, valamint az optimális kihasználási hatékonyság, az épületek és az építészeti hatékonyság, az emberi egészség és a termelékenység tekintetében.

3.1.1 Igényre szabott fény: spektrum, intenzitás és térbeli vezérlés

Amint azt a 2.2.2 fejezetben ismertettük, minden világítási alkalmazásnak megvannak a maguk követelményei, és az határozza meg az alkalmazás hatásfokát,



3.1 ábra –A Cree „Edge Area Square” térvilágító lámpatestei az Edgewater-i (Kolorádó) piacon (Forrás: John Edmond, Cree Inc., SSL R&D Workshop, San Francisco, Kalifornia, 2015. jan. [69])

hogy a világítási rendszer milyen hatékonyan, mekkora hatásfokkal tudja teljesíteni ezeket a követelményeket. Az alkalmazás hatékonyságának maximalizálása érdekében olyan fényforrásokra van szükség, amelyeknek különböző (spektrális, intenzitás- és térbeli) eloszlásait az alkalmazásra lehet szabni – lehetőleg valós időben.

A spektrális tervezés a kezdetektől fogva központi témája lett a szilárdtest-világításnak – különös figyelmet szentelve a legáltalánosabb mérőszámokra, a fénysűrűságra, a korrelált színhőmérsékletre és a színvisszaadási indexre. De ez még csak a kezdet, és számos alkalmazás élvezi majd a finomabban vezérelt spektrális tervezés előnyeit, nem csupán az alkalmazás energiaszükségletének csökkentése, hanem az alkalmazás termelékenységének javítása tekintetében is. Az alkalmazásra szabott spektrum felhasználása maximalizálja a világítás hatékonyságát biztosítva, hogy az adott világítási alkalmazáshoz szükséges spektrum megfelelő komponensei jelen vannak. Emellett a látható spektrum károsító vagy szükségtelen részei eliminálhatók vagy csökkenthetők. Ez a koncepció még viszonylag új az általános világítási alkalmazások terén, mivel a szilárdtest-világítás beköszöntével vált csak lehetővé a spektrum hatékony vezérlése. A legtöbb világítási alkalmazáshoz még nem ismert az optimális spektrum, ezért jelentős kutatómunkára lesz szükség ennek tisztázásához.

A fénysűrűség szabályozása lehetővé teszi a világítás jobb hatékonyságát és csökkenti

energiaigényét is. Ha van elegendő nappali fény, vagy senki sincs jelen, a világítási termékek fénysűrűségét le lehet csökkenteni, vagy ki is lehet kapcsolni azokat az energiatakarékosság érdekében. A fényszintek a nap folyamán is szabályozhatók a külső fényhez való hozzáigazításuk érdekében, ezáltal kiváltva a megfelelő pszichológiai ingereket és javítva a világítási rendszerek hatékonyságát. A világítási termékek úgy is tervezhetők, hogy az egyes LED-ek vagy LED-csoportok fénysűrűsége szabályozható legyen, ami lehetővé teszi a fehér vagy a színes fény tónusának változtatását. Ráadásul a termékeket úgy is tervezhetik, hogy aktív módon szabályozzák a fény térbeli eloszlását, amint azt a 4.2.2 fejezetben ismertett OSRAM Omnipoint koncepció mutatja.

A térbeli eloszlás tervezése az utolsó, de ugyanolyan fontos lába az igényre szabott fény hármasságának. A LED-es világítási rendszerek javított optikai vezérlésükkel és térbeli eloszlásukkal már megmutatták, hogy kevesebb fény felhasználásával is képesek elérni az előírt megvilágítási szinteket. Kültéri alkalmazásoknál ez javított optikai vezérléssel érhető el, amely csökkenti a túlvilágítást és a haszontalan, célt tévesztett fénysűrűségeket (amelyeket zavaró fényként vagy az ég felé irányuló, haszontalan, az égbolt parázslását növelő fénykomponensekként aposztrofálnak). A 3.1 ábra mutat be érdekes példát a LED-alapú kültéri lámpatestekkel feljavított fényhasznosításra. Ennél a példánál egy

[69] J. Edmond: „Reinventing Lighting”, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, Kalifornia, 2015

parkoló lámpatesteknek Cree-gyártmányú LED-es lámpatestekre történő lecserélésével 66%-kal kevesebb energiát használnak fel, mint a nagyintenzitású kisülőlámpákkal szerelt lámpatestek esetén a nagyobb fényhasznosításnak és a kisebb fényáramoknak köszönhetően. Ráadásul lényegesen nagyobb parkolóterület kapott megvilágítást, ami előnyös a gépkocsivezetők és a gyalogosok biztonsága szempontjából is.

3.1.2 A világítás integrálása az épületekbe

A LED-es világítástechnológiák többségét rövidtávú piaci lehetőségek kielégítésére tervezték – lámpák és lámpatestek lecserélésére. A világon megközelítőleg 45 milliárd lámpafoglalat van, ezért ezek formatényezői óriási piacot és energiamegtakarítási lehetőséget reprezentálnak. [2]. A lámpák és a retrofit formatényezők segítik a gyors vásárlói elfogadást is, miután megszokott termékformákat és a meglévő termékekéhez hasonló használhatóságot kínálnak. A tipikus lámpaformák azonban nem ideálisak a LED-csomagok világítási termékekbe történő beépítésére. Nincs természetes hőelvezetési út a LED-csomagoktól; a LED-csomagok fényeloszlása sok alkalmazás számára nem ideális; és a tápegységek beépítése az egyes lámpákba költséges és rossz hatékonyságú. A LED-es termékintegrátorok figyelemre méltó munkát végeztek olyan termékek kifejlesztésével, amelyek leküzdik ezeket a kihívásokat, de az örökölt formatényezők nem képesek kihasználni a LED-technológiával kapcsolatos egyedi tulajdonságokat és formatervezési rugalmasságot, és a LED-technológiát egy kevésbé optimális formatényezőbe fogják bekényszeríteni.

A retrofit lámpatestek nagyobb rugalmasságot tesznek lehetővé, mivel általában nagyobb térfogatuk van az integráláshoz, ami a LED-es világítási termékek optimálisabb és költséghatékonyabb beépítését teszi lehetővé. A hátrány az, hogy a világítási elrendezést és a megkívánt fényeloszlást a retrofit lámpatesteknél gyakran az a bevált technológia határozza meg, amelyet le akarnak vele cserélni, nem pedig az, amelyet optimálisan el lehetne érni, ha az egész rendszert a LED-ek tulajdonságainak szem előtt tartásával terveznék meg. Azt is a bevált világítási technológiák határozzák meg, hogy az épületekben hogyan illesztik és csatlakoztatják a lecserélésre szánt lámpatesteket. Például a LED-termékek kisebb mélységet és térfogatot igényelnek a süllyesztett világítási alkalmazások esetén, ami kompaktabb épületarchitektúrát és kevesebb építőanyag fel-

használását teszi lehetővé. A világítás elektromos csatlakoztatását potenciálisan javítani lehet, ha az épületekben DC hálózatot használnak, ezzel elkerülve, hogy mindegyik LED-lámpához vagy LED-es lámpatesthez teljes AC-DC átalakításról kelljen gondoskodni. Ez megkönnyítheti a megújuló energiaforrásokhoz való közvetlen csatlakoztatást is, mivel a nap- vagy szélenergia és azok akkumulátorrendszerei nem igényelnek először DC-AC, majd a LED-ek működtetéséhez AC-DC átalakítást.

A LED- vagy OLED-világítás sajátjának tekinthető tulajdonságai nem csupán új formatényezőkhöz vezethetnek, amelyek átalakíthatják az épületekhez való csatlakoztatást, hanem olyan tervezésekhez is, amelyek javítják az alkalmazás számára szolgáltatott hatékonyságot is. Azzal, ha a lámpatest a fény nagyobb hányadát juttatja el a célterületre, csökkenthető a megkívánt megvilágítási szintekhez igényelt teljes fénymennyiség – javítva ezzel a fényhasznosítást. Például a LED-ek kis mérete jobb optikai vezérlést és irányíthatóságot tesz lehetővé; ennek ellenkezőjeként az OLED-ek nagy mérete a kis fénysűrűséggel és a kis kápráztatással párosulva lehetővé teszi, hogy a célterülethez igen közel helyezzük el azokat. A LED- és OLED-fényforrások fényének maximális kihasználásához el kell mozdulni a megszokott formatényezőktől – a lámpabúráról és a süllyesztett tükrös-rácsos lámpatestektől – olyan formatényezők irányába, amelyek maximalizálják az alkalmazás hatékonyságát, valamint az optikai, elektromos és termikus hatásfokot.

Az OLED-ek nem alkalmasak arra, hogy a legtöbb lámpa és lámpatest formáját leutánozzák, ami hátrány és egyben előny is. Amíg ez ugyanis rövid távon gátolja az OLED-technológia elfogadását, egyben felgyorsítja az olyan, teljesen optimalizált világítási rendszerek és alkalmazások kifejlesztését, amelyek összhangban vannak a technológia egyedülálló tulajdonságaival (pl. a nagy területtel, a kis

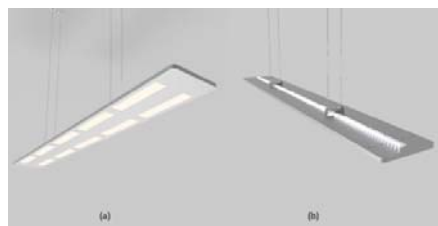
fénysűrűséggel, a karcsú formákkal és a síktól eltérő felületekkel). Végso soron a nagy felületű, kis fénysűrűségű OLED-ek és az irányított fényű LED-ek bizonyos kombinálásával elérhető egy olyan megközelítés, amely maximalizálja a világítástechnológiák előnyeit és optimalizálja a világítási terveket is.

E kiegészítő megközelítés egyik példáját mutatta be az Acuity Brands. Bejelentette a Duet SSL™ technológia kifejlesztését, amely ugyanabban a lámpatestben OLED- és LED-fényforrásokat is használ, optimalizálva ezzel a kifinomult fotometriai teljesítőképességet, a jobb minőségű világítást és a jobb költséghatékonyságot. Amint az a 3.2 ábrán látható, a lefelé néző OLED-ek fénye a célfelületre irányul, míg a LED-ek felfelé néznek és olyan általános világításról gondoskodnak, amely a mennyezetről visszatükröződve világítja meg a teret. Ez a kombináció kihasználja az OLED-ek lágy, diffúz fényét, ahol a fény kölcsönhatásba kerül a felhasználóval, és a LED-ek költséghatékony kiegészítő fényét a tér teljes megvilágításához.

3.1.3 Megbízhatóság

A LED-ek a szilárdtest-világítási termékek „lelkei”. Hosszú élettartamról gondoskodnak, amely meghaladja az 50 000 órás üzemelést – sokkal tovább tartanak, mint a hagyományos fényforrások. Minden világítástechnológia élettartamának végét fényvesztés jelzi, de ez a LED-es lámpatesteknél nem annyira szembeötlő, itt ui. a fényáram fokozatosan csökken, vagy a szín lassan eltolódik olyan pontig, ahol már ezek az események gyakorlatilag meghibásodásként értékelendők.

Amikor a beépített lámpák és lámpatestek először megjelentek a piacon, azt feltételezték, hogy a LED-csomagok fényáramcsökkenését lehetne majd felhasználni a beépített világítástechnikai termék degradációs jellemzőinek megbecsléséhez. Noha a LED-fényforrás élettartama fontos jelzője a LED-lámpatest élettartamának, az élettartamot a lámpatest-rendszer egészére kell értelmezni, nem csupán a LED-ekre. A meghajtók elektronikájának meghibásodása vagy az optikai komponensek degradációja gyakran jóval előbb felléphet, mintsem a LED-ek fényáramának csökkenése meghibásodáshoz vezetne. Egy olyan megbízhatósági modell, amely integrálja a



3.2 ábra – Duet SSL™ technológiájú lámpatest (a) a célfelület megvilágításához lefelé sugárzó OLED-ekkel és (b) LED-ekkel a felületen a tér általános megvilágításához (Forrás: Acuity Brands Website, 2016. április [70])

[70] Acuity Brands: „Olescence OLED /LED Specifications”, 2017. ápr. 18. (http://www.acuitybrands.com/products/detail/603152/Peerless/OLE4-Linear/Olescence-OLED-LED-Indirect-Direct-Suspended-Linear/-/media/products/Peerless/603152/document/OLE4_pdf.pdf)

lámpatestek különböző alrendszerének meghibásodási mechanizmusát, sokkal pontosabb élettartam-adatok megadását tenné lehetővé a LED-gyártók részéről.

A pontos élettartam-adatok megadásával kapcsolatos probléma megoldására a DOE Szilárdtest-világítási programja a Következő Generációs Ipari Szövetséggel (NGLIA) létrehozta az LED-rendszerek Megbízhatósági Konzorciumát (LSRC). A konzorcium célja a tevékenységek összehangolása és a jobb megértés elősegítése. Az LSRC-vel végzett és a DOE Szilárdtest-világítási programja által támogatott egyéb K+F munka a különböző degradációs mechanizmusok megértésére koncentrált olyan új modellek kifejlesztése érdekében, amelyekkel a rendszer megbízhatóságát biztosabban lehet majd megérteni, modellezni, megbecsülni és kommunikálni.

Fényáram-tartás

A LED-csomagok ritkán hibásodnak meg hirtelen (azaz nem, szűnik meg hirtelen a fénykibocsátásuk), ehelyett inkább paraméterromlás tapasztalható – a fényáram, a fénypont (színkoordináták), a színvisszaadási index vagy a fényhasznosítás degradációja vagy eltolódása. A LED-fényforrásokban ezek a paramétereltolódások, fényáram-csökkenések kapták a legnagyobb figyelmet, mivel úgy gondolták, hogy ezek az egész termék élettartamának elsődleges meghatározó tényezői. Noha a kutatás bebizonyította, hogy nem ez a helyzet, a fényáram-tartást még mindig meghatározó tényezőként használják a LED-lámpák vagy LED-es lámpatestek élettartam-adatainak megadásához – főként azért, mert léteznek szabványosított eljárások a LED-csomagok fényáram-csökkenésének mérésre és „megjósolására”. A LED-csomagok hasznos élettartamának gyakran azt az időpontot tekintik, amikor a kimeneti fényáram kezdeti értékének 70%-ára csökken le; ez az L70 érték. Az olyan termékek esetén, amelyeknek élettartama több év vagy akár évtized, a hibák normál működési körülmények között igen lassan alakulnak ki. 2008-ban az Illuminating Engineering Society (IES) publikált egy IES LM-80-nak elkeresztelt jóváhagyott módszert a LED-fényforrások, -tömbök és -modulok fényáram-tartásának mérésére [71]. Az LM-80-08 eljárás megköveteli, hogy egy reprezentatív termék-mintán legalább 1000 óránként minimum 6000 órának megfelelő ideig meg kell mérni a fényáramot és a színértéket.

Sok kutató sok energiát fektetett annak az időnek a megjósolására, amikor egy lámpa-

testben lévő LED-csomag eléri az L70-es értéket, és az IES dokumentált is egy előrejelzési eljárást, az IES TM-21-et [72], amely az LM-80 tesztadatot használja fel a fényáram-tartás előrejelzéséhez (ehhez minimum 6000 órás tesztadatokra van szükség). A LED-ekre tesztelt LM-80-as adatokat (a fényáramot a tesztórák függvényében) átlagolják, és egy illeszkedő exponenciális görbét rajzolnak az adatokhoz; az illeszkedő görbéből származó adatokat használják fel a fényáram-tartás alapján kiszámolható élettartam-bebecslések meghatározásához. Ez a műszaki dokumentum kimondja, hogy az előrejelzések nem haladhatják meg az LM-80 tesztadatai tényleges óráinak megállapított (a mintaméretektől függő) többszörösét, ami segít elkerülni a gyártóknak a termékkel kapcsolatos túlzott állításait.

Meg kell jegyezni, hogy az LM-80 mérések olyan szabályozott hőmérsékletű környezetben, folytonosan működtetett LED-ekre vonatkoznak, ahol a forrasztási pont és a környezet hőmérséklete egyensúlyi állapotban van. Ez nem utal szűkegképpen valóságos működési feltételekre, ezért a laboratóriumi mérési eredmények alapján végzett előrejelzések és a lámpákkal és lámpatestekkel a helyszínen nyert gyakorlati tapasztalatok között nem feltétlen van tökéletes egyezés. Mindenesetre a fényáram-tartás előrejelzései segíthetnek a „fejlett” felhasználóknak a termékek összehasonlításában, amennyiben azok korlátai pontosan ismertek.

A LED-csomagok tervezésének és konstrukciós anyagainak hatását a teljesítőképességre, színminőségre, fényáram-tartásra és színeltolódásra igen sokféle LED-csomagra megvizsgálták. A különböző LED-csomag kiviteleknek (részletesen l. a 4.1 fejezetben) a konstrukciós anyagoktól és a gyártási eljárásoktól függően különböző sajátos, „veleszületett” jellemzőik vannak. Magas hőmérsékleteken és hosszú üzemelési idők során a LED-csomagban lévő anyagok elszíneződhetnek, megrepedezhetnek vagy rétegeződhetnek, ami fényáram-csökkenéshez és színeltolódáshoz vezethet. A LED-csomagok degradációs mechanizmusaival és hatásaikkal kapcsolatos bővebb információ az LSRC legutóbb publikált jelentésében („LED-es lámpatestek megbízhatósága: a színeltolódásra gyakorolt hatás”) található [73] (<https://energy.gov/eere/ssl/downloads/led-luminaires-reliability-impact-color-shift>).

Színeltolódás

Noha a LED-ek élettartamával kapcsolatos vitákat a fényáram-tartás dominálta, a

színstabilitás (színérték-stabilitásnak is nevezik) is fontos paraméter, amely gátja lehet a vásárlásnak vagy kielégítetlen elvárásokat okozhat. Színeltolódás a hagyományos világítástechnológiában is előfordul, de a LED-világítással kapcsolatosan nagyobb figyelmet kapott a 10 évvel vagy még hosszabb idővel mérhető élettartam okán sok alkalmazás esetén. A hagyományos világítástechnológiáknál (halogénlámpák, fénycsövek vagy fémhalogénlámpák) is tapasztalható színeltolódás, ezért néhány évente lámpacserére van szükség a színeltolódás hatásának csökkentésére.

A színstabilitás fontossága függ az alkalmazástól, és bizonyos esetekben károsabb lehet, mint a fényáram-csökkenés. A nagy mértékű színstabilitás például döntő fontosságú a múzeumok vagy az üzletek fényforrásainál, de kevésbé fontos az utóvilágításnál. A lámpák és lámpatestek színstabilitása ott fontos, ahol több lámpát vagy lámpatestet használnak falmosáshoz, vagy ahol a tárgyakat szín alapján értékelik, például kórházakban vagy gyárakban.

A fény színét színkoordináták segítségével lehet jellemezni a színárnyalat vagy a telítettség leírására. A két színkoordináta egyedi fényszínnek felel meg; két azonos színkoordinátájú fényforrás elméletileg egyformának látszik. A színek elhelyezkedését reprezentáló színdiagramokat a CIE dolgozta ki és szabványosította. A legáltalánosabban használt színdiagram a CIE-nek a színérték megadásához (x , y) koordinátákat használó 1931-es és (u' , v') koordinátákat használó 1976-os színdiagramja. Eddig az ipar általában a színeltolódáshoz a $\Delta u'v'$ adatot használta, amely megadja a színeltolódás nagyságát, de irányát nem. (A tényleges u' és v' színkoordinátákhoz ismerni kell a színérték eltolódásának irányát is.) Az a pont, ahol a színeltolódás már észrevehetővé válik és paraméterhibát okoz, a világítási alkalmazástól függ. Ha a színváltozás lassan, igen hosszú idő (pl. 25 000 óra) alatt következik be, az nem kifogásolható feltéve, ha valamilyen fényforrás azonos mértékű és azonos irányú színeltolódást szenved (de ez a gyakorlatban valószínűtlen).

[71] Illuminating Engineering Society: „LM-80-08: Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources”, 2008

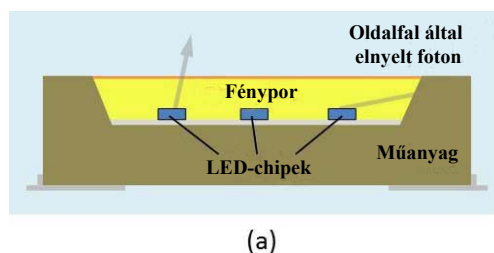
[72] Illuminating Engineering Society: „TM-21-11: Projecting Long Term Maintenance of LED Light Sources”, 2011

[73] LED Systems Reliability Consortium: „LED Luminaire Reliability: Impact of Color Shift”, 2017. ápr. (https://energy.gov/sites/prod/files/2017/04/f34/lsrc_colorshift_apr2017.pdf)

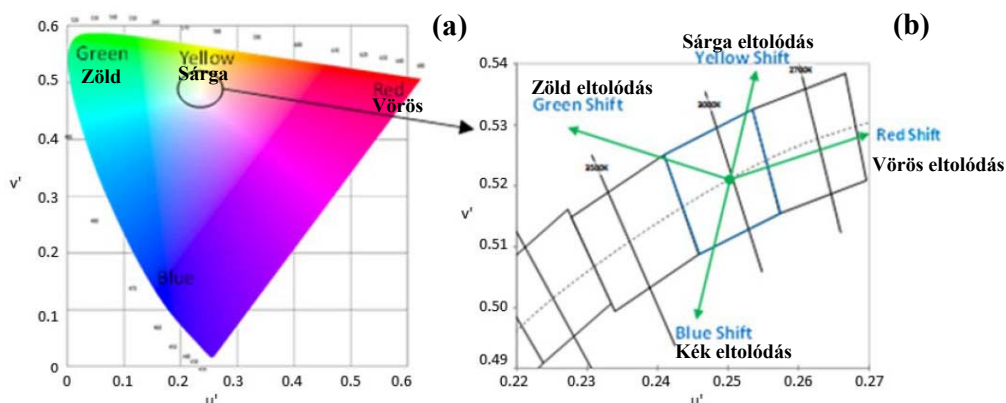
A színtabilitás változhat a LED-lámpa vagy a LED-es lámpatest konstrukciójától függően, amely számos olyan tényezővel rendelkezhet, amelyek befolyásolják az eredményül kapott teljesítőképességet. A környezeti hőmérséklet, a meghajtóáram és a lámpa vagy lámpatest hőelvezető rendszerének konstrukciója befolyásolhatja a LED-ek pn-átmenetének hőmérsékletét, amely viszont a kimeneti jellemzőkre van hatással. A hosszú távú színtabilitás szempontjából nagyobb aggodalomra ad okot az a hatás, amelyet a magas hőmérsékletek fejthetnek ki bizonyos LED-csomagokra vagy optikai anyagokra. A LED-csomagok konstrukciójától függően a fényporrétegek leülepedhetnek, felválhatnak vagy másféle módon megváltoztathatják a fehér fényt adó fotonok számát. Ez a viselkedés még akkor is előfordulhat, ha nem magas a környezet hőmérséklete. Hasonlóképpen az optikai szakasz más anyagai – például a műanyagok – idővel elszíneződhetnek. Ezenkívül például a ragasztó- vagy egyéb kémiai anyagok bedifundálódhatnak a LED-csomagba és befolyásolhatják annak színtabilitását. A működés során bekövetkező hőmérsékletváltozások fel is erősíthetik a degradációs mechanizmust bizonyos LED-termékeknél.

Nincsenek olyan hivatalos szabványok, amelyek korlátoznák a LED-es világítás-technikai termékekben elfogadható színeltolódás mértékét, de bizonyos tanúsítványok megállapítottak követelményeket. Például az Energy Star címke viseléséhez 10 LED-lámpából 9-nél a mért ($\Delta u'v'$) színeltolódás a működés első 6000 órája alatt 0,007-nél kisebb kell hogy legyen. Olyan alkalmazások esetén, amelyek nagy színtabilitást igényelnek, termékfüggő specifikációt is elő lehet írni. A színeltolódás elfogadható szintjeire vonatkozó megegyezés hiányán túl nincs szabványos módszer a jövőbeni szinttartás előrejelzésére, amely szabványos teszteljárásokat használna, mint a LED-csomagok fényáram-tartásának előrejelzésénél. Nincsenek kialakult módszerek a gyorsított tesztelésekre sem, arra hagyatkozva, hogy az egyes gyártók dolgozzák ki saját tesztelési eljárásaikat és előrejelzési modellezési megközelítéseiket. A színeltolódás előrejelzésével kapcsolatos konszenzusos módszer nagy kihívást jelent, mivel a különböző konstrukciós anyagok és gyártási eljárások befolyásolhatják a végeredményt, habár az IES egyik bizottsága (TM-31) dolgozik azon, hogy megegyezés szülessen ebben a sürgető kérdésben [74].

A LED-ekben a színpont stabilitását befo-



3.3 ábra – Színeltolódás eseteit mutató LED-csomagok sématisztikus ábrái: (a) közepes teljesítményű LED-csomag oldalfalának elszíneződése, amely hosszú hullámú kék fotonokat nyel el, ezzel kék irányban történő eltolódást okoz és (b) fényporréteg-felválás egy nagy teljesítményű LED-csomagban, amely a sárga irányba történő eltolódást mutat, miután ilyenkor a fotonoknak hosszabb utat kell megtenniük a fényporon keresztül (Forrás: Monica Hansen: *Strategies in Light*, Las Vegas, Észak-Karolina, 2015. febr. [75])



3.4 ábra – Színeltolódásokat mutató 1976-os CIE színdiagram (u' , v'): (a) a fekete körrel jelölt fehér szintartomány és a színeltolódások szokásos irányai LED-csomagokban és (b) a fekete körrel jelölt fehér szintartomány kinyújtott képe (Forrás: Monica Hansen: *Strategies in Light*, Santa Carla, Kalifornia, 2016. márc. [76])

lyásoló tényezők közé tartoznak az emitterben, a fényporban, a tokozóanyagokban és a műgyantákban az öregedés hatására bekövetkező változások. Az emitterek sugárárama idővel csökkenést mutathat; a fényporoknál a kvantumhatásfok csökkenhet vagy eltolódások léphetnek fel az emissziós spektrumban az oxidáció következtében, a tokozóanyagok pedig megrepedezhetnek, oxidálódhatnak és elsárgulhatnak, vagy megváltozhat a törésmutatójuk; végül a műgyanták elszíneződhetnek és fotonokat nyelhetnek el, amint azt a 3.3 ábra mutatja. A magasabb hőmérsékletek felgyorsítják ezeket a nagyobb színeltolódáshoz vezető degradációs mechanizmusokat, de a színeltolódás nagysága a hőmérséklet függvényében változni fog a felhasznált anyagok és gyártási folyamatok függvényében. Csakúgy, mint a fényáram-tartási viselkedésnél, ha a LED-eket kis meghajtóáramokkal és a normálisnál alacsonyabb hőmérsékleteken működtetjük, ezek az anyagok megváltoznak, ennek következtében a színérték igen lassan fog változni, ha egyáltalán megváltozik.

A színeltolódás irányát a LED-csomagban bekövetkező domináns degradációs mechanizmusok befolyásolják, amelyek viszont a LED-csomag anyagaitól és a konstrukciós módszerektől függenek. A sárga, kék, zöld és vörös színek irányába

történt színeltolódásokat a CIE 1976-os színdiagramjának felhasználásával a 3.4 ábra mutatja. A különböző LED-csomag konstrukciók élesen elkülönülő különbségeket mutatnak a színeltolódás jellegében. Négy fő színeltolódási módot lehetett megkülönböztetni, és ezek változásokat okoztak a LED-csomagok anyagaiban, ideértve a LED-chip, a fénypor és a szilikon kötőanyag, valamint a LED-csomagban használt kiöntő műanyag viselkedését. A színeltolódási mechanizmussal kapcsolatos további részletek a DOE „Kereskedelem-ben kapható LED-termékek kiértékelése és jelentése” (CALiPER) riportjában „Állandósult állapotokban működtetett LED-es PAR38 lámpák színeltolódási mechanizmusa” címen olvasható (https://energy.gov/sites/prod/files/2016/03/f30/caliper_20-5_par38.pdf)

[74] Next Generation Lighting Industry Alliance and LED Systems Reliability Consortium: „LED Luminaire Reliability: Impact of Color Shift”, 2017. ápr. (https://energy.gov/sites/prod/files/2017/04/f34/lsrc_colorshift_apr2017.pdf)

[75] M. Hansen: „The True Value of LED Packages”, *Strategies in Light*, Las Vegas, Nevada, 2015.

[76] M. Hansen: „Package Impact on Color Shift in LEDs”, *Strategies in Light*, Santa Clara, Kalifornia, 2016.

A lámpatestek megbízhatósága

Amikor a LED-lámpákkal összeépített lámpatestek megjelentek a piacon, először azt gondolták, hogy a LED-csomagok LM-80 tesztadataiból az egész termék degradációs jellemzőit is meg lehet jósolni. Amikor azonban a LED-eket egy lámpatestbe vagy rendszerbe beépítik, számos egyéb tényező is befolyásolhatja a fényáram-csökkenés sebességét vagy vezethet katasztrofális meghibásodáshoz. Ezek közé tartoznak a szélsőséges hőmérsékletek, a páratartalom, a vegyi anyagok behatolása, a feszültség- vagy áramingadozás, a meghajtó vagy más elektromos alkatrészek meghibásodása, a LED-ek burkolóanyagának károsodása vagy degradálódása, a LED-ek és a lámpatest közötti összeköttetések károsodása, a fényporok degradálódása és az optika megsárgulása. Ráadásul hirtelen, félig véletlenszerű, rövid távú meghibásodások figyelhetők meg a szerelés, az anyag vagy a tervezés hibái miatt is. A további kutatások kimutatták, hogy az elektronika, a meghajtó vagy a forraszkötések meghibásodása, vagy az optikai komponensek degradációja gyakran jóval azelőtt bekövetkezhet, mielőtt a LED-csomagok fényáram-csökkenése meghibásodást okozna. A megfigyelt rendszer-szintű meghibásodásokkal kapcsolatos további információ az LSRC „LED-es lámpatestek élettartama: Javaslatok a tesztesésre és a riportkészítésre” című anyagában található [77].

A LED-es lámpatestek meghibásodása lehet paraméterhiba (fényáram-csökkenés vagy színérték-eltolódás), vagy katasztrofális (megszűnik a fénykibocsátás). A LED-rendszerek élettartam-vizsgálatánál mindkét hibamechanizmust figyelembe kell venni. A folyamatos tesztelés gyakran vezethet paraméterhibák előfordulásához, míg a katasztrofális meghibásodások akkor fordulhatnak elő, amikor a teszt ki-bekapcsolási ciklusokat tartalmaz, ilyenkor ui. a hőtágulás mechanikai feszültséghez és törésekhez vezethet a különböző komponenseknél vagy forrasztott kötéseknel [78]. Az A-típusú búrákba szerelt lámpáknál egy tanulmány kimutatta, hogy a lámpák a ki-bekapcsolási ciklusokkal végzett élettartam-vizsgálat során rövidebb idő alatt meghibásodnak, mint a folyamatos üzemben végzett élettartam-teszteknél. Ráadásul sok lámpa mutatott katasztrofális meghibásodást az L70-es érték előtt – ilyenkor a forrasztott kötések és a meghajtó elektronikájának meghibásodása következett be [79]. Az A-típusú búrába szerelt lámpáknál a helyszínen bekövetkező meghibásodás erősen fog függeni az

Részarány a felszerelt rendszerekben	Keresk. intézm.	Lakások	Ipari intézmények	Kültér
Semmi	68%	86%	94%	41%
Fényszabályzó	3%	11%	4%	<1%
Napfényérzékelő	<1%	<1%	<1%	39%
Jelenlétérzékelő	6%	<1%	2%	<1%
Időzítő	4%	<1%	<1%	20%
Energiavezérlő rendszerek	15%	<1%	<1%	<1%
Többféle	4%	<1%	<1%	<1%
Csatlakoztatott	<1%	<1%	<1%	<1%

3.1 táblázat – A világításvezérlés részaránya a felszerelt rendszerekben az épületek esetén (Forrás: DOE SSL Program: „Energy Savings Forecast of Solid-State Lighting in General Illumination Applications”, 2016. szept. [1])

alkalmazástól is, vagyis hogy mélysugárzóba vagy asztali lámpába szereleik-e be, de a részletesebb élettartam-vizsgálati protokollok segíthetnének azonosítani azokat a katasztrofális hibákat, amelyek a megjósolt L70-nél rövidebb élettartamokhoz vezethetnek.

Napjainkban számos gyártó kidolgozta saját módszereit konstrukciói termék-élettartamának megbecsléséhez – olyan fontos komponensek adatainak felhasználásával mint a LED-csomag, a meghajtó és az optikai elemek –, ami lehetővé teszi a teljes lámpatest teljesítőképességének megbecslését. Bár ilyen gyakorlatok léteznek speciális gyártósorok és alkalmazások esetére, jelenleg nincs ipari konszenzusos protokoll. A rendszerhibák okának – magas hőmérsékletek, termikus ciklusosság, túlfeszültségek, ismételt kapcsolgatás stb. – megértése olyan vizsgálati módszerek kifejlesztését igényli, amelyek „észszerű” időtartam alatt leutánozzák ezeket a rendszer-meghibásodásokat, hogy hibamegoszlást lehessen készíteni. A rendszer-élettartamok pontos becsléséhez szükséges jobb tesztmódszerek kidolgozása még mindig fontos terület, amely nagyobb erőfeszítéseket igényel.

3.2 Csatlakoztatott világítás

A szilárdtest-világítás egy egészen új világítási rendszer paradigmája számára teremt lehetőséget a világítási infrastruktúra széleskörű alkalmazásával az eredendően szabályozható szilárdtest-világítási rendszerekben. A szilárdtest-világítás, az olcsó érzékelők, okostelefonok és applikációk, valamint a Tárgyak Internete (IoT) együttes hatása várhatóan új világítási funkciókat tesz lehetővé – és példáulan adatcserét is a világítási és egyéb épület-energetikai rendszerek, az Internet és más eszközök között. Az, hogy a világítás mindenütt jelen van az épített környezetben a fejünk felett, egyedi és értékes

lehetőséget biztosít arra, hogy hálózati adatgyűjtő csomópontok sűrű rendszerét hozzuk létre az épületekben és azok környezetében. Az ilyen csatlakoztatott világítási rendszerek – azaz érzékelőkkel ellátott, hálózatra kötött eszközök – kulcsfontosságú adatgyűjtő platformként szolgálhatnak az épületekben és a városokban, ezáltal lehetőséget biztosítva a Tárgyak Internete (IoT) számára, és lehetővé téve a szolgáltatások, előnyök és bevételi források egyedi skáláját, amely a világítást messze annak hagyományos értelmezésén túl hasznosítja és nagyban növeli értékét. A csatlakoztatott világítási rendszerek jobb világítási minőséget szolgáltatnak, javíthatják egyéb épületszolgáltatási rendszerek energiahatékonyságát és vezérlését, a térkihasználást és további olyan funkciókat tehetnek lehetővé, amelyeket most még nem is ismerünk. Továbbá valószínű, hogy ezek a lehetőségek olyan előnyökkel járnak, amelyek meghaladják az általuk biztosított energiamegtakarítás értékét.

3.2.1 Világításszabályozások

Világításszabályozással jelentős mennyiségű energiát lehet megtakarítani, ha a fény nagyságát az adott tér és annak használói valósidejű igényeinek megfelelően állítjuk be. A szilárdtest-világítási termékek

[77] LED Systems Reliability Consortium: „LED Luminaire Lifetime: Recommendations for Testing and Reporting”, 2014. szept. (http://www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/pdfs/led_luminaire_lifetime_guide_sept2014.pdf)

[78] N. Narendran és Y.-w. Liu: „LED life versus LED system life”, SID Symposium Digest of Technical Papers, vol. 46, no. 1, pp. 919-922., 2015. máj.-jún.

[79] N. Narendran, Y.-w. Lui, X. Mou, D. R. Thotamamu és O. V. Madihe Eshwarage: „Projecting LED product life based on application,” Proceedings of SPIE, vol. 9954, 2016. szept. 14.

[80] E. Biery: „Creating Value Through Controls”, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, Kalifornia, 2015.

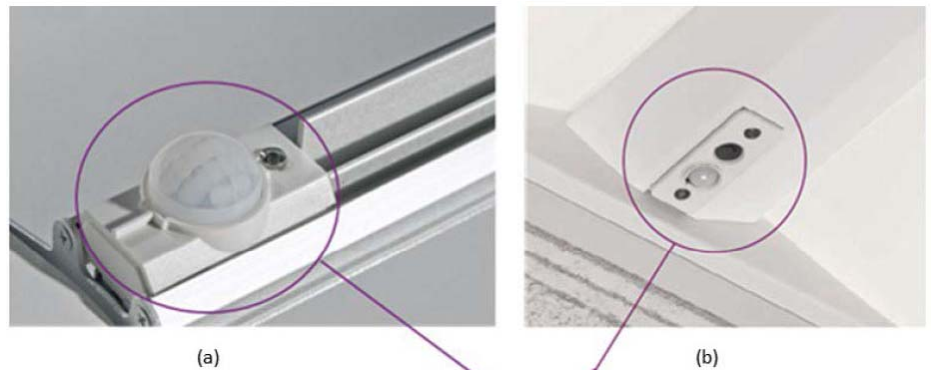
várhatóan olyan katalizátorokká válnak, amelyek megnyitják a világításszabályozás energiamegtakarítási lehetőségeit például nélküli szabályozhatóságuk és automatizált konfigurálásuk egyre növekvő foka okán, amelyet a beépített érzékelők és intelligencia, valamint más olyan tulajdonságok és képességek tesznek lehetővé mint az általuk összegyűjtött adatok kihasználása. Azok a világítási rendszerek, amelyek ki tudják használni a jelenlétérzékelést, a napfény felhasználását, a nagy fényáramok mérséklését, a területek igényre szabott vezérlését vagy e megközelítések bármilyen kombinációját, a szilárdtest-világítás segítségével 20-60%-os energiamegtakarítást értek el az alkalmazástól és a felhasználás módjától függően [80].

Noha a fény vezérléséhez soktermék már régóta kapható a kereskedelemben, bevezetésük és az ebből eredő energiamegtakarítás korlátozott bonyolult konfigurálásuk, magas áruk, más gyártóktól származó eszközökkel való korlátozott csere-szabotosságuk és azon szakembereknek a korlátozott száma miatt, akik tudják, hogy hogyan kell hatékonyan tervezni, felszerelni, beüzemelni és üzemeltetni azokat.

A 3.1 táblázat bemutatja a különböző épületekben található rendszerek mennyiségét és azt, hogy milyen fajtájú vezérlőeszközöket szereltek fel bennük. Látható, hogy még mindig óriási mennyiségű energiát lehetne megtakarítani mindössze azaz, ha megfelelő és folytonos világításvezérlésről gondoskodnánk, nem is beszélve arról, hogy mennyit lehetne megtakarítani a szélesebb körű alkalmazással. Ez az adat az adatelemzésekhez kell (pl. a térkihasználás, a helyi szolgáltatások meghatározásához), és fontos értékeket szolgáltat a világítási rendszerek számára is, hogy le tudják küzdeni a fejlett világításvezérlés elfogadása előtt álló múltbéli költség- és bonyolultsági korlátokat.

3.2.2 Érzékelők beépítése

Egy sűrű érzékelőhálózat kiépítése kulcsfontosságú ahhoz, hogy a végfelhasználó számára az adatelemzéshez adatokat lehessen szolgáltatni. Éppenséggel a világítás az egyik legjobb hely az érzékelők telepítéséhez, mivel általában az ingatlan minden négyzetméterére kiterjed és hozzáférést biztosít az elektromos energiához. A szilárdtest-világítási közösség élvezzi a mobiltelefon-ipar adta előnyöket, amely az érzékelők miniaturizálásának és költségcsökkentésének meghajtómotorja, lehetővé téve ezzel azt, hogy olcsó, kompakt érzékelőket építsenek be közvetlenül a lámpatestekbe –, amint az 3.5 ábrán látható.



Beépített szabályozók jelenlét- és napfényérzékelőkkel kombinálva az energiatakarékosság érdekében

3.5 ábra – Érzékelők beépítése LED-es lámpatestekbe (Forrás: (a) Cree SmartCast Technology [81], (b) Philips, SpaceWise Office Brochure [82])

A világításon alapuló fejlett érzékelőhálózat nagy mennyiségű adatot szolgáltat az épület környezetéből (például az energiafelhasználásról, a hőmérsékletről, a rendelkezésre álló napfényről) vagy az épületben folyó tevékenységről (pl. bentartózkodásról, az eszközök elhelyezkedéséről és a mozgásokról). Ez az információ felhasználható az energiamegtakarítások növelésére a napfény kihasználásával, a bentartózkodás érzékelésével, az igények lekövetésére szolgáló programokkal, a természetes megvilágítás változását követő fény szabályozással és az energiamegtakarítások valósidejű lejelentésével. Más információk az épület karbantartásának jobb kihasználását eredményezhetik, beleértve a bentartózkodás fejlett érzékelését, a magas szintű stabilitást, a személyre szabott világítási profilokat és a lámpatestek kicserélésének lejelentését.

Azonban ez a lehetőség továbbra is kihasználatlan, mivel a technológiai fejlesztők versengő ötletekkel tülekednek a tekintetben, hogy mennyire kell együttműködniük az iparukon belül és mennyire kell versenyezniük. Amint azonban a vezérlők egyre fontosabbakká váltak, számos lámpa- és lámpatest-gyártó – egyedül vagy vezérlőeszközöket gyártó cégekkel összefogva – elkezdte beépíteni a vezérlőeszközöket világítástechnikai termékeibe. Néhány példa olyan lámpatestekre, amelyek teljesen beépített világításvezérlő eszközökkel rendelkeznek: a Cree SmartCast és a Philips SpaceWise nevű lámpatestei. A Cree SmartCast világításvezérlő technológiájának platformja jelenlétérzékelést és napfény-kihasználási képességet biztosít amellett, hogy a helyszínen beállítható a színhőmérséklet. A lámpatestek el vannak látva jelenlét- és fényérzékelőkkel, dimmerekkal és kölcsönösen összekapcsolhatók vezeték nélküli hálózat segítségével. A rendszer lehetővé teszi a lámpatestek

automatikus beüzemelését helyiségen belül a Cree távirányítója segítségével (<http://www2.cree.com/smartcast-landing-page>). A Philips SpaceWise világításvezérlő technológiája hasonló megoldást nyújt – beépített érzékelőkkel és vezeték nélküli vezérlőkkel, amelyek plug&play hálózati csatlakozási lehetőségeket biztosítanak a lámpatestek automatikus csoportosításával központi zónák kiépítéséhez, automatikus kalibrálással és a napfény kihasználásával (<http://www.usa.lighting.philips.com/products/product-highlights/spacewise-wireless-lighting-controls.html>). Néhány gyártócég az épületfelügyeleti megoldások szélesebb választékát építi be ugyanazokba a rendszerekbe, amelyek világításvezérlést biztosítanak (a LED-es lámpatestekbe épített fejlett érzékelőeszközök felhasználásával). Például az Enlightened cég Energy Manager rendszere elemzi a fejlett érzékelőktől származó adatokat (<http://www.enlightenedinc.com/system-and-solutions/iot-system/energy-manager/>). Azon túl, hogy „gyűjtőhelyként” szolgál az érzékelők által szállított energiaadatoknak, valamint a bentartózkodással és a környezettel kapcsolatos adatoknak, az Energy Manager webalapú felhasználói interfész is szolgál a világítási rendszer vezérléséhez és az épület rendszerteljesítményének optimalizálásához. A valósidejű adatokba való bepillantással a létesítménymenedzserek kelendő információ birtokában tudják beállítani az energiafelhasználást vagy javítani tudnak az egyes területek komfortszintjén.

[81] Cree, Inc.: „Cree SmartCast Technology”, (<http://lighting.cree.com/products/controls/cree-smartcast-technology>)

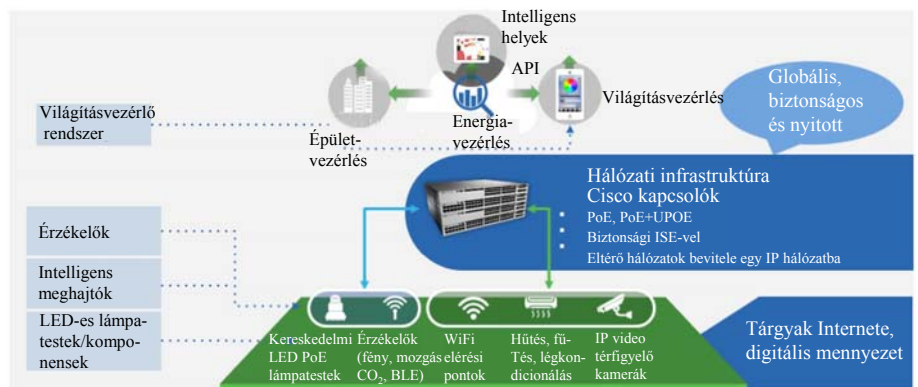
[82] Philips Lighting. „Spacewise Office Brochure”, (http://images.philips.com/is/content/PhilipsConsumer/PDFDownloads/United%20States/ODL120160224_001-UPD-en_US-PLT-1481BR-Spacewise-Office-Brochure.pdf)

3.2.3 Kommunikációk

A csatlakoztatott LED-es világítási rendszereket lehetővé tevő vezeték nélküli technológiák (pl. a Bluetooth vagy a Zigbee) egyre elterjedtebbé váltak az elmúlt években. Az okostelefonok és táblagépek elterjedése is megváltoztatta azt a módot, ahogy az emberek vezérelni szeretnék a világítást. A vezeték nélküli csatlakoztathatóság e megnövekedett integrálásával a világítás könnyebben konfigurálhatóvá és vezérelhetővé válik. A felhasználók például épületeikben egy olyan szoftver applikáció segítségével tudják vezérelni a világítást, amely okostelefonra vagy táblagépre is letölthető.

E vezeték nélküli technológiák mellett a Power over Ethernet (PoE) (Etherneten keresztüli táplálás) az egyik olyan vezetékes megoldás, amely nagyobb figyelmet érdemel a világítás csatlakoztathatósága tekintetében. A PoE technológia kifesztésű DC teljesítményt és Ethernet-kábelen keresztüli kommunikációt is tud biztosítani. A PoE technológia figyelemre méltó kontrasztokat kínál a csatlakoztatott világítási rendszerek vezeték nélküli megközelítései számára. Amíg a mobil eszközök eredendően vezeték nélküli technológiákat igényelnek, az általános világítási eszközöknek tipikusan rögzített helyük van, és nem szükséges hozzájuk vezeték nélküli vezérlés. A PoE technológiának megvan az az előnye, hogy az energiát és az adatokat egyetlen kábelen továbbítja, és csökkenti a vezeték nélküli kommunikáció sávszélessége iránti igényt. Ugyanakkor a világításhoz (és egyéb épületfelügyeleti eszközökhöz) szükséges vezeték nélküli technológia csökkenti az installációs költségeket – különösen a retrofit (csere)eszközök esetén –, mivel nincs szükség új vezetékre a vezérlőjelek és egyéb adatok továbbításához. A PoE-vel kapcsolatos kihívás az a képesség volt, hogy képes-e elegendő teljesítményt szolgáltatni a világítási hálózatok számára. A LED-ek állandóan javuló fényhasznosítása következtében azonban csökkent a világítási alkalmazások energiaigénye, és a PoE technológia legújabb fejlesztései lényeges javulást eredményeztek a hálózatba kötött eszközökhöz egyetlen kábelen szállítható teljesítmény nagysága tekintetében.

E fejlődések eredményeként a PoE technológia szószólói – például a Cisco – úgy vélik, hogy a világítás ugyanolyan pályát fog befutni, mint egyéb olyan technológiák, amelyek konvergáltak az Internet protokollal (IP) munkahelyi szolgáltatással – például a telefóniával, a biztonsági és épületfelügyeleti rendszerekkel, amelyek



3.6 ábra – A Tárgyak Internete „digitális mennyezete” felépítésének vázlatos rajza épületek számára (Forrás: Wen-Lin Tsao, Cisco, DOE SSL R&D Roundtable, Washington, DC, 2016. szept. [83])

az épületautomatizálási és vezérlőhálózatokon alapulnak. A 3.6 ábra egyetlen IP-hálózaton elérhető szolgáltatásokat mutatja – amint a Cisco elnevezte: egy „digitális mennyezetet”. Tavaly a nagy LED-gyártók jelentős száma bevezetett PoE alapú csatlakoztatott világítási rendszereket, többen pedig jelezték a bevezetésüket a közeljövőben – potenciálisan „technológiai forradalmat” készítve elő ezzel.

3.2.4 Interoperabilitás (kompatibilitás)

Amint a szilárdtest-világítási technológia számos új szereplőt (pl. félvezetőgyártókat és mikroelektronikai rendszerfejlesztőket) vonzott a világítástechnikai iparba, a világítás, a kommunikációs hálózatok, a „big data” és a fejlett analitika – valamennyit a Tárgyak Internete tette lehetővé – is jelentősen meg fogja változtatni a világítástechnikai ipar arculatát. A kihívás az, hogy közös platformokról és protokollokról állapodjanak meg, amelyek kibontják a Tárgyak Internete lehetőségeit, lehetővé téve a használható adatok cseréjét a világítási rendszerek, más épületfelügyeleti és vezérlőrendszerek és a Felhő között. Az interoperabilitás megfelelő szintjének biztosítása elengedhetetlen fontosságú az eszközök, az alkalmazások, a hálózatok és a rendszerek számára ahhoz, hogy megbízhatóan tudjanak együtt dolgozni és biztonságosan lehessen végezni az adatcserét, A versengő világításvezérlő eszközök és rendszerek között hagyományosan kevés vagy semmilyen interoperabilitás nem létezett, mivel a gyártók saját szabadalmaztatott technológiáik vagy az ipari szabványok saját verziójának kidolgozására és támogatására koncentráltak. A saját tulajdonú hardver és szoftver használata lényegében arra kényszeríti a felhasználókat, hogy a kompatibilitás biztosítására valamennyi terméket egyetlen beszállítótól szerezzenek be. Mivel a felhasználói igények idővel valószínűleg változni fognak,

egyetlen beszállítóra hagyatkozni növeli a felhasználó kockázatát, amikor új világítási rendszer felszerelését fontolgatja, függőséget hozva létre egy olyan beszállítóval kapcsolatban, aki esetleg nem képes ezeket a változó igényeket kielégíteni. Ilyen helyzetben a felhasználó azzal a döntéssel szembesül, hogy kezdjen egy teljesen újjal, vagy éljen együtt egy meglévő, egyre alkalmasabbabb rendszerrel.

A csatlakoztatott világítási rendszer számos kommunikációs réteget tartalmaz, ideértve a fizikai és adatcsatoló rétegeket (ahol az adatok keletkeznek), a továbbító és a hálózati rétegeket (ahol az adatok irányítása történik) és az alkalmazási réteget (ahol megtörténik az adatok értelmezése). A rendszerekben az interoperabilitást átjárókkal (gateway) lehet megosztani, amelyek elvégzik a különböző protokollok közötti „fordítást”. Amint azt a 3.7 ábra mutatja, az interoperabilitás egyik megoldása lehetővé teszi a lámpatestek és az érzékelők közötti adatcserét, míg egy másik a lámpatestek és a vezérlők közötti adatcserét teszi lehetővé, egy következő pedig egyszerű kommunikációs csatornát biztosít a központi vezérlőrendszer és az átjáró között egy helyszíni eszközhálózat felé. Konkrétabban alkalmazás-szintű kompatibilitásra van szükség annak biztosításához, hogy az eszközök és rendszerek ne csak „hallják” egymást, hanem meg is értsék, hogy mit mond a másik. Számos jelenlegi világítástechnikai protokoll alacsony szintű interoperabilitásra fókuszál, ami olyan, mintha több résztvevő be tudna csatlakozni egy telekonferenciába anélkül, hogy először meggyőződne arról, beszélnek-e közös nyelvet. Ha nem, akkor az információcsere tolmács nélkül nem megy.

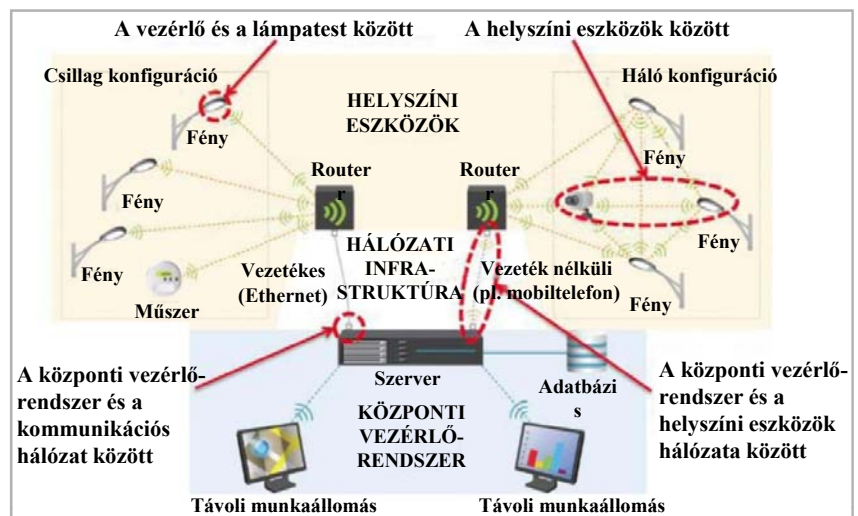
A szabványosított kommunikációs protokollok segíthetnek növelni az interoperabi-

[83] W.-L. Tsao: „POE Lighting Systems”, DOE SSL R&D Roundtable, Washington, D.C., 2016

litást, és egyszerűbb rendszerintegrációt kínálnak. Az ilyen szabványok következtében a vevők könnyebben tudnak választani a versengő beszállítók között, ezzel lecsökkentve annak beruházási kockázatát, hogy a jövőben egyetlen beszállítótól függenének.

A szabványos kommunikációs protokollok előnyök lehetnek a beszállítók számára is, mivel támogatják a piaci növekedést, ami valamennyi piaci szereplő számára hasznos. Több csoport is dolgozik közös specifikációk és szabványok összeállításán, amelyek támogatják a javított interoperabilitást – ideértve az Open Connectivity alapítványt, a TALQ konzorciumot, a oneM2M-et, a Bluetooth speciális érdekcsoportot, az Industrial Internet konzorciumot és a Zigbee szövetséget. A számítástechnológiák fejlődésével ezek a csoportok különböző megközelítéseket alkalmaznak vagy a „kirakós játék” különböző részleteire koncentrálnak. Jelenleg a kereskedelemben kapható csatlakoztatott világítási rendszerek között alacsony az interoperabilitás szintje. A DOE segíti az ipari konzorciumokat abban, hogy teljes mértékben fel tudják tárni a csatlakoztatott világítás teljes lehetőségeit az interoperabilitás növekvő szintjei kidolgozásának támogatásával. Amíg a kompatibilitás kevésbé fontosnak tűnhet a viszonylag kicsi, önálló világítási rendszereknél (pl. amelyek egyetlen konferenciatermet vagy épületszintet szolgálnak ki), a kihívások idővel növekedni fognak, amint egyre több rendszert kapcsolnak össze olyan kezdeményezések támogatásának hatására mint a „net-zero building” (nulla energiafelhasználású épület), a „smart-city” (intelligens város), a „smart-grid” (intelligens hálózat) és az „intelligent transportation” (intelligens szállítás).

A kompatibilitás az otthoni energiagazdálkodási rendszereknél továbbra is nagy akadályt jelent – a rendszerek költségével együtt. Ezeknek a Wink, a Belkin WeMo és az Apple HomeKit rendszerekhez hasonló megoldások segítségével történő beépítése lehetővé teszi a fogyasztók számára, hogy egyszerű interfésszel vezérelni tudják otthoni eszközeiket. Például a Wink Hub lehetővé teszi, hogy intelligens termékek sokféle csoportja „beszéljen ugyanazon a vezetéknélküli nyelven”, ezért könnyen vezérelhetők egyetlen Wink szoftver applikáció segítségével. A Wink szoftver applikációval a felhasználók könnyen tudják monitorozni és szabályozni az otthonukban lévő eszközök energiafelhasználást. Sok más otthoni integrációs rendszer viselkedik hasonló módon. A legtöbb csatlakoztatott világítási termékhez (pl. Philips Hue, GE



3.7 ábra – Lámpatestek, érzékelők, műszerek, átjárók és vezérlőrendszerek – együttműködésben (Forrás: Michael Poplawski, PNNL, DOE SSL Market Development Workshop, Detroit, Michigan, 2014. nov. [84])

Link, Cree Connected). áthidalóra vagy hub-ra (ismétlő elosztóra) van szükség ahhoz, hogy egy helyi Wi-Fi hálózathoz lehessen csatlakoztatni. Az otthoni automatikus rendszerek közötti kompatibilitás leegyszerűsíthetné a használatukat és támogatná a fejlett világításvezérlések és otthoni energiavezérlő rendszerek elfogadását.

(Az említett termékekkel kapcsolatos bővebb információk: Wink: <http://www.wink.com/>; Belkin WeMo: <http://www.belkin.com/us/Products/home-automation/c/wemo-home-automation/>; Philips Hue: <http://www2.meethue.com/en-us/>; GE Link: <http://gelinkbulbs.com/>; Cree Connected: <http://creebulb.com/products/standard-a-type/connected-60-watt-replacement-soft-white-led-bulb>).

3.2.5 Csatlakoztatott világítási próba-program

A LED-technológia beérésével a csatlakoztatott LED-es világítási rendszerekből származó energiamegtakarítások maximalizálása egyre jobban fog függeni az épületi környezetbe történő sikeres integrálástól. A DOE szilárdtest-világítási programja szorosan együttműködik az iparral a csatlakoztatott világítási rendszerek technológiai fejlesztési szükségleteinek megállapításában és együttműködő kezelésében. A DOE e területen kifejtett erőfeszítéseinek középpontjában a csatlakoztatott világítási próba-program (CLTB) áll, amelyet a PNNL tervezett és működtet a piacérett csatlakoztatott világítási rendszerek képességeinek jellemzésére. E tanulmányok eredményei növelni fogják az új eszközök és rendszerek képességeinek és teljesítményének láthatóságát és átláthatóságát, valamint szigorú információ-visszacsatolási

hurkot hoznak létre annak érdekében, hogy a technológiai fejlesztők tájékoztatást kapjanak a szükséges fejlesztésekről, hiszen a DOE kiemelt jelentőségű területei az energiapiportok, az interoperabilitás, a konfiguráció összetettsége, a kiberbiztonság és a legfontosabb új funkciók.

A CLTB csatlakoztatott világítási próba-program olyan infrastruktúrával rendelkezik, amely lehetővé teszi beltéri és kültéri világítóberendezések hatékony telepítését. A beltéri lámpatestek felszerelésére két mennyezeti rácsozat áll rendelkezésre. Magasságuk állítható, hogy megkönnyítse a felszerelést, és különböző lámpatest-magasságokhoz lehessen beállítani. A rácsonak dugaszolható csatlakozói vannak az elektromos csatlakoztatás és az áramkör-szintű teljesítmény és energia mérésének megkönnyítésére az őket kiszolgáló elektromos paneleknél. A CLTB útvilágító lámpatestekhez alkalmas külön infrastruktúrával is rendelkezik; ennél ismét dugasz- és aljzat-párok segítik az egyszerű elektromos csatlakozást.

Több eszköz és rendszer teszteléséhez a CLTB-nek van egy szoftver-interoperabilitási platformja, amely lehetővé teszi, hogy az olyan felszerelt világítási eszközök és rendszerek, amelyek természetüknél fogva nem képesek az adatcserére, kommunikálni tudjanak egymással. A CLTB-vel már több kereskedelembe kapható beltéri és kültéri csatlakoztatott világítási rendszert szereltek fel a szoftver-interoperabilitási platform segítségével és tették hozzáférhetővé a csatlakoztatott világítási rendszerek és más tanulmányok számára.

[84] M. Poplawski: „Control System Interoperability: Can We Talk?”, DOE SSL Market Development Workshop, Detroit, Michigan, 2014.

3.2.6 Csatlakoztatott világítási alkalmazások

Érzékelő-hálózataikkal a csatlakoztatott világítási rendszerek oly módokon segítik az adatok gyűjtését és cseréjét, amilyenekre korábban nem volt lehetőség, és képessé teszik az épület tulajdonosait/működtetőit arra, hogy irányítsák és megértsék fizikai környezetüket, ami nagyobb termelékenységet, hatékonyságot, energiamegtakarítást és biztonságot tesz lehetővé. Ennek eredményeképpen több olyan világítási eszköz és rendszer vált hozzáférhetővé, amelyek le tudják jeleníteni saját energiafogyasztásukat és a beltéri pozíció alakulását nagyforgalmú épületekben, például áruházakban vagy repülőtereken. A csatlakoztatott világítási rendszereknek megvan a lehetőségük arra, hogy a Li-Fi-nek nevezett szélessávú kommunikáció új forrását fejlesszék ki, amely adatátvitelre modulálja a fényt. Amerika szerte városok építettek ki csatlakoztatott világítási platformokat a közvilágítást használva fel a hozzáférési csomópontok és az érzékelők telepítésének vázáként. A csatlakoztatott világítást kombinálják a spektrumok szabályozásával is különböző beállításokra azzal a céllal, hogy javítsák a hangulatot, a termelékenységet és az egészséget.

Energiamonitorozás

Az energiafogyasztási riportok kiemelt fontosságúak a világítási rendszerek számára azon egyszerű oknál fogva, hogy nem lehet hatékonyan menedzselni azt, amit nem tudunk mérni. A csatlakoztatott világítási rendszerek segíthetnek az épület-tulajdonosoknak megtudniuk azt, hogy a benntartózkodók hogyan használják a teret és kidolgozni olyan adaptív világítási stratégiákat, amelyek növelik a világítási energia hatékonyságát. Az adatokkal alátámasztott energiamedenzsment jelentősen képes lecsökkenteni az energiafogyasztást és új piaci lehetőségekre képes, ilyenek például a „fizess a teljesítményért” energiahatékonysági kezdeményezések, a jelenleg átalánydíjas tarifákon működő készülékek tényleges fogyasztásának leszámolása, a közüzemi igénybevétel (pl. csúcsidejű és egyéb igények szerinti) energiaügyletek ellenőrzött szolgáltatása, a szolgáltatás-alapú üzleti modellek olcsóbb és energiamegtakarításainak pontosabb validálása, valamint az elérhető (azaz piacképes) „épületenergetikai szolgáltatások” önrértékelése.

Ez a valósidejű információ segítheti a projekt éves megtérülését, amelyet a hagyományos világítási rendszer csatlakoztatott LED-világítással való lecserélésével re-

3.9 ábra – Szolgáltatások, amelyeket egy város kaphat, ha érzékelőkkel ellátott LED-es útvilágítási rendszert alkalmaz (Forrás: Himamshu Prasad, GE Lighting, DOE SSL R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016. febr. [86])



3.8 ábra – Példa az Enlighted cég Energy Manager szoftverének alkalmazására, amely egy épület energiafelhasználását mutatja (Forrás: Enlighted, Energy Manager Specification Sheet [85])

alizálódik. A 3.8 ábra példaként bemutatja az Enlighted cég Energy Manager rendszerét, amely az energiafelhasználást tünteti fel az adatfelvétel idejének függvényében, valamint az érzékelés és az ütemezés hatását az energiafogyasztásra. A DOE érdekelt abban, hogy megkönnyítse és fejlessze a tranzakciós energiapiacokat ilyen adatok szolgáltatásával; a különböző piaci szereplők – köztük az épülettulajdonosok – szeretnék ui. realizálni az elérhető – és talán piacképes – épületenergetikai szolgáltatásokat. A DOE együttműködik az ipari partnerekkel, hogy segítsen meghatározni és kiértékelni az energiafelhasználási adatok széles körű rendelkezésre bocsátásának módjait, és kidolgozni a megvalósított világítási rendszerek energiafogyasztásának mérésére szolgáló költséghatékony módszereket.

Intelligens városok

A LED-es útvilágítások jelentős megtakarításokat nyújtanak a városok számára a megnövekedett energiahatékonyság, a lecsökkent karbantartási költségek és a hosszabb élettartamok okán. Platformul is szolgálnak az érzékelős hálózatok integrálására, amelyek hozzáadott értéket előállító tulajdonsággal ruházzák fel a várost (l. a 3.9 ábrán). A sűrű érzékelőkkel rendelkező hálózat adatokat szolgáltat a város számára a levegő minőségéről, az

időjárás eseményekről, a biztonságról, a szabad parkolóhelyekről és a közlekedési helyzetről. Az útvilágítási oszlopok ideális helyek a környezeti érzékelők és a biztonsági infrastruktúrák számára – térfigyelő kamerák vagy akusztikus detektorok beépítéséhez, amelyek valósidőben érzékelik pl. a pisztolylövéseket és értesítik erről a rendőrséget. Ezeknek az adatoknak egy intelligens platformon keresztül felhasználásával a LED-es útvilágítás vezeték nélküli kommunikációs hálózatként működhet, ami sokkal költségesebb lenne, ha külön-külön alakítanák ki. Az adatokat központi adatvezérlőhöz lehet továbbítani, amelyeket azután személyre szabott irányítópultokkal tudják elérni az önkormányzati alkalmazottak, hogy informálódhassanak és felelősségi körüknek megfelelően intézkedhessenek.

A LED-es világítás már bebizonyította, hogy pénzt takarít meg a városok számára az elterjedt nagynyomású nátriumlámpás útvilágításhoz képest nyújtott nagyobb energiahatékonyság következtében. A csatlakoztatott világítás lehetőséget teremt a városi tisztviselők számára adaptív világítási stratégiák bevezetésére (pl. 100% fényerősséget állítva be az útvilágításnál sötétedéskor és fokozatosan lecsökkentve azt 50%-ra az éjszaka közepére, majd ismét teljes fényerősségre kapcsolva korán reggel az ingázók számára), ami további energiamegtakarítást tesz lehetővé. A csatlakoztatott közvilágítási lámpatestek megadják az önkormányzatok számára az egyes lámpaoszlopok helyét is, hogy jobban lehessen kezelni a vagyontárgyakat – különösen meghibásodások esetén.

[85] Enlighted: „Energy Manager Specification Sheet”, (http://info.enlightedinc.com/rs/enlighted/images/Energy-Manager-Spec-Sheet_0215.pdf)

[86] H. Prasad: „Intelligent Cities”, DOE SSL R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016

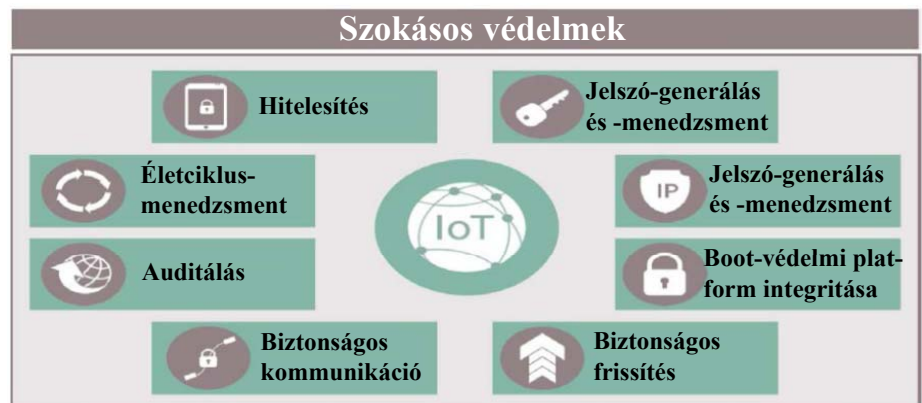
Beltéri helymeghatározás

A csatlakoztatott szilárdtest-világítási rendszereket már használják beltéri helymeghatározáshoz áruházakban és más nagy forgalmú épületekben Bluetooth-os és/vagy látható fénnel való kommunikáció (VLC) segítségével – személyre szabott, helyfüggő szolgáltatásokat nyújtva ezzel a benntartózkodók számára egy mobiltelefonos applikáció felhasználásával. A LED-es lámpatestekbe épített jeladók lehetővé teszik az épület kihasználásának és forgalmának monitorozását és elemzését, ami nagyobb működési hatékonysághoz, fokozott biztonsághoz és nagyobb bevételekhez vezethet például repülőterek, bevásárlóközpontok, logisztikai központok, egyetemek és egészségügyi intézmények esetén.

Néhány világítástechnikai gyártónak vannak olyan lámpatestei, amelyek rendelkeznek VLC és kisenégiájú Bluetooth-os (BLE) jeladó technológiával a kereskedők számára. A kereskedők azután ezeknek a lámpatesteknek a segítségével helyspecifikus adatokat tudnak továbbítani a vásárlókhöz, pl. kedvezményre jogosító kuponokat, vagy azt, hogy egyes termékek hol találhatóak az áruházban. A vevőnek előnyös lehet a megcélzott információ vagy terméktámogatás vétele, a kereskedőnek pedig az, hogy tudja, merre jár a vevő és milyen termék érdekli. Az ebből származó ismétlődő bevételi forrás kialakításának képessége a beruházás visszatérülésének felgyorsításával megváltoztatja a LED-ek elfogadásának gazdaságosságát a kereskedő számára. A vevő számára kifejlesztett applikáció-alapú szolgáltatásokon kívül a LED-es lámpatestekbe beépített jeladók lehetővé teszik, hogy a beltéri elemzések során mérjék az áruház vagy épület előtt elhaladók vagy oda belépők számát. Ezekkel a helyfüggő elemzésekkel meg lehet határozni, hogy hányan lépnek be először az épületbe, hány a visszatérő látogató és hogy mennyi időt töltenek el ott. A jeladók felhasználása az okostelefonok BLE vagy Wi-Fi jelekkel történő meghatározásához értékes információval szolgál a forgalomról és az adott helyen eltöltött időtartamról. Az épület forgalmának ez a fajta részletezése segíthet abban, hogy a vállalkozások megismerjék a csúcsg forgalom idejét, hozzáigazítsák a munkaerő-igényt, maximalizálják a visszatérő vásárlók számát és becsalogassák a vevőket.

Szélessávú kommunikációk VLC felhasználásával

A VLC felhasználásával történő szélessávú kommunikáció új forrásai megterem-



3.10 ábra – A Tárgyak Interneté általános védelmi stratégiái

(Forrás): Michael Armentrout, *Strategies in Light*, Anaheim, Kalifornia, 2017. márc. [88]

tésének lehetősége fontos lehet a jövőben ahhoz, hogy meg lehessen birkózni a mobiltelefonok globális adatforgalmának folyamatos növekedésével. A világszerte kiépített mobilhálózatokat elérő vezeték nélküli eszközök növekvő száma az elsődleges oka a mobilforgalom világméretű növekedésének. A VLC fejlesztéseket igényel az adatátviteli sebességek növeléséhez, ami a világítással történő adatátvitellel kapcsolatos kihívások egyike. Kiterjedtebb kutatásra van szükség a LED-ek modulációs sebességeinek növeléséhez is, ami meg tudná növelni az átviteli sebességet és értékessé tehetné ezt a plusz kommunikációs funkcióképességet. A növekvő átviteli sebesség szükségessé teheti a lézerdiodák vagy a szuper nagy lumineszcenciával rendelkező diódák kifejlesztését, amelyek mindketten nagyobb modulációs sebességgel rendelkeznek a világítás számára. Egyéb rendszer-szintű kihívásnak tekinthető a Li-Fi jelátadási képességének kifejlesztése; amint ui. a felhasználók mozognak a lámpatestek között, úgy változik a VLC-hez szükséges rálátási szög. Ehhez a lámpatesteknek nagy sebességű adathálózathoz alkalmas vezetékcsatlakozókkal kell rendelkezniük.

3.2.7 Biztonság

Amint egyre több eszköz válik a csatlakoztatott világ részévé, az előnyökhöz biztonsági kockázatok is társulnak, amint azt néhány publikált eset is bizonyítja, ahol a tűzfalakat világítási termékek meghekkelésével törték fel [87]. Az internethez csatlakoztatott világítási rendszer a hekkerek számára belépési pontokul szolgál minden olyan dologhoz, amely a hálózat tűzfala mögött van, például személyi számítógépekhez, kiskereskedelmi fizetési terminálokhoz vagy egy kormányhivatal érzékeny adatbázisához. A vizsgálatok azt mutatták, hogy gyakran még a legalapvetőbb biztonsági óvintézkedéseket sem követték,

amelyek megakadályozhatták volna ezeket a jogsértéseket, ideértve köztük a titkosítás és a hitelesítés hiányát, az érzékeny információk (pl. jelszavak) átadására szolgáló egyértelmű szöveges protokollok használatát és az alapértelmezett jelszavak alkalmazását a vevői környezetben [87]. E potenciális sebezhetőség miatt elengedhetetlen, hogy a gyártók a biztonságot már a kezdetektől építsék be a termékekbe és a szoftverfejlesztés életciklusába.

A csatlakoztatott világítási rendszerek és a Tárgyak Internetével kapcsolatos egyéb rendszerek további munkát igényelnek még a teljes biztonság eléréséhez. A 3.10 ábra bemutat néhány szokásos védekezési stratégiát a Tárgyak Internetéhez kapcsolt rendszerek és eszközök számára, hogy meg lehessen védeni és fenn lehessen tartani az adatvédelem biztonságát, és el lehessen kerülni a fontos vezérlőrendszerek tönkretételét a szolgáltatást érő támadások visszaverésével. A lámpatesteknek hitelesítési és biztonsági tanúsítványokkal kell rendelkezniük minden egyes csomópont számára, és az érzékelők adatait „alá kell írni” – igazolva ezzel azt, hogy a megfelelő érzékelőtől származnak. A Tárgyak Internetéhez kapcsolódó rendszereket sok esetben nem egyedül használják, nem egyedül a tulajdonosuk. Az eszközök és a vezérlő platform, ahol az adatokat gyűjteni és továbbítani lehet, különböző tulajdonosi, eljárási, menedzselési és csatlakozási domain-ekkel rendelkezhetnek. Emiatt az eszközöknek esetleg számos adathoz, fogyasztóhoz és vezérlőhöz kell hozzáférniük, miközben meg kell őrizniük az adatok titkosságát, ahol erre szükség van a felhasználók között. Fontos, hogy az adatokhoz hozzá lehessen férni, ugyanakkor a szokásos felhasználók között el is legyenek azok „szigetelve”.

[87] P. Jauregui: „Exploring and Addressing Security Risk in Smart Lighting Systems”, *Strategies in Light*, Las Vegas, Nevada, 2015. febr.

A felhasználói és személyes adatok védelme, a rendelkezésre állás biztosítása és a hálózathoz csatlakoztatott eszközök védelme a jogosulatlan hozzáféréssel szemben döntő fontosságú lesz azoknak a vállalatoknak, akik szeretnék megszerezni és fenntartani a bizalmat a csatlakoztatott világítást vásárlókkal.

3.2.8 Végkövetkeztetés

A DOE elsősorban azért szándékozik segíteni a csatlakoztatott világítási technológiát, mert az még nagyobb energiamegtakarítást tesz lehetővé, mint amekkora a hagyományos fényforrásokról a szilárdtest-világítási fényforrásokra való áttéréssel elérhető. Ez a nagyobb energiamegtakarítás nem csupán a csatlakoztatott rendszerek fejlettebb világításvezérlési lehetőségeiből következik, hanem egyéb végfelhasználók, például az épületenergetikai rendszerek tökéletesített működéséből, a kisebb energiátanszportból (a kültéri csatlakoztatott világítási rendszerektől) és más olyan értékes javaslatokból, amelyek valószínűleg többletköltséget generálnak, ha az energiavezérlési képesség kiesik. A csatlakoztatott világítási rendszerek messze nagyobb értékeket ígérnek, mint csupán energiamegtakarítást, ilyenek például a kereskedők számára biztosított helyi szolgáltatások. Ezek a plusz szolgáltatások hozzáadott értéket, bevételi forrásokat generálnak és olyan funkciókat, amelyek részben vagy egészében kiegyenlíthetik a javított energiavezérlési szolgáltatásokból adódó többletköltségeket, olcsóbbá vagy lényegében ingyenessé téve az energiavezérlési szolgáltatásokat – attól függően, hogy mekkora költséget jelent a járulékos funkcióképesség a potenciális szolgáltatások körében.

A DOE az ipari partnerekkel azon dolgozik, hogy segítsen felgyorsítani a csatlakoztatott világítási rendszerek fejlesztését, hogy 1) a lámpatestek saját maguk legyenek képesek mérni és jelenteni az energiafelhasználást, 2) rendelkezzenek magas alkalmazás-szintű interoperabilitással és 3) könnyebb legyen konfigurálni, beüzemelni és karbantartani őket a jelenlegi világítási rendszerekénél. E fókuszált erőfeszítés részeként a DOE egy sor workshopot rendez a csatlakoztatott világítással kapcsolatban, amelyek a közös ipari erőfeszítések lehetővé tételére és ösztönzésére fókuszálnak ezeken a területeken. (A 2015. novemberében, 2016. júniusában és 2017. júniusában megrendezett Csatlakozott világítási workshopokról részletesebb információk a következő webcímen találhatók: <https://energy.gov/eere/ssl/workshops>).

Ezek a workshopok segíteni fognak kijelölni azokat a magas prioritású K+F beruházásokat, amelyeket a közösségi és a magán szektorok is igényelnek.

3.3 Egészség és termelékenység – Fiziológiai válaszok

Amint az a 3.1.1 fejezetben olvasható, a LED-es világítástechnikai termékeket úgy lehet tervezni, hogy azok a látható fény bármelyik spektrumát képesek legyenek előállítani. Az újabb kereskedelmi termékek – például a Philips Hue – és a specialitások – például a Tealumen Light Replicator – az emittált spektrumot aktív módon képesek szabályozni különböző mértékű spektrális felbontással és fényerősség-szabályozással. Ezenkívül az új termékekkel a lámpatest által kibocsátott fehér fény színhőmérsékletét aktív módon szabályozni is lehet az ember pszichológiai reakcióinak kiváltása érdekében. Amíg azonban a LED-termékeknek igényre lehet szabni a spektrumát, a legtöbb LED-es világítási termék még nem képes aktív módon szabályozni a kibocsátott spektrumot. A LED vagy OLED fényforrás által emittált spektrum dinamikus „hangolásának” képessége és a fényerősség folyamatos vezérlésének széles tartománya a technológia megkülönböztető sajátossága, és az energiamegtakarításon túl hozzáadott értéket jelent a szilárdtest-világítás számára. A LED-ek színárnyalatának beállításával és a spektrum megismételhetőségével lehetővé vált új alkalmazások közé tartozik az emberi közérzetet javító világítás és a kereteszetek termőképeség-javítást célzó világítása.

A spektrum igényre szabásának képessége segít jobban megérteni azt, hogy milyen a legmegfelelőbb fény egy adott feladathoz, a kertészet termőképességének optimalizálásához, az emberi fiziológia pozitív befolyásolásához és új alkalmazások kidolgozásához. Az emissziós spektrum dinamikus szabályozása további értékeket teremthet azáltal, hogy lehetővé válik a spektrum időbeli változtatása a változó világítási követelményekre adott válaszként.

Noha egyre jobban megismerjük a világításnak a kertészetre, a fiziológiai válaszokra és a termelékenységre kifejtett hatását, fontos tudni azt, hogy az ezeket a hatásokat támogató kutatások többsége még kezdeti szakaszban van, és hogy további kutatómunkára van szükség a biológiai válaszok teljes megértéséhez. A LED-technológia ezeket az erőfeszítéseket a világítás valamennyi biológiai hatásának jobb kutatásához és megértéséhez alkal-

mas új, nagy felbontású eszköz felkínálásával tudja támogatni. Különösen a világításnak az emberi fiziológiára kifejtett – mind pozitív, mind negatív – hatásait kell jól megismerni és kontrollálni ahhoz, hogy maximalizálhassuk a világítás előnyeit, és a világítástechnikai gyártóknak csak jól alátámasztott és igazolható fiziológiai előnyöket szabad termékeikkel kapcsolatosan hirdetniük.

3.3.1 Az ember fényre adott fiziológiai válasza

Az emberek folyamatosan ki vannak téve természetes és mesterséges fénynek, amelyeknek minden része valamilyen módon hatással van fiziológiánkra – a fényforrás típusától függetlenül.

A legfrissebb kutatások jelentősen elősegítették annak megértését, hogy a fény nem csupán a látást teszi lehetővé, hanem igen fontos jelzés biológiai rendszereink számára, befolyásolja a cirkadián ritmust, a pupillareflexiót, az éberséget és még sok minden mást, amint azt a 3.11 ábra mutatja [59]. Azt is kimutatták, hogy a fény hatásos kezelést jelent sokféle állapotnál, pl. a szezonális affektív zavar (SAD) és a demencia esetén [89].

Fontos, hogy szemünkben a nem kép-képző fotoreceptor rendszer különbözik a látási rendszertől. Noha osztozik ugyanazon fotoreceptorok némelyikével, van saját egyedi spektrális és időbeli válasza a fényre. A nem kép-képző fotoreceptor a kék fényre reagál a legérzékenyebben és a melatonin-termelést szabályozza. Amikor nagy kék komponensű fény – például déli napfény – hatásának vagyunk kitéve, a melatonin-termelés lecsökken. A kék fény szabályozása ezért fontos a fény és az egészség szempontjából, de a hatások teljes megértéséhez még további kutatásokra van szükség.

Esettanulmányok kimutatták, hogy a világítás spektrumának bizonyos „beigazítása” a nap folyamán javítja az éberséget és a termelékenységet, valamint segít szinkronizálni a belső cirkadián órát. A fény-szintek reggel világosan jelezhetik belső óráknak, hogy a nap elkezdődött és hogy a testnek fel kell ébrednie. Ez az aktiválási fázis nagy kék tartalmú fényt igényel, amint azt a 3.12 ábra mutatja. Este csökkenteni kell a spektrum kék tartalmát, mivel az elnyomja a melatonin-termelést, és így nehezebb lenne elaludni.

[88] M. Armentrout. „Anatomy of Network Attacks and How to Protect Against Them”, Strategies in Light, Anaheim, Kalifornia, 2017

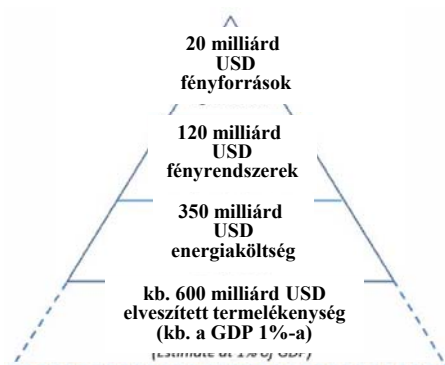
[89] A. Wojtysia: „The Physiological Impact of Lighting”, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, Kalifornia, 2015

A spektrális „hangolással” kapcsolatosan a kutatók a következőket mutatták ki [89]:

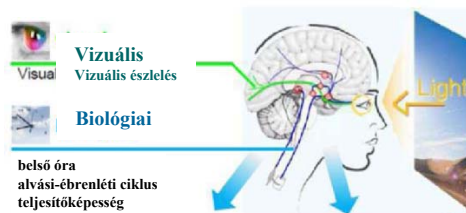
- Javul a tanteremben a diákok ébersége
- Javul a napközbeni aktivitás, éberség és jobb alvás éjszaka az idősebbeknél (ápolási otthonok)
- Javulás érhető el a krónikus fájdalom gyógyításában a nap strukturálásával és az alvási/ébredési ciklusok stabilizálásával
- Jobb esti és éjszakai pihenés és a reggeli aktivitás az utasok számára a repülőgépek utasterében
- Az unipoláris depresszió enyhítésére szolgáló terápia időtartamának csökkenése

A fent leírt élettani hatásokat fel lehetne használni a fény hatása alatt állók közérzetének és a világítási rendszerek hatékonyságának javítására. Túl korai lenne megmondani, hogy e tulajdonságoknak mekkora lehet a hatása, de a munkaerő termelékenységének már igen kis javulása is igazolhatja a fény erősségének vagy a fehér fény spektrumának napközbeni változtatására alkalmas személyi szabályozók beépítésének plusz költségét. A LED-technológia alkalmas lehet arra, hogy a fényáram, a spektrum és a fényeloszlás megkívánt szabályozását megvalósítsuk ilyen rendszerekben.

A DOE szilárdtest-világítási K+F workshopján és kerekasztal megbeszélésein a résztvevőknek az volt javaslata, hogy a DOE támogassa a fényre adott emberi fiziológiai válaszokkal kapcsolatos K+F tevékenységét. A szilárdtest-világítási technológia által kínált építőelemekkel (pl. LED-ekkel, fényporokkal és vezérlőeszközökkel) most már lehetővé válik közvetlenül összekapcsolni az ember fiziológiai válaszait a közérzet és a termelékenység javítása érdekében. A laboratóriumokban elért eredményeket azonban meg kell ismételni és igazolni valószerűbb világítási környezetekben, és az előnyöket egyértel-

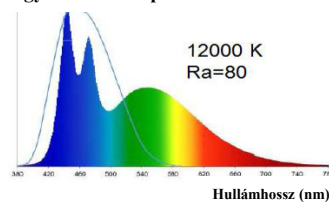


3.13 ábra – A világítás hatása a világgazdaságra 2014-ben (Forrás: International Solid-State Lighting Alliance, Global Solid State Lighting Industry Status Report and Market Trends, 2014 [90])

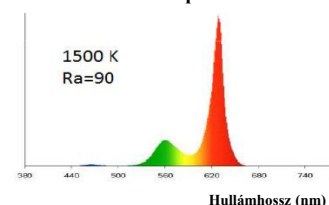


3.11 ábra – Hogyan befolyásolja a fény a biológiai rendszereket? (Forrás: Andreas Wojtyasiak, OSRAM, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, Kalifornia, 2015. jan. [89])

Nagyfokú melanopos stimulálás



Kis mértékű melanopos stimulálás



3.12 ábra – (a) A fény napközbeni aktiválása és (b) kisebb circadián-hatása az esti és éjszakai órákban (Forrás: Andreas Wojtyasiak, OSRAM, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, Kalifornia, 2015. jan. [89])

műen igazolni kell a kinyilatkoztatott válaszokhoz. E vizsgálatok eredményeit azután át lehetne ültetni a világítástervezés legjobb gyakorlataiba és olyan hatékony termékmegoldásokat lehetne kidolgozni, amelyek mind a megkívánt fiziológiai választ, mind a jó hatékonyságot biztosítják. Noha az energiára fordított kiadások messze meghaladják a világítási rendszerek beszerzésének és felszerelésének költségeit, a világítástechnikai ipar számára valószínűleg a legnagyobb lehetőség a termelékenység-növelés potenciáljának realizálása. Ez származhat közvetlenül a munkahelyek jobb megvilágításából vagy – indirekt módon – például az oktatás és az orvosi ellátás lehetővé tételével a fejlődő országokban [90]. A világítás világgazdaságra gyakorolt hatását az International Solid State Lighting Alliance (ISA) becslése alapján a 3.13 ábra mutatja.

3.3.2 Kertészetek

A kertészetek világítása egyre növekvő fontosságú alkalmazási terület, amely a szilárdtest-világítási fényforrások spektrumának igényre szabhatóságán és állíthatóságán, valamint a fényerősség és a fényeloszlás szabályozhatóságán alapul. Mivel a virágzás, a lombosodás, a növény magassága, a biomassza felhalmozódása, a nö-



3.15 ábra – A hideg fehér fénycső és a LED-fények hatása az antocián-termelésre a vörös salátánál (Forrás: Tessa Pocock, Rensselaer Polytechnic Institute, SSL Technology Development Workshop, Portland, Oegon, 2015. nov. [91])

vény immunitása és védelme, stressztűrő képessége és a phytoecutikus anyagok termelése mind fény által befolyásolt tulajdonságok, a fény spektrumában bekövetkező változások hatással vannak a növénytermesztés különböző aspektusaira, például a növény méretére, a csírázási folyamatra, a virágzásra, a vegetációra és még a tápértékre is [91].

Noha a spektrum kék és vörös tartománya a legfontosabb a fotoszintézishez – amint ezt a 3.14 ábra klorofill-görbéi mutatják – kertészeti körökben vita van a zöld fény szerepéről is. Számos szabályozott környezetben a növények csak a nagynyomású nátriumlámpák szinte teljesen zöld spektruma alatt növekednek megfelelően. Az egyes fajok specifikus növekedési periódusaival kapcsolatos optimális spektrumok, fényszintek és időtartamok jelenleg is folyó kutatási témák.

A növényi pigmentek elnyelik a látható spektrumot – beleértve a zöld tartományt is, amint az a 3.14 ábrán látható. A Rensselaer Polytechnic Institute által végzett kutatások kimutatták a spektrum igényre szabásának lehetőségét a növények tápértékének javítására. A vörös saláta vörös színéért például egy növényi pigment, az antocián a felelős, és úgy vélik, hogy ennek különböző egészségügyi előnye is van, például javítja a szem és a szív működését és a kognitív képességet [91]. A különböző spektrális fényeloszlású lámpák alatt növesztett vörös saláta különböző mennyiségű antociánt állított elő, amint azt a 3.15 ábra mutatja.

A kertészeti növények egyedi világítási igényeinek megértése lehetővé teszi a végtérmet hatékonyabb növekedését és ellenőrzését.

[91] T. Pocock: Tuning the Spectrum for Plant Growth”, DOE SSL Technology Development Workshop, Portland, Oregon, 2015

[92] L. Taiz, E. Zeiger, I. Møller és A. Murphy: „Plant Physiology and Development”, Sixth Edition, Oxford University Press, 2014

Ez, valamint a LED-ek fényhasznosításának folyamatos javulása és a LED-es világítási termékek költségeinek csökkentése javíthatja valamennyi szabályozott környezetű kertészet – üvegházak, beltéri szokásos és függőleges elrendezésű növénytermesztők – gazdaságosságát. A LED-technológia által lehetővé vált szabályozott környezetű kertészetek potenciális előnyei a következők:

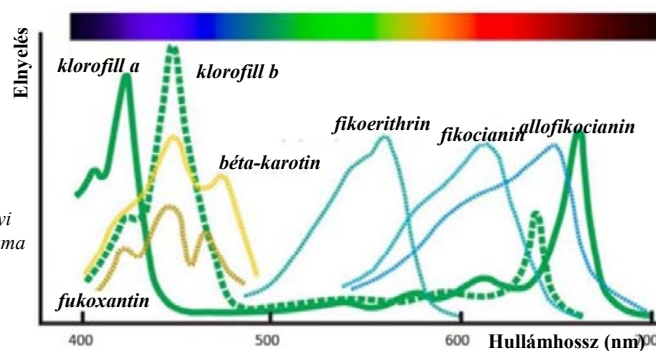
- kisebb energiafogyasztás
- kisebb vízfogyasztás
- helybeni élelmiszerellátás
- kevesebb vegyszer-igény
- a növények fokozott tápértéke
- a növekedési folyamat jobb ellenőrzése

A kertészeti világítási termékek teljesítőképességét más mértékegységekkel jellemzik, mint az általános világítási termékekét. Az általános világítási termékek teljesítőképességének központi mértékegysége a lumen (amelyet az emberi szem reakciója határoz meg), valamint a színminőséget jellemző mértékegységek, például a CRI színvisszaadási index és a CCT korrelált színhőmérséklet, amelyek biztosítják azt, hogy a fény minősége megfelelő az adott alkalmazáshoz. A kertészetek világításának jellemzésére általában azt használják, hogy a fényáramban hány foton található a fotoszintézis szempontjából aktív tartományban (400-700 nm) (a fotonok energiájától vagy színétől függetlenül), valamint a színminőség általános jellemzésére a színsávokat vagy a színarányokat. Noha a paraméterek az általános világítás és a kertészetek világítása esetén eltérőek, a világítástechnikai termék ugyanazon radiometrikus méréseiből számíthatók ki. A világítástechnikai szakemberek is ugyanazokat a világítási tervezési eljárásokat használhatják az üvegházakhoz és beltéri gazdaságokhoz, mint az általános világításhoz, miután meghatározták a termény világítási követelményeit.

Ez a dokumentum minden évben ismerteti a LED-ek és LED-es lámpatestek lm/W-ban kifejezett fényhasznosítási előrejelzéseit – specifikált színminőségek mellett. Ezeket az előrejelzéseket a 4.4 ábra tovább részletezi. A LED-ekre ugyanezeket a fényhasznosítás-növekedési előrejelzéseket felhasználva a 3.16 ábra bemutatja a kertészeti világítás fényhasznosítás-növekedési előrejelzéseit is.

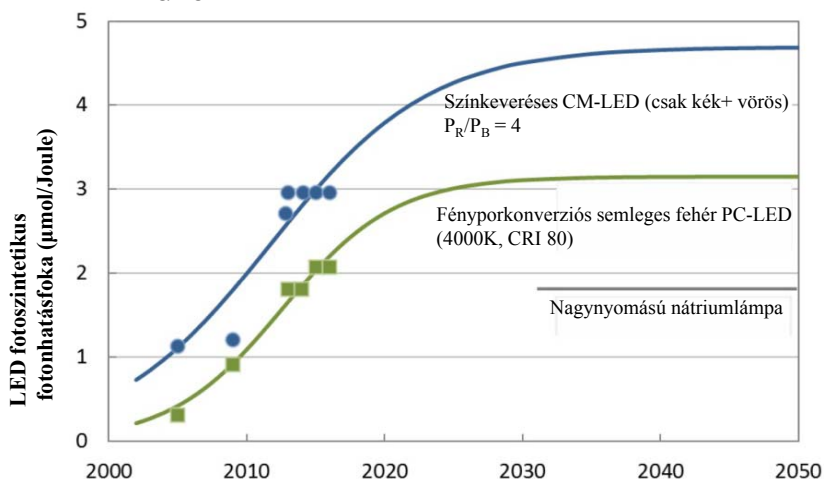
Néhány beépített kertészeti LED-es világítási termékről 2,5 $\mu\text{mol/J}$ körüli hatásfok-szinteket közölnek, amely jól illeszkedik az egyedi LED-csomagok teljesítőképességein alapuló teljesítőképesség-bebecslésekhez – tipikus lámpatest-vesztések figyelembe vétele mellett.

3.14 ábra – Különböző növényi pigmentek abszorpciós spektruma (Forrás: Lincoln Taiz et al.: „Plant Physiology and Development”, 2014 [92])



	Általános világítás	Kertészetek világítása
Kimenet	Lumen (lm)	Fotoszintetikus fotonáram
Hatásfok	Lumen/Watt (lm/W)	Fotoszintetikus fotonhatásfok ($\mu\text{mol/Joule}$)
Megvilágítás	Láb-gyertyafény (lm/ft^2) Lux (lm/m^2)	Fotoszintetikus fotonáramsűrűség ($\mu\text{mol/s.m}^2$)
Sugárzási hatásfok	Sugárzás fényhasznosítása (LER) (lm/optikai Watt)	Sugárzás fotoszintetikus fotonhatásfoka ($\mu\text{mol/s.optikai W}$)

3.2 táblázat – Az általános és a kertészeti világítás egymásnak megfelelő paramétereit és mértékegységeit



3.16 ábra – LED fotoszintetikus fotonhatásfoka (vagy LED fotoszintetikus fényforráshatásfoka) tipikus, semleges fehér színhőmérsékletű fényporkonverziós LED-architektúra esetén és csak 4,55 nm-es kék és 665 nm-es mélyvörös színt tartalmazó, hipotetikus színkeveréses LED-felépítés és 1:4-es optikai teljesítményarány esetén

Megjegyezzük, hogy ezek az előrejelzések 25 °C-os és 35 A/cm²-es meghajtóáramú, fix működési feltételeken alapulnak. A gyakorlatban a LED-ek gyakran magasabb hőmérsékleten üzemelnek, ami lecsökkenti a fényhasznosítást, és/vagy alacsonyabb áramsűrűségek mellett, ami viszont növeli azt.

A 3.16 ábra azt mutatja, hogy fényporkonverziós fehér LED-eknél a színkeveréses cm-LED-ekhez képest fényhasznosítás-esés következik be. Azonban az általános világítás fényhasznosításához hasonlóan, a fényporkonverziót és a közvetlenül vörös fényt kibocsátó LED-et használó hibrid megoldások a két görbe közé eshetnek, és mindkét megoldás előnyeivel rendelkeznek.

A két görbe 3.16 ábrán látható telítési értékei a LED-ek maximális fotoszintézis foton-hatásfokainak becslései, és egybevágnak a LED-ek megcélzott fényhasznosításaival a színkeveréses cm-LED-ek 4.2.4 fejezetben ismertetett architektúrája esetén. Megjegyezzük, hogy ezek kisebbek, mint a tökéletes fényhasznosítású fényforrások adott spektrumára kiszámított maximális értékek, amelyek megegyeznének az általános világításnál adódó sugárzási fényhasznosítással (LER). Mint a LER esetén, a fotoszintézis sugárzási fotonhatásfokot (PFER) meg lehetne szorozni a LED fényforrások fényhasznosításával (beleértve az optikai és a tápegység veszteségeit is) a rendszer tényleges hatásfokának meghatározásához.

4 A LED-technológia és LED-gyártás helyzete, lehetőségei és kihívásai

A LED-es világítástechnológia drámai módon fejlődött az elmúlt 10 év alatt, és elérte a rendelkezésre álló fehér fényű fényforrások legnagyobb fényhasznosításait. A gyártás terén megvalósított fejlesztések pedig lehetővé tették, hogy a LED-termékek ára eléggé lecsökkenjen ahhoz, hogy elfogadásuk valamennyi általános világítási alkalmazásban mérhető legyen. Az elért eredmények ellenére további javításokra van lehetőség a színminőség, a fényceloszlás, a formatényező és az épületekbe való beépítés terén. A LED-es világítás gyártás-technológiája is javítható a költségek csökkentése és a piaci behatolás növelése érdekében, ezzel az ország számára a lehető legnagyobb energiamegtakarítást eredményezve.

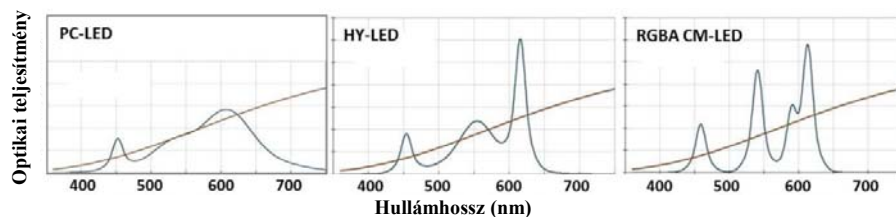
A következőkben megvizsgáljuk a LED-technológia jelenlegi helyzetét, javításának lehetőségeit és a felmerülő kihívásokat. A LED-technológiával kapcsolatos jelenlegi legnagyobb kihívások egyben a teljesítőképesség javításának néhány nagy lehetőségét is reprezentálják.

A következő részek nyolc kulcsfontosságú kihívást neveznek meg. A fejezetek vonatkoznak mind a fehér fényt előállító LED-csomagokra, mind a LED-csomagokat működtető LED-alapú lámpatestekre is, és megteremtik a megfelelő kapcsolatot az elektromos táplálás, a mechanikai integrálás, a hőelvezetés és az optikai fényceloszlás között.

4.1 A LED-csomagok technológiája

Ez a fejezet a fehér fény előállítására háromféle általánosan használt architektúrát tárgyal, amelyeknek szimulált optikai eloszlása a 4.1 ábrán látható. A fényporkonverziós LED (pc-LED) egy kék LED-et tartalmaz, amely zöld és vörös hullámhosszúságú lefelé konvertáló optikai rendszereket (szokásosan fényporokat) táplál, így hozva létre a fehér fényt. A hibrid LED (hy-LED) egy sárga-zöld hullámhosszúságú lefelé konvertáló rendszert tápláló kék LED-en alapul; az eszközben a kék és a sárga-zöld fény azután összekeveredik egy vörös LED fényével ismét csak a fehér fény létrehozásához. Az RGBA színkeveréses LED (cm-LED) 4 primer (vörös, zöld, kék és narancssárga) LED fényének összekeverésén alapul.

Ebben a részben a három felépítés kvantitatív elemzését ismertetjük úgy, hogy a



4.1 ábra – A fehér fényt adó LED-csomagok háromféle fajtájának tipikus szimulált optikai spektruma (PC-LED = fényporkonverziós LED, HY-LED = hibrid LED, RGBA CM-LED = RGBA színkeveréses LED)

Megjegyzés: A csúcshullámhossz és a relatív intenzitás mindhárom esetben az az érték, amelynél maximális a sugárzás LER fényhasznosítása 3000K meleg fehér színhőmérséklet, „standard” $R_a = 80$ és a kilencedik mélyvörös Munsell-színre vonatkozó $R_9 > 0$ színviszszaadási index esetén. A különböző források színének spektrális szélessége a technika mai állását tükrözi. Az egyes spektrumokban feltüntetett emelkedő görbe a feketetest spektrumát mutatja 3000K-en

teljes hatékonyságukat a különböző forrás színekkel kapcsolatos hatékonysági alcsoportokra választjuk szét, majd újra összekeverjük őket fehér fényre egy optikai modellezési munkalap (Yoshi Ohno által a National Institute of Standards and Technology-ban (NIST) kidolgozott szimulátor 7.5 változata) felhasználásával. Az elemzések feltárják a különböző felépítéseknek adódó különböző hatékonysági veszteségeket és a megcélzott javításokkal kapcsolatos lehetőségeket. Ezeket a hatékonysági kitérési lehetőségeket és hatékonyság-javulásokat a 4.1 és 4.2 táblázat részletezi.

Mindhárom fehér fényt adó struktúra esetén négy fontos teljesítőképességi jellemző idézhet elő fényhasznosítás-romlást, ha optimalizáljuk őket (különösen, ha egyszerűen): a meghajtóáram sűrűsége, a működési hőmérséklet, a CCT korrelált színhőmérséklet és a CRI színviszszaadási index. A velük kapcsolatos kompromisszumokat és a következő elemzésekhez választott értékeket az alábbiakban ismertetjük.

1. A meghajtóáram sűrűsége (35 A/cm²)

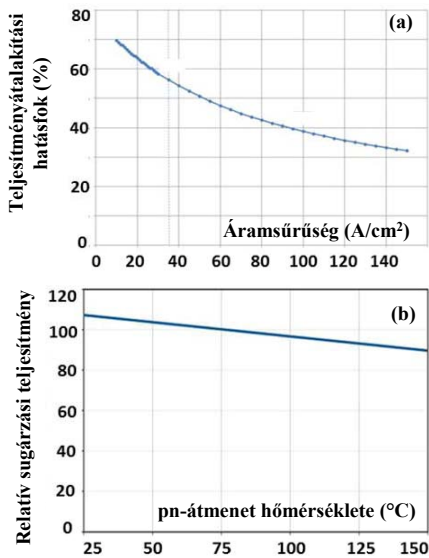
A meghajtóáram meghatározza a LED-csomagban keletkező fényáram nagyságát. A felső kategóriás kereskedelmi LED-csomagok 200 lm/W fényhasznosítást képesek elérni, de csak kisebb áramsűrűségek esetén, ezáltal kisebb teljes fényáram jön létre a LED-csomagban, s így nagyobb lesz a lumenenkénti ár. A nagyobb áramsűrűséggel meghajtott LED-csomagok nagyobb fényáramot állítanak elő, azonban a hatékonyság-esésnek nevezett jelenség következtében a kék LED-ek fényhasznosítása nagyobb áramsűrűségeknél csökkenni fog, amint az a 4.2(a) ábrán látható. Az egységítés érdekében a fejezet valamennyi elemzése 35 A/cm²-rel meghajtott LED-csomagokra vonatkozik.

2. A pn-átmenet hőmérséklete (25 °C-os szobahőmérsékleten)

Ez az a hőmérséklet, amely a diódát alkotó p- és n-típusú félvezetők közötti átmenetnél működés közben fellép. Az átmenet T_j hőmérséklete befolyásolja az eszköz fényhasznosítását. Amint az a 4.2(b) ábrán látható, a relatív fényáram (és ennél fogva a fényhasznosítás) az átmenet hőmérsékletének növekedésével csökken. E termikus esésnek nevezett jelenségnek valószínűleg nőni fog a jelentősége. A korábbi évek adataival és célkitűzéseivel való konzisztencia érdekében a következő elemzések hangsúlyozzák a standard ($T_j = 25$ °C-os) szobahőmérsékleten történő üzemelést. Mivel azonban a LED-csomagokat „keményen” is meg lehet hajtani (35 A/cm²-es vagy ennél nagyobb áramsűrűséggel), azok gyakran „forró” állapotban (25 °C-nál jóval magasabb T_j hőmérsékleten) üzemelnek. Ezért a „forró” állapotú teljesítőképességük gyakran nagyobb érdeklődésre tarthat számot, mint a szobahőmérsékleten adódó. Ezért van az, hogy sok LED-gyártó 85 °C-on teszteli a LED-eket. Az átmenet hőmérsékletét befolyásolja a LED-csomag konstrukciója, ideértve a hőelvezető anyagokat, a meghajtóáramot és a környezeti hőmérsékletet.

3. Korrelált színhőmérséklet (meleg fehér, 3000K)

Nagyobb fényhasznosítások elérése a meleg fehér LED-eknél nagyobb kihívást jelent, mint a hideg fehér LED-eknél a vörös lefelé konvertálók viszonylag gyengébb fényhasznosítása miatt. A meleg fehér LED-ek fényhasznosításának növelésével kapcsolatos fejlesztések azonban valószínűleg a hideg fehér LED-ek számára is előnyt fognak jelenteni. Noha a meleg fehér LED-ek jelenleg nagyobb kihívást jelentenek, mint a hideg fehér LED-ek, a meleg fehérnél elérhető sugárzás maximális fényhasznosítása valamivel nagyobb, mint a hideg fehér LED-eké.

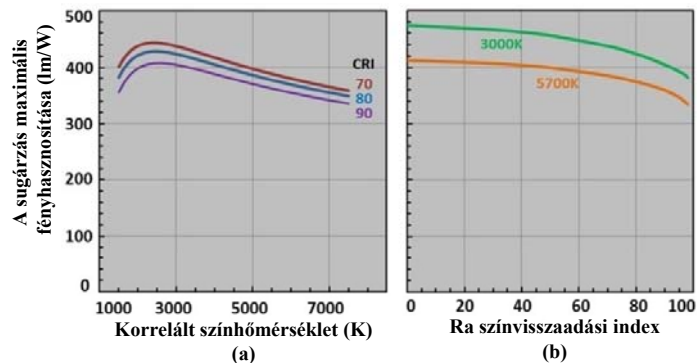


4.2 ábra – Példák az áramhatásfok-esésre (a) és a termikus hatásfok-esésre (b) (Forrás: a Cree XLamp XT-E adatlapja [93])

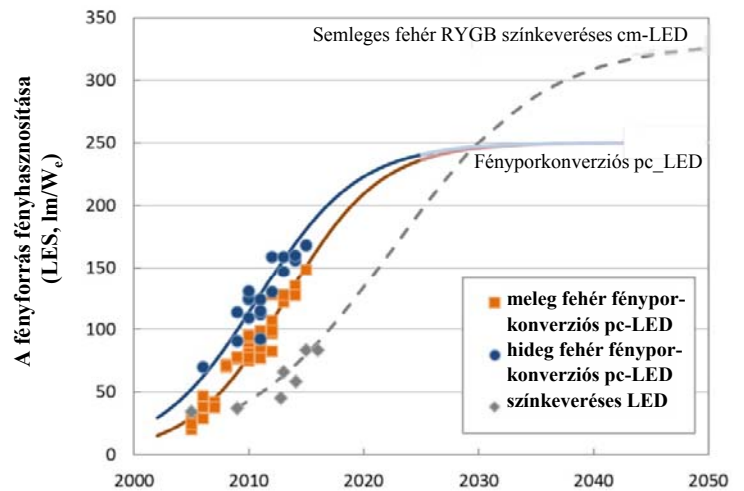
esetén. Amint az a 4.3(a) ábrán látható, a sugárzás maximális fényhasznosításai CRI 80 esetén valamivel nagyobbak (kb. 114 lm/W 3000K esetén) a meleg fehér LED-eknél, mint a hideg fehér LED-eknél (kb. 390 lm/W 3000K esetén). Ennek az az oka, hogy az emberi szem érzékenyebb a vörös fényre, mint a kékre.

4. Színvisszaadás (Ra = 80, R9 > 0)

A fényhasznosítás és a színvisszaadás minősége között inverz összefüggés áll fenn. Amint az a 4.3(b) ábrán látható, a CRI színvisszaadási index 80-ról 90-re történő növelése 10%-kal lecsökkenti a maximálisan elérhető fényhasznosítást. A gyakorlati adatok azt sugallják, hogy az esés a fényporkonverziós pc-LED felépítésnél lényegesen nagyobb (15-25%) a vörös fénypor hiányosságai és széles csúcsértékei miatt. Ahhoz, hogy meg lehessen felelni a fehér fényű alkalmazások többségének, viszonylag jó, azaz „standard”, Ra = 80 és R9 > 0 színvisszaadási indexre van szükség. (A standard CRI (Ra) egy fényforrásnak az a képessége, hogy pontosan visszaadja az R1...R8 nyolc standard színminta színeit (CIE 1995), de nem képes mérni a telített színek megjelenítésének képességét, különösen a vöröset, amelyet ezért az R9-es színmintával reprezentálnak. Emiatt a CRI-t gyakran kiegészítik az R9-re vonatkozó értékkel, hogy minősíteni lehessen egy fényforrás vörös színvisszaadási képességét. Például az Energy Star specifikáció R9 ≥ 0 értéket ír elő, de néhány specifikációs szervezet elkezdett nagyobb értékeket fontolgatni, pl. a Kaliforniai Energia Bizottság önkéntes specifikációja R9 ≥ 50-re szólít fel.)



4.3 ábra – A kisugárzott fehér fény fényhasznosításának elméleti határértékei a korrelált színhőmérséklet függvényében (a) adott CRI színvisszaadási index és (b) adott CCT korrelált színhőmérséklet esetén (Forrás: Hung and Tsao: Maximum White Luminous Efficacy of Radiation Versus CRI and Color Temperature: Exact Results and a Useful Analytic Expression, 2013. június [94])



4.4 ábra – 25 °C-on és 35 A/cm² bemeneti áramsűrűségeen mért kereskedelmi LED-csomagok fényhasznosításai. Megjegyzés: kék = hideg fehér (5700K) adatok (körök) és illeszkedő vonal; narancssárga = meleg fehér (3000K) adatok (négyzetek) és illeszkedő vonal. A 2016-os kereskedelmi termékek megközelítőleg 160 lm/W-ot értek el a hideg fehér és 140 lm/W-ot a meleg fehér típusok esetén. A fehér fényű pc-LED architektúra megközelítő hosszú távú potenciális fényhasznosításai telítettségük után, a 2020-2025-ös évek kezdetére vonatkoznak. A vörös, sárga, zöld és kék (RYGB) színekveréses cm-LED architektúra távoli potenciális fényhasznosítását pontozott szürke görbe mutatja. Amint azt a szöveges részben számos „úttörő innováció” esetén tárgyaltuk, a cm-LED architektúra jelenleg kisebb teljesítőképességű, mint a jelenleg domináló pc-LED felépítés, de megvan a lehetőség a következő években ennek túlszárnyalására.

Néhány piaci szegmensben egyre nagyobb az igény még jobb színvisszaadási minőség iránt. Emellett a színvisszaadási minőség értelmezése önmagában is aktívan tanulmányozott terület. (Valószínű, hogy a jövőben új mérések fogják helyettesíteni, vagy legalább gazdagítani a standard CRI-t oly módon, amely függ az adott világítási alkalmazástól. Például az Észak-Amerikai Világítástechnikai Mérnökök Szövetsége (IES) által nemrég szerkesztett TM-30 egy olyan új módszer a színvisszaadás értékelésére, amely tartalmazza a „színhűség indexet” és a „garnet indexet” is [95].)

4.1.1 A fényporkonverziós pc-LED-ek jelenlegi helyzete

A fényporkonverziós pc-LED felépítés volt az első és messze a domináns a fehér fényt előállító megoldások között. Három fontos előnye van a többi architektúrával szemben: az egyszerűség (csak egy LED-

típust kell „meghajtani”), a „hőmérséklet robusztussága” (az InGaN kék LED és az ittrium-alumínium-garnet (YAG) fényporos lefelé konvertálók tudnak működni viszonylag magas hőmérsékleteken) és a színtabilitás (a vörös, zöld és kék források arányait a gyártás során a fénypor optikai sűrűségével határozzák meg, és ez az idő múlásával viszonylag stabil marad). A 4.4 ábra mutatja a pc-LED-ek fényhasznosításának alakulását és fejlődését a

[93] Cree, Inc.: „Cree XLamp XT-E LEDs Data-sheet”, (<http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/Data%20and%20Binning/XLampXTE.pdf>)

[94] P.-C. Hung és J. Y. Tsao: „Maximum white luminous efficacy of radiation versus color rendering index and color temperature: exact results and a useful analytic expression”, Journal of Display Technology, vol. 9, no. 6, 2013

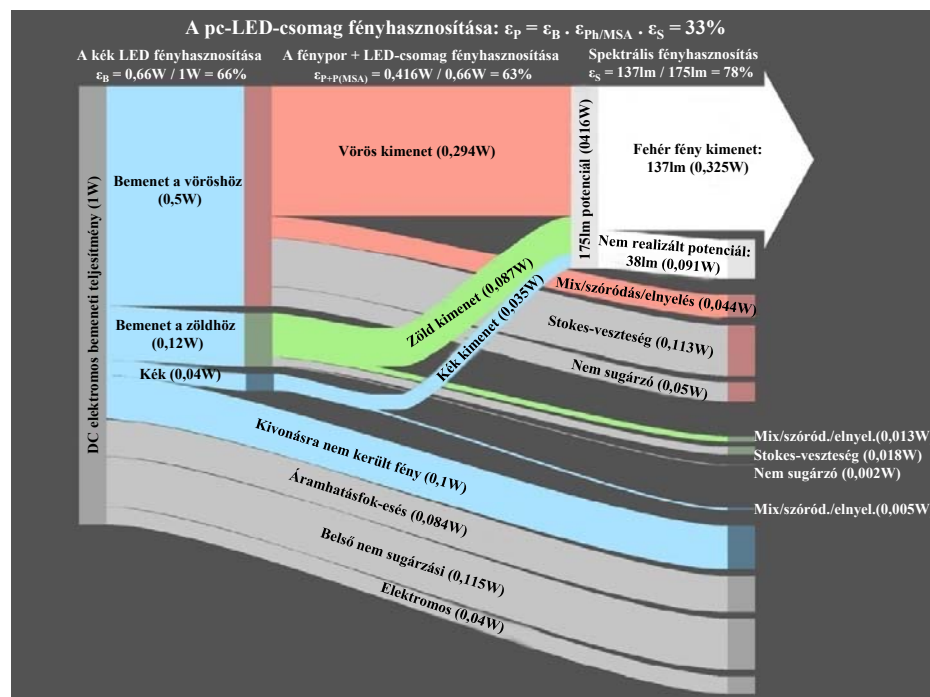
[95] Illuminating Engineering Society: „IES TM-30-15: IES Method for Evaluating Light Source Color Rendition”, 2015

DOE szilárdtest-világítási programjának kezdete óta. A fényhasznosítás mindössze 10 év alatt több mint háromszorosára – kisebb mint 50 lm/W-ról megközelítőleg 150 lm/W-ra – növekedett (35 A/cm² mellett). Az alapvető ok a kék LED fényhasznosításának növekedése; egyéb tökéletesítések is történtek azonban a fényporoknál (a hatékonyság és a hullámhossz hozzáillesztése az emberi szem érzékenységehez) és a LED-csomagok hatékonysága (optikai fényszórás/fényelnyelés) terén.

E javulások ellenére még sok a tennivaló. Amint azt a 4.4 ábra kék és narancssárga görbéinek telítettségi értékei mutatják, a pc-LED-eknél gyakorlatilag kb. 255 lm/W fényhasznosításra van lehetőség, ami 1,6-szerese a jelenlegi legjobb értéknek. Ahhoz, hogy el lehessen képzelni, hogy ez miből származhat, a 4.5 ábra bemutatja az elektromos áram és a látható fény energiájának becsült folyamatábráját egy jelenlegi, modern, kereskedelmi, meleg fehér LED esetére, amelynél hipotetikusán 1W-nyi (= 0,35A x 2,85V) energiát vezetünk be a kék LED-be az ábra baloldalán és 137 lm nagyságú fehér fényt kapunk az ábra jobb oldalán egy fénypor-konverziós pc-LED esetén.

A kék LED az 1W elektromos energiát 66%-os hatékonysággal 0,66W kék optikai energiává alakítja át. Közben a kék LED ennek az elektromos energiának a 34%-át, azaz 0,34W-ot elektromos ellenállás-veszteségek, valamint a kis áramsűrűségen injektálódó elektronok és lyukak sugárzást nem eredményező rekombinációja folytán adódó belső kvantumhatásfok-veszteségek (IQE), a nagyobb (35 A/cm²) áramsűrűségen történő üzemelés következtében fellépő fényhasznosítás-esés és a nagy törésmutatójú InGaN félvezetőanyag nem teljes fénykivonása folytán keletkező veszteségek formájában elveszít.

A zöld és vörös fényporok a 0,66W kék optikai energiát 63%-os hatásfokkal alakítják át 0,035W kék, 0,087W zöld és 0,294W vörös komponensből álló, összesen 0,416W optikai energiává. Közben az eredeti kék optikai energia 37%-a, azaz 0,244W elvész belső kvantumhatásfok-veszteségek, eredendő Stokes-veszteségek és keverési/szóródási/elnyelődési veszteségek formájában. Az IQE belső kvantumhatásfok-veszteségek a fényporokban gerjesztődő elektronok és lyukak sugárzást nem okozó rekombinációja folytán keletkeznek. Az alapvető Stokes-veszteséget a zöld és vörös fotonoknak a kék fotonokhoz képesti kisebb energiái okozzák. Veszteségek keletkeznek a zöld, kék és vörös fo-



4.5 ábra – Az elektromos áram és a látható fény energiájának folyamatábrája egy 2016-os kereskedelemben kapható modern meleg fehér pc-LED-csomag esetén (Forrás: Tsao, Coltrin, Crawford és Simmons: Solid-State Lighting: An Integrated Human Factors, Technology, and Economic Perspective, 2010. július [96]. Megjegyzés: Az ábra azt mutatja meg, hogy 1 W = 0,35 A x 2,85 V egyenáramú teljesítmény hogyan oszlik meg hasznos és nem hasznos (vesztési) ágakra a fehér fény előállítása során. A különböző útvonalak színei a szóban forgó teljesítmény típusára utalnak: a szürke az elektronikus gerjesztést, a színes a különböző RGB hullámhosszakot, a fehér pedig a színek kombinációjából adódó fehér fényt jelöli. Az egyes veszteségi ágaknál jelöltük az abszolút teljesítményt és a közvetlenül megelőző anya-ágban képviselt százalékos értékét is.

tonok keverésénél, szóródásánál és néha a LED-csomag általi elnyelődése folytán is. Végül a 0,416W fehér optikai energia – amely spektrálisan egy 20nm-es a maximum felénél adódó teljes szélességű (FWHM) kék LED-sávra, egy 100nm FWHM zöld fényporsávra és egy 80nm-es vörös fényporsávra oszlik – 137 lm fényáramot eredményez. A fehér optikai energia maximális sugárzási fényhasznosítása (LER) 80-as CRI színvisszaadási index és 3000K korrelált színhőmérséklet mellett – ha optimálisan oszlik meg három vagy négy keskenyebb (20nm-nél keskenyebb) kék, zöld és vörös sávra – megközelítőleg 414 lm/W. Ez a 0,416W fehér optikai energia spektrálisan elosztva potenciálisan 175 lm (0,416W x 414 lm/W) fényáramot lenne képes előállítani. A LED-csomag spektrális hatásfoka így 78% (137 lm a maximális 175 lm-ből). Mindent összevetve a jelenlegi, modern meleg fehér fényű, kereskedelmi LED-csomag hatásfoka 33%, és ez a kék LED 66%-os hatásfokának, a fénypor és a keverés/szóródás/elnyelés 63%-os hatásfokának, valamint a fehér fény 78%-os spektrális hatásfokának az eredménye. Ezek az alcsoportokra osztott hatékonysági becslések és a teljes hatékonysági értékek meleg fehér fényre vonatkoznak. A

történeti és a jelenlegi kereskedelmi fényporkonverziós pc-LED-ek fényhasznosításai a hideg fehér fényűek esetén valamivel nagyobbak, mivel ezek a vörös fény kisebb optikai energiahányadát igénylik, és a vörös fény nagyobb veszteségeket okoz a pc-LED felépítésekben, mint a kék vagy a zöld. A legfontosabb veszteség a Stokes-hatásfokosítás (25% vörös esetén, szemben a zöld 15 és a kék 0%-ával). A második legfontosabb veszteségfaktor a fehér fény 15%-os spektrális hatásfokvesztése, mivel a jelenlegi 80nm-es FWHM vörös fénypor emissziós vonalszélessége a fény jelentős átsugárzását okozza a mélyebb vörös felé, ahol az emberi szem kevésbé érzékeny, amint azt a 3.3.1 fejezetben ismertettük.

4.1.2 A fényporkonverziós pc-LED architektúra lehetőségei és kihívásai

Amint azt a fentiekben tárgyaltuk, a jelenlegi, modern, kb. 137 lm/ fényhasznosítású kereskedelmi pc-LED-ek hatásfoka 33% körüli. Mivel ennél a konstrukciónál eredendően fellép Stokes-hatásfok-

[96] J. Y. Tsao, M. E. Coltrin, M. H. Crawford és J. A. Simmons: „Solid-State Lighting: An Integrated Human Factors, Technology, and Economic Perspective”, Proceedings of the IEEE, vol. 98, no. 7, pp. 1162-1179, 2010. júl.

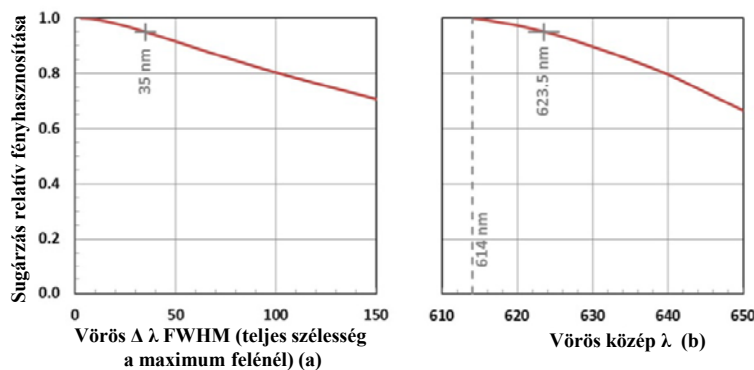
veszteség, 100% hatásfok nem lehetséges. Amint azt a 4.1 és 4.2 táblázat mutatja, a jelenlegi spektrális optikai teljesítmény-eloszlású pc-LED-ek maximális fényhasznosítása legfeljebb 220 lm/W (LER x Stokes-veszteségek) lehet – még akkor is, ha az összes többi veszteséget kiküszöbölnénk. Ez az optikai teljesítmény spektrális eloszlásának tökéletesítésével javítható, amint azt részletesen tárgyaljuk majd a következőkben, de nem valószínű, hogy valamennyi egyéb veszteség kiküszöbölhető. Ezért a „pc-LED-ek legnagyobb elérhető fényhasznosítását” 255 lm/W-ra, azaz 61%-os hatásfokra becsüljük, és ezt mutatják a 4.4 ábra telítettségi értékei a 2020-as évtől kezdődően 2025-ig.

A pc-LED-ekre lehetséges felső értéke megközelítőleg azonos a meleg és a hideg fehér fényűek esetén is. Ennek az az oka, hogy a meleg fehér fény a kéknél nagyobb vörös optikai teljesítményhányadot igényel, ami két ellentétes hatást eredményez. Másrészt az emberi szem érzékenyebb a vörös fényre, mint a kékre, ezért a meleg fehér fénynek eredendően nagyobb lesz a LER sugárzási fényhasznosítása a hideg fehér fényénél. Másrészt a fényporkonverziós pc-LED felépítéseknél a vörös fénynek nagyobb a Stokes-vesztesége, mint a kéknek, ezért a meleg fehér fénynek eredendően kisebb a fénypor + keverési/szóródási/abszorpciós hatásfoka, mint a hideg fehérnek. Ezek a hatások kioltják egymást, amihez az a végeredménye, hogy megközelítőleg hasonló potenciális hatásfokok adódnak.

Mind a meleg, mind a hideg fehér változatok esetén nagy lehetőségek vannak: a 255 lm/W lényegesen nagyobb, mint a jelenlegi modern típusok fényhasznosítása (137 lm/W a meleg fehér és 168 lm/W a hideg fehér típusok esetén) tipikus áram-sűrűségek mellett. Ilyen nagy fényhasznosítás eléréséhez számos fejlesztésre lesz szükség – a zöld és a vörös fényporok IQE belső kvantumhatásfokának további javításától a zöld fénypor vonalszélességének 50nm FWHM körüli mérsékelt szűkítésén keresztül a kék LED elektromos hatásfokának javításáig. Három különösen fontos lehetőséget (és kihívást) lehet meghatározni, amint azt a 4.5 ábra és az 4.1 és 4.2 táblázat mutatja.

Lehetőség/kihívás: A fénykivonás és a keverési/szóródási/abszorpciós hatásfok javítása

Amint az a 4.5 ábrából, valamint a 4.1 és 4.2 táblázatból látható, a kék LED fény jelentős hányadát (kb. 13%-át) nem sikerül kivonni a kék LED-ből, és a fehér (kék,



4.6 ábra – A fehér fényű sugárzás relatív fényhasznosítása (Forrás: Calculations based on White Light Simulator, Color rendering and luminous efficacy of white LED spectra, Yoshihiro Ohno, 2004. október [97])

Megjegyzés: A fehér fény relatív LER fényhasznosítása (a) a vörös fénypor FWHM vonalszélességének növekedésével a vörös fény adott, 614 nm-es közép hullámhosszánál és (b) a vörös közép hullámhosszának növekedésével adott 7 nm FWHM vonalszélességnél. A kék és a zöld vonalszélesség mindkét esetben 20 és 50nm FWHM volt, de a közép hullámhosszokat változtatni lehetett a LER optimalizálása érdekében – $R_a=80$ és $R_9>0$ megőrzése mellett. A 95%-os hatásfok-pontokat bejelöltük (35 nm FWHM és 623,5 nm közép hullámhossz).

zöld és vörös) fénynek ugyancsak jelentős részét (kb. 13%-át) nem lehet kivonni a fehér fényű LED-csomagból a keverési/szóródási/abszorpciós veszteségek miatt. Mindent összevetve, e két veszteségi csatorna minimalizálása a hatásfoknövelés jelentős lehetőségét reprezentálja. Az alapvető kihívás mindkét veszteségi csatorna esetén a kék fényt emittáló InGaN félvezető, valamint a kék fényt elnyelő és a soron következő fehér fény keverését/szórását végző fényporok és tokozóanyagok nagy törésmutatója. A nagy törésmutatók és a szóródás együttesen azt okozzák, hogy a fény becsapódzódik a fehér fényű LED-csomagban, és hosszú benntartózkodási ideje végül is optikai abszorpcióhoz vezet. Az abszorpció bizonyos részét (pl. a kék LED által elnyelt kék fényt, vagy a zöld/vörös fényporok által elnyelt kék/zöld/vörös fényt) újra lehetne hasznosítani foton-reemisszió segítségével, de nagyobb részük elvész a parazita abszorbensek (pl. a fémkontaktusok, közbenső fázisok, erősen adalékolt, sugárzás szempontjából sötét félvezetőrétegek) folytán. Az egyik kihívás olyan módok kidolgozása, amelyekkel a fény mind a kék, mind a fehér LED-csomagokból sokkal gyorsabban tud kilépni – célszerűen az első áthaladás során. A lehetséges megoldások közé tartoznak a kisebb törésmutatójú anyagok, az új mikro- és nanooptikai formák, geometriák, vagy a koherens, ill. részben koherens irányított fénynyalábok. Egy másik kihívás olyan felépítések és anyagok kifejlesztése, amelyek minimalizálják a parazita abszorbenseket, vagy legalább annak a mértékét, amellyel a fény kölcsönhatásba lép velük.

Lehetőség/kihívás: A vörös lefelé konvertáló anyag vonalszélességének csökkentése

Amint azt a korábbiakban említettük, a

jelenlegi 100nm FWHM szélességű vörös fénypor emissziós vonalszélessége következtében a fény jelentős része a mélyebb vörös felé tolódik, ahol az emberi szem kevésbé érzékeny, és ez jelentősen hozzájárul a jelenlegi fényporkonverziós fehér pc-LED-ek elégtelen spektrális hatásfokához. Amint az a 4.6(a) ábrából látható, a sugárzás relatív fényhasznosítása (LER) keskenyebb vörös vonalszélesség esetén nagyobb – 15%-kal, 80-ról 95%-ra növekszik, ha a vonalszélesség a jelenlegi 100nm FWHM-ről 35nm FWHM-re csökken. Fontos megjegyezni, hogy a vonalszélesség akár 35nm alá történő csökkentésével további javulás érhető el anélkül, hogy ez rontaná a színvisszaadás minőségét. A kihívás tehát új vörös lefelé konvertáló anyagok – fényporok, kvantumpontok stb. – kifejlesztése, amelyeknek keskenyebb az emissziós vonalszélessége, ugyanakkor megőrzik a nagy (90%-nál nagyobb) belső sugárzási kvantumhatásfokot. A fénypornak közvetlenül a chipre (és nem attól távol) történő felvitele, a magas (85 °C-os) üzemi hőmérsékletek elviselése és a nagy (1 W/mm²) visszaverődő optikai fluxus is kritikus fontosságú. Végezetül, a keskenyebb vonalszélességű vörös lefelé konvertáló anyagok megjelenésével azok középső emissziós hullámhossza is fontossá válik. Amint az a 4.6(b) ábrából látható, a relatív LER annál nagyobb, minél közelebb van a középső emissziós hullámhossz a 614nm-hez. A 623,5nm-es közép hullámhossz 5%-os, a 630nm-es pedig 10%-os hatásfokromlással jár.

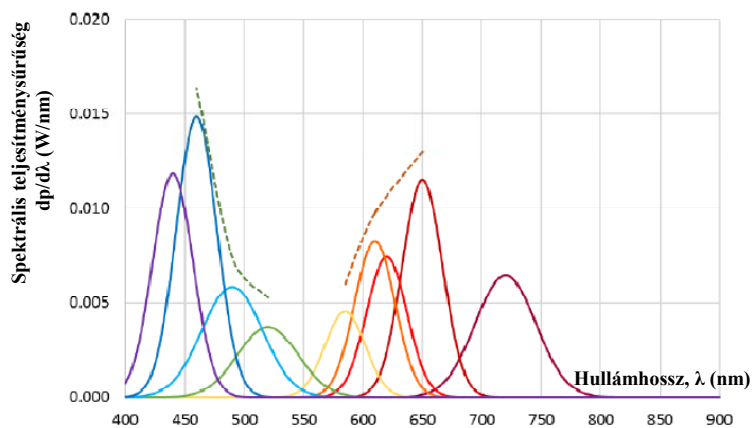
A keskenysávú lefelé konvertáló vörös anyagok terén új fejlesztési eredmények születtek. A GE folytatja „Tri-Gain” már-

[97] Y. Ohno: „Color rendering and luminous efficacy of white LED spectra”, Proceedings of SPIE, vol. 5530, p. 88, 2004. okt. 20..

kanevű világítástechnikai termékeinek fejlesztését, amelyeknek jellemzőjük a keskeny sávú vörös fénypor (PFS). Ezek a fényforrások a fénypor keskeny vörös emissziós spektrumának köszönhetően kitűnő színminőséget és nagy fényhasznosítást mutatnak. A Lumileds kereskedelmi forgalomba hozta közepes teljesítményű LED-jeit, amelyek a cég „SLA” elnevezésű fényporát használják a vörös emisszióhoz, valamint a jó színminőség és a nagy fényhasznosítás elérésére. Még frissebb hír, hogy a Lumileds a Pacific Light Technologies chipen kialakított kvantumpont-jait használta fel közepes teljesítményű LED-jei keskenysávú vörös emissziójához. A kvantumpontos LED-ek elfogadható stabilitást mutatnak a chipre épített konfigurációnál, és közel vannak ahhoz, hogy kereskedelmi terméké váljanak. Noha nagy áttöréseket éretek el, a keskenysávú vörös emitterek még nem bizonyították a szükséges stabilitást a nagy fényerősségű LED-ekkel megvalósított alkalmazások terén.

Lehetőség/kihívás: A kék LED hatásfok-esése

A kék LED hatásfoka óriási mértékben javult, de még mindig alacsony áramsűrűségeknél a legnagyobb. A jelenlegi „legjobb” kutatási eredmények 80%-ot meghaladó hatásfokú LED-csomagokat eredményeztek, de csak viszonylag alacsony áramsűrűségek mellett. A piaci behatolás növelését elősegítő olcsó fény előállításához szükséges nagyobb áramsűrűségeknél a LED-ek hatásfoka csökken. A kb. 10 A/cm²-ről 35 A/cm²-re történő növelésnél bekövetkező úgynevezett „hatásfok-esés” kb. 10%, 100 A/cm²-re történő növelésnél pedig 15% körüli. A kihívás az lesz, hogy „kijátsszák” a hatásfok-esésért felelős kulcsfontosságú fizikai mechanizmust, az Auger-rekombinációt. Az Auger-rekombináció sugárzást nem okozó töltéshordozó-rekombinációs folyamat, amely nemlineárisan növekszik a töltéshordozó-sűrűséggel – és így az áramsűrűséggel. Az Auger-rekombinációs veszteségek elkerülésének lehetséges módjai: a konkurens sugárzási rekombináció arányának megnövelése (összetétel/geometria módosításával, vagy alternatív rekombinációs mechanizmusok segítségével, mint amilyen a lézerdiodák-nál alkalmazott stimulált emisszió), vagy a töltéshordozók sűrűségének csökkentésével (sávszerkezet/transzport módosításával, vagy alternatív geometriák alkalmazásával, mint amilyenek az alagút-injektálással összekapcsolt, egymásra épített aktív tartományok. E megoldások közül a legfontosabb az, hogy megértsük és kontrol-



4.7 ábra – A legmodernebb kereskedelmi LED-ek spektrális teljesítményeloszlása a hullámhossz függvényében. A pontvonalak a tekintet irányítását szolgálják és a „zöld hézagot” ábrázolják: a fényhasznosítás csökkenését a kéktől a zöldes-sárgáig, illetve a vöröstől a zöldes-sárgáig.

(Forrás: A spektrális teljesítménysűrűséget a Lumileds LUXEON Rebel Color Line 2017-es termékadatlapján megadott fényhasznosításokból, központi hullámhosszokból és spektrális szélességekből számítottuk ki [99])

láljuk az epitaxiális anyagok bonyolult szintézisfolyamatait – közben megőrizve a jelenlegi LED-struktúrákhoz gondosan kidolgozott anyagminőséget [98].

4.1.3 A feltörekvőben lévő hibrid hy-LED struktúrák: helyzet, lehetőségek és kihívások

A hibrid hy-LED architektúra kék LED, sárga-zöld fénypor és vörös LED kombinációjával állítja elő a fehér fényt. Ez egy nem szokásos, de feltörekvőben lévő elrendezés a fehér fény előállítására. Például a Cree TrueWhite és az Osram Brilliant Mix technológiájánál egy fényporkonverziós pc-LED-ből származó (a feketetést görbét szándékosan a zöld felé eltolt) zöldes-fehér fényt kevernek össze egy vörös LED tiszta vörös fénykomponensével. Ennek az elrendezésnek jelentős hatásfok-előnye van a megszokottabb fényporkonverziós pc-LED felépítéssel szemben, mivel a vörös LED-nél nem lép fel Stokes-vesztés a vörös fény előállításánál, és a vörös LED-eknek eredendően keskeny a vonalszélességük – kis eltolódásokkal a mély vörös felé, ahol az emberi szem viszonylag érzéketlen. A hibrid hy-LED „felső lehetőségeként” 280 lm/W fényhasznosítást, azaz 68% hatásfokot jelölnek meg. Ezzel szemben a fényporkonverziós pc-LED „felső lehetősége” csak 255 lm/W, és ha nem sikerül keskenyebb vonalszélességű vörös fényport kifejleszteni, inkább csak a 220 lm/W-hoz közelít. Noha a hatásfokok nagyobbak lehetnek, ennek a felépítésnek is van azonban két fontos hátránya, mindkettő a vörös LED-hez jelenleg használt alumínium-indium-gallium-foszfid (AlInGaP) technológiával van összefüggésben. Az egyik az, hogy az AlInGaP-technológián alapuló vörös LED-ekkel összefüggő termikus hatásfokcsökkenés jó-

val nagyobb, mint az InGaP-alapú kék LED-ekkel kapcsolatos. Ezekhez az igen különböző termikus viselkedésekhez szükség van egy vezérlőrendszerre a konszisztens színpont megőrzése érdekében, ami növeli a világítási rendszer bonyolultságát és költségét. Várható, hogy az emberközpontú világítás számára egyre növekvő érdeklődésre számot tartó, állítható színhőmérsékletű fényforrások lefelé fogják hatni az ilyen vezérlőrendszerek költségeit, s így minimalizálni fogják a jövőben ezt a hátrányt. A másik az, hogy az AlInGaP-alapú vörös LED hatásfoka a rövidebb vörös hullámhosszúságoknál csökken – amint azt a 4.7 ábrán a különböző LED-ek spektrális teljesítménysűrűségei mutatják.

614 nm-nél – amely a világításhoz ideális vörös csúcspontnak tekinthető, mivel még elég hosszú a jó színvisszaadás biztosításához, de még elég rövid az emberi szem jó érzékeléséhez (észszerűen magas LER mellett) – a kutatások mai állása szerint a LED-ek külső kvantumhatásfoka (EQE) mindössze 25% körüli. Ezért ez az architektúra egy sor kihívással néz szembe, amelyek közül kettő ugyanaz, mint a fényporkonverziós pc-LED-eknél: a fénykivonás és a keverés/szórás/abszorpció hatásfokának a javítása és a kék LED hatásfokcsökkenése. De a legfontosabb az, hogy tökéletesíteni kell a vörös LED-eket.

Lehetőség/kihívás: A vörös LED hatásfokának javítása

Ez egy fontos, de kemény kihívás. Ha egy fényporkonverziós pc-LED-ben a még ép-

[98] E. Nelson, I. Wildeson és P. Deb: „Efficiency Droop in c-plane AlInGaP LEDs”, DOE SSL R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016

[99] Lumileds: „LUXEON Rebel Color Line Data-sheet”, 2017. jan. 22. (<http://www.lumileds.com/uploads/265/DS68-pdf>)

pen ideálisan keskeny vonalszélességű vörös fényport egy hibrid hy-LED 614 nm-es, nagy hatásfokú vörös LED-jére cserélnék ki, megközelítőleg 10% javulást lehetne elérni, és ha egy fényporkonverziós pc-LED-ben a nem ideális vonalszélességű vörös fényporral tennénk ugyanezt, kb. 25%-os lehetne a javulás. A legfontosabb kihívás leküzdeni az AlInGaP anyagokkal együtt járóknak látszó alapvető korlátokat: egy kedvezőtlen sáv szerkezetet az alacsony vörösben mind a töltéshordozó-transzport/gátlás és a sugárzást előállító (a tiltott sáv közvetlen vagy közvetett átlépése következtében előálló) töltéshordozó-rekombináció számára. Az AlInGaP új változata, vagy talán egy teljesen eltérő anyagrendszer (pl. InGaP) megoldást jelenthet. A félvezetőanyagok összetételének és sáv szerkezetének teljes kiaknázását gyakran a szokásos hordozók rács hibáival összefüggő feszültségek korlátozzák, habár a legutóbbi fejlesztések áttörést hozhatnak e problémák leküzdésében, ideértve a metamorf epitaxiát (amelyben a feszültség okozta hibák minimalizálódnak a rács-állandók fokozatos eltolásával) és a nano-kompatibilitást (amelynél a feszültség nano-geometriák segítségével mérséklődik). A szilárdtest-világítás előnyét élvezve ezeknek a kutatási eredményeknek és a vörös LED-eknél történő alkalmazásuknak fokozottabb megértéséből. Olyan új hordozók kifejlesztése is előnyös lehet, amelyeknek rácsai illeszkednek a 614 nm-es vörös LED-emisszióhoz alkalmas anyag-összetételekhez.

4.1.4 Hipotetikus színkeverés RYGB cm-LED architektúra: lehetőségek és kihívások

A négy színű színkeverés RYGB cm-LED felépítés – amelynél valamennyi színt közvetlenül LED-ek állítanak elő – tekinthető a fehér fényt előállító struktúrák végső megtestesítőjének. Nem kell a hullámhosszakat lefelé konvertálni, és így nem lépnek fel fényporkonverziós vagy Stokes-veszteségek. Amint azt a 4.4 ábra felső szürke pontvonal mutatja, ennek a „felső lehetősége” 330 lm/W nagyságrendjébe esik, és csak maguknak a LED-eknek a 80-90%-os hatásfoka szabna határt, valamint azok a veszteségek, amelyek a tiszta forrásszíneik fehér fénné történő összekeverésénél lépnek fel. Meg kell jegyezni, hogy ez a Clayton Christensen által „Az innovátor dilemmája: Amikor az új technológiák nagyvállalatok kudarcait okozzák” című munkájában tárgyalt „szétrebontó” innovációinak egyik tipikus esete [100]. Az acél minidarálókól kezdve, a személyi

A szín-források és ehér fényt előállító keverékük tulajdonságai				Mérték-egység	Ma	Jövő (célok)				
					2015	2018	2020	2025	Cél	
Kék forrás	LED vagy LD	Hatásfokok	Elektromos hatásfok		0,96	0,97	0,98	0,98	0,98	
			Belső kvantumhatásfok 0 A/cm²-nél		0,88	0,91	0,94	0,97	0,98	
			Hatásfok-esés 35 A/cm²-nél		0,90	0,93	0,96	0,98	0,99	
			Kivonási hatásfok		0,87	0,89	0,90	0,92	0,95	
		LED hatásfoka		0,66	0,73	0,80	0,86	0,90		
	Spektrális tulajdonságok	Hullámhossz (középső)	nm	459	459	459	459	459		
Hullámhossz (FWHM)		nm	20	20	20	20	20			
Sugárzási fényhasznosítás		lm/W	43	43	43	43	43			
Zöld források	LED vagy LD	Hatásfokok	LED hatásfoka		0,24	0,33	0,39	0,50	0,86	
			Hullámhossz (középső)	nm	530	535	540	540	540	
			Hullámhossz (FWHM)	nm	20	20	20	20	20	
			Sugárzási fényhasznosítás	lm/W	566	602	630	630	630	
		Fénypor	Hatásfokok	Belső kvantumhatásfok		0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
	Stokes-hatásfok				0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	
	Fénypor hatásfoka				0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	
	Hullámhossz (középső)			nm	540	540	540	540	540	
	Spektrális tulajdonságok		Hullámhossz (FWHM)	nm	100	80	70	50	50	
		Sugárzási fényhasznosítás	lm/W	486	486	499	552	552		
Borostyán-sárga forrás		LED vagy LD	Hatásfokok	LED hatásfoka		0,08	0,15	0,22	0,25	0,86
				Hullámhossz (középső)	nm	587	575	575	575	575
				Hullámhossz (FWHM)	nm	20	20	20	20	20
Vörös források	LED vagy LD	Hatásfokok	Sugárzási fényhasznosítás	lm/W	534	611	611	611	611	
			LED hatásfoka		0,44	0,50	0,60	0,65	0,86	
			Hullámhossz (középső)	nm	615	615	615	615	615	
			Hullámhossz (FWHM)	nm	20	20	20	20	20	
		Fénypor	Hatásfokok	Sugárzási fényhasznosítás	lm/W	304	304	304	304	304
	Belső kvantumhatásfok				0,90	0,93	0,95	0,95	0,95	
	Stokes-hatásfok				0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	
	Fénypor hatásfoka				0,68	0,69	0,71	0,71	0,71	
	Spektrális tulajdonságok		Hullámhossz (középső)	nm	612	615	615	615	615	
		Hullámhossz (FWHM)	nm	80	60	30	30	30		
Sugárzási fényhasznosítás		lm/W	313	314	308	304	304			
LED-csomag (optikai keverés/szórás/elnyelés) hatásfoka					0,87	0,89	0,90	0,93	0,95	

4.1 táblázat – A kék, zöld, borostyánsárga és vörös fényforrások jelenlegi és jövőbeni, célul kitűzött hatásfokai a fehér fényű LED-csomagok becslült (optikai keverési/szórási/abszorpciós) hatásfokaival együtt

számítógépen át a mobiltelefonokig ezek olyan technológiák, amelyek kezdetben lassan fejlődnek, végül azonban a jobb hosszú távú potenciáljuk miatt "nyerő" technológiává válnak. Ez persze nem mindig van így, de ha megtörténik, „átformáló erejű” lehet. A mi esetünkben a színkeveréses cm-LED-ek felépítése most még kisebb teljesítőképességű a jelenleg dominánsnak tekinthető fényporkonverziós pc-LED-eknél, de megvan a lehetősége arra, hogy az elkövetkező években ugrásszerűen fejlődjön.

Léteznek különböző megfontolandó színkeveréses cm-LED kialakítási lehetőségek: háromszínű, vörös, zöld és kék (RGB), négy színű RYGB (vagy RGBA) és talán még az ötszínű RYGB is. A jelen fejezet a négy színű RYGB-t tekinti át, mivel ez nagyobb végső hatásfokot, jobb színvisszaadást és nagyobb rugalmasságot nyújt a színérték beállítására és így az „intelligens” világításhoz (és az emberek kényelmének, egészségének és termelékenységének jobbításához), mint a háromszínű RGB. Az ötszínű megoldást nem vizsgáljuk, mivel egy ötödik szín csak elhanyagolható módon növeli a hatásfokot, a színvisszaadás minőségét és a színérték beállításának rugalmasságát.

Ezt a felépítést némileg hipotetikusnak lehet tekinteni. Vannak ugyan olyan speciális típusok, amelyek ezzel a felépítéssel ké-

szenek, a zöld és a borostyánsárga LED-fényforrások alacsony hatásfoka, valamint a vörös és borostyánsárga AlInGaP-alapú LED-fényforrások termikus stabilitása korlátozza teljesítőképességüket. A gyakorlatban a megközelítőleg 540, illetve 575 nm-es ideális hullámhosszúságú zöld és borostyánsárga LED-ek éppen az úgynevezett „zöld rés” kellős közepén vannak. A hatásfok csökken, ha a zöld emissziós hullámhosszakat akár a rövid, akár a hosszú hullámhosszak felől közelítjük. Amíg az InGaP alapú kék és lila LED-ek teljesítőképessége az elmúlt néhány évtized alatt gyorsan javult – alacsony áram-sűrűségeknél most 95%-ot elérő belső kvantumhatásfokokkal – az indium-tartalomnak a zöld spektrális tartomány emissziója érdekében való növelése gyorsan csökkenti a hatásfokot. Például ha a hullámhosszat eltoljuk a 450 nm-es kékről az 500 nm-es cián irányába, a teljesítményátalakítási hatásfok (PCE) megfeleződik, s ha tovább toljuk 525 nm-ig, további feleződés következik be.

Lehetőség/kihívás: A zöld/borostyánsárga LED hatásfokának növelése

A jó hatásfokú LED-ek megvalósítása a

[100] C. M. Christensen: „The Innovator's Dilemma: When New Technologies Cause Great Firms to Fail”, Boston, Massachusetts, Harvard Business School Press, 1997

zöld részben (pl. a zöld és a borostyánsárga LED-eké) kulcsfontosságú technikai kihívás, és a megoldások nehezen megfoghatóknak bizonyultak. Egyre több a bizonyíték arra, hogy a zöld LED-ek teljesítményképességét ugyanúgy korlátozza az áramesés, mint a kék LED-ekét, amelyért az Auger-rekombináció a felelős. Ezért az áramesés csökkentésével kapcsolatos alapkutatások mind a kék, mind a zöld LED-ek számára előnyök lehetnek [81]. Egy másik megoldandó kérdés a zöld és borostyánsárga emissziójához elegendő indiumhányadot tartalmazó InGaN és a szokásos hordozók közötti rács-illesztetlenséggel kapcsolatos feszültség. Elképzelhető, hogy ebben segítenek a hosszabb hullámhosszú InGaN alapú LED-ekkel kapcsolatos kutatási eredmények (pl. a metamorf epitaxia és a nano-kompatibilitás). Ha olyan InGaN-et lehetne előállítani, amely hatékonyan emittálna a vörösben, akkor ebből a zöld és a borostyánsárga teljesítőképessége is húzhatna hasznot. Továbbá bizonyíték van arra, hogy a zöld LED-ek alacsony hatásfokának jórészt az az oka, hogy a hatásfokesés nagyobb a zöldben, mint a kékben. Ezért a hatásfokesés jobb megértése és elkerülésének módjai a kékben segíthetné a zöld LED-eket is.

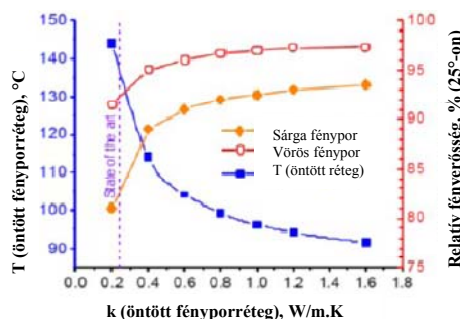
A hullámhossz lefelé konvertálásával működő LED-ek hatásfoka lényegesen nagyobb, mint a közvetlen borostyánsárga LED-eké, még a hullámhossz lefelé konvertálásával együtt járó Stokes-veszteségek figyelembe vétele után is. Ez azt mutatja, hogy a hatékony keskeny sávú lefelé konvertáló anyagok kifejlesztése, ha igen nagy PCE teljesítmény-átalakítási hatásfokú kék InGaN LED-ekkel kombinálják is őket, fontos közbülső lépés lehetne a fehér fényű színkeveréses cm-LED-ek felé. A 4.1 táblázat összefoglalja a kék, zöld, borostyánsárga és vörös fényforrások különböző hatásfokait (mind a fényporkonverziós, mind az esetlegesen közvetlen emittáló típusok esetére).

4.1.5 A LED-csomagok tokozása

A fényporkonverziós pc_LED-ek teljesítményképessége nem csak a LED emitterétől függ, hanem a tokozóanyagok felvitelétől is. A tokozás tulajdonságai hatással vannak a LED-csomag termikus és optikai tulajdonságaira is. A jelenlegi szilikon tokozóanyagok kis hővezetőképessége a fényporrészecskék felmelegedéséhez és így az átalakítási hatásfok gyors degradációjához vezethetnek, ha a LED-et nagy áramokkal hajtják meg. A kék fény fehérré történő átalakításából származó Stokes-veszteségek azt eredményezik, hogy az abszorbal

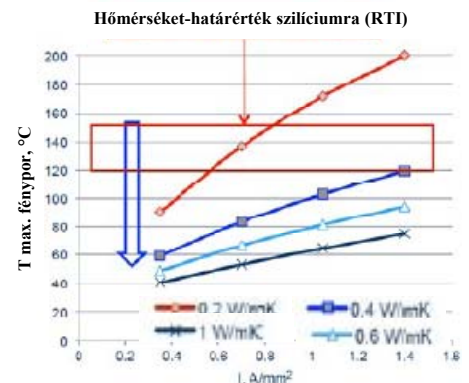
A LED-csomag által előállított fehér fény tulajdonságai és hatásfokai					Mérték-egység	Ma	Jövő (célok)				
							2015	2018	2020	2025	Cél
Meleg fehér: CCT=3000, R _a > 80, R _g > 0	Fényporkonverziós PC-LED	A fehér fény forrás-teljesítményének megoszlása	Kék			0,08	0,09	0,10	0,12	0,12	
			Zöld			0,21	0,36	0,45	0,42	0,42	
			Vörös			0,71	0,55	0,45	0,47	0,47	
		A fehér fény fényporkonverziós	Alapvető (Stokes+spektrális veszteségek)	lm/W	256	281	300	306	306		
			LER (spektrális veszteségek)	lm/W	323	354	372	381	381		
			Max. LER (nincsenek veszteségek)	lm/W	414	414	414	414	414		
	Tényleges (Stokes+spektrális veszteségek)		lm/W	137	175	208	237	255			
	A fehér fény hatásfokai	Forrás (nincsen Stokes-hatásfok)		0,53	0,62	0,69	0,77	0,83			
		Stokes-hatásfok		0,79	0,79	0,81	0,80	0,80			
		Spektrális hatásfok		0,78	0,85	0,90	0,92	0,92			
		Tényleges		0,33	0,42	0,50	0,57	0,61			
	Hibrid HY-LED	A fehér fény forrás-teljesítményének megoszlása	Kék			0,09	0,09	0,09	0,12	0,12	
			Zöld			0,49	0,49	0,48	0,42	0,42	
			Vörös			0,42	0,42	0,43	0,47	0,47	
		A fehér fény fényporkonverziós	Alapvető (Stokes+spektrális veszteségek)	lm/W	335	335	337	343	343		
			LER (spektrális veszteségek)	lm/W	374	374	376	381	381		
			Max. LER (nincsenek veszteségek)	lm/W	414	414	414	414	414		
	Tényleges (Stokes+spektrális veszteségek)		lm/W	166	189	215	243	285			
	A fehér fény hatásfokai	Forrás (nincsen Stokes-hatásfok)		0,49	0,56	0,64	0,71	0,83			
		Stokes-hatásfok		0,90	0,90	0,90	0,90	0,90			
		Spektrális hatásfok		0,90	0,90	0,91	0,92	0,92			
		Tényleges		0,40	0,46	0,52	0,59	0,69			
	Hipotetikus színkeveréses RGBa CM-LED	A fehér fény forrás-teljesítményének megoszlása	Kék			0,13	0,14	0,14	0,14	0,14	
			Zöld			0,29	0,24	0,27	0,27	0,27	
			Borostyánsárga			0,20	0,20	0,15	0,15	0,15	
			Vörös			0,38	0,42	0,44	0,44	0,44	
		A fehér fény fényporkonverziós	Alapvető (Stokes+spektrális veszteségek)	lm/W	390	400	400	400	400		
			LER (spektrális veszteségek)	lm/W	390	400	400	400	400		
			Max. LER (nincsenek veszteségek))	lm/W	414	414	414	414	414		
			Tényleges (Stokes+spektrális veszteségek)	lm/W	89	119	154	186	327		
		A fehér fény hatásfokai	Forrás (nincsen Stokes-hatásfok)		0,23	0,30	0,39	0,46	0,82		
			Stokes-hatásfok		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		
			Spektrális hatásfok		0,94	0,97	0,97	0,97	0,97		
			Tényleges		0,21	0,29	0,37	0,45	0,79		

4.2 táblázat – A fehér fény előállításához használt háromféle (pc-LED, hy-LED, RGBa cm-LED) felépítésű fehér fényű LED-csomagok jelenlegi és „felturbózott” jövőbeni „cél” hatásfokai. A „felturbózott” hatásfokok az 4.1 táblázatban felsorolt rész-hatásfokokon alapulnak.



4.8 ábra – (a) A fényporréteg hőmérséklete a hővezetőképesség függvényében és a LED-fényporok relatív fénysűrűségére kifejtett hatása; (b) a fényporréteg hőmérséklete csökken a tokozóanyag hővezetőképességének növekedésével (Forrás: Michael Bockstaller, Carnegie Mellon University, SSL R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016. febr. [101]. Ábrák: az OSRAM Sylvania szivességből)

energia 20-30%-a hő formájában elvész. A fényporrészecskéktől származó hő csökkenti azok hatásfokát, ha a hőt nem tudjuk elvezetni. A szilikon tokozóanyag hővezetőképessége megközelítőleg 0,2 W per méter Kelvin (W/m.K), ami nem elegendő a hőnek a fényporból történő elvezetéséhez. Ennek eredménye nagyobb fényporhőmérséklet és kisebb hatásfok. A hővezetőképesség 1 W/mK-re történő növelésével a fényporréteg hőmérsékletét 50 °C-kal vagy még többel is le lehetne csökkenteni, ami a fénypor hatásfokának 10%-os vagy annál is nagyobb javulását eredményezheti a LED-csomag standard üzemeltetése mel-



lett, amint azt a 4.8 ábra mutatja. A LED tokozóanyagok törésmutatójának növelése is javíthatja a LED fénysűrűsítését, ezáltal nagyobb hatásfokot eredményezve. Minél nagyobb a törésmutató, annál több fényt lehet kivonni a chip-ből. A törésmutató növelésének módszerei közé tartozik, ha a szilikon molekulájú „gerinchez” (fenil-alapú kémiaihoz) több fenilvégű csoportot adunk hozzá, mint a metil-alapú szilikonokéhoz. A kék LED-csomagoknál

[101] M. Bockstaller: „Enhancing LED Performance: A Case For Research on Encapsulant Materials With Enhanced Thermal Conductivity”, DOE SSL R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016

használt metilszilikonok törésmutatója 1,4, a fehér fényporkonverziós LED-csomagoknál általános használt fenilszilikonoké pedig 1,55. A fenilvégű csoportok adalékolásának van egy gyakorlati korlátja, ha ugyanis túl sok feniltartalmat adalékolunk, a szilikon stabilitása a LED optikai fénysűrűségei és hőmérsékletei alá csökken, így jelenleg lényegében 1,55-os törésmutatójú felső határ érhető el [102]. A Nagy törésmutatójú nano-kitöltőanyagok – pl. titán-dioxid vagy cirkónium-dioxid – adalékolására van lehetőség, noha a polimer láncokba való beépítésük kritikus a teljesítőképesség számára, ezért ez is intenzív kutatási területnek számít.

Lehetőség/kihívás: Nagy hővezetőképességű és törésmutatójú tokozóanyagok

A szilikon tokozóanyagok rossz hővezetőképessége lehetőséget kínál az eredményül kapott fényporkonverziós pc-LED hatásfokának javítására a fénypor-részecskékben – sőt még a LED emitterben is – létrejövő hőmérsékletes csökkenésével. A hővezetőképesség javulásának folyamata lassú. A hibrid anyagok (pl. a szilikon műgyanta nagy hővezetőképességű adalékanyagai) hőtranszportját a polimer/részecske mátrix hővezetőképességének növelésével lehet javítani. A részecske-kitöltő anyagok szóródási keresztmetszetének csökkentése több szervesen anyag adalékolása esetén nagyobb optikai átláthatóságot tesz lehetővé. Ha ezt a koncepciót szélsőséges módon folytatjuk szervesen tokozóanyagok – pl. alacsony olvadáspontú üvegek – felhasználásával, egy másik lehetséges módot kapunk a törésmutató és a termikus stabilitás javítására.

4.1.6 Általános következtetések és jövőbeni kilátások

A fényporkonverziós pc-LED, a hibrid hy-LED és a színkeveréses cm-LED felépítések összehasonlításából (amint azt a 4.2 táblázat mutatja) a következő konklúziókat lehet levonni:

- A fényporkonverziós pc-LED felépítést tovább kellene javítani a jelenlegi kb. 140 lm/W-ról a lehetséges 255 lm/W-ra, amit az optikai fénykivonás javításával, a LED-csomag 75% körüli hatásfokának 95%-ra történő növelésével, a vörös fénypor emissziós vonalszélességének 35 nm FWHM körüli történő szűkítésével és a kék LED hatásfokelésének a 35-100 A/cm²-es tartományban 10-20%-ról 5%-ra való csökkentésével lehetne elérni.
- A hibrid hy-LED felépítésnek a jelenlegi kb. 160 lm/W-ról a potenciális 280 lm/W-ra történő javuláshoz valamivel nagyobbak

Hatásfokok	2016	2018	2020	2025	Cél
LED-csomag várható fényhasznosítása (lm/W)**	137	175	208	237	255
Termikus hatásfok-esés (magnövelt Top)	88%	91%	93%	95%	95%
Meghajtó hatásfoka	88%	91%	93%	95%	95%
Lámpatest hatásfoka/optikai hatásfok	90%	92%	94%	95%	95%
Lámpatest teljes hatásfoka	70%	76%	81%	86%	86%
Lámpatest fényhasznosítása †	95	133	169	203	218

4.3 táblázat – A fehér fényű* LED-es lámpatestek jelenlegi és célul tűzött hatásfokai. A LED-csomagok fényhasznosításai a 4.2 táblázatban feltüntetett „felturbózott” hatásfokokon alapulnak.

*Meleg fehér LED-csomagok és lámpatestek esetén CCT=3000K és CRI=80.

** LED-csomag fényhasznosítás-előrejelzése meleg fehér pc-LED-ekre a 4.2 táblázat alapján

† A lámpatest hatásfoka a LED-csomag hatásfokának és a lámpatest teljes hatásfokának a szorzata

a tökéletesítési lehetőségek, de adódnak további nehéz kihívások is: növelni kellene a vörös LED hatásfokát (a jelenlegi kb. 20%-ról 80%-ra) és termikus stabilitását a fehér fényű világításhoz ideális 614 nm-es hullámhosszon.

- A színkeveréses cm-LED architektúra számára adódik a legnagyobb javulási lehetőség a jelenlegi 90 lm/W-ról a lehetséges 330 lm/W-ra történő fényhasznosítás-növekedés terén, de ehhez a legnagyobb kihívás járul: a zöld, a borostyánsárga és a vörös LED-ek hatásfokának a növelése.

A jövőben a teljesítőképességi jellemzők várhatóan még szigorúbbak lesznek, ami hatással lesz arra, hogy a fehér fény előállításához melyik felépítést fogják előnyben részesíteni és hogy a hatásfokjavítás különböző lehetőségei közül melyik lesz a fontosabb.

Először is, az alapszintnek tekintett 35 A/cm²-es áramsűrűség és a 25°C-os működési hőmérséklet meglehetősen önkényes. A gyakorlatban minél nagyobb a még tolerálható működési hőmérséklet, annál nagyobb a megengedhető áramsűrűség, és minél nagyobb az áramsűrűség, annál alacsonyabb a fény költsége (mindkét összefüggés kapcsolatban van az áramsűrűséggel és a termikus hatásfok-eséssel). Igen kíváncsi tehát a 100 A/cm²-es és e feletti működési áramsűrűség és a 85°C-os és ennél magasabb működési hőmérséklet.

Másodszor: minél jobban megismerjük a fénynek az emberekre és az emberi teljesítőképességre kifejtett hatását, annál fontosabbak lesznek a fény spektrális jellemzői. A CRI-vel mért jobb színvisszaadási minőség egyre fontosabbá válhat. Számos alkalmazás már most is CRI 90 vagy legalábbis 80-nál nagyobb értéket igényel. Egyéb spektrális jellemzőket is szükség lehet majd kontrollálni – például a fen-

tieken az új IES TM-30 irányelvekkel összefüggésben tárgyaltakat.

A nagy hatásfok, nagy áramsűrűség vagy az alacsony költségek irányába történő előrelépés segíteni fog mindezen tulajdonságok javításában. Feltehetőleg a hatásfoknövelés a legfontosabb, mivel ezzel megnő a LED-csomagonkénti fényáram (és így csökken a lumenenkénti költség) és lecsökken az eltávolítandó veszteségi hő (ami viszont indirekt módon csökkenti a LED-csomagok árát és a lumenenkénti költséget). Az áramsűrűség növekedésével nő a LED-enkénti fényáram és így csökken a lumenenkénti költség. Az alacsonyabb költségek elérése fedezetet fog képezni a nagyobb hatásfokú vagy nagyobb áramsűrűségű, bonyolultabb eszköz-struktúrák kifejlesztéséhez.

4.2 A LED-es lámpatestek technológiája

Noha a LED-csomag annak a teljes rendszernek a „szíve”, amely a fehér fényt előállítja és eljuttatja a környezethez és végső soron az emberi felhasználóhoz, de körül van véve mindkét (bemeneti és kimeneti) oldalról egyéb olyan komponensekkel, amelyek együttesen alkotják magát a lámpatestet. E fejezetben ezeket a komponenseket, valamint a fehér fény előállítását és továbbítását végző rendszerre kifejtett hatásukat fogjuk tárgyalni.

4.2.1 A lámpatestek fényelőállítási hatásfoka: fejlődés, lehetőségek, kihívások

Egy LED-es lámpatest fehér fény előállítási hatásfoka csak akkora lehet, mint a „szívét” képező LED-csomagé. A lámpatest egyéb alkotóelemei – a bemeneténél

[102] J. McDonald: „Advanced Silicone Materials for LED Lighting”, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, Kalifornia, 2015.

lévő tápegység és elektromos meghajtó, illetve a mechanikai és termikus hűtőrendszer, valamint a másik végén a fényterítését és/vagy irányítását végző optika – csak további veszteséget termel. A lámpatestek alkotóelemeivel kapcsolatos fejlesztések (és jövőbeni célok) – a meghajtó hatásfokának, a LED-csomag szobahőmérsékleten (25°C-on) mutatott fényhasznosításának, a magasabb (85°C-os) működési hőmérsékleten fellépő termikus hatásfok-esés csökkentésének és a lámpatest optikai hatásfokának javulási lehetőségei – a 4.3 táblázatban láthatók.

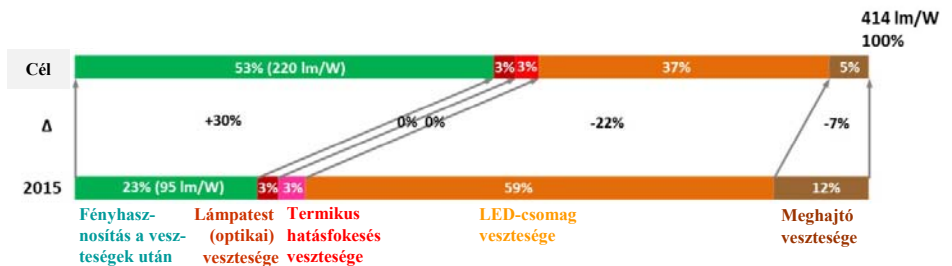
A táblázatban nem az átlagos, hanem a „legjobb eset” szerinti hatásfok-bebecslések láthatók, ezért bármilyen adott alkalmazásnál nem érhetők el feltétlenül. Sokféle világítási alkalmazás létezik, és mivel a lámpatest a végső vásárolt elem, amely megszabja, hogy a fehér fény hogyan illeszkedik az alkalmazáshoz, igen sokféle lámpatest-típus létezik. A végső sugárnyaláb fényerőssége, mérete, iránya és terítése, a lámpatest esztétikai megjelenése, alakja, mérete és ára és a környezet, amellyel a lámpatestnek kompatibilisnek kell lennie és amelyhez illeszkednie kell – nos a lámpatestnek ezt mind figyelembe kell vennie, ami azt eredményezi, hogy sokkal többféle típusuk létezik, mint a LED-csomagoknak. Ráadásul számos lámpatest működtet 35A/cm²-nél kisebb áramsűrűségeken LED-csomagokat, ezért a LED-csomag hatásfoka nagyobb lehet a 4.2 és 4.3 táblázatban közölt szinteknél. E tényezők igen különböző hatásfok-szinteket eredményeznek, amelyek a termékek teljesítőképesség-szintjeinek sokféleségét hozzák létre.

Emellett a piac éppen egy fontos átalakulás közepén van, ami a lámpák üzemeltetésére alkalmas típusoktól a LED-csomagok működtetésére szánt típusokra való átállást illeti. A beépített LED-es lámpatestek használatának állandó növekedése jósolható azoknak a hatásfok- és teljesítőképesség-előnyöknek köszönhetően, amelyeket a régebbi formatényezőjű lámpákkal nem lehet elérni.

A lámpatestek komponenseivel kapcsolatos nagyobb hatásfokok lehetőségeit a 4.9 ábra mutatja. Az ábra alapján két K+F prioritást fogunk tárgyalni az integrált lámpatestek hangsúlyozásával.

Lehetőség/kihívás: Elektromos meghajtó

A lámpatest bemeneténél található a tápegység, amely a váltakozóáramú hálózati teljesítményt a LED-csomagokkal kompatibilis feszültséggé és árammá alakítja át,



4.9 ábra – Az elektromos energia látható fénné történő átalakításánál fellépő veszteségek

Megjegyzés: Jobbról balra haladva láthatók az elektromos energia látható fénné történő átalakításának a különböző csatornáiban fellépő százalékos veszteségei a modern, kereskedelemben kapható lámpatesteknél – baloldalon az eredeti elektromos energia zöld látható fénné történő átalakításának végső százalékos értékével együtt. A 100%-os jelzés a LER megközelítő elméleti maximumának, 414 lm/W-nak felel meg. Az alsó csík a jelenlegi, 2016-os állapotot, a felső a hosszú távú célt mutatja, a közepén feltüntetett százalékos változások a különböző csatornák potenciális javulásainak a következménye. A LED-csomagok javulása a 4.2 táblázatban feltüntetett „felturbózott” hatásfokokon alapul.

és vezérlőfunkciókat is tartalmazhat, például fényerősség-szabályozót. Sokféle meghajtó-konfiguráció alkalmas különböző számú LED-csomag, különböző áramköri felépítés és különböző szintű – változó- és egyenfeszültségű – bemenet táplálására. A meghajtó egzakt teljesítőképességét a különböző meghajtó-struktúrák, a LED-meghajtók felépítése, funkcióképessége, mérete és ára fogják meghatározni. A 4.3 táblázat a meghajtók reprezentatív hatásfokait mutatja, jóllehet a mai meghajtó-konstrukciók némelyike jobb, némelyike viszont gyengébb teljesítőképességet mutat. A meghajtók feltehetőleg leggyengébb tulajdonsága nem a teljesítőképesség, hanem a megbízhatóság. A meghajtók megbízhatósága a leggyengébb láncszem a lámpatest összes többi komponense között. A meghajtók megbízhatóságának növelése jelentős lehetőség/kihívás – ideértve a számos al-komponensük alapvető megbízhatósági korlátait is. Lehetőség van a meghajtók teljesítőképességének javítására is, ami a leszabályozott állapotokban adódó hatásfokot és villogást illeti, és lehetőség van további szabályzási és kommunikációs funkciók beépítésére is a lámpatest energiamegtakarításának és funkcióképességének növelése érdekében. További kontrollszintet jelenthetne a jobb címzésre való képesség és a LED-ek egyedi láncainak vezérlése a kompakt formatényező és az alacsony ár megtartása mellett.

A fény előállításának másik végén a mechanikai, hűtő és optikai struktúrák találhatók, amelyeket arra használnak, hogy a LED-csomagokat nagyobb lámpatestekbe építsék be. A teljes lámpatest optimalizált integrálása az elektromos, termikus és optikai rendszer integrálását is figyelembe véve, miközben egy adott világítási alkalmazásnál új értéket teremtenek és energiát takarítunk meg – ez a lehetőségek/kihívások szélesebb perspektívája, amely sok előzőekben tárgyalt témát érint,

és kiemelt kutatási területet képez.

Ami a hőhátartást illeti, a LED-fényforrások – a hagyományos izzólámpákkal szemben – nem sugároznak hőt, ezért a veszteségek által generált hőmennyiséget maga a lámpatest kell hogy elvezesse. Ezért a LED-csomagok üzemi hőmérsékletét azok üzemi árama és a környezeti hőmérséklet határozza meg. Amint az a 4.2(b) ábrán látható, a termikus hatásfok-esés a LED hatásfok-esésében nyilvánul meg, amikor azt megemelt hőmérsékleten üzemeltetjük. A tökéletesített hűtés és/vagy a lecsökkentett üzemi áram csökkenteni fogja a LED működési hőmérsékletét és így nagyobb LED-hatásfokot eredményez. A lámpatestfejlesztők azt találták, hogy a termikus határfelületek eltávolítása a lámpatest belső hőelvezető pályájánál javíthatja a lámpatest hőelvezetését és a LED hatásfokát.

Ami az optikai hatásfokot illeti, a lámpatest optikai rendszere a világítási alkalmazástól, a megkívánt optikai fényeloszlástól és a világítástechnikák termék formatényezőjétől függően a lencsék, reflektorok, optikai keverőkamrák, távolban elhelyezett fényporok és diffúzorok sokféle elrendezését alkalmazhatja. Jól megtervezett lámpatestekkel bizonyos alkalmazások esetén 10%-nál kisebb optikai veszteségeket lehet elérni, és ezt az új megoldások még tovább csökkenthetik. Általában minél kevesebb és kisebb a felhasznált LED-csomag és minél kisebb a fényszóródási terület, annál jobb lehet az optikai rendszer hatásfoka. A lézerdiodák korlátai között olyan optikai rendszereket lehet elképzelni, amelyek rendkívül hatékonyak és újszerűek (pl. az ultravékony élvilágításos hullámvezető geometriák lehetőségeit). Noha a lámpatestfejlesztés hangsúlyának jelentős része a fényporkonverziós pc-LED felépítésekre esik, kivételesen jó teljesítőképességet lehetett elérni hibrid hy-LED architektúrákkal is. 2013-ban a Philips bejelentette egy 200 lm/W-os csőalakú LED-

lámpa (TLED) prototípusának kifejlesztését, amelynek színhőmérséklete 3000 és 4500K között változtatható, CRI színvisz-szaadási indexe nagyobb mint 80 és R9 értéke > 20 [103]. 2014-ben a Cree jelentett be egy 3200 lm fényáramú lámpatestet, amelynek fényhasznosítása meghaladja a 200 lm/W-ot 80-as CRI mellett, termikus egyensúlyi állapotban, miközben az ANSI 3000K-re vonatkozó színspecifikációin belül marad [104]. 2014-ben az Osram egy 3900 lm fényáramú LED-cső kifejlesztését is bejelentette, amely hasonló a Philipséhez, de fényhasznosítása 215 lm/W – vagy meghajtóval kombinálva 205 lm/W – 3000K és CRI 90 mellett [105]. Ezek a K+F prototípusok kielégítik a 4.2. táblázatban bemutatott 2020-as célokat, és azt igazolják, hogy holisztikus tervezéssel végzett gondos rendszer-optimalizálással lényegesen jobb teljesítőképesség érhető el. A vörös LED-ek felhasználása növeli a költséget és bonyolultabbá teszi a rendszert a hőmérséklet és idő függvényében elérhető színtabilitás és a tápegység konstrukciója tekintetében. Ezért – noha az első prototípusok igazolják a módszer ígéretes voltát – a gyakorlati korlátok megmaradnak.

Lehetőség/kihívás: Funkcióképesség beépítése a LED-es lámpatestekbe.

Felmerülő lehetőség/kihívás a meglévő és az új lámpatest-funkciók kisebb és könnyebb kivitelű lámpatestekbe történő beépítése, bizonyos funkciókat talán a LED-csomagba integrálva. Az egyik ilyen funkcióképességet az érzékelők adják. A csatlakoztatott világítás beköszöntével a lámpatestek a leggyakrabban előforduló hálózathoz csatlakoztatott „tárggyá” válhatnak, és a „Tárgyak Internetének” a környezet szabályzásához való felhasználásához (beleértve a világítás vezérlését is) mindenféle típusú érzékelőre szükség lesz. Egy másik ilyen funkció a programozható irányíthatóság. Amint azt a következő fejezetben ismertetni fogjuk, jelentős javításra van mód a fény felhasználásának vonatkozásában is, és a fényforrás körülmint elhelyezése jelentősen javíthatná annak hatásfokát.

Az optikai sugárnyaláb formálása egy másik ilyen funkcióképesség. Bizonyos út-világítási elrendezések speciális lencse-funkciókat építenek be a LED-csomag primer optikájába/tokozatába, ezáltal elkerülve a másodlagos optika szükségességét és a járulékos csatlakozó felületek optikai veszteségeit. Az elektromos meghajtó is egy ilyen funkcióképesség, és van lehetőség még arra is, hogy a GaN-alapú meg-

hajtó elektronikát monolitikus módon beépítsék a GaN-alapú LED-ekbe. Végezetül az, ha a lámpatesteket egyszerűen csak kisebbre készítik, nagyobb rugalmasságot és a lámpatestek sűrűbb elhelyezését engedi meg, ami viszont azt teszi lehetővé, hogy a világítási rendszerek rugalmasabban vezéreljék a világítási jeleneteket és az érzékelőkkel sűrűbb lefedettséget lehessen elérni.

4.2.2 A lámpatestek fényeloszlása

Miután a lámpatest előállította, a fényt el is kell juttatni a környezethez és végül a felhasználóhoz. Amíg az előző fejezet a fényelőállítás hatásfokát tárgyalta, ez a rész annak az alkalmazásnak a hatásfokára fókuszál, amelynél a fényt felhasználják – különös tekintettel a tértervezésre és a fény eloszlására.

Abszolút értelemben a „térbeli” hatásfok, amellyel az elektromos fényt használják, rendkívül alacsony. Tipikus felhasználásnál a lámpát elhagyó fotonoknak valószínűleg csak egymilliomodnál kisebb része jut el végül az emberi szem retinájához – még olyan zárt térben is, mint amilyen egy iroda. A veszteségi tényezők közé tartozik a megvilágított nem fehér tárgyak 100%-nál kisebb reflexiók tényezője, az emberi szem kisméretű apertúrája és a térhez és a megvilágított tér térszögéhez képesti kis látószöge, valamint a térben (vagy térrészben) annak megvilágítási idejéhez képest eltöltött, 100%-nál rövidebb idő.

E veszteségi tényezők mindegyikét nem lehet kiküszöbölni. A fényeloszlás, azaz a lámpatestből kilépő „fénynyaláb” dinamikus vezérlése segíthetne az épület használati számára a veszteségi tényezők csökkentésében, valamint a hely gyors és könnyű megváltoztatásában és visszaállításában. Olyan épületekben, ahol egy adott tér használata az év folyamán nem egyforma – például kiskereskedelmi vitrinek esetén – költséges és időigényes lehet a tér világításának újatervezése. A változtatható sugárzási szögű lámpatestek telepítése nem egyszerű, és motorral működtethető csuklós szerkezetek felszerelését teszi szükségessé, amelyek kihívást jelentenek a távvezérlés szempontjából, és nem egyszerű beszerezni őket a mennyezetbe. Egy könnyű, kompakt lámpatestből származó fény irányának és eloszlásának távirányításához jelentősen javítani kellene az épület tereinek felhasználását bizonyos szektorokban – például a kiskereskedelemben és a vendéglátásban. A következőkben öt olyan példát mutatunk be, amelyek a fény térbeli hatásfokára vonatkoznak.

A fénynyaláb-vezérlési technológia első példája az Osram OmniPoint távvezérlésű



4.10 ábra – (a) Az Osram OmniPoint lámpatestje és (b) a felhasználói interfész (Forrás: Jerry Ryu, Osram Sylvania, SSL R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016. február [106])

világítási rendszere (lámpatest, meghajtó és applikációs szoftver), amely lehetővé teszi, hogy a felhasználó azonnal átformálja a kimeneti fény alakját (azaz a sugárzási szöget, a fény irányát, eloszlását, alakját és erősségét) egy érintőképernyős, vezeték nélküli interfész segítségével. Amint az a 4.10(a) ábrából látható, a lámpatest egy egyedileg vezérelhető LED-ekből álló tömböt tartalmaz, amelynek fénye egy kis apertúrán keresztül lép ki, így a lámpatest a tér általános és/vagy kiemelő világítására is felhasználható az igényeknek megfelelően. A 4.10(b) ábrán bemutatott felhasználói interfészen a felhasználó ki tudja választani az általános és kiemelő világítást igénylő térrészeket, és szabályozni tudja a fényerősséget, ami jelentős javulást mutat a hagyományos világítási rendszerekhez képest, amelyek a mennyezeten lévő lámpatestek manuális beállítását igényelné [106].

Noha az Omnipoint fontos demonstrálása annak, hogy mit lehet elérni egy rugalmas lámpatest-konstrukcióval, különböző irányokba beállított nagyszámú LED-et tartalmaz, amelyek egyszerűen be- és kikapcsolhatók a fényeloszlás igényeinek megfelelően. Ez számos LED-csomag és vezérlőcsatorna használatát igényli, ami

[103] Philips: „Details of the 200lm/W TLED lighting technology breakthrough unraveled”, 2014. ápr. 11. (<http://www.newscenter.philips.com/main/stand/ard/news/articles/20130411-details-of-the-200-lm-w-tled-lighting-technology-breakthrough-unraveled-wpd#.VWiVYM9Viko>)

[104] Cree, Inc.: „Cree Shatters Efficiency Benchmark with First 200-Lumen-Per-Watt LED Luminaire”, 2014. jan. 23. (<http://www.cree.com/News-and-Events/Cree-News/Press-Releases/2014/January/200-LPW-fixture>)

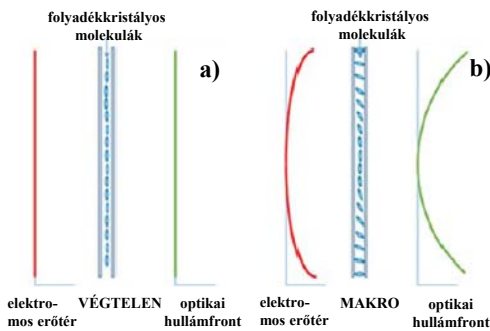
[105] OSRAM: „Osram constructs the world's most efficient LED lamp”, 2014. márc. 28. (http://www.osram.com/osram_com/press/press-releases/_trade_press/2014/osram-constructs-the-worlds-most-efficient-led-lamp/index.jsp)

[106] J. Ryu: „Ultimate Lighting Design Freedom & Flexible Reconfiguration”, DOE SSL R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016

[107] LensVector: „How It Works”, 2017 (<http://lensvector.com/technology/how/>)

[108] Varioptic: „Liquid Lens for Autofocus (AF)”, (<http://www.variopic.com/technology/liquid-lens-autofocus-af/>)

[109] D. Bishop: „Painting with Light and Data”, DOE SSL R&D Roundtable, Washington, D.C., 2015

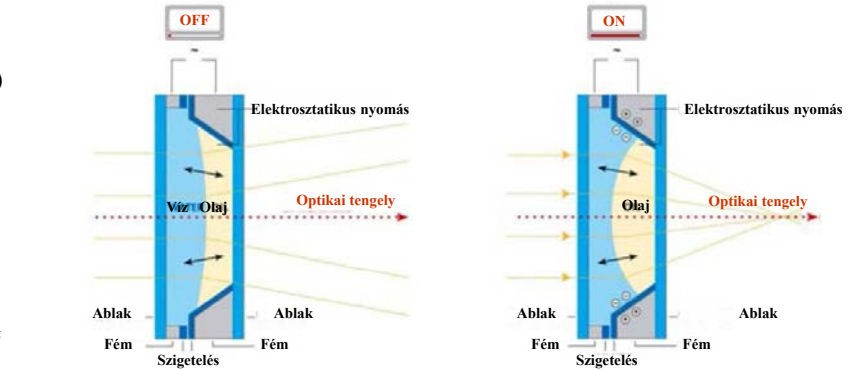


4.11 ábra – A folyadékkristályos lencse és az elektro-mos erőter optikai hullámfrontjára kifejtett hatás (a) állandó gradiens és (b) változtatható gradiens esetén (Forrás: LensVector, How it Works, 2017 [107])

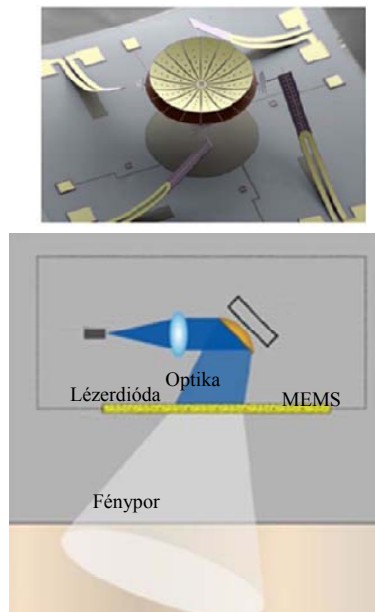
megemeli a rendszer költségeit és bonyolultságát. Egy olyan optikai fénynyaláb-vezérlő technológiára van szükség, amely könnyen képes megváltoztatni a fénysugár irányát, méretét és alakját. Különböző technológiák több kutatási területe foglalkozik ezzel az igénnyel – a MEMS mikro-elektro-mechanikai rendszerektől kezdve a folyadékkristályos és folyékony lencséken át a metaanyagokig.

A fénynyaláb-vezérlési technológia második példáját a folyadékkristályos lencsék szemléltetik, amelyek a folyadékkristályos molekulákat egy alakos elektro-mos erőterhez igazítják, hogy változó törésmutatót hozzanak létre a lapos lencsefelületen. Ezek a folyadékkristályos molekulák eltérő törésmutatót mutatnak különböző irányokban (a hosszú és a rövid tengely mentén). Mivel a molekulákat elektro-mos erőter veszi körül, orientálódnak és változó törésmutató-gradienst hoznak létre a felületen, hogy illeszkedjenek az elektro-mos erőter télerősségi gradienséhez. A 4.11 ábrán a folyadékkristályos lencse vázlata látható.

A fénynyaláb-vezérlési technológia harmadik példája az „elektronedvesítés” – ez egy másik módszer a lencsék alakjának megváltoztatására, a folyékony felületet elektro-mos erőter segítségével formálva. Így egyfajta sík folyadéklencse alakul ki úgy, hogy két, egymással nem elegyedő folyadékot két lemez közé zárnak a lencsecella létrehozásához, amint azt a 4.12. ábra szemlélteti. A működető folyadékba (pl. vízbe) nem poláris olajat merítenek, és hidrofób réteggel bevont, gyűrű alakú elektródákkal veszik körül. Amikor az elektródákra feszültséget kapcsolnak, megváltozik a folyadék érintkezési szöge a



4.12 ábra – A folyadéklencse működése és az elektronedvesítés (Electrowetting) (Forrás: Varioptic, Liquid Lens for Auto Focus [108])



4.13 ábra – (a) MEMS mikrotükör és (b) a MEMS mikrotükör világítási rendszerben való felhasználásának vázlata (Forrás: (a) David Bishop, Boston University, DOE SSL R&D Roundtable, Washington, DC, 2015. szept. [109] és (b) Helux Lighting)

felületen, ami viszont megváltoztatja a lencsét kialakító olajcsepp alakját. A lencse gyújtótávolsága a különböző olajméreteknek megfelelően változik. Az elektronedvesítésnél a kihívást olyan cella kialakítása jelenti, amely elég nagy egy LED-es lámpatest fénynyalábjának vezérléséhez.

A fénynyaláb-vezérlési technológia negyedik példáját a standard MEMS mikro-elektromechanikai gyártási eljárásokon alapuló, vezérelhető mikrotükrök szolgáltatják, amelyek elektronikusan beállítják a fénynyaláb pozícióját és profilját egy olyan eszközben, amely tízszer kisebb a

jelenlegi mechanikai beállítórendszereknél a MEMS alapú tükör max. 80°-os irányíthatóságra képes, és milliszekundumokban állítható. Kihívást jelent a MEMS mikrotükör-csomag rendszerbe építése és az elegendően alacsony költségek elérése. A 4.13 ábra egy gyártott mikrotükröt és a világítási rendszerbe történő beépítését mutatja be a fénynyaláb-vezérlés elérésére. A fénynyaláb-vezérlési technológia ötödik példáját a metaanyagok képviselik. Ez egy új, izgalmas lehetőségekkel teli kutatási terület. A beágyazott optikák fejlesztéséhez a dielektromos metaanyagok és metafelületek bevezetése lehetővé tehetné az irányíthatóság és a fénykivonási hatások vezérlését kontrollált, koherens fényszórással – kisebb optikai elnyelési veszteségek mellett, mint a hagyományosabb fém-alapú metaanyagok esetén. A változtatható fókuszú metalencsék vagy a konform lencsék új, dinamikus fénynyaláb-vezérlési képességeket eredményezhetnek a LED-es világítás számára. A fényemitterek és metaanyagok beágyazott optikai vezérléssel ellátott monolitikus eszközöket eredményezhetnek. Több kutatómunkára van azonban szükség olyan anyagok megtalálásához, amelyeknek nagy a törésmutatója, mivel az optikai metaanyagok kutatása új terület, és a látható spektrumon kívüli alkalmazásokra fókuszált.

Ezek a példák az új fénynyaláb-vezérlési technológiák kutatási irányait mutatják. A sikeres dinamikus fénynyaláb-vezérlés és a fény térbeli eloszlásának megoldása nagy világítási lehetőségeket kínál a nagyobb alkalmazási hatások és a termelékenység érdekében, beleértve az alacsony infrastrukturális költségekkel rendelkező rugalmas épülettereket.

4.3 A LED-gyártás helyzete

4.3.1 Az ellátólánc felépítése

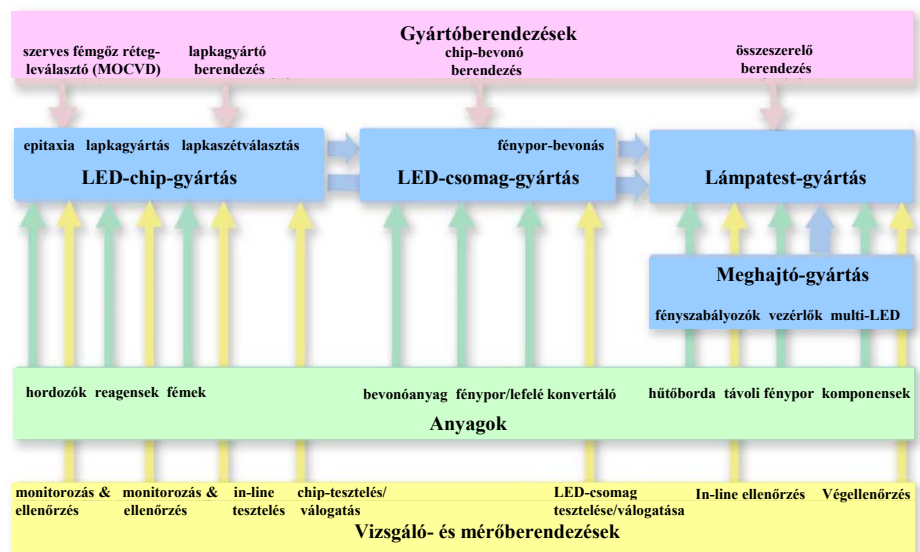
A gyártás ellátóláncának ismerete és megismerése döntő fontosságú bármilyen gyártási tevékenység sikeréhez. A LED-ek gyártási folyamatát általánosságban egymástól viszonylag független gyártási lépések sorozatával lehet definiálni. E gyártási lépéseket gyártóberendezések, anyagok és tesztelő berendezések biztosítása támogatja. A gyártási folyamatok, berendezések, anyagok és a tesztelés összessége képezi a gyártás ellátóláncát.

Az 4.14 ábrán bemutatott ellátólánc a LED-alapú szilárdtest-világítás gyártásának jelenlegi helyzetét mutatja, de az ellátólánc állandóan változik és folyamatosan fejlődni és érni fog. Például meglehet, hogy egy vertikálisan integrálódott gyártó e folyamatok közül jelenleg számosat vállalaton belül végez el, de a gyáripar fejlődésével az ellátólánc általában egyre jobban széttagozódik az optimális gyártási hatások érdekében. Ezenkívül a gyártás ellátóláncát befolyásolni fogja a technológia és a terméktervezés fejlődése, sőt a termék forgalmazása is – ideértve a földrajzi vagy a szabályozási szempontokat is.

A LED-alapú lámpatestek gyártási folyamata a LED-chipek gyártásával kezdődik, amibe beleértendő a LED-lapkák szerves fémgőz rétegleválasztással (MOCVD) történő növesztése, a LED-lapkák feldolgozása (többnyire hagyományos félvezetős gyártási lépésekkel) és a LED-lapkák szétválasztása egyedi LED-chipekké. A következő lépés tipikusan a LED-chipek „LED-csomagokká” történő összeszerelése, ideértve a kék LED-emissziót fehér fénné átalakító fénypor-anyag leválasztását. Végzetül a LED-csomagokat összeépítik egy meghajtóval, hűtőbordával, optikai komponensekkel és mechanikai elemekkel a vég-ső lámpatest vagy lámpa kialakításához. A gyártási folyamat állandóan formálódik, amint az egyes elemek finomodnak vagy kiesnek, illetve amint új elemeket fejlesztenek ki vagy új gyártási lépéseket iktatnak be. Végül soron egy adott termék optimális gyártási folyamata a részletes, rendszer-szintű optimalizálástól fog függeni.

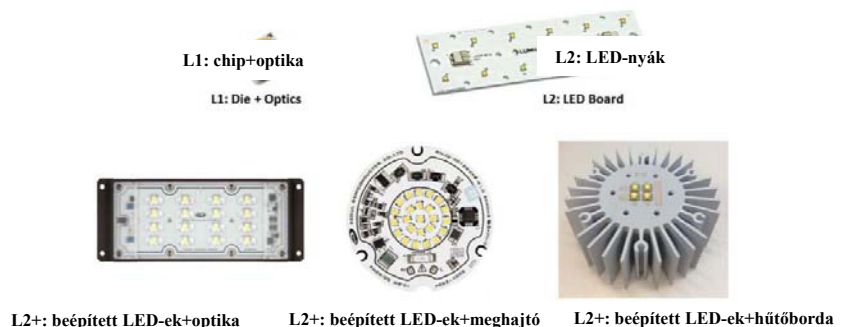
4.3.2 A LED-csomag („tokozott chip”) gyártási módszerei

A LED-chipek gyártási folyamatának lépései a következők: az aktív eszközrétegek hordozóra történő epitaxiális növesztése, a félvezető lapka feldolgozása az egyedi



4.14 ábra – A LED-alapú szilárdtest-világítás gyártásának ellátólánc

Megjegyzés: A kék háttérű boksok és nyilak a fő gyártási folyamatot ábrázolják. Az ellátólánc támogató elemeit gyártóberendezésekre, anyagokra, valamint vizsgáló- és mérőberendezésekre osztottuk fel. Ezeket a támogató elemeket a fő gyártási folyamathoz megfelelő nyilakkal illesztettük hozzá.



4.15 ábra – A LED-komponensek beépítési formái – A képek forrásai: a) Lumileds, Luxeon T adatlap, 2015 [110]; b) Lumileds, Luxeon XR-TX adatlap, 2016 [111]; c) Seoul Semiconductor, Acrich2.5 adatlap, 2015 [112]; d) Seoul Semiconductor, Acrich3 adatlap [113]; e) Frost & Sullivan, hűtőbordára szerelt chip-technológia, 2013 [114]

eszközök definiálásához, a lapka szétválasztása egyedi chipekké és az így kapott chipek „becsomagolása, tokozása”, ami a termikus és elektromos kontaktus mellett mechanikai védelmet is biztosít.

A LED-alapú lámpatesten belül többé már nem a LED-csomag a meghatározó költségtenyező, a költségnek csak kisebb hányadát képviseli: a retrofit-lámpákra érvényes mintegy 18%-tól a LED-es beltéri és kültéri lámpatestek 7%-nyi vagy még kisebb értékéig. Ahhoz, hogy a költségeket csökkenteni lehessen a teljesítményképesség folyamatos javítása mellett, koncentrált erőfeszítésekre van szükség a gyártás egész ellátólánc mentén – ideértve a jobb minőségű és olcsóbb nyersanyagokat, a tökéletesített epitaxia-növesztő berendezéseket és technológiákat, az optimalizált lapkafeldolgozó berendezéseket és a na-

gyobb hatékonyságú tokozó módszereket, anyagokat és berendezéseket.

Egyre nagyobb a piaci igény olyan integrált modulok („light engine”-ek) iránt, amelyek a LED-eket és a meghajtót is tartalmazzák.

- [110] Lumileds: „LUXEON T Datasheet”, 2015. (<http://www.lumileds.com/uploads/382/DS106-pdf>)
 [111] Lumileds: LUXEON XR-TX Datasheet”, 2016 (<http://www.lumileds.com/uploads/599/DS160-pdf>)
 [112] Seoul Semiconductor: „Acrich2.5 Product Data Sheet”, 2015. okt. 2. (http://www.seoulsemicon.com/_upload/Goods_Spec/SMJQ13XXFNSX_Rev1.5.pdf)
 [113] Seoul Semiconductor: „Acrich3 Product Data Sheet”, 2016 (http://www.seoulsemicon.com/_upload/Goods_Spec/%5BSPEC%5DSMJQ-XCA5W4PX_Rev1.0.pdf)
 [114] Frost & Sullivan: „Frost & Sullivan Honours Cambridge Nanotherm for its Chip on Heat Sink Technology for Thermal Management”, 2013. dec. 19. (<https://www.gilcommunity.com/gil-talks/bp-2013-cambridge-nanotherm-european/>)

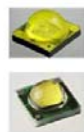
A különböző integrálási szinteket a 4.15 ábra illusztrálja. Az 1. szint (L1) a tokozott LED-chipekre vonatkozik, a 2. szint (L2) áramköri panelre szerelt LED-ekre vagy meghajtó elektronikákra, az L2+ szint pedig különböző, magasabb szintű integrációra, például optikai elemekkel szerelt LED-ekre. Az L2 és L2+ integrációs szint kedvező egyes lámpatestgyártók számára, mivel egyszerűsíti az értékláncot és gyártási folyamataikat. Az L2 szint gondos optimalizálás mellett lehetővé teszi a LED-ek működési feltételeinek igényre szabását, a felhasznált LED-csomagok számának optimalizálását és leegyszerűsíti az L2 szint olyan kialakítását, hogy alacsonyabban legyenek a gyártási költségek a minőség és a megbízhatóság megőrzése mellett. Ez lefordítva kisebb rendszer méretet és/vagy költséget jelent, ami fontos a vevők számára.

A LED-csomagok sokszínűsége

Az elmúlt években igen sokféle, általános világításra szánt LED-csomag jelent meg a piacon az 1W-osoktól az igen sokféle formájú, fénysűrűségű, feszültségű, sugárzási szögű és fizikai méretű változatokig. Egy LED-gyártónak akár 50 különböző LED-családja is lehet, és az egyes családokon belül számos olyan változat, amelyek fénysűrűségben, nyitófeszültségben, színhőmérsékletben, színvisszaadási indexben és színtűrésben térnek el egymástól. Ez a sokszínűség nagy szabadságot és rugalmasságot jelent a lámpatestgyártók számára a tekintetben, hogy a megcélzott világítási alkalmazáshoz és piachoz legjobban illeszkedő LED-eket alkalmazzák.

A LED-csomagoknak négy fő típusa jelent meg (l. a 4.16 ábrát):

1. Nagyteljesítményű (1-5W-os) LED-csomagok, tipikusan a kis optikai fénysűrűségű méretet igénylő termékekhez (pl. irányított fénysűrűségű lámpákhoz) vagy ahová nagy megbízhatóság szükséges (pl. utvilágításhoz).
2. Közepes teljesítményű (0,1-0,5W-os) LED-csomagok, amelyeket tipikusan nem irányított fénysűrűségű világításhoz (mennyezeti tükrös/rácsos lámpatestekhez, hagyományos izzólámpaburába szerelt lámpákhoz) használnak.
3. Közvetlenül a hordozón kialakított (chip-on-board) LED-csomagok, amelyeket szokásosan olyan termékekhez alkalmaznak, amelyek kis optikai fénysűrűségről nagy fénysűrűséget igényelnek, vagy igen nagy fénysűrűségűre van szükség (pl. csarnok-világítók esetén).
4. Chip-méretű LED-csomagok (chip scale packages = CSP) – nevezik néha tokozás



Nagyteljesítményű LED-csomagok: kerámia hordozó, öntött lencsék



Közepes teljesítményű LED-csomagok: szerelőkeret, polimer tokozás



Közvetlenül hordozóra szerelt chip (COB): fémhagyas flip-chip fénysűrűségbevonattal nyák, kerámia nyák

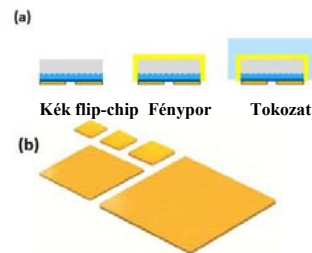
4.16 ábra – Nagyteljesítményű, közepes teljesítményű, közvetlenül a hordozón létrehozott (COB) és chip-méretű (Chip Scale) LED-csomagok

nélküli LED-eknek vagy fehér chipeknek is –, a nagy és a közepes teljesítményű változatok kompakt, olcsó alternatíváiként kaptak figyelmet.

A nagyteljesítményű LED-eknek nagy a fénysűrűsége, nagy a fénysűrűsége és jó a megbízhatósága, ami jó hűtésüknek és jó optikai konstrukciójuknak köszönhető. Tipikusan egy nagyméretű (1-4 mm²-es) chipet tartalmaznak, vagy több ilyen egy nagy tömbben – a jó hűtés érdekében kerámia hordozóra szerelve. A chipet ezután fénysűrűséggel vonják be, majd egy félgömb alakú vagy sík szilikon lencsét öntenek rá. Néhány nagyteljesítményű LED-konstrukció a nagy chipen kívül több kis, sorba kötött chipet is tartalmaz a nagyfénysűrűségű konstrukció létrehozásához, amely – megfelelően csoportosítva egy meghajtóval – növelheti a rendszer fénysűrűsítését.

A közepes teljesítményű LED-eket eredetileg kiemelő és háttérvilágításra használták, de 2012-ben megtalálták az utat az általános világítás felé is, mivel a chipek teljesítőképességének javulása elfogadható lumenszintekhez vezetett. A közepes teljesítményű LED-ek olcsó, fröccsöntött műanyagból és vezetőlécből állnak, amely tipikusan 1-3 kis LED-chipet tartalmaz. A chipek egy, a műanyag üreget körülvevő, ezüst bevonatú fém vezetőléc vázra vannak szerelve. Az üreg szilikonba kevert fénysűrűséggel van kitöltve, amely lefelé konvertáló és tokozó anyagként szolgál. A közepes teljesítményű LED-ek az alacsonyabb költségek okán számos alkalmazásban előnyösebbek a nagyteljesítményű LED-eknél, ami javítja a rendszer lm/USD mutatóját.

A közvetlenül a hordozón kialakított chip (COB) megoldás tipikusan fém magú nyomtatott áramköri panelre (MC-PCB) vagy kerámia hordozóra szerelt kis chipeket tartalmazó nagy tömbökből áll. A LED-eket azután fénysűrűséggel kevert szilikonnal fedik le. Kis optikai fénysűrűsége



4.17 ábra – (a) A chip méretű LED-csomagok (CSP) (b) Újabb példák a kereskedelmi CSP-k méretezésére (Forrás: (a) Shatil Haque, DOE SSL R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016. febr. [115], (b) Samsung Newsroom, 2016. máj. [116])

felületükről nagy (akár 14 000 lm-es) fénysűrűséget szolgáltatnak, ezért tipikusan magas vagy alacsony belvilágú csarnokok világítására használatosak. Jó hővezető hordozó esetén ugyanolyan jó szín- és fénysűrűség-stabilitásuk lehet, mint a nagyteljesítményű LED-eknek, ha az üzemi hőmérsékletet az előírt értéken belül tartjuk. Könnyű felhasználásuk a lámpatestgyártáshoz sok olyan kisebb lámpatestgyártónak előnyös, akiknek nincs a diszkrét LED-csomagok fém magú nyomtatott áramköri panelre (MC-PCB) való szereléséhez alkalmas berendezésük.

A CSP LED-ek az anyagfelhasználás és a gyártási lépések minimalizálása okán és mert kis helyigényüknek köszönhetően sűrűbben szerelhetők a lámpatestekbe, újabban nagyobb figyelmet kaptak. Kínálatuk az ilyen LED-termékek gyártók számával együtt folyamatosan növekszik. A chip-méretű LED-termékek többsége alapként ún. „flip-chipet” használ, amelyre aztán ráviszik a fénysűrűséget és a tokozóanyagot, amint azt a 4.17(a) ábra

[115] S. Haque: „Wafer Scale Packagin Manufacturing Challenges”, DOE SSL R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016

[116] Samsung: „Samsung Introduces Full Line-up of LED Components Based on Chip-Scale Packaging Technology”, 2016. márc. 14. (<https://news.samsung.com/us/samsung-introduces-full-line-led-components-based-chip-scale-packaging-technology/>)

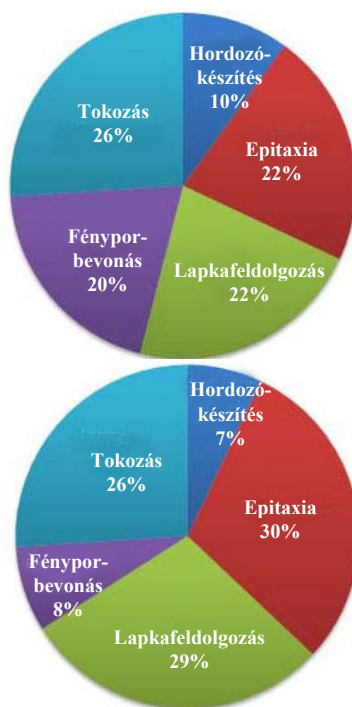
mutatja. A huzalkötés és a szerelőkeretek vagy kerámiahordozók elhagyása kisebb méreteket és alacsonyabb költségeket tesz lehetővé. A CSP gyártók alakhú fénypor-bevonatot hordanak fel közvetlenül egy kék LED flip-chipre, amely öt oldalon át – szélesebb szögekben – bocsát ki fényt. A CSP LED-ek legfrissebb példái igen sokféle méretváltozatot mutatnak, kielégítve ezzel a közepes és nagy teljesítményű, valamint a kis COB LED-csomagok lecserélésével kapcsolatos különböző világítási alkalmazások igényeit, amint az a 4.17(b) ábrán látható.

Noha a chip-méretű LED-ek jelentős megtakarítást kínálnak a rendszerköltségek terén, különböző teljesítőképességi kompromisszumok adódnak: a jó hővezetőképességű kerámia hordozó elhagyásával termikus problémák, a nagy kúpos primer lencse szög tartó kocka-tokozattá történő átalakításával pedig optikai veszteségek lépnek fel. Ezenkívül egyéb gyártási problémák is maradnak, amikor a kis chip-méretű elemeket 2. szintű nyomtatott áramkört panelre építik. Ezek a következők:

- Az elfordulás és elhajlás következtében a sokkal kisebb chip-méretű CSP LED-eknek a nyomtatott áramkört panelra történő beigazításához pontosabb gyártásra van szükség.
- A sugárnyaláb beállítása korlátozhatja a chipek sűrűségét és befolyásolhatja a szerkezet optika konstrukcióját.
- Fokozni kell az elektrosztatikus kisülés elleni védelmet, mivel a chip-méretű CSP eszközök nem tartalmaznak elektrosztatikus kisülés ellen védő Zener-diódákat.
- A LED-csomagok kezelését optimalizálni kell a fényporréteg sérülésének elkerülése érdekében, mivel a fényporréteg közvetlen kezelése elkerülhetetlen.
- A kisebb chip-méretű CSP LED-ek pontos tesztelése kezelési problémákat jelent a felületre szerelt LED-ek gyártósoraihoz tipikusan használt tesztelő és válogató berendezéseknél.

A LED-csomagok költsége

A nagy és közepes teljesítményű LED-csomagok tipikus költségmegoszlását a 4.18 ábra mutatja. A nagyteljesítményű LED-ekre vonatkozó adatok esetén tömeggyártást tételezünk fel, amelynek során 100 mm átmérőjű zafirhordozóra 1 mm²-es elemeket visznek fel, és a chipeket kerámia-tokokba zárva állítanak elő meleg fehér, fényporkonverziós pc-LED-fényforrásokat. A közepes teljesítményű, meleg fehér, fényporkonverziós pc-LED-ek adatai hasonló méretű, vezetővázis műanyag



4.18 ábra – A nagy és közepes teljesítményű LED-csomagok gyártási fázisainak tipikus költségei (Forrás: A DOE SSL Roundtable and Workshop résztvevőitől származó adatok)

hordozóra szerelt, 0,5 mm²-es chipekre vonatkoznak. A költségek megoszlása a nagyteljesítményű LED-csomagok esetén a 2016-os adatokhoz képest lényegében változatlan, noha van egy kb. 20%-os összköltség-csökkenés, ami főként a nyersanyagok árának csökkenésével és a kihozatal növekedésével van összefüggésben. A költségek megoszlása a nagyteljesítményű LED-csomagok esetén a 2015-ös adatokhoz képest lényegében változatlan, noha van egy kb. 20%-os összköltség-csökkenés, ami főként a nyersanyagok árának csökkenésével és a kihozatal növekedésével van összefüggésben. Az elemgyártás és a tokozás költsége sokkal alacsonyabb a közepes teljesítményű LED-csomagok esetén, noha a fényport hasonló területre alkalmazzák, ezért az összköltség vonatkozásában növekszik a viszonylagos fontossága. A közepes teljesítményű LED-csomagok költsége 5-10-szer alacsonyabb lesz a chip területének függvényében, és ez hasonló árkülönbözetet is jelent.

A 4.18 ábra azt mutatja, hogy nincs olyan költségelem, amely domináns lenne a nagy- vagy a közepes teljesítményű LED-csomagoknál. A tokozás marad a legnagyobb költségtényező, de a lapkafeldolgozás költségei is hasonlóak, és az epitaxia-növesztés költségei sem maradnak le sokkal mögöttük. Ezek a megoszlások azt

sugallják, hogy sokkal átfogóbb megközelítésre van szükség a költségcsökkentéshez.

Várható, hogy a nagyteljesítményű LED-csomagok költsége idővel tovább fog csökkenni a mennyiségek további növekedésének hatására. A hordozó-, az epitaxia- és a lapkafeldolgozás részaránya csökkenni fog ebben az időszakban, míg a tokozás és a fényporé növekszik.

Bőven van lehetőség az innovációra ezen a területen, és a DOE számos különböző megközelítést fontolgat a költségcsökkentésre, a következők szerint:

- berendezés-teljesítmények növelése
- automatizálás növelése
- jobb tesztelés és ellenőrzés
- jobb „upstream” folyamatellenőrzés
- javított válogatási kihozatal
- optimalizált tokozatok (pl. egyszerűsített konstrukciók, olcsóbb anyagok és multi-chipek)
- magasabb szintű komponens-integráció (hibrid vagy monolit eszközök)
- chip- és lapka-méretű tokozás

A közepes teljesítményű LED-csomagok az intenzív verseny és a 2014 óta ebben a piaci szegmensben tapasztalható túlkínálat következtében azonban olyan árszinteket értek el, amelyek közel vannak a nyersanyagok árához. Számos LED-chip és LED-csomag gyártó emelte a közepes teljesítményű LED-csomagok árát, hogy vissza tudják hozni az árresek az általuk a közelmúltban elért legmélyebb szintekről. A nyersanyagok – például a nyomtatott áramkört panelék és az aranyhuzalok – növekvő ára miatt a gyártók folytatták az árháborúkat, hogy túlélhessék a vad versengést. Várható, hogy a jövőben a nagyteljesítményű LED-csomagok ár-eróziója folytatódni fog, miközben a közepes teljesítményű LED-csomagok ára lassan emelkedik.

A LED-csomagok ára

A múltban a LED-alapú lámpák vagy lámpatestek költségeiben a LED-csomagok ára volt a meghatározó, az elmúlt években azonban gyors árcsökkenés volt tapasztalható a műanyag tokozóanyagok és a chip-méretű CSP LED-csomagolási módszerek bevezetésével.

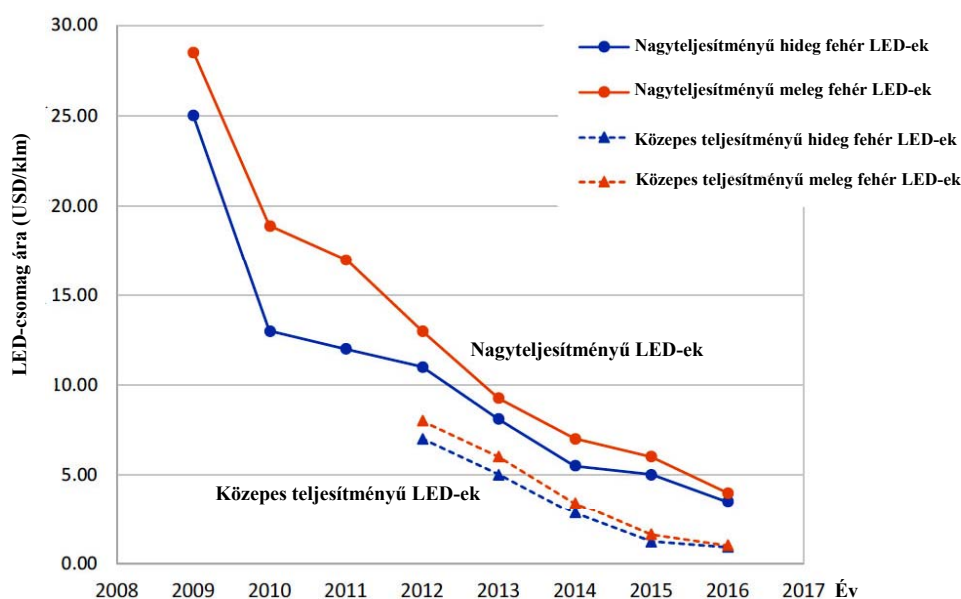
Az árbecslések ebben a fejezetben az 1000 darabos mennyiségekben nagy kereskedelmi elosztóktól – Digi-Key, AVNET, Mouser és Future Electronics – vásárolt LED-csomagok tipikus kiskereskedelmi árait reprezentálják. A LED-gyártók az

egyes LED-csomagok számos változatát gyártják – sokféle színhőmérsékletet és fényáram-szintet fedve le ezzel. A kiválasztott adatok a rendelkezésre álló adatlapokon alapulnak és a legnagyobb közölt fényáram-válogatást reprezentálják (az illető válogatási csoport átlagértékét véve alapul), vagy tipikus fényáram-értékeket a teljes rendelkezésre álló eloszlásra. A kiválasztott eszközök adott színhőmérséklet és színvisszaadási index tartományokba esnek. Az árakat minden esetben USD/klm-ben adtuk meg.

A kilolumenenkénti ár a közepes teljesítményű LED-csomagok esetében meglehetősen stabil volt 2016-ban, miközben a nagyteljesítményű LED-csomagok ára állandó sebességgel, folyamatosan csökkent. A LED-csomagok árának alakulása a 4.19 ábrán látható. A nagyteljesítményű LED-csomagok ára a hideg fehér típusok esetében megközelítőleg 3,5 USD/klm volt, a meleg fehér típusoknál pedig 5,4 USD/klm, míg a közepes teljesítményű LED-csomagok 0,9 USD/klm (hideg fehér), illetve 1,0 USD/klm (meleg fehér) árszintűek voltak.

A nagyteljesítményű LED-eknél látható maximális fényhasznosítások nem érhetők el az igen alacsony áron beszerezett közepes teljesítményű LED-ek esetében. E típusoknak a fényhasznosítása gyakran 120 és 130 lm/W közé esik, míg az összehasonlításban szereplő nagyteljesítményű típusoké 140-150 lm/W volt ezeken az árszinteken. Megjegyezzük, hogy a nagyobb fényhasznosítások (hideg fehér típusoknál 168 lm/W, meleg fehér, 80-as színvisszaadási indexű típusoknál 137 lm/W) a jelenlegi 35 A/cm² fényűrűségeknél a 2016-ban tömeggyártásban készen beszerezhető nagyteljesítményű LED-csomagokra voltak érvényesek, bár a 4.18 ábrán feltüntetett árak is nagy tömegben gyártott LED-típusokat reprezentálnak. A Meleg fehér és a hideg fehér LED-csomagok közötti árkülönbség csökkent, és számos LED-családnál majdnem elhanyagolható mértékű. A meleg fehér LED-csomagok megközelítőleg 10%-kal drágábbak voltak, noha ez a különbség idővel várhatóan csökkenni fog, mivel a fényporok ára továbbra is csökkenő tendenciát mutat.

A 4.4 és 4.19 ábrák ár-fényhasznosítás előrejelzéseit a 4.4 táblázat foglalja össze. Az ár-előrejelzéseket úgy alakítottuk ki, hogy azok vegyék figyelembe a közepes teljesítményű LED-típusokkal összefüggő alacsonyabb árakat. Ugyanígy, a fényhasznosítási előrejelzéseknél az előrejelzett fejlődésnél lassabb ütemet vettünk figyelembe, különösen a hideg fehér típusok esetében.



4.19 ábra – A nagy- és a közepes teljesítményű LED-csomagok ára

Megjegyzés: A hideg fehér típusoknál CCT=5700K, a meleg fehéréknél pedig CCT=3000K színhőmérsékletet és CR=80 színvisszaadási indexet tételeztünk fel.

Paraméter	2014	2016	2018	2020	2025
Hideg fehér típusok fényhasznosítása (lm/W)	158	168	194	218	240
Hideg fehér típusok ára (USD/klm)	1.4	0.9	0.6	0.45	0.3
Meleg fehér típusok fényhasznosítása (lm/W)	131	137	175	208	237
Meleg fehér típusok ára (USD/klm)	1.7	1.0	0.7	0.45	0.3

4.4 táblázat – A LED-csomagok árának és teljesítőképességeinek becsült alakulása

4.3.3 A LED-es lámpatestek gyártása

Gyártási módszerek

A LED-es lámpatestek gyártása a LED-ek mechanikai és hűtőelemekkel (pl. hűtőbordákkal), a fény eloszlását megszabó optikai komponensekkel és a LED meghajtó elektronikájával történő összeépítését foglalja magában. A LED-lapka vagy LED-csomag a LED-alapú lámpatestek kritikus komponensei, ezért a lámpatestgyártás a LED-fényforrásnak a lámpatest többi komponensével való összeépítése körül forog a megkívánt formatervezés és a költség, teljesítőképesség, termékconszisztencia és megbízhatóság közötti optimális egyensúly elérése érdekében. E funkciók és a szükséges kompromisszumok közötti egyensúly a világítási alkalmazástól, a fogyasztói profiltól, a világítás elvárt teljesítőképességétől és áratól függ. Például egy 15 cm átmérőjű lakásvilágítási mélysugárzó 67 lm/W leadására képes, míg egy felsőkategóriás kereskedelmi mélysugárzó ugyanattól a gyártótól ugyanolyan színhőmérséklet és színvisszaadási index esetén

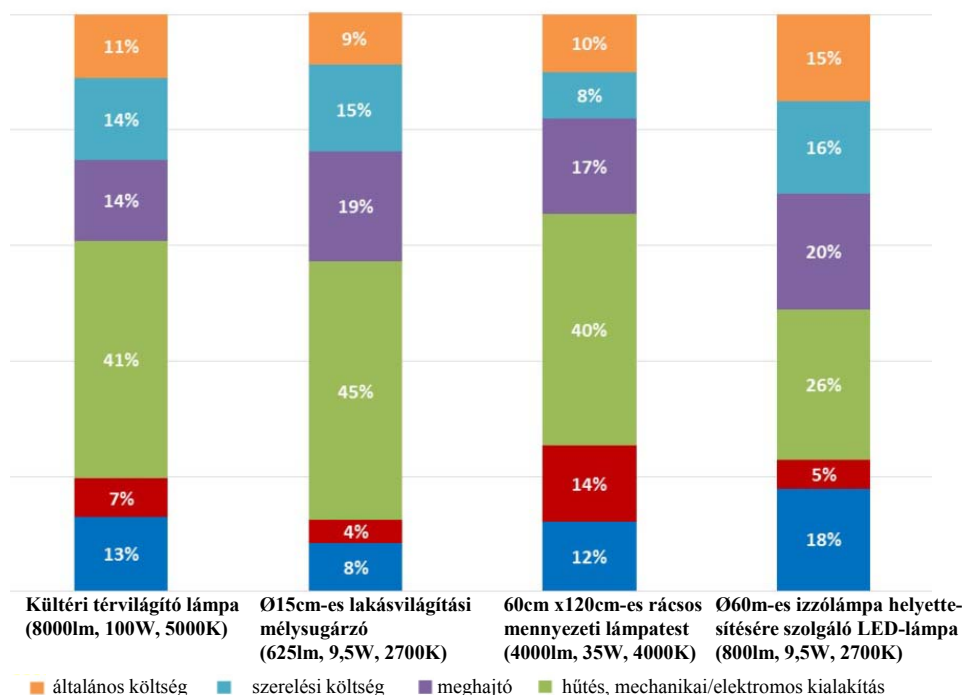
elérheti a 100 lm/W-ot. E két típus közötti eltérés okán tervezési döntés kérdése, hogy melyiket választják az adott alkalmazás terméktervezésének kielégítéséhez. Az olcsóbb mélysugárzóban kevesebb LED van, amelyeket viszont nagyobb áramokkal hajtanak meg a megkívánt fényáram elérése érdekében, ezzel lejjebb szorítva a fényhasznosítást a nagyobb meghajtóáramoknál fellépő áramsűrűség-esés következtében.

A LED-ek számának csökkentése lejjebb viheti az árakat a fényhasznosítás rovására, vannak azonban egyéb figyelembe veendő következmények is: a nagyobb meghajtóáramok ui. magasabb hőmérsékleteket eredményeznek a LED-csomagban, ami korábban bekövetkező fényáram-csökkenéshez és szineltolódáshoz vezet, ezzel befolyásolva a lámpatestek megbízható teljesítőképességét és garantált élettartamát. Ez csupán az egyik kompromisszum a LED-fényforrás tervezésénél. A többi alrendszer-konstrukciók – hűtőborda, meghajtó és optika – további kompromisszumokhoz vezetnek. Valamennyi apró kompromisz-

szumnak és ezeknek a termékkonstrukcióra és a gyártási költségekre kifejtett hatásának figyelembe vétele határozza meg a fényhasznosítás, a színhőmérséklet, a színvisszaadási index, a garantált élettartam és a költség azon szintjét, amelyen a különböző lámpatestek piacra kerülnek. A minőségi tényezők – mint amilyen a kiváló színvisszaadás, a szabályozhatóság és a nagyobb L70 élettartam – mind-mind magasabb árat jelentenek. Az olcsóbb LED-lámpák általában nem szabályozhatók és nincs hosszabb élettartamuk vagy nagy színvisszaadási indexük. Ezért nem készül egy kaptafára valamennyi világítási termék. A fényhasznosítás, a színminőség vagy az élettartam értékét az egyes fogyasztók különbözőképpen ítélik meg, ami befolyásolja azt, hogy akarnak-e többet költeni ezekre az előnyökre.

Az a tény, hogy bizonyos formátényezőjű lámpatesteknek kisebb a fényhasznosítása, mint a többinek, nem jelenti szükségképpen azt, hogy bizonyos LED-es lámpatesteket nem lehetne olyan nagy fényhasznosítással vagy megbízhatósággal gyártani, mint a többiek, inkább a gyártónak az adott végfelhasználási esetre kidolgozott speciális kompromisszumát tükrözi. Van-e bizonyos esetek – például a keskeny sugárzó spotlámpákhoz szükséges, kis méretű világítási konstrukciók –, amelyeknek fényhasznosítás-korlátaik lehetnek a nagy területek megvilágítására szolgáló tükrös-rácsos lámpatestekéhez képest (miután a kis spotfények eléréséhez kis fényforrásméretekre van szükség), de ezek a fényhasznosítás-korlátok nem alapvetőek számos világítási megoldás esetén.

A LED-alapú retrofitlámpáknak és a LED-es lámpatesteknek hasonló az integrációs szintje, de a lámpák szabványos elektronikus interfészt használnak a hagyományos lámpatestekben történő alkalmazásukhoz. A LED-alapú és a hagyományos lámpatestek gyártásában csak kevés a hasonló, mivel a hagyományos világítási technológiák a „lámpatest+lámpa” paradigmán alapulnak, egyes komponenseik gyártása teljesen különvált, sokszor más-más cég állítja elő azokat. A LED-alapú világítási termékek integrált természete – ahol a lámpatest, a LED-modul és a meghajtó elektronika tipikusan egyetlen egységbe van ötvözve – jelentősen bonyolítja a gyártási folyamatot. A lámpatestgyártók sikeresen megoldották a kihívást azzal, hogy a fogyasztói elektronikai iparban általánosabb gyártási technológiákat vezettek be, egyszerűsítették az anyagokat és a gyártási folyamatokat, rendszerszintű tervezési optimalizálási módszereket vezettek be (ide-



4.20 ábra – Különböző világítási alkalmazások 2016-os költségeinek összehasonlítása

(Forrás: A DOE SSL Roundtable and Workshop résztvevőitől és ipari partnerektől származó adatok)

Megjegyzés: A fentiek tipikus gyártási költségekre vonatkoznak, jóllehet különböző gyártóknak üzleti modelljeiktől függően eltérőek lesznek a költségei.

értve a „gyártásra, ill. szerelésre tervezett konstrukciókat”) és tökéletesített tesztelési eljárásokat fejlesztettek ki.

A LED-es lámpatestek költsége

A lámpák és lámpatestek tipikus költségmegoszlása függ a világítási alkalmazástól és a lámpatest méretétől. A 4.20 ábra összehasonlítja egy kültéri térvilágító lámpatest, egy beltéri lakóvilágítási mélysugárzó, egy LED-es tükrös-rácsos lámpatest és egy 60mm átmérőjű A19-es retrofitlámpa költségeinek megoszlását. Látható, hogy a különböző formátényezőjű fényforrások viszonylagos költségei jelentősen eltérhetnek. Az utóbbi években észrevehető volt a LED-csomagok árának gyors csökkenése mind a lámpatesteknél, mind a lámpáknál.

A rezsiköltségek valódi költségelemet reprezentálnak, különösen a 60mm átmérőjű A19-es lámpák esetén, ezért feltüntetjük a költség-grafikonban az anyagköltségekkel együtt. A rezsiköltségek a költségdiagramokban a gyártástechnológiára, a termékfejlesztésre, a dokumentációra, a tokozásra, az in-line és a megfelelőségi ellenőrzésre, a kiszállításra és az elosztásra vonatkoznak. A kiskereskedelmi ár további 25-30%-os elosztási árrést tartalmaz.

A LED-lámpák és LED-es lámpatestek fejlődésének korai szakaszában a termék teljes költségét a LED-csomagok költsége dominálta, de a világítási célú LED-ek ala-

csonyabb ára és széles körű hozzáférhetősége következtében ma már nem ez a helyzet. Költség szempontjából dominánsnak a legtöbb lámpatest esetén a termikus/mechanikus/elektromos alrendszer számítanak, amelyek a házat, a hűtőbordákat, az elektromos csatlakozókat és a mechanikai rögzítéseket jelentik. A LED-csomagok költsége továbbra is csökkenni és stabilizálódni fog, ezért a jövőbeli költségszökkentést a teljes rendszer optimalizálására, nem pedig adott költség-elemre összpontosítva kell elérni.

Amíg az egyenes költségszökkentési folyamat az egyik megközelítés a lámpatest költségének leszorítására, a rendszer áttervezése – a rendszerkomponensek mennyiségének és típusának módosításával – sokkal gyakoribb módja a költségszökkentés nagyobb ugrásainak eléréséhez. A rendszer újratervezése hatással van a relatív alrendszer-költségek időbeli alakulására is, mivel a jó optikai, elektromos és termikus tulajdonságok eléréséhez alkalmas különböző tervezési megközelítések befolyásolni fogják a komponensek költségeit és így azok arányait is. A gyártók továbbra is olyan megoldások után fognak kutatni, amelyek a rendszer teljesítmőképességének – a fényhasznosításnak, élettartamnak, színminőségnek stb. – károsítása nélkül képesek csökkenteni a költségeket. A LED ellátólánc fő részeinek legfontosabb költségeleseit a 4.5 táblázat foglalja össze.

Ellátólánc		Költségmeghatározó tényezők		
Berendezés- beszállítók	Epitaxianövesztés	• Egyformaság • Kihozatal	• Reagens-felhasználás hatásfoka	• In situ monitorozás/ folyamatvezérlés
	Lapkafeldolgozás	• Kihozatal	• Automatizálás	• Kihozatal
	LED-csomagolás	• Kihozatal	• Rugalmasság (csomagolóanyagok és csomagolástípusok)	
	Lámpatest-szerelés	• Kihozatal	• Automatizálás	• Chip-léptékű csomagolás
	Teszt és ellenőrzés	• Kihozatal	• Pontosság	• Reprodukálhatóság
Anyag- beszállítók	Hordozók	• Átmérő	• Minőség	• Szabványosítás
	Vegyi anyagok	• Minőség/tisztaság	• Ömlesztett szállítási rendszerek	• In-line tisztítás
	Csomagolóanyagok	• Szabványosítás	• Kerámiafeldolgozás	• Műanyag zsugorfóliák
	Fénypor	• Minőség/tisztaság • Konzisztencia	• Stabilitás (termikus és optikai áramlás)	• Megbízhatóság
	Tokozóanyagok	• Minőség	• Stabilitás (termikus és optikai áramlás)	• Feldolgozhatóság
Elemgyártás		• Gyártásközi ellenőrzés/ folyamatszabályozás	• Kihozatal • Tesztelés	• Teljesítmény • Beruházási költségek
LED-csomag-gyártás		• Modulrendszer kialakítása • Gyártásközi ellenőrzés/ folyamatszabályozás	• Munkaerő-tartalom • Tesztelés • Szabványosítás	• Kihozatal • Teljesítmény
Lámpatest-gyártás		• Automatizálás/ élőmunka • Gyártásközi ellenőrzés/ folyamatszabályozás	• Tesztelés • (teljesítőképesség és megfelelés)	• Modulrendszer kialakítása • Teljesítmény

4.5 táblázat – A LED ellátólánc: költségmeghatározó tényezők

5. OLED-technológia és -gyártás

Helyzet

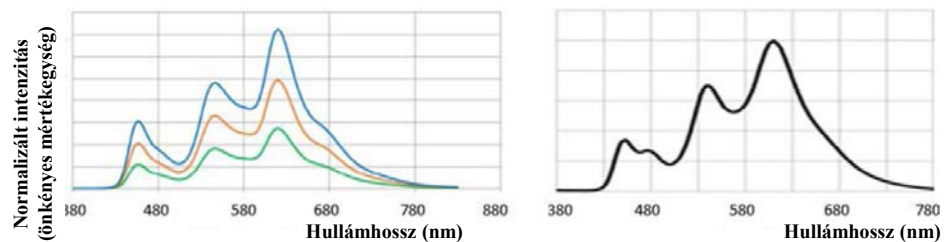
A 2016-os év egyik legfontosabb eseménye az volt, hogy az OLEDWorks bejelentette: gyártásba vette a Brite2 panelt [117], az első olyan új terméket, amely a korábban Philips tulajdonban lévő aachen gyártósor beszerzéséből származott. Ezeknek a paneleknek kitűnő a színük ($\text{CRI} > 90$ és $\text{R9} > 70$), a 3000 cd/m^2 -es standard fénysűrűség mellett fényhasznosításuk eléri a 63 lm/W -ot, L70-es élettartamuk pedig $50\,000$ óra. A japán Konica Minolta által megépített roll-to-roll (R2) gyártósort eddig még használták tömeggyártásra, és az LG 2016-ban visszavonta néhány leginnovatívabb termékét. 2017 tavaszán azonban a koreai Gumiban egy új gyártósor befejezésekor olyan dokumentumokat tett közzé, amelyek új panelek és lámpatestek lenyűgöző választékát ismertetik [118]. 70 lm/W fényhasznosítású panelekkel először az O-Lite jelentkezett, és olyan különleges, új termékekről számolt be, amelyek beállított spektrumokkal rendelkeznek, nem villognak és kifejezetten kisgyermekes családok „egészséges világítására” szolgálnak –, de ezek kevés hatással lesznek az általános világításra vagy az energiamegtakarításokra [119].

A kutatás területén az Acuity és az OLEDWorks között futó egyik DOE-projekt beigazolta, hogy egy több-paneles lámpatestnél lehetőség van az egyes OLED-ek intelligens vezérlésére, de további fejlesztésekre van még szükség a költségek csökkentése és a meghajtók hatásfokának növelése érdekében [120]. Az OLEDWorks és a Philips csapatainak egyesülése leküzdött néhány olyan akadályt, amelyek gátolták azt, hogy a panelek fényhasznosítását 100 lm/W fölé lehessen növelni. A megbízható tokozási technológiák bevezetése felgyorsult ugyan a rugalmas OLED-kijelzők iránt megmutatkozó növekvő érdeklődésnek köszönhetően, de még jelentős kihívások maradtak a világítástechnikai alkalmazások területén. Folyamatos előrehaladásról számoltak be a belső fénykivonási struktúrák fejlesztéséről is – a laboratóriumi kísérletekben 2,5-szeres növekedési tényezők elérése mellett. Az anyagokkal kapcsolatos fejlesztések az orientált emissziójú molekulákra és az IR-alapú foszforeszcens alternatívákra összpontosultak, mint amilyenek a termikusan aktivált, késleltetett fluoreszcencia (TADF) vagy a platina/palládium-(Pt/Pd)-alapú foszforeszkáló emitterek.

HOLUX Hírek N°180 p.4



5.1 ábra – Acuity OLED-es lámpatestek irodákban (Forrás:PNNL: „OLED Lighting Products: Capabilities, Challenges, Potential”, 2016.. máj.[122]; Fotó: Aurora Lighting Design)



5.2 ábra – Emissziós spektrumok – (a) Brite 2 FL300 – különböző meghajtóáramok esetén; (b) az LG egyik tipikus panelje (Források: (a) OLEDWorks, Brite 2 FL300 adatlap, 2016. szept. [124], (b) LG, OLED Light Panel User Guide, 2017. ápr. [127])

2016-ban a DOE közzétett értékeléseket három OLED-termékről. Az Aurora Lighting Design irodájában rendezett egyik Gateway-bemutatóból (l. az 5.1 ábrán) azt a következtetést lehetett levonni, hogy „az OLED-eket kényelmes módon lehet közvetlenül szemlélni a kis (3000 cd/m^2 -nél kisebb) felületi fénysűrűségük és a fény oly mértékű terítése folytán, amely nagy függőleges megvilágításokat hoz létre a felületeken (pl. a falakon) és kitűnő arc-felismeréssel, lágy fénnel szolgál, amely csökkenti a tárgyaktól származó éles árnyékképződést” [121]. 2016 májusában a DOE közzétette a rendelkezésre álló kereskedelmi lámpatestek teljesítőképességének áttekintését a PNNL által végzett átfogó értékelésekkel együtt [122]. A CALiPER jelentés 2016 szeptemberében bemutatta a PNNL és az RTI International további tesztjeinek eredményeit [123].

5.1 OLED-panelek

Ez a fejezet az OLED-panelek teljesítőképességéről számol be a fényhasznosítás, az élettartam és a színminőség vonatkozásában. Ismertetjük az egyes teljesítőképességi kritériumokkal kapcsolatos áttöréseket, valamint a kulcsfontosságú technikai kihívásokat és célokat. A teljesítőképességi célokat összevetjük a jelenlegi adatokkal, amiből láthatók a kívánatos élettartam, színminőség és egyedi formátényezők megvalósításához szükséges fényhasznosítási kompromisszumok. Olyan tulajdonságok kifejlesztése folyik, amelyek meg-

különböztetik az OLED-eket más hatékony fényforrásoktól, és folyamatosan bővül az OLED-termékek kínálata is. A célok a jövőbeni teljesítőképesség-növekedésre vonatkoznak.

5.1.1 Az OLED-panelek fényhasznosítása

A Brite 1-es panelről a Brite 2-re való áttérés során az OLEDWorks a fényhasznosítást 35%-kal növelte meg, 63 lm/W -ot

[117] OLEDWorks: „Brite 2 FL300 Family”, 2016. szept. (<https://www.oledworks.com/wp-content/uploads/2016/09/PRODUCTSHEET-OLEDWorks-OLED-Panel-Brite-2-FL300-family-2016.pdf>)

[118] LG Display: „LG OLED Light Downloads”, (<http://www.lgoledlight.com/downloads/>)

[119] First O-Lite: „Product Homepage”, (<http://www.first-o-lite.cn/products.html>)

[120] M. Lu: „OLED Luminaire with Individually Addressable Panels”, DOE SSL R&D Workshop, Long Beach, Kalifornia, 2017

[121] Pacific Northwest National Laboratory: „Gateway Demonstrations: OLED Lighting in the Offices of Aurora Lighting Design, Inc.”, 2016. márc. (https://energy.gov/sites/prod/files/2016/04/f30/2016_gateway_aurora-oled.pdf)

[122] Pacific Northwest National Laboratory: „OLED Lighting Products: Capabilities, Challenges, Potential”, 2016. máj. (https://energy.gov/sites/prod/files/2016/08/f33/ssl_oled-products_2016.pdf)

[123] N. Miller, F. A. Leon és J. L. Davis: „CALiPER Report 24: Photometric Testing, Laboratory Tear-downs, and Accelerated Lifetime Testing of OLED Luminaires”, Pacific Northwest National Laboratory, 2016

[124] OLEDWorks: „Lumiblade OLED Panel Brite 2 FL300 ww”, 2016. szept. (<https://www.oledworks.com/wp-content/uploads/2016/09/DATASHEET-OLEDWorks-OLED-Panel-BRITE-2-FL300-ww-2016.pdf>)

érve így el – és mindezt a színminőség jelentős javulása mellett [124]. A CALiPER teszt megerősítette, hogy az Acuity által a lámpatestekbe beszerelt LG-panelek fényhasznosítása 55 lm/W. A japán beszállítóktól (Lumiotec, Kaneka, Konica Minolta és Pioneer) kapható panelek fényhasznosítása marad 50 lm/W alatti. Először az O-Lite jelentett be 70 lm/W-os fényhasznosítású paneleket, de teljesítőképességüket még nem erősítették meg [125].

Az LG új katalógusa olyan 3-rétegű merev paneleket kínál, amelyeknek fényhasznosítása 90 lm/W lesz 93-as színvisszaadási index és 3000K színhőmérséklet mellett [126]. Hatféle méretben – kör, négyzet és téglalap alakú formában – készülnek majd. A gyártás 2017. harmadik negyedévére várható, de a gyárápítás vagy a kihozatal-optimalizálás problémái miatt késedelmet szenvedhet. Azoknak a vevőknek, akiknek nagyobb színhőmérsékletre van szükségük, 4000K színhőmérsékletű típusok is készülnek 75 lm/W fényhasznosítással. Habár rugalmas panelek is találhatók még a katalógusban, ezek fényhasznosítása marad 50-55 lm/W.

A fejezet további részében négy olyan ténnyet vizsgálunk meg, amelyek befolyásolják a panelek fényhasznosítását és megfogalmazzák a további kutatás lehetőségeit.

5.1.2 Spektrális hatásfok

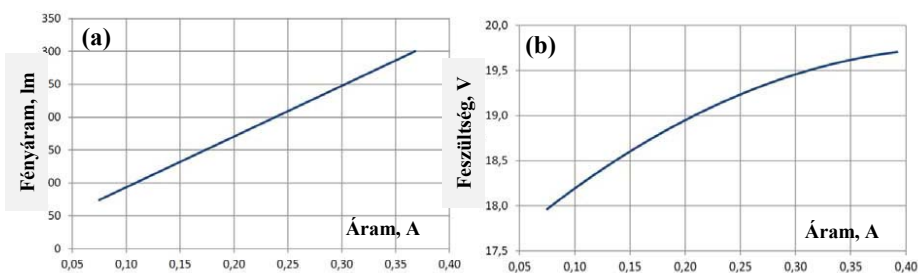
Lehetőség/kihívás: keskeny sávzélességű vörös emitter

A Brite 1-ről Brite 2-re történt fejlesztés során elért javulás a színegyensúlyban és a zíniskálában a sugárzás fényhasznosítását (LER) 336 lm/W-ról 302 lm/W-ra csökkentette. Ezt főként az infravörös-közeli tartományban megnövekedett emisszió okozta. A Brite 2 panel emissziós spektrumát különböző meghajtóáramok estén az 5.2 ábra mutatja az LG tipikus paneljének emissziós spektrumával együtt.

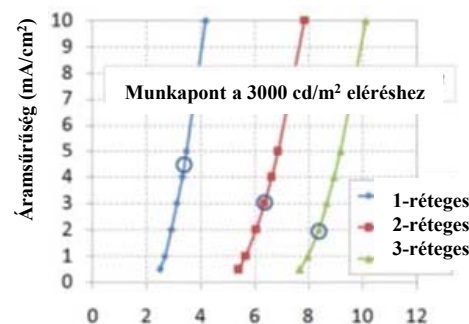
Az LG paneljének IR-része nem túl jelentős, de mindkettő fényhasznosítása növekedhetne egy keskenyebb spektrális csúccsal rendelkező vörös emitter megjelenése esetén. Megjegyezzük, hogy a Brite 2 panel spektruma egy kicsit függ a meghajtóáramtól.

5.1.3 Elektromos hatásfok

Az elektromos hatásfok a meghajtófeszültség és az emittált fotonok elektronvoltban mért energiájának a hányadosa. Ez a komponens általában javul a többretegű eszközöknél, mivel a vörös, sárga vagy zöld rétegeknél kisebb potenciálkülönbséget lehet alkalmazni, mint a kék réteg



5.4 ábra – A fényáram (a) és a meghajtófeszültség (b) áramfüggése (Forrás: OLEDWorks, Brite FL300 adatlap, 2016. szept. [124])



5.3 ábra – A 3000 cd/m²-es fénysűrűséghez szükséges meghajtófeszültség (Forrás: Larry Sadwick, InnoSys és Jeff Spindler: OLEDWorks, DOE SSL R&D Workshop, Long Beach, Kalifornia, 2017. febr. [128])

esetén. A többretegű eszközökben szükséges áramsűrűség is kisebb, mint az egyrétegűeknél. Ezért – amint az az 5.3 ábrából látható – amíg egy egyrétegű eszközönél 3000 cd/m² fénysűrűség eléréséhez 3,4 V-os meghajtófeszültségre lehet szükség, ugyanakkora fénysűrűséget 2-rétegű eszközöknél 6,4 V-tal, 3-rétegűeknél 8,5 V-tal lehet elérni.

Az OLEDWorks hatréteges struktúrájú, 105 cm²-es emissziós felületű FL300-as paneljének adatai betekintést nyújtanak a fénysűrűség áram- és feszültség-függésébe. Az 5.4(a) ábra azt mutatja, hogy a fényáram lineárisan változik az árammal. 0,12 A-nél kisebb áram esetén 10 kl/m² fénysűrűség érhető el. Az 5.4(b) ábra pedig azt mutatja, hogy ez az áram 19,2 V-os (azaz rétegenként 3,2 V-os) meghajtófeszültséggel érhető el, ami 70% elektromos hatásfokot eredményez.

Az LG-panelek 3000 cd/m² fénysűrűséget 2-réteges eszközöknél 6 V-os, 3-rétegeseknél pedig 8,5 V-os meghajtófeszültséggel tudnak elérni, ami 75, illetve 80% elektromos hatásfokot jelent.

Lehetőség/kihívás: a meghajtófeszültség növekedése a működési élettartam során

A PNNL elemzése által felvetett egyik probléma az, hogy az OLED-panel meghajtásához szükséges feszültség a működési élettartam során növekszik. A Brite 2 FL 300 specifikációs adatlapja azt mutatja, hogy a maximális fénysűrűség eléréséhez

szükséges feszültség 20,5 V-ról 25,5 V-ra növekedhet. E hatást a meghajtóáramkör tervezésénél figyelembe kell venni, de a feszültségnövekedés hatásának kompenzálása persze csökkenti a meghajtó hatásfokát. A feszültségnövekedés a panel fényhasznosítását is csökkenti. Ha például az öregedés 30%-os fényáram-csökkenést és 25%-os feszültségnövekedést okoz, akkor a fényhasznosítás 44%-kal fog csökkenni. További kutatómunkára van szükség e feszültségnövekedés okának tisztázására és hatásának mérséklésére.

Az elektromos hatásfokot azok az ohmos veszteségek is csökkentik, amelyek akkor keletkeznek, amikor a töltés a panelen és az átlátszó vezetõn halad keresztül. Ezek a hatások a kisebb áramsűrűség következtében a többretegű eszközöknél kisebbek. A veszteség nagyságát a panelből kibocsátott fény homogenitása alapján lehet megbecsülni. A fénysűrűség a Brite 2 FL300 panel esetén 50%-nál kisebb mértékben változik. Ez azt mutatja, hogy a feszültség a rétegeken keresztül csak 0,3 V-tal, azaz mindössze 1,5%-kal változik, amiből arra lehet következtetni, hogy az átlátszó vezetõben keletkező ohmos veszteségek kisebbek a bemeneti teljesítmény 1%-ánál.

Lehetőség/kihívás: a rétegen keresztüli potenciálkülönbség csökkentése

Nyilvánvalóvá vált, hogy az elektródák közötti ohmos veszteségek nagyobbak a többretegű eszközökben. Értékesek lennének további adatok a veszteségekkel kapcsolatosan, különösen a töltésgeneráló

[125] OLED-info: „First-O-Lite”, 2017 (<https://www.oled-info.com/first-o-lite>)

[126] LG Display: „LG OLED Light Catalogue”, 2017. ápr. (<http://www.lgoledlight.com/wp-content/uploads/2017/04/LG-OLED-light-Catalogue.pdf>)

[127] LG Display: „OLED Light Panel User Guide v3.0”, 2017. ápr. (<http://www.lgoledlight.com/wp-content/uploads/2017/04/LG-OLED-lighting-User-Guide.pdf>)

[128] L. Sadwick és J. Spindler: „OLED Track 2: Product Design and Integration: OLED Light Engines”, DOE SSL R&D Workshop, Long Beach, Kalifornia, 2017

rétegek és bármilyen más olyan vastag réteg vonatkozásában, amelyet az emitter-rétegek elektródáktól való elválasztásának növelésére iktatnak be. A Tokyo University of Technology OLED-csoportjának az a véleménye, hogy a tipikus töltésgeneráló rétegek közötti feszültségcsökkenés 0,4 V, ami 10%-ot meghaladó mértékben csökkentheti az elektromos hatásfokot [129].

5.1.4 Belső kvantumhatásfok

Az OLED-ek belső kvantumhatásfoka (IQE) főként két tényezőtől függ. Az egyik az elektronok és lyukak kiegyensúlyozott áramlásának elérése az emissziós rétegbe. A másik a rekombinálandó elektron-lyuk pároknak az a része, amely látható fotonok előállítását eredményezi. A két tényezőt nehéz egyszerre optimalizálni, amikor az emissziós réteg egyetlen komponenset tartalmaz, ezért általában a fotonok előállítására alkalmas adalékanyagot olyan „gazdanyaggal” párosítják, amely kontrollálja a töltéstranszportot.

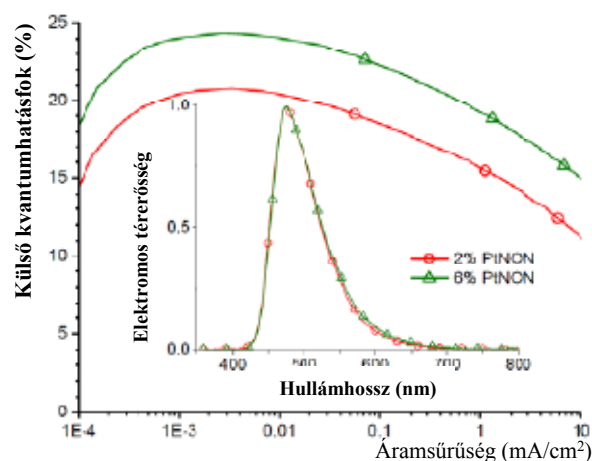
A fotonoknak a küszöbértékhez közeli előállításának vizsgálata során az OLED Works (korábban: Philips) csoport arra a következtetésre jutott, hogy a vörös és zöld foszforeszkáló emitterek belső kvantumhatásfoka 95% lehet, míg a fluoreszkáló kéké 30% körüli [130]. A teljes kvantumhatásfok 74%-ra becsülhető. A Brite paneljeit igen nagy – max. 8300 cd/m²-es – fényssűrűségeen való működésre tervezi, amelyek 0,260 A-es áram mellett 300 lm fényáramot állítanak elő [131]. A fényáram 100-ról 300 lm-re való megnövelése 10% fényhasznosítás-csökkenéssel jár. A szükséges meghajtófeszültség 18,8-ről 20,3 V-ra növekszik, 8%-kal járulva hozzá a fényhasznosítás-csökkenéshez. Ez megerősíti azt, hogy a csökkenés nem jelent komoly problémát az ilyen többretegű eszközöknél, mivel az áramnak fényre történő átalakításában a hatásfok csak 2%-kal csökken. Így a kvantumhatásfok a legnagyobb fénverősség mellett 70% körüli.

Lehetőség/kihívás: nagy fényhasznosítású, stabil emitterek

A stabil, jó hatásfokú kék emitterekkel kapcsolatos kutatás folytatódik. Noha a kisebb energiájú emitterek és gazdaanyagok többszázezer órától több millió óráig terjedő stabilitást és kitűnő fényhasznosítást biztosítanak, a kék emitterek és gazdaanyagok továbbra is szűk keresztmetszetet jelentenek az eszközök teljesítőképessége vonatkozásában. A kék fotonok előállításához szükséges nagy energia a szerves anyagok molekulái közötti kötési szilárdságokkal összehasonlítható energiájú

5.5 ábra – Platinavegyületek külső kvantumhatásfoka (Forrás: Jian Li, DOE SSL OLED Stakeholder Meeting, Corning, New York, 2016. okt. [132])

gerjesztett állapotok kialakulásához vezet. Ezek a gerjesztett állapotok sok nem sugárzó mechanizmussal bomlanak, ami a szerves rétegek felgyorsult degradációját eredményezi és csökkenti a hatásfokot. Ez a probléma nem annyira súlyos a fluoreszcenciánál, mert a szingulett állapot élettartama rövid; azonban a foszforeszkáló rendszerekben a triplett állapotok sugárzása sokkal lassabb, növelve a nem sugárzó bomlás valószínűségét és csökkentve az eszköz élettartamát. Habár a Universal Display Company-nál (UDC) és más vállalatoknál elvégzett sok évnnyi kutatómunka javulásokat eredményezett a foszforeszkáló emitterek teljesítőképességében, az élettartam még nem elegendő sem a világítási, sem a kijelző célú kereskedelmi forgalmazáshoz. Kutatómunka folyik még mindig számos egyetemi laboratóriumban is. Például a DOE egyik szilárdtest-világítási projektjénél az Arizona State University-ben kimutatták, hogy a tetradentátumú Pt komplexeknek (pl. a PtON7, PtON1 és PtNON) nagy a fotolumineszcens hatásfoka, és gyors sugárzási bomlási folyamattal rendelkeznek, amint azt az 5.5 ábra mutatja. Ez lehetővé teszi a kék foszforeszkáló OLED-ek életképesebb megvalósítását [132]. 17%-nál nagyobb a külső kvantumhatásfoka, és a kezdeti fényáram 50%-ánál mérhető LT50 élettartama nagyobb 3000 óránál 1000 cd/m² mellett. A DOE egy másik projektjénél a University of Michigan-en egy „gerjesztett állapotú menedzser LED” bevezetése 9%-os külső kvantumhatásfokot eredményezett, és a kezdeti fényáram 80%-ánál adódó LT80 élettartam 33 óra volt 1000 cd/m² mellett egy CIE (0.16,0.30)-nak megfelelő égszínkék emitter esetén [133]. A „menedzser adalékanyag” alkalmazásának célja, hogy olyan útvonalat biztosítson a gerjesztés megszüntetésére, amely megvédi a szerves molekulákat a degradációval szemben. A nagy lumineszcencia-hatásfok



elérése így módon a menedzser adalék-
anyag elhelyezésének és koncentráció-
jának gondos kontrollálását igényli.

A stabilitás gyakorlati szintjeinek elérése érdekében a kereskedelmi panelek fluoreszkáló kék emitterekre támaszkodnak. A gyakorlatban égszínkék emittereket használnak, miután ezeknek a kijelzőkhöz szükséges mélykéekkel összehasonlítva kisebb a gerjesztett állapotú energiájuk. A fluoreszkáló emitterek hatásfoka sajnos 25% körüli értékre korlátozódik a szingulett és triplett állapotok aránya miatt. Folytatódnak kísérletek arra vonatkozóan, hogy mind a szingulett, mind a triplett gerjesztéseket felhasználják kék fotonok kibocsátásának generálásához fluoreszcenciás útvonalakon keresztül. Azoknál a molekuláknál, ahol a triplett energia közel van a szingulettéhez, a triplett termikus felfelé konvertálása 100% belső kvantumhatásfokot tesz lehetővé TADF (termikusan aktivált késleltetett fluoreszcencia) esetén. TADF felhasználásával a Cynora 12%-os külső kvantumhatásfokot ért el 1000 cd/m²-nél

[129] H. Yang, J. Kim és H. Hosono: „Realization of a Low-Voltage Drop across the Charge-Generation Layer Using Bi-Layered Oxide Semiconductors for Tandem OLEDs”, SID Symposium 2017, 2017

[130] M. Boesing: „Recent Advances in OLED Lighting”, International Display Workshop, Fukuoka, Japan, 2016. dec.

[131] OLEDWorks: „OLEDWorks OLED Panel Brite FL300 WW Data Sheet”, 2016. márc.
(<https://www.oledworks.com/wp-content/uploads/2016/04/Data-sheet-Lumiblade-OLED-Panel-Brite-FL300-wm-1.pdf>)

[132] J. Li és M. Weaver: „Efficient and Stable OLEDs Employing Square Planar Metal Complexes”, DOE SSL OLED Stakeholder Meeting, Corning, New York, 2016

[133] M. Thompson és F. Stephen: „Advances in Organic Materials for White OLEDs”, DOE SSL R&D Workshop, Long Beach, Kalifornia, 2017

[134] T. Baumann és D. Volz: „Recent Progress in Highly Efficient Blue TADF Emitter Materials for OLED Displays”, SID Symposium 2017, 2017

[135] T. Ohsawa: „Realizing Deep-Blue TADF Emission with CIE of (0.16, 0.15) using a Highly Twisted Acceptor Unit”, SID Symposium 2017, 2017.

és 94 órás LT80 élettartamot 1000 cd/m² mellett CIE (0.17, 0.27) színű fényt kibocsátó emitter esetén [134]. A Yamagata University közre adott piramidin-alapú TADF-emitterekkel kapcsolatos tanulmányokat is [135]. Egy mélykék emitterről van szó, amelynek (0.16, 0.15) a CIE színekoordinátája, kicsi, 3,25V a bekapcsolási feszültsége, nagy (18%) a külső kvantumhatásfoka és 20 lm/W a fényhasznosítása.

A Kyushu University kutatócsoportja a TADF megközelítés további kiterjesztését javasolja, amelynél kétféle adalékanyagot alkalmaznak. A TADF adalékanyagot excitonok kialakulása kíséri, és valamilyen exciton egy fluoreszkáló emitter szingulett állapotába megy át. A javaslattevők azt jósolják, hogy az eszköz stabilitása és hatásfoka meg fogja haladni a hagyományos TADF-ét a felfelé konvertálás miatti kisebb triplet energiának, az excitonok rövidebb élettartamának és a hatékonyabb transzferfolyamatoknak köszönhetően. Ebből a megoldásból előnyük származhat a rendelkezésre álló fluoreszkáló emittereknek is, és a megoldás alkalmas kijelzőkhöz is, mivel egy fluoreszkáló emitter keskeny spektrumát állítja elő, de nagyobb hatásfokkal. A megoldást „hiperfluoreszcenciának” nevezték el, és a Kyulux hozza kereskedelmi forgalomba [136]. Amint azt a 2.5.2 fejezetben említettük, ezt a megoldás a Merck által vezetett európai csapat alkalmazza a HyperOLED projekt során.

A National Taiwan University kutatócsoportja rekordereredményeket ért el egy orientált TADF emitter felhasználásával [137]. A csoport azt jelentette, hogy „extrém nagy hatásfokú, 37% körüli külső kvantumhatásfokú, mélykék szerves elektrolumineszcenciát sikerült elérniük egy hagyományos planár eszközstruktúra esetén spiroakridin-triazin hibriden alapuló, nagy hatásfokú TADF emitter felhasználásával – közel egységes (100%) fotolumineszcencia kvantumkihozatal, kiváló termikus stabilitás és erősen vízszintesen orientált emittáló dipólusok mellett (ahol a vízszintes dipólus-arány 83% volt)”.

5.1.5 Fénykivonási hatásfok

A (fény)kivonási hatásfok a panel által emittált látható fotonok és az emissziós tartományban keletkezett fotonok hányadosa. A planár üveg-hordozókon kialakított egyszerű OLED eszközöknél a keletkezett fénynek csak kb. 20%-a (17-25%-a) emittálódik a panelből. Ezt az elektródákban, az átlátszó hordozón és a belső rétegekben elnyelődött és becsapódott fotonok okozzák, amit a fotonok útvonala (azaz a

szerves agyagok, az anód, a hordozó, a tokozó rétegek és a levegő) mentén adódó fénytörések eltérése okoz. A DOE célkitűzése a 70%-os fénykivonási hatásfok elérése, ami 3-3,5-szeres javulást jelentene. A jelenlegi termékek fénykivonási hatásfoka mindössze 30-50%, így bőven van tenni való a javításra és az energiahatékonyság növelésére.

A kereskedelembe kapható paneleknél már használtak kétféle módszert is a fénykivonási hatásfok növelésére. A korai termékekben egy mikrolencsés tömb (MLA) egészítették ki az átlátszó hordozó külső felületét. Ezek a tömbök nem teljesen periodikusak, hogy el lehessen kerülni a fénynek a kibocsátási szögétől függő színváltoztatást. Az ilyen filmek általában 32%-re növelhetik a fénykivonási hatásfokot.

Lehetőség/kihívás: Az OLED eszközökhez illeszkedő törésmutató

Az átlátszó hordozókhoz használt anyagok törésmutatója 1,5-hez közeli érték, míg az emitterrétegé 1,75 körüli. Ez azt jelenti, hogy a fény nagyobb része nem éri el a hordozót és így nem tudja kivonni a mikrolencsés MLA tömb. A külső filmnek nem lehetne nagyobb a hatásfoka, ha nagyobb törésmutatójú hordozókat használnánk. Sajnos még nem találtak olyan anyagokat, amelyeken megbízható OLED-eket lehetne gyártani elfogadható költségek mellett. Mindenesetre egy „közös” törésmutatójú anyagsorozat kifejlesztése növelné a külső MLA mikrolencsék hatásfokát és kiküszöbölné a Fresnel-visszaverődéseket a belső felületeknél.

Lehetőség/kihívás: Nagy teljesítményű fénykivonó rétegek

A másik módszer, amelyet néhány kereskedelembe kapható termékben alkalmaztak, egy fényszóró réteg beiktatása az átlátszó elektróda és a hordozó közé. A piacvezető Pixelligent-től származó filmekben cirkónium-dioxidot (ZrO₂) vagy titánium-dioxidot (TiO₂) ágyaznak be egy polimer rétegbe [138]. E réteg törésmutatóját fokozatosan is ki lehet alakítani a Fresnel-visszaverődések csökkentése érdekében, így ezek a filmek megközelítőleg 2,5-szeres fénykivonás-növekedést eredményeznek. A belső fénykivonó rétegek OLED-eszközökbe való beépítése kihívásokat jelent. A fénykivonó filmeknek stabilnak és kompatibilisnek kell lenniük az OLED-gyártás következő lépésével. Ha polimer gazdaanyagokat használnak, azoknak „formázhatóknak” kell lenniük, megakadályozandó, hogy a víz és az oxigén bejusson

az eszközbe. a fénykivonó rétegen keresztül. Ezenkívül az anódleválasztás és a temperálás hőmérsékleteit korlátozni kell, az anód kialakítása is nehézkes lehet, és oldószerek bejutását teszi lehetővé. A DOE által támogatott egyik projektben a PPG (most: Vitro) kidolgozott egy olcsó online eljárást: fényszóró anyagok beágyazását egy üveg hordozóba az úsztatott üveggyártás során. Ez a megoldás sima, áthatolhatatlan üvegfelületet eredményez az OLED-leválasztás számára. A kezdeti teljesítőképességi eredmények azonban szerények, kb. 1,6-szeres fénykivonás-növekedést eredményeznek. A hatásfok-előrelépések eléréséhez olyan nagy hatásfokú, legalább 2,5-szeres fénykivonás-növekedést eredményező fénykivonási módszerekre van szükség, amelyeket az élettartam és a kihozatalok veszélyeztetése nélkül lehet a panelekbe integrálni.

Lehetőség/kihívás: Fénykivonás növelése rugalmas OLED-ekben

A rendelkezésre álló belső fénykivonó rétegek nem konzisztensek a rugalmas OLED-ekkel. A fő probléma megfelelő nanorészecske/gazdaanyagok és leválasztási technikák megtalálása, amelyek hajlítás esetén stabilak maradnak és amelyekre átlátszó elektródákat és OLED-eket lehet építeni. Másik probléma a fénykivonó rétegek olyan felületi kiképzése, amely megakadályozza a víznek és az oxigénnek a szélek mentén történő bejutását.

Lehetőség/kihívás: Csökkentett optikai abszorpció az OLED-rétegben

A többirétegű OLED-ek túlsúlya és a fényszóró rétegek bevezetése – amelyek sok foton recirkulálását eredményezik az eszközön belül – megnövelte az abszorpciós veszteségekre irányuló figyelmet. Minden olyan esetben, amikor egy foton visszaverődik a fényszóró rétegről vagy az átlátszó hordozóról, kétszer át kell hogy haladjon az átlátszó anódon és a szerves rétegeken, majd a katódnál visszaverődik. Ennél a folyamatnál három külön figyelmet érdemlő komponens is van.

[136] Kyulux: „Our Technology”, (<http://www.kyulux.com/our-technology>)

[137] T.-A. Lin, T. Chatterjee, W.-L. Tsai, W.-K. Lee, M.-J. Wu, M. Jiao, K.-C. Pan, C.-L. Yi, C.-L. Chung és K.-T. Wong: „Sky-Blue Organic Light Emitting Diode with 37% External Quantum Efficiency Using Thermally Activated Delayed Fluorescence from Spiroacridine-Triazine Hybrid”, *Advanced Materials*, vol. 28, no. 32, p. 6976–6983, 2016. aug. 24.

[138] Z. Chen és J. Wang: „Pixelligent Internal Light Extraction Layer for OLED Lighting”, *Pixelligent Technologies LLC*, Baltimore, Maryland, 2014

• Átlátszó anód: A kereskedelemben kapható OLED-ekhez még mindig indium-ón-oxidot (ITO) használnak. Igen nehéz egyszerre kis – 10 ohm/egységterületnél ($\Omega/\square$) kisebb – rétegellenállást és kis (5%-nál kisebb) optikai abszorpciót elérni. Az alternatív átlátszó vezetőkkel kapcsolatos kutatómunka során biztató laboratóriumi eredmények születtek polimer gazdayanyagba ágyazott ezüst nanohuzalokkal kapcsolatosan, de ilyen elektródákra le választott, megbízható OLED-ekről még nem számoltak be.

• Töltésgeneráló rétegek: A Philips-szel (most: OLEDWorks) együttműködésben az Aixtron és az RTW Aachen University kimutatta, hogy a töltésgeneráló rétegek jelentős optikai abszorpciót eredményezhetnek, gyakran 90% alatti átviteli sebességek mellett [139]. Ez a veszteség gyakorlatilag a hat szerves rétegű eszközökre vonatkozik. A Philips-csoport becslése szerint a fénykivonási hatások 4%-ot esik a háromról hat rétegű struktúrára váltva át [130].

• Katód: A fotonelnyelődés fontos előidézője lehet a katódnál fellépő tökéletlen visszaverődés. A Philips-csoport kimutatta, hogy a hatások jelentősen megnövelhető, ha a szokásos alumíniumkatódot ezüstkatódra cserélik ki. Ezüstkatód, belső fény-szóró réteg és külső fólia használatával 65%-os fénykivonást értek el egyrétegű és 57%-osat háromrétegű eszközöknél. A kutatók nagy figyelmet szenteltek a felületi plazmonok gerjesztésének a katódban, amikor az emittorréteg igen közel volt a fém elektródához. A hatás vastag transzportréteg bevezetésével csökkenthető, és több-rétegű eszközöknél kisebb gondot okoz.

Lehetőség/kihívás: Egyvonalba állított emittáló dipólusok

A fotonok nagyobb valószínűséggel szöknek meg, amikor a merőlegeshez közeli irányban emittálódnak. Ez akkor valószínűbb, ha a molekuláris dipólusok az OLED síkjában vannak. Az orientált molekulájú foszforeszkáló rétegek fejlesztése nagy léptekkel halad előre – IR-alapú emitterek számára a Dél-Kaliforniai Egyetemen, Pt-alapú emitterek számára pedig az Arizonai Állami Egyetemen és a Szöuli Nemzeti Egyetemen [133] [140] [141]. Az 5.6 ábra azt mutatja, hogy 35% feletti külső kvantumhatásfokot sikerült elérni fénykivonást növelő struktúrák nélkül.

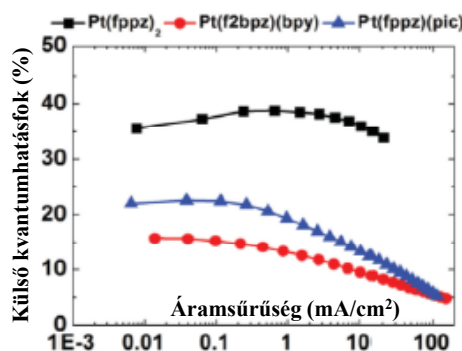
Lehetőség/kihívás: A planárszimmetria megtörése

Nehéz megnövelni a fénykivonást olyan eszközknél, amelynek minden felülete sík.

Forrás	OLEDWorks	LG*
Termék	Brite 2	LL056RS1-93P1
Fénysűrűség (lm/m^2)	10.000	10.000
Sugárzás fényhasznosítása (lm/W)	302	328
Elektromos hatások (%)	71	80
Belső kvantumhatások (%)	60	62
Fénykivonási hatások (%)	49	55
Panel hatások (%)	21	27
Panel fényhasznosítása (lm/W)	63	90
Korrelált színhőmérséklet (K)	3000	3000
Színvisszaadási index (R_a)	>90	93
Színvisszaadási index (R_9)	>70	-
Duv**	-0.0016	0.0005
L70 élettartam (óra)	50.000	40.000

5.1 táblázat – Az OLED-panelek hatásfokának összetevői

*Noha ennek az LG-panelnek az adatlapja elérhető az interneten, a termék még nem került kereskedelmi forgalomba **A fekete test helyétől adódó távolság az u-v színdiagramon



5.6 ábra – Platina-alapú emitterekkel ellátott foszforeszkáló OLED-ek külső kvantumhatásfoka

(Forrás: K.H. Kim et al., Seoul National University: „Crystal Organic Light-Emitting Diodes with Perfectly Oriented Non-Doped Pt-Based Emitting Layer”, *Advanced Materials*, 2016. ápr. [141])

A fény-szóró részecskék bevezetése csak az egyik példája annak a sokféle stratégiának, amellyel háromdimenziós struktúrákat igyekeznek létrehozni az eszköz belsejében.

Más javaslatok rácsok bevezetése mellett szóltak az emittorrétegek és az átlátszó katódok vagy a belső többlencsés tömbök közé. Az utóbbi megoldás igen hatásosnak bizonyult a Panasonic által végzett laboratóriumi kísérletek során [142], de kereskedelmi forgalomba kerülő panelekben még nem tudták alkalmazni.

A kutatók azt javasolták, hogy a planárszimmetriát meg lehet törni az OLED-ek hullámos felületű hordozókon való kialakításával. Ezt a DOE számos szilárdtest-világítási projektjénél alkalmazták. A North Carolina State University

kutatócsoportja létrehozott egy kvázivéletlen, 260nm átlagos ismétlődésű és 50nm FWHM (teljes szélesség a maximum felénél) spektrumú rácsos struktúrát, amelynek a tipikus hullámhossza 90nm volt. A kutatócsoport 87%-os hatásfoknövekedést figyelt meg anélkül, hogy a szivárgási áram megnőtt volna [143]. A Iowa State University kutatócsoportja max. 2,4-szeres növekedésről számolt be polikarbonátra felvitt 215-500nm mélységű mintázatok esetén [144]. A fő problémát ennél a megoldásnál a hullámosított hordozókon

[139] M. Brtast, S. Axmann és M. Slawinski: „Efficient Stacked OLED processed by Organic Vapor Phase Deposition”, Materials Research Society Symposium, San Francisco, Kalifornia, 2015

[140] J. Li: „Efficient and Stable OLEDs Employing Square Planar Metal Complexes and Inorganic Nanoparticles”, DOE SSL R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016

[141] K.-H. Kim, J.-L. Liao, S. W. Lee, B. Sim, C.-K. Moon, G.-H. Lee, H. J. Kim, Y. Chi és J.-J. Kim: „Crystal Organic Light-Emitting Diodes with Perfectly Oriented Non-Doped Pt-Based Emitting Layer”, *Advanced Materials*, vol. 28, no. 13, pp. 2526-2532, 2016. ápr. 6.

[142] K. Yamae, H. Ysuki, V. Kittichungchit, Y. Matsuhisa, S. Hayashi, N. Ide és T. Komoda: „High-Efficiency White OLEDs with Built-up Outcoupling Substrate”, Society for Information Display International Symposium Digest of Technical Papers, vol. 43, no. 1, pp. 694-697, 2012. jún.

[143] F. So: „Low Cost Corrugated Substrates”, DOE OLED Stakeholder Meeting, Corning, New York, 2016

[144] E. Mann: „Enhanced Light Extraction from Low Cost White OLEDs Fabricated on Novel Patterned Substrates”, DOE SSL R&D Workshop, Long Beach, Kalifornia, 2017

kialakított OLED-ek megbízhatósága jelent. Sok év eltelhet addig, amíg a gyártók elfogadják a kockázatot.

A University of Michigan egyik kutatócsapata többféle módszert vizsgált: 1) anód alatti rácsokat – 300nm-es mélységben az indium-ón-oxid (ITO) mögötti hordozón; 2) anód alatti rácsokat az emittáló struktúra tetején – tükrös és anód alatti rács készítése a hordozón, amelyre leválasztják az OLED-et és az átlátszó katódot; és 3) a katódfelületek hullámosítását – a hordozó hullámosításával szerves gőzfázisban leválasztott-növesztett szerves nanooszlopokkal, vagy nyomtatással mintázott polimer-rétegekkel az üveghordozón.

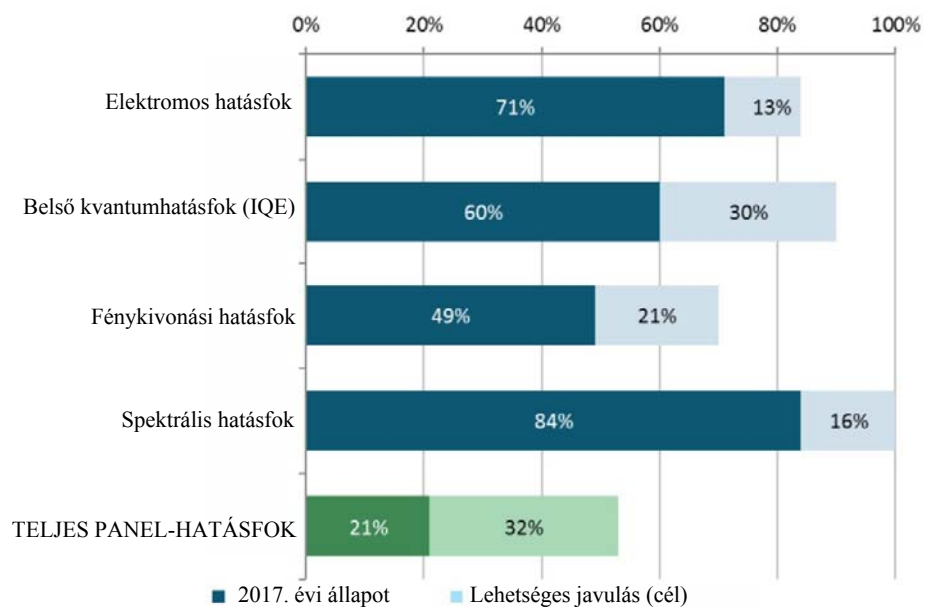
5.1.6 A hatásfokok felosztása és a kitűzött célok

Az 5.1 táblázat két OLED-eszközcsoport – a jelenleg kereskedelmi forgalomban lévő panelek és az 2017-ben várhatóan megjelenő következő generációs panelek – hatásfok-tényezőinek becsléseit hasonlítja össze. Az első oszlop az OLEDWorks Brite 2 paneljére vonatkozik, a második pedig egy olyan panelre, amelyet az LG új gyártósorán fognak gyártani. Ennek a gyártósornak az üzembe helyezése azonban késlekedhet, és a teljesítményképes paraméterek is változhatnak. Ezek az adatok megerősítik azt, hogy a szín jelentősen javult, de még hosszú utat kell megtenni az eszköz hatásfokának optimalizálásáig. A költség is fontos kihívás marad az OLED-termékek elfogadása terén.

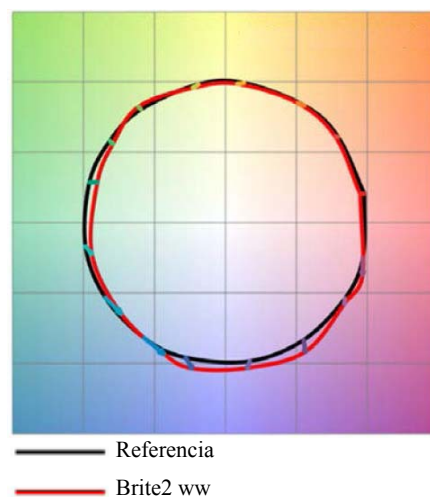
Az 5.7 ábra az OLED-ek veszteségi csatornáit mutatja, összehasonlítva a modern termékek teljesítményképességét a programcélokkal, és bemutatja azt is, hogy milyen fejlődésre lenne lehetőség. A 2017. évi értékek a 6-rétegű Brite 2 panelre vonatkoznak, amelynek fényhasznosítása 63 lm/W 85mA-es áram és a 105 cm²-es fényt adó területű panelre adott 18,9V-os meghajtófeszültség esetén [124]. A cél 360 lm/W sugárzási fényhasznosítás (LER) és 190 lm/W panel-fényhasznosítás elérése.

5.1.7 A panelek színminősége

A panelhatásfok viszonylag lassú növekedésének egyik fő oka az, hogy mindkét piacvezető gyártó cég a színminőséget tekint a legfontosabbnak. A vörös színtónusok megnövekedett reprezentálását az R9 jóval nagyobb értékei mutatják. Néhány újabb tanulmány kimutatta, hogy alacsony korrelált hőmérsékletű panelek esetén sok vörös részeseit előnyben, ha a színpont a CIE (u, v) színdiagramjában a feketetést görbéje alatt van. Ezt sikerült elérni a Brite 2 panelnél. Az OLEDWorks által közölt



5.7 ábra – Az OLED-panelek veszteségi csatornáit és hatásfokait



5.8 ábra – A Brite 2 panel színvektor diagramja (Forrás: OLEDWorks, Brite 2 FL300 adatlap [124])

adatok az új TM30-15 mérőszámot használják 86-os Rf színhűség-index és 100-as Rg színskála-index mellett. A színvektor 5.8 ábrán látható formája azt igazolja, hogy valamennyi szín jól reprezentált.

Az OLEDWorks és az LG fejlesztését 3000K színhőmérsékletű meleg fehér panelekre fókuszálja. Mindketten kínálnak 4000K színhőmérsékletű paneleket is, de 16-20% fényhasznosítás-vesztés mellett. Az OLEDWorks kínálatában szerepel borostyánsárga fényű panel is, lényegében kék komponens nélkül, amelyet egészségügyi intézmények, idősek otthonai, közintézmények (pl. börtönök) és lakások hálószobái számára terveztek.

Más cégek egyéb színes paneleket és olyanokat is kínáltak, amelyeknek színtónusát lehet állítani, de ezeknek a paneleknek a

kis fényhasznosítása és a magas ára jelenleg kizárja őket az általános világítási alkalmazások köréből.

5.1.8 Formatényező

Noha az OLED-ek támogatói gyakran mutattak be tetszőleges alakú prototípus paneleket, a kereskedelemben kapható legtöbb panel négyzet, téglalap vagy kör alakú. Az OLEDWorks háromféle alakot kínál, míg az LG katalógusa hétféle különböző formájú panelt tartalmaz. A panelek alakját a mintakészítésre rendelkezésre álló kevés opció korlátozza, és csak korlátozott haladást sikerült elérni olyan nyomtatási eljárások kifejlesztése terén, amelyeknél a formákat könnyen lehet változtatni.

A rugalmas panelek gyártásának fejlődése is csatlakozást okozott. Habár az LG katalógusában és promóciós anyagaiban szembe-tűnően sok rugalmas panel található, hozzáférhetőségük korlátozott, és e termékeknek a megbízhatósága továbbra is probléma. A rugalmas panelek gyártása volt az egyik motivációs tényező a Konica Minolta roll-to-roll gyártásának megvalósítása mögött, de a gyártósort még nem sikerült tömegtermelésre átállítani.

5.2 OLED-alapú lámpatestek

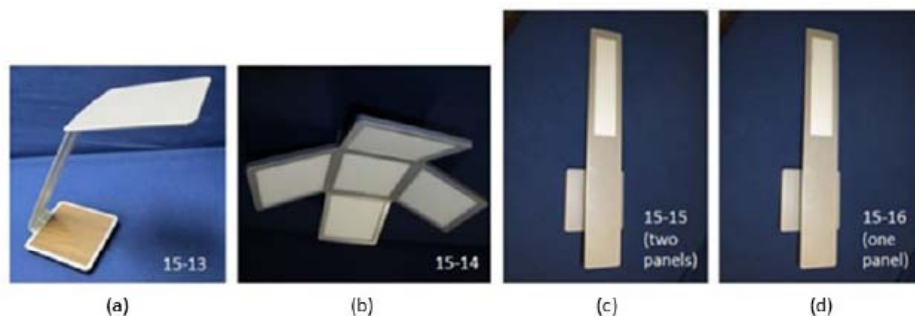
Egy OLED-panel lámpatestté történő átalakításához a panelt elektromos csatlakozásokkal és meghajtókkal kell kiegészíteni a panelra jutó áram vezérléséhez, mechanikai házba kell szerelni a törékeny panel védelme érdekében és hőelvezetésről kell gondoskodni (habár a nagyobb felület következtében könnyebb a hűtés, mint LED-es lámpatestek esetében. Ha a Lambert-fényeloszlás elegendő az alkalmazáshoz, külső optikákra nincs szükség, a fénynyaláb formálása azonban kihívást jelent a jövő számára..

5.2.1 Az OLED-alapú lámpatestek hatásfoka

Számos OLED-alapú lámpatestet úgy alakítottak ki, hogy csupán a meghajtóban keltezzen járulékos hatásfok-veszteség, ami 15% körüli hatásfok-csökkenéshez vezet. Nem alkalmaznak külső optikákat, így a fényeloszlás közel olyan, mint a Lambert-sugárzóké. Habár a LED-es lámpatestekhez hasonlóan az OLED-gyártók is dönthetnek úgy, hogy paneljeiket olyan körülmények között működtetik, amelyek eltérnek a panelgyártók specifikációs adataiban közlöttől. A jelen fejezet, kereskedelmi forgalomban kapható OLED-alapú lámpatestek példáit mutatja be az OLED-meghajtók teljesítőképességét és a fényáramot is feltüntetve.

A DOE CALiPER és Gateway programjaiban tesztelték néhány Acuity-gyártmányú lámpatestet. Az Aurora Lighting Design egyik irodájába felszerelt Trilia™ mennyezeti lámpastről készült Gateway-tanulmányban 120 db LG-gyártmányú, 100mm x 100mm-es panelt közel a panelekénti 75 lm-es javasolt fényáram elérésére hajtottak meg 11 db olyan Osrám-meghajtóval, amelyeket eredetileg szervetlen LED-ekhez konstruáltak. 189 W fogyasztással 8518 lm teljes fényáramot sikerült elérni, azaz 45 lm/W fényhasznosítás adódott a névleges 55 lm/W panel-fényhasznosításhoz képest, ami 82%-os lámpatest-hatásfokot jelent [121].

A 2016-os CALiPER-tanulmányban tesztelt négy lámpatest az 5.9 ábrán látható. A Chalina öt ugyanolyan LG-panelt használ, fényárama 330 lm, fogyasztása 7,4 W, így a lámpatest fényhasznosítása 45 lm/W. A kiértékelést végzők szerint a meghajtó hatásfoka közel 87% volt. Az ugyanebben a tanulmányban tesztelt Aedan falilámpa két változatban állt rendelkezésre. Az egypaneles típus 65 lm fényáramot állított elő



5.9 ábra – A DOE szilárdtest-világítási programjának CALiPER-jelentésében tesztelt OLED-ek: (a) Aerelight asztali lámpa az OTI Lumionics-től; (b) az Acuity Brands Chalina függesztéke; (c) az Acuity Brands kétpaneles Aedan falilámpája; (d) az Acuity Brands egypaneles Aedan falilámpája (Forrás: PNNL: „CALiPER Report 24: Photometric Testing, laboratory Teardowns, and Accelerated Lifetime Testing of OLED Luminaires”, 2016. szept. [123])



5.10 ábra – A Visa Lighting Limit és Petal elnevezésű lámpatestei (Forrás: Visa Lighting adatlapja [145])

2,8 W felvétele mellett (azaz 23 lm/W volt a fényhasznosítása), míg a kétpaneles modell 130 lm fényáramot állított elő 4,3 W felhasználásával, azaz 30 lm/W fényhasznosítást ért el. A meghajtók hatásfokát 47, illetve 58%-ra becsülték, ami azt igazolja, hogy a meghajtók veszteségeinek a jelentősége nő a teljesítmény csökkenésével. Az ebben a CALiPER-jelentésben tesztelt utolsó lámpatest az OTI Lumionics cég Aerelite asztali lámpája volt, amely egyetlen – 9,6W mellett 270 lm fényáramot adó – panelt tartalmazott, azaz fényhasznosítása 28 lm/W volt. A meghajtó hatásfokát 77%-ra becsülték [123].

A Workrite Ergonomics cég „Natural” nevű asztali lámpája egy 320mm x 110mm-es LG Chem-panelt használ fel. Maximális fényárama 442 lm 13,8 W fogyasztása mellett, azaz fényhasznosítása 32 lm/W. 94-es színvisszaadási indexével, 5-éves garanciájával és 209 USD árával a lámpa jól összevethető a Workrite Astra 2 nevű ekvivalens LED-lámpájával. Az LG Display-től származó specifikációs adatlap azt javasolja, hogy ezt a panelt 4,8 W-tal

hajtás meg 250 lm fényáram előállításához, ami 55 lm/W fényhasznosítást jelent. A lámpatestnek a nagyobb fényáramnál adódó 40%-os fényhasznosítás-csökkenését részben a panel túlajtása, részben a meghajtó veszteségei okozzák. Az európai Emdedesign cég OMLED termékvalasztékának részeként kifejlesztett olyan függesztékett, amelyek 2-5 db OLEDWorks-gyártmányú Brite 1 panelt használnak fel. A panelek max. 300 lm fényáramot állítanak elő 7,4 W fogyasztás esetén 102mm x 102mm-es világító felületen. A javasolt maximális érték 280 lm 12 W fogyasztás mellett a kétpaneles és 695 lm 28 W felvétele esetén az ötpaneles változat esetén. A panelek így csúcsteljesítményüknél kisebb értékkel vannak meghajtva – olyan szinten, amelynél a panel fényhasznosítása 45 lm/W körüli. A lámpatestek fényhasznosítása 23 lm/W a kétpaneles és 25 lm/W az ötpaneles változatnál, amiből az következik, hogy a meghajtó hatásfoka 55% körüli.

A Visa Lightingnak az 5.10 ábrán bemutatott „Limit” és „Petal” függesztékéi három ugyanilyen Brite 1 panel használnak fel. A Limit 850 lm fényáramot állít elő 27 W felvétele esetén, ami azt mutatja, hogy a panelek meghajtása közelebb van a legnagyobb teljesítményszintjeikhez. Mindenesetre a fényhasznosítás nagyobb, 32 lm/W, amiből az következik, hogy a lámpatest hatásfoka 75% közeli. A Petal fényárama csak 700 lm 27 W felvétele és így 26 lm/W fényhasznosítás mellett, aminek talán az az oka, hogy a fénynek egy része elnyelődik a lámpatestben annak háromdimenziós formája okán.

Az OLEDWorks és az Acuity Brands közösen dolgozott a DOE egyik szilárdtest-világítási projektjében az OLEDWorks legújabb kifejlesztett paneljein alapuló lámpatest-prototípusok kifejlesztése kap-

[145] Visa Lighting. „Products”, (<http://www.visalighting.com/products>)

csán. Az egyik „Trilia” lámpatestet 24 db prototípus-panellel építették meg, fényhasznosítása 72 lm/W körüli, fénnyárama 2240 lm, fogyasztása pedig 38 W, ami 59 lm/W lámpatest-fényhasznosításnak felel meg. Egyetlen távolban felszerelt meghajtót használtak, és a lámpatest hatásfoka meghaladta a 80%-ot.

Lehetőség/kihívás: OLED-specifikus meghajtók

A váltakozófeszültség egyenirányítása és az egyenfeszültség vezérlése nem teszi lehetővé az egyes panelek fényerősségének külön-külön történő vezérlését, ami problémát okoz, ha egy panel meghibásodik. A DOE egy másik projektjében az Acuity Brands egy 66 panelből álló „Canvis” lámpatestet tesztelt, amelyben az AC-DC átalakítást egy mester meghajtó végezte, de mindegyik panelt elláttak egyenfeszültségű meghajtókkal a fényerősség egymástól független vezérlése érdekében. Az AC-DC átalakító hatásfoka 88% volt, az egyes DC meghajtók pedig 72%, miután a paneleket kis (0,85W) teljesítménnyel táplálták. Noha a lámpatestet 86 lm/W fényhasznosítású prototípus LG-panelekkel építették fel, a 4870 lm teljes kimeneti fénnyáram csak 55 lm/W lámpatest-fényhasznosítást eredményezett [120]. Ezek az eredmények azt mutatják, hogy ha egyedi vezérléssel látjuk el az egyes panelek fénnyáramát, további kutatómunkára van szükség ahhoz, hogy alacsony teljesítmények mellett meg lehessen növelni a meghajtók hatásfokát.

A lámpatestek konstrukciójának és a meghajtóknak a tökéletesítése segítheti a költségek csökkentését. Az 5.2 táblázatban közzétett előrejelzések azt feltételezik, hogy az OLED-meghajtók hatásfoka a LED-meghajtókéval együtt fog javulni, de csak mintegy kétéves csúszással, mivel az OLED-specifikus meghajtók optimális működtetést igényelnek. A kereskedelemben kapható LED-meghajtók feszültsége nem feltétlenül egyezik meg az OLED-panelek vagy OLED-panelegyüttesek feszültségével, ami a rendszer-hatásfok csökkenéséhez vezet. Az OLEDWorks most speciális meghajtókat kínál paneltermékei kiegészítésül, hogy enyhítsen az installációs gondokon [146]. A DOE 2016-ban és 2017-ben rendezett szilárdtest-világítási K+F workshopjain külön hangsúlyozták az ilyen összetett OLED-modulok (light engine-ek) kifejlesztésének szükségességét. A felfeztetőretek és a meghajtók ilyen együttes tervezése segíthetné leküzdeni az elektromos hatásfok-problémákat. A lámpatest-hatásfokban elért javulások mellett az OLED-alapú lámpatestek által

Paraméter	2016	2018	2020	2025	Cél
Panel-fényhasznosítás* (lm/W)	60	90	110	150	190
Lámpatest optikai hatásfoka	100%	100%	100%	90%**	90%**
Meghajtó hatásfoka	85%	85%	90%	90%	95%
A meghajtótól a lámpatestig mérhető hatásfok	85%	85%	90%	81%	86%
A lámpatest eredő fényhasznosítása* (lm/W)	51	76	99	122	162

5.2 táblázat – Az OLED-alapú lámpatestek hatásfok előrejelzései (Forrás: DOE SSL OLED Stakeholder Meeting, Corning, New York, 2016. okt. [147])

*Fényhasznosítás-előrejelzések CRI >90 és CCT 3000K feltételezése mellett

** Sugárnyaláb-formáló optika esetleges használatát reprezentáló veszteségek

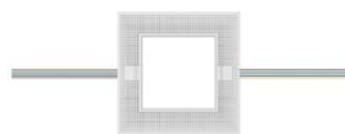
nos használati hatékonyságát befolyásolhatja a fényeloszlás profilja is. Az OLED-ből széles szögben emittálódó fényt többféle módon lehet jó hatásfokkal felhasználni. A mennyezeti lámpatestek vagy a magasba szerelt függesztékek jó egyensúlyt teremtenek a függőleges és vízszintes felületek megvilágítása között, ami fontos az arcok és a fali díszítések felismerésében. Ha a fényhasznosítás 100 lm/W-ra vagy e fölé növekedhetne, az OLED-ek jó eséllyel kelthetnének versenyre a többi, általános világítási célú fényforrással. A helyi megvilágításoknál a munkafelülethez közel elhelyezett OLED-ek zavaró árnyékok és kápráztatás nélküli kiegészítő világításról gondoskodhatnak. Valószínűtlennek látszik, hogy ezt el lehetne érni a panelek belüli, ezért lámpatest-szinten külső optikai elemekre lehet szükség. Habár bizonyos fénysugár-formáló optikák költség-hatékonyak lehetnek a nagy fényű OLED-alapú lámpatestekben, a csupasz panel számos alkalmazáshoz elegendő marad, ami minimalizálja a járulékos költségeket, amikor a fényforrásról lámpatestre váltunk. A hatásfok-fajták várható fejlődését egy tipikus lámpatest esetén az 5.2 táblázat mutatja. Az optikai hatásfok 2020 utáni előrejelzésében mutatkozó visszaesés a nagyobb irányított fényeloszlással összefüggő optikai veszteségekkel van kapcsolatban, míg 2020-ig külső sugárnyaláb-elosztást nem tételezünk fel.

5.2.2 Lámpatestek konstrukciója

Az OLED-ipar meghatározta az OLED-es világítás kulcsfontosságú megkülönböztető sajátosságait, amelyek alapján az OLED-ek vélhetően előnyt élveznek a világítási iparban. Ilyen a káprázscsökkenés, a környezethez való alkalmazhatóság, az átlátszóság és a könnyű, karcsú konstrukciók. A termékfejlesztés szempontjából kulcsfontosságú a megkülönböztető sajátosságok beépítése. Várható, hogy a lámpatest-fejlesztés fel fog gyorsulni, amint a gyártók



5.11 ábra – Greenlight, tervező: Sadyr Khabukhayev (Forrás: Corning: „Világítás lámpabúra nélkül” c. verseny, 2016 [148])



5.12 ábra – Felületbe épített foglalat, tervező: Matthew Boyko (Forrás: Corning: „Világítás lámpabúra nélkül” c. verseny, 2016 [148])

meggyeznek a közös panelméretekben és elektromos és mechanikai csatlakozási rendszerekben. A lámpatest-beépítés egyszerűsítéséhez – és ezáltal a lámpatest termékfejlesztésének és alkalmazásának felgyorsításához – vezető másik út a panelgyártók számára a paneleket vagy panelcsoportokat megfelelő, hatékony meghajtó mechanizmussal ellátó összetett OLED-modulok (light engine-ek) kifejlesztése, amelyeket a lámpatestgyártók be tudnak építeni a lámpatestekbe. Az Acuity jelentős előrehaladást ért el olyan lámpatest-architektúrák kifejlesztésében, amelyek több gyártótól származó panelek beépítését is lehetővé teszik.

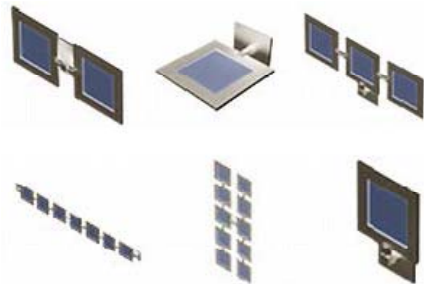
[146] OLEDWorks: „Lumiblade Compatible Drivers”, 2016. (<https://www.oledworks.com/products/lumiblade-compatible-drivers/>)

[147] DOE SSL Program: „DOE SSL OLED Stakeholder Meeting”, Corning, New York, 2016

[148] Corning: „OLED Lighting Design Contest Winners Announced”, 2016. szept. (<https://www.corning.com/worldwide/en/innovation/corning-emerging-innovations/oled-lighting-design-contest-winner-announcement.html>)



5.13 ábra – Hexy OLED-alapú lámpatest, tervező: Mike Garner (Forrás: Corning: „Világítás lámpabúra nélkül” c. verseny, 2016 [148])



5.14 ábra – Astel Versa beltéri OLED-lámpacsalád (Forrás: Astel Lighting [149])

Az OLED-panelek lapos formája lehetővé teszi, hogy azokat készülékekbe, bútorokba és architekturális részletekbe építsék be. 2016-ban a Corning Glass és az OLED Works szervezett egy OLED-es világítás-tervezési versenyt, amelyen három díjat ítéltek oda. Amint az 5.11 ábrán látható, az első díjat a kazahsztáni Izmir Institute of Technology „Greenlight” alkotása kapta, amely kiegészítő világításként OLED-panelet tartalmaz egy olyan lámpatestben, amely függeszték funkciója mellett dekorációs beltéri növénytartóként is funkcionál.

Néhány beépített panel esetén – például a szekrények alá szerelt világításoknál – van elég hely a hagyományos meghajtók és csatlakozók számára. Más paneleknél azonban külön ki kell találni azt, hogy hogyan helyezték el a szerelvényeket, meghajtókat, tápvezetéseket és a vezérlőeszközöket. A második díjat ezért nem véletlenül Matthew Boyko kapta, a Society Creative tervezőiroda munkatársa felületbe építhető foglalatáért (l. az 5.12 ábrán), amely elegánsabb falilámpák kialakítását tehetné lehetővé.

A harmadik díjat pedig Mike Garneré (MSG Lighting) kapta az 5.13 ábrán bemutatott Hexy OLED elnevezésű lámpatestéért. A lámpatest kellemes látványt nyújt, háromdimenziós szerkezetbe elrendezett sík panelekből áll. Számos lámpatestgyártó használja ezt a megközelítést – arra várva, hogy kereskedelmi forgalomba kerüljenek a kényelmes OLED-es világítópanelek és így számos új, háromdimenziós lámpatest-konstrukcióra nyílnak lehetőségek. Néhány gyártó modulfelepítést kínál – például az Acuity Brands Trilia és Canvis termékeivel és az Astel a Versa családjával



5.15 ábra – Olessence lámpatest, amely OLED- és LED-technológiát is alkalmaz (Forrás: Acuity Brands, 2016 [150])



5.16 ábra – Az Osram OLED-LED hibrid hátsó helyzetjelző lámpa autókhoz (Forrás: Osram: OLED-LED Hybrid Rear Combination Light, 2017 [151])

(l. az 5.13 ábrán). A lámpatestek opcióként sokféle felszerelési lehetőséget és egy olyan meghajtót kínálnak, amely DMX 512 digitális multiplex vezérlővel történő dimmelési lehetőséget támogat.

Felismerve, hogy a LED és az OLED fényforrások egymást kiegészítő előnyökkel rendelkeznek, több lámpatestgyártó olyan lámpatesteket fejlesztett ki, amelyek kombinálják a két technológiát. Az Acuity Brands 5.15 ábrán bemutatott lapos Olessence függesztéke a lefelé irányuló, Lambert-profilú direkt fénykomponens előállításához OLED-panelet használ. Az indirekt fénykomponens denevérszárny-fényeloszlást előállító, fröccsöntött anyagból készült optikai rendszerrel ellátott LED-fényforrások szolgáltatják a lámpatest tetejéről. A fény kilencven százalékát a LED-ek állítják elő, így a lámpatest teljes fényhasznosítása közel van a 100 lm/W-hoz. A lámpatest 1,2, 1,8 és 2,4 méteres hosszban készül, mindegyikük 2-2 db 200mm x 50mm-es OLED-panellel szerelve. A LED és az OLED fényforrások egyaránt 3000K, 3500K vagy 4000K színhőmérsékletűek, színvisszaadási indexük pedig nagyobb mint 80. A lámpatest a direkt és indirekt fénykomponensének egymástól független szabályozása érdekében kettős áramkörrel van ellátva. Sokféle vezérlő áll rendelkezésre, hogy fény- vagy mozgás-érzékelőket és hálózati csatlakozásokat lehessen beépíteni.

Az Osram is hibrid megoldást használ prototípus autójának hátsó lámpájához (5.16 ábra). OLED-eket használ a hátsó helyzet- és irányjelző lámpához, de a fékezés vagy a hátramenet jelzéséhez szükséges nagyobb fényerősséget LED-ek állítják elő.

5.2.3 OLED-meghajtók

Tekintettel a szilárdtest-világítás digitális természetének kiaknázására irányuló széles körű érdeklődésre, egyre nagyobb az igény az olyan áramkörök és komponensek iránt, amelyek az OLED lámpatest paneljeihez betáplált áramot egymástól függetlenül képesek vezérelni. Ezeknek az áramköröknek a legtöbb esetben először a hálózati váltakozófeszültséget egyenfeszültséggé kell átalakítaniuk. Ezután a paneleket és a csatlakozásokat úgy kell konfigurálni, hogy a szükséges egyenáramot lehessen szolgáltatni a megfelelő feszültségen.

Noha a fókusz a korábbi jelentésekben az energiahatékonyságra helyeződött, számos egyéb olyan tényező is van, amely fontos a vezérlőrendszerek tervezésénél.

- **Teljesítménytényező:** Ez a névleges áramú és feszültségű termék által kiszámolható látszólagos teljesítmény és az előállításához ténylegesen felhasznált teljesítmény hányadosa. Ezt az áramkörben lévő induktív és ellenállás jellegű terhelések aránya szabályozza. A javasolt értékek 0,95-nál nagyobbak.

- **Teljes harmonikus torzítás (THD):** Ez a harmonikus üzemmódokban adódó teljesítmények összegének és a váltakozóáram alaphérvencijájánál adódó teljesítménynek a hányadosa. A javasolt limit gyakran 20%, habár ennél szigorúbb értékeket is előírnak néha.

- **Elektromágneses zavarás:** Az Egyesült Államokban a limiteket a Szövetségi Kommunikációs Bizottság (FCC) állapítja meg.

- **Vezetékezés:** az előírásoknak – pl. az Underwriter's Laboratory előírásainak kell megfelelnie.

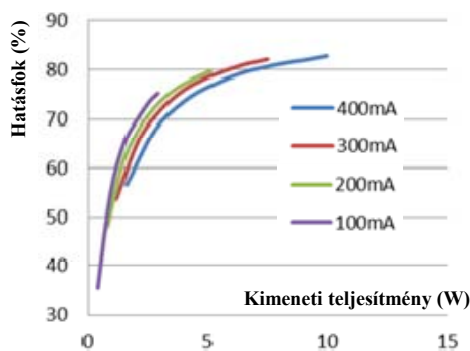
- **Villogás:** A fényerősség legtöbb rövid időszakos változása nemkívánatos jelenség. Noha gyakran hivatkoznak egyszerű mérőszámokra, például „villogási százalékra” vagy „villogási indexre”, egyes kutatók szerint, hogy meg kellene vizsgálni az intenzitásváltozások frekvenciafüggését.

- **Fényerősség-változtatási (dimmelési) tartomány:** Zökkenőmentes dimmelést kell lehetővé tenni – lehetőleg a maximális fényerősség 1%-a alatti értékekig. A villogás és a teljes harmonikus torzítás gyakran erősödik alacsony dimmelési szinteken, és a fényhasznosítás is jelentősen csökkenhet.

[149] Astel Lighting: „VERSA Interior OLED Light”, (<http://www.astel-lighting.com/new-products/108-versa-interior-oled-light.html>)

[150] Acuity Brands: „OLED Lighting - Inspiration Through Concepts”, 2016. (<http://www.acuitybrands.com/oled/inspiration-through-concepts>)

[151] OSRAM: „OLED-LED Hybrid Rear Combination Light”, (<http://www.osram-oled.com/oled/en/applications/automotive/oled-led-hybrid-rcl/index.jsp>)



5.17 ábra – A Philips kisfeszültségű Lumiblade OLED-meghajtójának hatásfoka (Forrás: OLEDWorks, Philips Lumiblade adatlap, 2016. márc. [152])

• **Öregedés figyelembe vétele:** Az OLED-ek öregedésével a kompenzálatlan panelek fénye elhalványul, miközben a tápsztűtség növekszik. Az áramkörnek elegendő teret kell engednie a feszültség-növekedéshez, amely tovább is növekedhet, ha a vezérlők növelik az áramfelvételt a megkívánt fényerősség fenntartása érdekében.

• **A panelek egymástól független vezérlése:** A több panellel rendelkező lámpatesteknél a panelek egymástól független vezérelhetősége növelheti a funkcionalitást és kompenzálhatja az egyes panelek fényáramai közötti nemkívánatos eltéréseket.

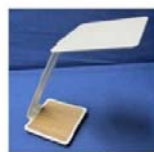
• **Hiba-válasz:** Az egyik panel meghibásodása szinte minden meghajtóáramkörnél megváltoztatja a lámpatestben lévő többi panelhez szállított áram nagyságát. Az OLED-ek legtöbb meghibásodása veszélyezteti a paneleket.

Egészen a közelmúltig a legtöbb OLED lámpatest olyan meghajtókat használt, amelyeket eredetileg szerves LED-ekhez terveztek. Ez nem megfelelő energiahatékonyságot eredményezhet, különösen egypaneleles vagy egyedi meghajtókkal szerelt többpaneleles lámpatestek esetén. Ez a probléma látható az 5.17 ábrán, amely a Lumiblade meghajtó teljesítményfüggését mutatja be [152].

A kis teljesítményszinten való működés hatása jól látható a 2016-os CALiPER tanulmány során végzett méréseknél. Az 5.18 ábra azt mutatja, hogy a teljesítménytényező, a teljes harmonikus torzítás és a hatásfok nem kielégítő azoknál a lámpatesteknél, amelyek csak egy vagy két panelt tartalmaznak (azaz az ID 15-13, 15-15 és 15-16 számú tesztekénél).

A kifejezetten OLED-ekre szabott meghajtók kifejlesztésének egyik akadálya, hogy a panelek elektromos jellemzői (5.3 táblázat) nincsenek szabványosítva. Emellett a panelek méretének, alakjának, vastagságának és bekötési elrendezésének szabványosítása segíthetne azoknak a lámpa-

CALiPER 15-13 (helyi világítás) CALiPER 15-14 (mennyezeti lámpa) CALiPER 15-15 (2-paneles lámpa) CALiPER 15-16 (1-paneles lámpa)

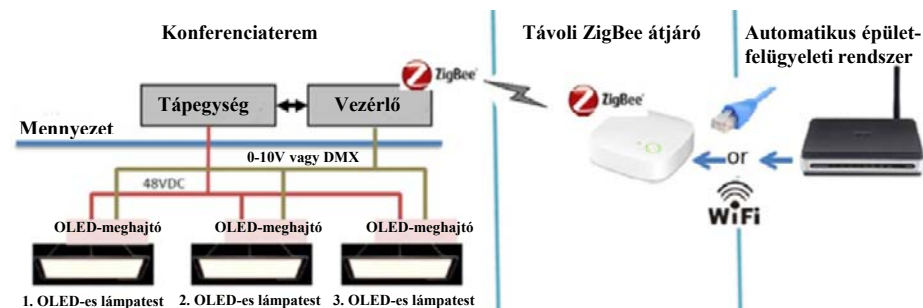


DOE CALiPER 10. test	Kezdeti fényáram (lm)	Teljes bemeneti teljesítmény (W)	Fényhasznosítás (lm/W)	Teljesítménytényező	CRI (Ra)	R9	Rf	Rg	Rf – 1. színárnyalat csoport	CCT (K)	Du,v	THD-I (%)
15-13	270	9.6	28	0.45	78	-6	78	95	74	2952	0.0010	188.1
15-14 mennyezeti	332	7.4	45	0.99	88	21	86	97	83	2946	0.0030	8.6
15-14 fali	329	7.4	45	0.99	88	20	86	97	83	2940	0.0030	8.6
15-15	130	4.3	30	0.42	88	21	87	97	83	2912	0.0020	189.1
15-16	65	2.8	23	0.40	88	21	87	97	83	2855	0.0030	192.2

5.18 ábra – Kolorimetria – Különböző OLED-termékek fotometriai és elektromos adatai (Forrás: „CALiPER Report 24: Photometric Testing, laboratory Teardowns, and Accelerated Lifetime Testing of OLED Luminaires”, 2016. szept. [123])

OLED-panelek	Működtető feszültség (V)	Működtető áram (V)
LG N6SA30	6	230
LG N6SA40	8.5	150
OLEDWorks Brite 2 FL300	20	260
OSRAM CDW-031	3.4	186
Kaneka KN-P-P4-BF-30	6.8	210
Lumittec P11B	9.2	590

5.3 táblázat – Kereskedelmi forgalomban lévő panelek működtető feszültsége és árama (Forrás: Jacky Qui, OTI Lumionics, DOE SSL R&D Workshop, Long Beach, Kalifornia, 2017. jan. [153])



5.19 ábra – Konferenciaterem világítási rendszerének vezérlőrendszer (Forrás: Mike Fusco, LED Specialists, DOE SSL OLED Stakeholder Meeting, Corning, New York, 2016. okt. [154])

testgyártóknak is, akik azzal a feladattal birkóznak, hogy különböző paneleket és meghajtókat szereljenek össze, s közben őrizték meg az egyszerű fényhasznosítást és a panelválaszték rugalmasságát a sokféle termékínálatnak megfelelően.

Az 5.19 ábrán egy olyan, többpaneleles rendszerekhez ajánlott vezérlőrendszer látható, amelyet LED-specialisták mutattak be a DOE 2016. évi SSL OLED Stakeholder tanácskozásán. A tápegység a 120 V-os váltakozófeszültséget 48 V-os egyenfeszültséggé alakítja át, amellyel maximum 14 db, egyenként max. 6,6 W teljesítményt felvevő OLED lámpatest táplálható 2 kábel és csatlakozó felhasználásával [154]. A 6,6 W egyetlen nagy panel vagy kisebb panelfűző táplálására használható. A vezérlőjeleket belül 1-10 V-os vagy DMX protokollokat használó különálló

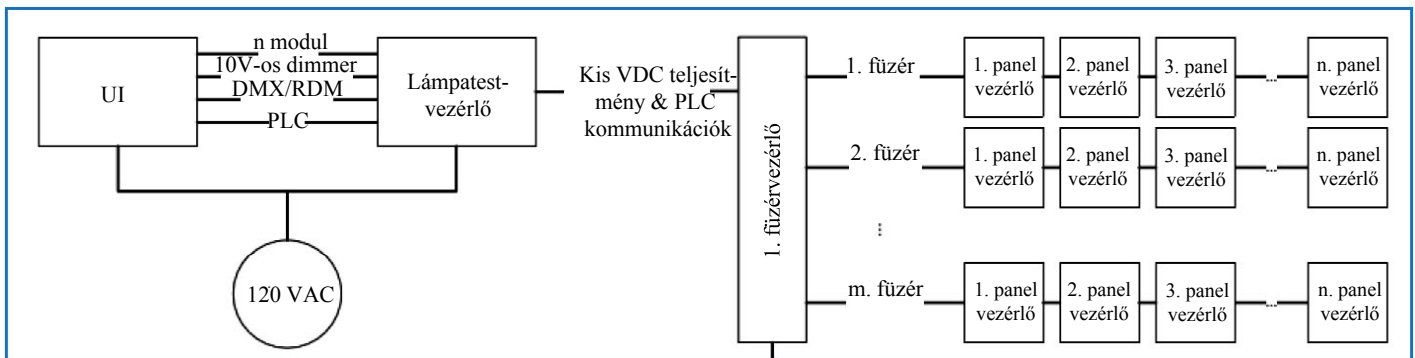
kábeleken lehet továbbítani, vagy külső linkekkel, Zigbee hálózat segítségével [154]. Alternatívaként a teljesítményt és a vezérlőjeleket kombinálni is lehet – esetleg teljesítményvezetékes kommunikáció (PLC) vagy PoE technológia segítségével [154].

Amint azt az 5.2.1 fejezetben megemlítettük, az Acuity Brands befejezte a DOE egyik szilárdtest-világítási K+F projektjét,

[152] OLEDWorks: „Philips Lumiblade OLED driver, low voltage”, 2016. márc. (<https://www.oledworks.com/wp-content/uploads/2016/03/Datasheet-Lumiblade-D024V-10W-0-1-0-4A-28V-D-A.pdf>)

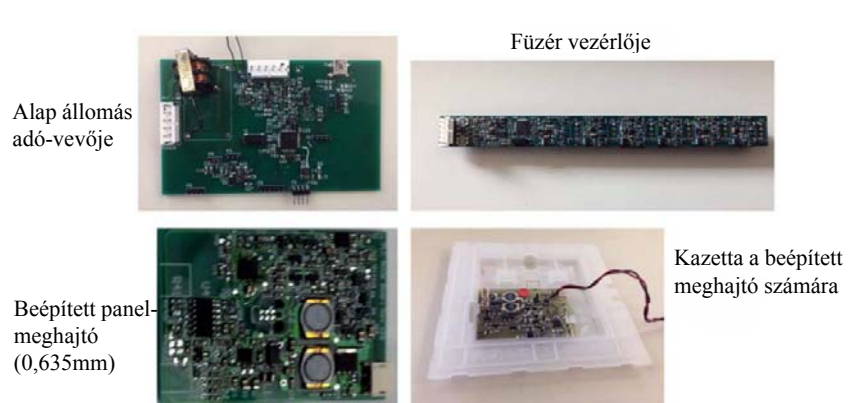
[153] J. Qiu: „OLED Luminaire Design, Challenges Remain”, DOE SSL R&D Workshop, Long Beach, Kalifornia, 2017

[154] M. Fusco: „Enabling Technologies to Bring OLEDs to Lighting Fixture Market”, DOE SSL OLED Stakeholder Meeting, Corning, New York, 2016



5.20 ábra – Egy OLED-alapú lámpatestben lévő egyedi panelek vezérlését ellátó rendszer felépítése (Forrás: Mike Lu, Acuity Brands Lighting, DOE SSL R&D Workshop, Long Beach, Kalifornia, 2017. febr. [120])

amely egy olyan rendszer építésére és tesztelésére vonatkozott, amely egy Canvis lámpatestben lévő 66 db panel egyedi vezérlését látja el. A három vezérlési szintű konfiguráció az 5.20 ábrán látható. A panelek hat fűzérben vannak elrendezve egy közbelső fűzér-vezérlő beiktatásával. A meghajtórendszer három komponense az 5.21 ábrán látható. A beépített meghajtók a panelek hátsó részén, egy olyan kazettában kaptak helyet, amely termikus szigetelést biztosít a meghajtó és az OLED-struktúra között.



5.21 ábra – Az egyedi panelvezérléssel ellátott több-paneles meghajtórendszer komponensei (Forrás: Mike Lu, Acuity Brands Lighting, DOE SSL R&D Workshop, Long Beach, Kalifornia, 2017. febr. [120])

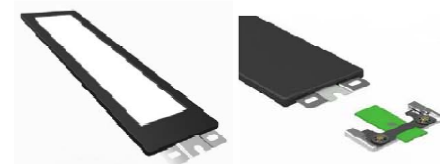
5.2.4 Összetett OLED-modulok (Light Engine-ek)

Az OLED-panelek vékony profilja nehézségeket okoz az elektromos csatlakozások szerelésében és alakításában. Ezenkívül a lámpatest-gyártók nem feltétlen akarnak befektetni olyan meghajtók keresésébe és beszerzésébe, amelyek illeszkednek a panelekhez. Ezért egyre nagyobb az érdeklődés olyan összetett modulok, azaz „OLED light engine”-ek biztosítására, amelyek révén egyszerre juthatnak kompatibilis panelekhez, meghajtókhoz és csatlakozókhoz.

Az 5.22 ábra az OLEDWorks Keuka-modulját mutatja, amelynek teljes vastagsága 0,6 mm, és a foglalat 21 mm-rel növeli meg a panel 262 mm-es hosszát. A 8300 cd/m²-es névleges fénysűrűséget 25%-ra lehet szabályozni. A panel 2016-ban már elérhető volt, kereskedelmi forgalomba hozatalát 2017 első negyedévére tervezték.

5.2.5 Az OLED-alapú lámpatestek megbízhatósága

Viszonylag kevés hosszú távú tesztet végeztek az OLED-alapú lámpatestek megbízhatóságával kapcsolatban. Az RTL International a DOE szilárdtestvilágítási programjának támogatásával 4 db öt-paneles lámpatestre végzett el egy kis gyorsított élettartamvizsgálatot [156]. A paneleket



5.22 ábra – a Keuka modul elől- és hátulnézete (Forrás: OLEDWorks, a Keuka OLED-modul adatlapja, 2016 [155])

egy 45 °C-os kályhában 4500 órán át működtették 150 mA-es, előre beállított áram mellett, amely 81 cm²-es fényt adó panelfelületen oszlott el. A meghajtót a kályhán kívül helyezték el.

Az egyik lámpatestben az egyik panel 500 óra elteltével, egy másik 1750 óra után lett zárlatos. Adódott probléma a tápegységben is, de a meghajtó és a panel-meghibásodások között nem volt megállapítható kapcsolat. A teszt során még a következőket lehetett megfigyelni:

- 13%-os fénysűrűség-csökkenés, amiből 10 000 órás L70 értékre lehet következtetni 45°C-os környezeti hőmérséklet mellett.
- Színeltolódás a kék irányába kb. 0,004 Δu^v értékkel
- 11%-os 120 Hz-es villogás.

A másik teszt során az egyik lámpatestet 75°C-os hőmérsékleten és 75%-os relatív páratartalom mellett üzemeltették.

Az egyik panel 750 óra után szakadási hibát mutatott – nagy (4 Mohm-nál nagyobb) impedanciát produkált, és átlátóvá változott.

A lámpatestgyártók különösen érzékenyek a korai kiesésekre, ezért néha azt a megoldást választják, hogy minden panelt előéletnek, mielőtt kiszállítanák a vevőhöz. Az Acuity Brands azonban jelentős javulásról számolt be e tekintetben, és a paneljei meghibásodási szintjét 1:1000-ről 1:10 000-re növelte.

5.2.6 Különleges alkalmazások

Az Egyesült Államokon kívüli vezető OLED-alapú világítástechnikai gyártók többsége nagy érdeklődést mutatott az autóiipari felhasználások iránt, mivel ezek nagy értékű termékek, amelyeknél a magas beszerzési ár nem olyan nagy probléma. Az autókban történő alkalmazások azonban óriási környezeti kihívásokkal terheltek, amint azt az 5.23 ábra összefoglalja.

[155] OLEDWorks: „OLEDWorks Keuka OLED Module Product Sheet”, 2016. máj. (<https://www.oledworks.com/wp-content/uploads/2016/05/OLED-Works-Keuka-OLED-Module-Product-Sheet.pdf>)

[156] L. Davis: „Reliability Testing of OLED Luminaires”, DOE SSL Stakeholder Meeting, Corning, New York, 2016



5.24 ábra – Az LG Display szállította azokat az OLED-es világító paneleket, amelyeket a Chang's Custom használt fel a Chevy Explorer belső terének világításához (Forrás: LIGHTimes Online, 2016. aug. [159])

A fókusz főként a hátsó lámpákra esett. Philipp Rabenau az Auditol úgy véli, hogy egy 50 cm²-es alapfelületen a hátsó helyzetjelzéshez 2000 cd/m², a féklámpához 20 000 cd/m², míg az irányjelzőkhöz 25 000 cd/m² fénysűrűségű komponensre van szükség [158]. Ezenkívül a vörös színnek erősen telítettnek kell lennie – a CIE szerinti (x,y) koordinátáinak (0.7, 0.3)-hoz közelinek kell lenniük. Az első termékeket az Audi és a BMW 2016-ban bocsátotta útjára, de az elfogadásuk jelenleg igen kevés modellre korlátozódik. Az OLED-panelek karcsúsága igen jól illeszkedik az autók és más gépjárművek belsőteri világításához is. Az 5.24 ábrán a Szöuli Autó Szalonon a Chang's Custom által bemutatott furgon látható, benne LG-gyártmányú OLED-panelekkel a mennyezetre és az oldalfalakba ágyazva.

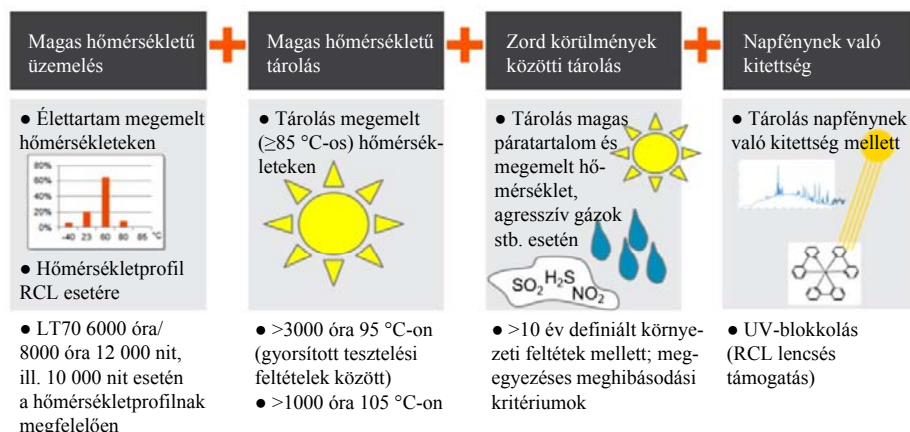
A súlycsökkentés minden szállítással kapcsolatos alkalmazásnál fontos, különösen a légi szállításhoz. A 2016-ban megrendezett OLED Word Summit-on Mark Borus a Zodiac Aerospace-től úgy vélekedett, hogy a repülőgépeknél a belsőteri OLED-es világítás piaca 140 millió USD-re emelkedik a következő évtizedben [160]. Hivatkozott arra a prototípusra, amelyet a DOE szilárdtest-világítási projektje során az UDC-vel együtt készített, és ismertette a Dassault F5x repülőgép pilótafülkéjébe szerelt felvilágítók különleges kialakítását.

5.3 Az OLED-gyártástechnológia helyzete

A következő rész a legújabb fejlesztésekre és azokra a fontos kihívásokra koncentrálna, amelyekkel az OLED-gyártásnak szembe kell néznie. A fejezet célja a jelenlegi gyártólétesítmények állapotának felmérése és a fennmaradó kihívások azonosítása.

5.3.1 A jelenlegi gyártó létesítmények

Az OLED-gyártás a világítástervezőknek és egyedi vásárlóknak kiküldött teszt-



5.23 ábra – Környezetvédelmi kihívások a gépjárművek világításánál (Forrás: Alireza Safaee, OSRAM, DOE SSL R&D Workshop, Long Beach, Kanada, 2017. febr. [157])

panellekkel folyó K+F tevékenységből már eljutott a hatékony gyártáshoz tervezett gyártósorokon végzett kísérleti gyártásig. Ezeket a gyártósorokat a dél-koreai LG Chem, az európai Osram és Philips, a kínai First O-Lite, a japán Konica Minolta és az egyesült államokbeli OLEDWorks fejlesztette ki, amelyek csatlakoztak a franciaországi Blackbody-hoz, a japán Lumiotec-hez, Kaneka-hoz és Pioneer-hoz, akik már évek óta készítenek paneleket és értékesítenek lámpatesteket. Más cégek – például a Panasonic – késleltették a kereskedelmi gyártásba való bekapcsolódásukat, noha folytatják a K+F munkát. A Sumitomo Chemical folytatta a polimer OLED-ekkel kapcsolatos K+F tevékenységét a Cambridge Display Technologies-szel együtt, és 2016-ban számos kiállításon bemutatatták színes paneljeiket, bejelentve, hogy az általános világításra alkalmas termékek kereskedelmi célú gyártása 2017-ben indul [161].

A nagy volumenű piacok létrehozásának nehézsége az utóbbi néhány évben számos vállalat átszervezéséhez vezetett. A Philips kilépett az OLED-alapú világítástechnikai termékek területéről, és az aacheni gyártósorát az OLEDWorks vette meg [162]. Az OLEDWorks most legfontosabb kereskedelmi termékeit Európában gyártja, rochesteri létesítményét pedig K+F tevékenységhez és prototípus panelek előállítására használja. Az LG OLED-alapú világítási üzletágát áthelyezte az LG Chem-től az LG Display-hez, amely Gumi-ban lévő gyárában egy „ötödik-generációs” gyártósort épít 1000mm x 1200mm-es hordozók felhasználásával. [163] [164].

Az Osram továbbra is az autó-világítási piac megteremtésére koncentrálna, és nem számolt be új gyártási létesítményekről. 2013-ban a Mitsubishi Chemical és a Pioneer egyesítette erőfeszítéseit a Pioneer

OLED Lighting megalapításával [165]. További egyesülések követhetik azt a 2017.januári bejelentést, miszerint a Konica Minolta és a Pioneer OLED-alapú világítási üzletágát egy 50-50-százalékos közös tökélekedeltségű vállalatba tervezik összevonni – arccal a gépjárművilágítási alkalmazások felé [166]. Középtávú értékesítési céljuk 25 milliárd yen (kb. 220 millió USD). Időközben a kínai Visionox kijelzőgyártó cég új vállalkozást indított el Yeolight néven OLED-alapú világítási panelek gyártására és értékesítésére [167]. Az LG új gyártósora a tervek szerint 2017-ben kezdi meg a gyártást havi 15 000 db hordozó kapacitással [164]. Ha állási időt nem veszünk figyelembe, ez 3 perces gyártási ciklusidőt (TAKT) jelent – amelyre egyébként névlegesen 2 perc a célkitűzés, ami azt jelentené, hogy így a bejelentett kapacitást az ünnepnapokra, a karbantartásra és a gyártósor meghibásodásaira eső leállásokkal együtt is meg ehetne valósítani. A gyártósor beruházási költségét 140 milliárd koreai won-ra (KrW) (kb. 125 millió USD-re) becsülték. Ez a Gumi-ban telepített gyártósor jelentős technológia-transzfert jelentene az OLED-kijelzők részéről, mivel az LG több mint 1 trillió KrW-t investál egy rugalmas

[157] A. Safaee: „OLED Development @ OSRAM: Past Present and Future Topics”, DOE SSL R&D Workshop, Long Beach, Kalifornia, 2017

[158] P. Rabenau: „OLED Technology in Automotive Lighting”, OLED World Summit, San Diego, Kalifornia, 2016

[159] LIGHTimes Online - LED Industry News: „Custom Van Employs OLED Interior Lighting”, 2016. aug. 23. (<http://www.solidstatelighting.net/custom-van-employs-oled-interior-lighting/>)

[160] M. Borus: „Mastering the Elements”, OLED World Summit, San Diego, Kalifornia, 2016. szept.

[161] OLEDNet: „Sumitomo Chem. Aims for General Lighting Market with P-LED”, 2016. jan. 15. (<http://www.olednet.com/en/sumitomo-chem-aims-for-general-lighting-market-with-p-led/?kattempt=2>)

OLED-kijelzőket gyártó gépsor kifejlesztésébe ugyanazon a telephelyen [168].

2016 talán legfeltűnőbb eseménye az volt, hogy láthatólag hiányoztak a Konica Minolta által 2014-ben konstruált roll-to-roll gyártósoráról származó kereskedelmi termékek, amely gyártósor egyébként kb. 10 milliárd yenbe (90 millió USD-be) került [169]. A gyártat 1 millió rugalmas hordozójú panel/hónap kapacitásúra tervezték, de úgy tűnik, hogy a gyártás demonstrációs termékek előállítására korlátozódott. A Konica Minolta továbbra is beszámol K+F eredményeiről, de nem tett nyilvános bejelentést semmiféle gyártási problémáról.

A jelenlegi gyártósorok többsége hagyományos gőzfázisú leválasztási eljárásokat használ a szerves rétegeknek 370mm x 470mm körüli üveghordozókra történő kialakításához

3 perces gyártási ciklusidőt és 70%-os kihozatal feltételezve, e sorok teljes kapacitása 100 000 m² körüli becsülhető, ami 10 millió darab 100mm x 100mm-es panel legyártásához elegendő. 15 USD panelenkénti árat feltételezve, 150 millió USD potenciális bevételre lehet így számítani, ez azonban valószínűleg ennél sokkal kisebb lesz, mivel a rendelkezésre álló kapacitás csak igen kis mértékben van kihasználva.

Néhány említésre méltó kivételtől eltekintve – mint amilyen például az LG és a Konica Minolta – kevés gyártó rendelkezik megfelelő tőkével és szakértelemmel ahhoz, hogy elkészítsen egy egész OLED-panelt. Így az OLEDWorks-höz és a First O-Lite-hoz hasonló vállalatok olyan integrált hordozókat keresnek, amelyek átlátszó vezetékekkel, könnyű fénykivonási struktúrákkal és (műanyagfóliák használata esetén) gát- (barrier) rétegekkel rendelkeznek. Bár az integrált hordozók intenzív K+F tevékenységek tárgyát képezik, a jelenlegi kínálat erősen korlátozott – részben a mintakialakítás nehézségeinek köszönhetően. Az integrált hordozók észak-amerikai vagy európai forrásai ezért nagy jelentőséggel bírhatnak az ipar számára.

Újabban számos lámpatestgyártó kezdett el OLED-alapú lámpatesteket gyártani. Az Egyesült Államokban a Visa Lighting és a Workrite az Acuity Brands példáját követte, míg Európában az Emdedesign és a Neumuller OLED-lámpatestek széles választékát kínálja [170] [171] [172] [173]. Koreában már megjelentek az üzletekben az LG által a Szöuli National University-n bemutatotthoz hasonló asztali lámpák, és több kisebb gyártó kínál dekorációs OLED-es lámpatesteket. Kínában a

	2016	2018	2020	2025
Hordozóterület (m ²)	0.2	1.2	1.2	2.7
Tőkeköltés (millió USD)	50	125	125	200
Ciklusidő (perc)	3	2	1	0.5
Kapacitás (1000 m ² /év)	17	175	350	2400
Értécsökkenés (USD/m ²)	600	140	70	35
Szerves anyagok (USD/m ²)	150	100	50	15
Szervetlen anyagok (USD/m ²)	200	140	100	30
Bérköltés (USD/m ²)	100	25	15	5
Egyéb fix költség (USD/m ²)	50	15	10	5
Össz (nem hozam) (USD/m ²)	1100	420	245	90
Jó termék kihozatal (%)	70	80	85	90
Összköltség (USD/m ²)	1570	525	290	100

5.4 táblázat – A hagyományos módszerekkel gyártott panelek költség célkitűzése

Yeelight megjelent LG-panelekkel szerelt asztali lámpákkal, ugyanakkor fejleszti a saját gyártósorát is.

Néhány OLED-es világítástechnikai gyártócég – például a kanadai OTI Lumionics, a kínai First O-Lite és a francia Blackbody – saját lámpatesteit gyártja és értékesíti [174] [175]. Mások – például az OLEDWorks – olyan összetett modulokat (light engine-eket) fejleszt, amelyek tartalmaznak a meghajtókat és a csatlakozásokat is a lámpatestekbe való beépítés megkönnyítésére. Az LG Display saját lámpatesteit kínálja, és bútorgyártóknak – például a koreai Fursys Group-nak – is szállít [176].

5.3.2 Költségsökkentés

Az OLED-es világítástechnikai vállalatok legfontosabb célja a költségek csökkentése. Az OLED-panelek gyártási költsége szorosabb kapcsolatban van a panelek területével, mint a fényárammal. Az 5.4 táblázat egy lehetséges fejlődési utat mutat be a 100 USD/m²-es cél eléréséhez, amely elegendő lehet ahhoz, hogy az OLED-ek jobban behatoljanak az általános világítás piacára.

A legnagyobb költségtényező jelenleg a berendezések értécsökkenése. A terület-egységenkénti költség csökkentésének egyik módja a hagyományos sheet-to-sheet („lemezről-lemezre”) gyártásokhoz használt üveghordozó méretének megnövelése. A nagyobb eszközök tőkeköltése megközelítőleg a lineáris méretekkel arányos, míg a termék területe a hordozó felületével arányosan változik. Az 5.4 táblázat feltételezi, hogy a hordozó mérete 2025-re 1800mm x 1500mm lesz. A várható méret-növekedést lecsökkentették a korábbi előrejelzésekhez képest a szükséges tőke-mozgás nehézsége miatt.

Az 5.4 táblázat azt is feltételezi, hogy a

gyártási ciklusidő (TAKT) 30 másodpercre csökkenthető. Az OLEDWorks aacheni gyártósorát e cél szem előtt tartásával tervezték, de a jelenlegi ciklusidő 2 perc

[162] OLEDWorks: „OLEDWorks Finalizes Acquisition of Key parts of Philips' OLED Light Source Components Business”, 2015. nov. 2. (<https://www.oledworks.com/news/oledworks-finalizes-acquisition-of-key-parts-of-philips-oled-light-source-components-business/>)

[163] The Korea Times: „LG accelerates realignment focusing on OLEDs”, 2015. okt. 20. (https://www.koreatimes.co.kr/www/news/tech/2015/10/133_188997.html)

[164] LG Display: „LG Display to Build World's First 5th Generation OLED Light Panel Plant”, 2016. márc. 17. (<http://www.prnewswire.com/news-releases/lg-display-to-build-worlds-first-5th-generation-oled-light-panel-plant-300237655.html>)

[165] „Mitsubishi and Pioneer Sets up a New Company to Handle OLED Sales in Japan”, 2016. nov. 26. (<http://www.whlyhg.com/news/show-htm-itemid-273.html>)

[166] Konica Minolta: „Konica Minolta and Pioneer Form Strategic Alliance for Accelerating Business Launch for OLED Lighting”, 2017. jan. 31. (https://www.konicaminolta.com/about/releases/2017/0131_01_01.html)

[167] OLED-info: „Yeelight Flexible Technology” (<http://www.yeelight.com/website/yiguang-technology-detail.html?page=2>)

[168] LG Display: „LG Display to Invest in 6th Generation OLED Panel Line for Flexible Displays”, 2015. júl. 23. (<http://www.lgdisplay.com/eng/prcenter/newsView?articleMgtNo=4924>)

[169] Konica Minolta: „Konica Minolta Constructs Plant for World's First Mass Production of Plastic Substrate Flexible OLED Lighting Panels,” 2014. márc. 18. (http://www.konicaminolta.com/about/releases/2014/0318_01_01.html)

[170] Visa Lighting: „OLED technology enters the scene at Visa Lighting!”, 2016. aug. 17. (<http://www.visalighting.com/oled-technology-enters-scene-visa-lighting>)

[171] Workrite Ergonomics: „Natural OLED Desk Light”, 2016 (<http://workriteergo.com/natural-oled/>)

[172] OMLED: „About OMLED” (<https://www.omled.com/pages/uber>)

[173] Neumuller Elektronik GmbH: „Innovative OLED-Module von LG Displays” (<http://www.neumueller.com/de/news/innovative-oled-module-von-lg-displays>)

körüli [177]. Az egyes rétegek leválasztási sebességének növelése tehát gyümölcsöző téma lehet a jövőbeli kutatások számára. A legnehezebb lépések közé az aktív szerves rétegek, a katód és a tokozó (lezáró) rétegek kialakítása tartozik.

Az egyszerűbb struktúrák használata csökkenthetné az amortizációs költségeket is, ugyanakkor a teljesítményben elért legutóbbi előrelépések szinte mindegyikét a rendszer bonyolultságának növelésével érte el, és e trend megfordításához több évre lesz szükség. Például az, hogy az OLEDWorks a paneljeiben hatról háromra csökkentette a rétegek számát, már ebbe az irányba mutató lépésnek számít.

A nagyobb kihozatal a roll-to-roll eljárás egyik lehetséges előnye. A kísérleti gyártó-sorokon tipikusan 3 m/perc sebességet tudnak elérni 300 mm-es anyagszélességek esetén. Ez 475 000 m²/év kapacitást eredményezne, ami elegendő lehetne ahhoz, hogy az új LG sheet-to-sheet gyártó-sorának kihozatalát meghaladja – még az alacsonyabb hordozó-kihasználás és termék-kihozatal esetén is.

Várhatóan az aktív szerves anyagok ára is gyorsan csökkenni fog a volumenek növekedésével, és ez a hatás az OLED-es kijelzőknél már látható is. Például az UDC a foszforeszkáló emitteranyagok vezető szállítója, ugyanakkor bevétel az elmúlt két évben 5%-nál kisebb mértékben nőtt, jóllehet az OLED-panelek területe több mint megduplázódott [178]. Ennek részben az az oka, hogy az anyagok gyártási költségei csökkentek, de az is, hogy a panelgyártók hatékonyabban használják fel az anyagokat.

A szervetlen anyagoknál lassúbb költség-csökkenés várható, mivel ezek az anyagok magasabb fejlettségi színvonalon vannak. A kijelzők üveghordozóihoz olcsóbb alternatívák kifejlesztése a várakozásokhoz képest nehezebbnek bizonyult. Például a hatékony gátrétegekkel rendelkező műanyag hordozók jelenleg drágábbak, mint a kijelzők üveghordozói. Másrészt a belső fénykivonó rétegek még csak épphogy megjelentek, ezért az árak csak a mennyiségek növekedésével fognak jelentősen csökkenni. A bérköltségek viszonylagos hozzájárulása már most is alacsony, és fordított arányban csökken a mennyiséggel. A gyártó-sorok – például az OLEDWorks és az LG gyártó-sorai – magasan automatizáltak és kevés felügyeletet igényelnek.

5.3.3 Nyomatási eljárások

Az elmúlt 20 év során jelentős érdeklődés mutatkozott az elektronikus és fotonikus anyagok nyomatási módszereinek fejlesztése

terén. Az additív mintakészítés használata jelentősen csökkenteni fogja a drága anyagok veszteségeit. Egyesek azzal érveltek, hogy a nagyvákuumú eljárás elkerülése csökkentené a berendezések tökeköltségét, de a hagyományos struktúráknál a nagyon kis mennyiségű vízgőz, oxigén vagy egyéb részecskék jelenléte csökkentheti a gyártási kihozatalokat és a termékek élettartamát. Ezért a tintasugaras szerszámok vezető gyártói nitrogén atmoszférát használnak [179]. Ezenkívül az egyes fűvókákon keresztül történő áramlás szigorú ellenőrzésének szükségessége növeli a berendezés bonyolultságát és a tökeköltséget.

Bizonyos rétegekhez egyszerűbb módszereket – például „széles résű szerszámmal” (slot die) történő bevonást – alkalmaztak, s kidolgoztak újabb eljárásokat is – például nyomdai litográfiát – fénykivonó struktúrák létrehozásához.

Az oldatos feldolgozáshoz használt anyagok gyenge paraméterei késleltették az OLED-es kijelzőkhöz és világításhoz való felhasználásukat. Noha az aktív szerves anyagok fényhasznosításában meglévő szakadék csökkent, a nyomtatott vezetők vezetőképesége jóval kisebb, mint a nagytömegű fémeké.

Az OLED-es kijelzőkhöz alkalmas nyomtatószerszámok és oldható anyagok fejlesztésében megmutatkozó nagyobb aktivitás talán segíti a világítástechnikai alkalmazásokat is. A Kateeva például igazolta, hogy a tintasugaras nyomtatás versenyképes lehet a tokozó rétegek szerves komponenseinek leválasztásánál, és nagy előrehaladást ért el a mintázott emitterrétegek leválasztási folyamatánál.

A legtöbb nyomtatott réteget a leválasztás után hőkezelní kell. A hagyományos hőkezelési eljáráshoz nagy kályhák kellenek, és nehezebb csökkenteni a gyártási ciklusidőt (TAKT), amint azt a Holst Centre-ben lévő kísérleti gyártó-sor is mutatta, ahol a kályhák el vannak különítve a leválasztó kamráktól a tisztaszoba alapterületének csökkentése érdekében [180]. A „fotokemé-nyítést” sokkal rövidebb idő alatt el lehet végezni, és alkalmazták aktív szerves rétegek-nél, nyomtatott rácsozatoknál és tokozóanyagoknál is.

Aktív szerves rétegek nyomtatásánál ügyelni kell arra, hogy az egyes rétegek leválasztásánál ne sérüljön meg az illető réteg alatt lévő anyag. A rétegek közötti kölcsönhatások javíthatók keresztlinkéses polimerek alkalmazásával. A rétegek számának csökkentése a folyadékos feldolgozás legfontosabb célkitűzése az egyszerűbb gyártás és a tökeköltségben elérhető

jelentős megtakarítás esélye miatt. Az eljárás egyik legnagyobb híve, a Sumitomo Chemical mindössze négy szerves rétegből álló, 1-rétegzésű struktúrákra fókuszált [181].

5.3.4 „Alakítható” panelek

Noha viszonylag kicsi a „folytonosan görbült vagy hajtogatott” lámpatestek iránti kereslet, az állítható panelek kereskedelmi forgalomba kerülése jelentősen megnövelheti az OLED-es lámpatestek iránti keresletet – akár háromdimenziós formák vagy ívelt felületekbe ágyazott panelek előállítása esetén.

Amint azt a Corning demonstrálta, néhány centiméteres hajlítási sugár érhető el vékony, kb. 100 µm-es üveggel [182]. A vékony üveg megmunkálható roll-to-roll vagy sheet-to-sheet rendszerű gyártó-sorokkal is. Még a vékony üveg is kitűnő gátréteget képez a víz vagy oxigén behatolásával szemben, így a tokozás kérdése a szélek lezárására redukálódik. Az ilyen panelek azonban igen törekenyek a gyártás, szállítás és felszerelés során.

A műanyag hordozók és burkolatok robusztusabbak, de a kijelzőkben használt anyagok – például a poliimid és a poli-etilén-naftalát – viszonylag drágák, és drága gátrétegeket igényelnek. Az OLED-es világítástechnikai eszközökhöz szükséges feldolgozási hőmérsékletek alacsonyabbak, mint az OLED-es megjelenítők vékonyréteg tranzisztoros hátlapjaihoz szükségesek, úgyhogy poliimidge esetleg nincs is szükség.

A pozicionálási pontosság követelményei is lazábbak az OLED-es világító panelek gyártásánál, mint a kijelzőpanelek esetében, és könnyen megvalósíthatók roll-to-roll feldolgozással. A lemezek feldolgozásához a műanyag hordozót a gyártás során általában ideiglenesen merev alapra

[174] OTI Lumionics: „Organic Light Emitting Diodes” (<https://www.otilumionics.com/oleds/>)

[175] Blackbody: „OLED Technology” (<http://www.blackbody.fr/en/oled-technology/>)

[176] OLED-info: „LG teams us with Korea's Fursys to offer an integrated OLED desk lamp” (<https://www.oled-info.com/lg-teams-us-koreas-fursys-offer-integrated-oled-desk-lamp>)

[177] U. Hoffman: „Manufacturing of High Quality OLED”, China International OLED Summit, Peking, Kína, 2015

[178] Universal Display Corporation: „2016 Annual Report” (http://s21.q4cdn.com/428849097/files/doc_financials/annual/OLED_Annual-Report_2016.pdf)

[179] C. Brown: „Inkjet Printing: Manufacturing Equipment and Process Solutions for Flexible and Large-Size OLEDs”, DOE SSL R&D Workshop, Long Beach, Kalifornia, 2017

[180] H. Schoo: „Open Innovation; Ultra-low-power, wireless & flexible electronics”, DOE SSL R&D Workshop, 2017

rögzítik. Az OLED-es megjelenítőknél a hordozókra történő ideiglenes felvitel és leválasztás technikáit alkalmazni lehetne a világítástechnikai paneleknél is..

A rugalmasság is korlátozza egyes belső rétegek anyagának megválasztását – például a fénykivonó struktúráknál. Noha a folytonos hajlíthatóság türése volt az egyik oka annak, hogy helyettesítő anyagot kerestek az átlátszó elektródaként szolgáló indium-ón-oxid (ITO) réteg helyett, a vékony ITO-rétegeket sikeresen alkalmazták „alkalmazkodó” panelekhez.

5.3.5 Rétegek kialakítása

Aktív szerves anyagok leválasztása

Amikor az elektródák közötti töltéseket transzportáló és fotonokat létrehozó szerves anyagok leválasztásához megfelelő berendezéseket keresünk, számos tényezőt figyelembe kell venni. Ezek a következők:

- **Leválasztási idők** – A párologtató források esetében a leválasztási sebesség erősen függ a hőmérséklettől. A rendszerek többsége gyakran 300 °C-nál magasabb hőmérsékleten üzemel, a hordozót azonban hidegen kell tartani. A szerves anyagok megválasztásánál nagyon fontos a magas hőmérsékleten mutató stabilitás. A tipikus célkitűzés az 5 nm/s körüli leválasztási sebességek elérése.

- **Anyaghasznosítási hatékonyság** – Az alacsony kihasználtsági szintek nem csak növelik a szerves anyagok költségét, hanem gyakoribb tisztítást is igényelnek. A szerves anyagoknak a hordozón kívüli – például a leválasztó kamra falaira – történő leválasztódását minimalizálni kell. A felhasználási hatékonyságra jellemző rövid távú célok 50% és 70% közé esnek. A tintasugaras nyomtatás és a széles résű szer számmal (slot-die) történő bevonatkészítés sokkal nagyobb anyagfelhasználási szintet érhet el, és e tekintetben egyértelműen előnyös.

- **Szennyeződések kontrollálása** – Az UDC által elvégzett vizsgálatok kimutatták, hogy a leválasztó kamrában a vízgőznek még az alacsony szintjei is meg rövidíthetik az OLED-termékek élettartamát. 10^{-8} Pa-nál alacsonyabb parciális nyomást javasolnak, amely ultra nagy vákuum vagy tisztított nitrogénatmoszféra alkalmazásával érhető el. Az aeroszol részecskék kontrollálása is nagyon fontos.

- **Egyöntetőség** – Szigorú ellenőrzéssel kell megőrizni az aktív rétegek vastagságát és az emitterrétegeken belüli adalékoldási arányokat – $\pm 3\%$ -os eltérések a jellemzőek. A hullámosított (bordás) hordozók iránti növekvő érdeklődés okán általában

az alakhű leválasztás a kívánatos. Ha azonban az alul lévő struktúrák éles széleket vagy nanoméretű szabálytalanságokat tartalmaznak, az első rétegeknél bizonyos mértékű „planarizáció” fontos lehet – gyakran a lyuk-injektáló vagy lyuk-transzportáló rétegben.

- **Költség** – Noha kevés információ látott napvilágot a világítási célú panelekhez tervezett berendezések költségeiről, a Display Supply Chain Consultants 2017-ben az OLED-ek leválasztási eszközeinek teljes piacát 2,2 milliárd dollárra becsülte [183]. A várható többlettermelés 2018-ban 3 millió m², amiből az következik, hogy körülbelül 750 dolláros tőkebefektetésre van szükség az éves termelés minden egyes négyzetméteréhez [183]. A kapcsolódó 150 dollár körüli értékcsökkenési költség (5 évesnél hosszabb lineáris értékcsökkenést feltételezve) nagyobb lenne, mint a panelek teljes költségére vonatkozó hosszú távú cél [183]. Ezért fontosnak tűnik, hogy az OLED-es világításhoz olcsóbb vagy termelékenyebb eszközöket fejlesszenek ki.

Az elmúlt néhány évben jelentős előrelépés történt a világítástechnikai alkalmazásokhoz még jobban megfelelő párologtató források fejlesztésében, például a DOE SSL által finanszírozott egyik OLEDWorks-projekt révén. Az Aixtron kiváló eredményeket ért el olyan szerves gőzfázisú leválasztás alkalmazásával, amelyben a szerves molekulák a forrásból a hordozóra ultra tiszta nitrogéngáz atmoszférában jutnak el [184]. A Kateeva a tintasugaras nyomtatási laboratóriumi szintről OLED-ek tömeggyártására állította át, bár az első alkalmazás a rétegek tokozása, lezárása volt [179]. Japánban a JOLED befejezte annak demonstrálását, amely szerint a tintasugaras nyomtatás nagy termelékenységgel és megbízhatósággal alkalmazható aktív szerves rétegek előállítására is, és 2017-ben tervezi megkezdeni a tömeggyártásra alkalmas gyártósorának megépítését is [185].

Fénykivonó struktúrák

Igen egyszerűen szólva, a fénykivonó struktúrák kialakításának fő célja az, hogy oly módon törje meg az OLED-panelek sík szimmetriáját, amely nem teszi lehetővé az OLED-emitterek hatékony leválasztását. Amint azt az 5.1.5 fejezetben ismertettük, ez külső filmek, hullámosított hordozók, strukturált elektródák vagy a hordozó és az átlátszó elektróda közé helyezett további rétegek segítségével érhető el. Többféle olyan külső film létezik, amely a hordozóra laminálható.

Ezeket a filmeket rendszerint egy mes-terminta pozitív vagy negatív másolásával állítják elő, amelyeket roll-to-roll eljárás alkalmazásával egy vagy több hengeren alakítanak ki. Az ilyen filmek 40 USD/m² körüli költsége magas az 5.4 táblázatban bemutatott jövőbeli költségcélokhoz képest, de a fényhasznosítás-növekedés indokolja. Mivel az ilyen filmek akár 80%-kal is képesek megnövelni a fényáramot, a megkívánt fényáram előállításához szükséges felület 15%-kal csökkent – 700 USD/m² körüli megtakarítást eredményezve 2016-ban.

Habár a külső filmek hatékonyságát nagy törésmutatójú hordozókkal javítani lehetne, a legutóbbi erőfeszítések a belső struktúrákra koncentráltak. A Pixelligent kimutatta, hogy fényesítő rétegek 2,5-szeres javulást eredményezhetnek [186].

Két elem kritikus fontosságú a Pixelligent filmjeinek tervezésénél. Az első az, hogy képesek legyenek szabályozni a törésmutatót, amely a vállalat PixClear technológiájával érhető el ZrO₂ nanokristályoknak a filmbe történő beágyazásával. A nanokristályok felületeit jól passziválják a „csapdázó” szerek, amelyek megakadályozzák a felgyülemelést és kompatibilitást kínálnak sokféle különböző oldószer, monomer és polimer esetén. A nanorészecskék nagy tömegterhelése érhető el (amely ahhoz kell, hogy a törésmutató jobban megegyezzen az anódéval) úgy is, hogy közben megőrizzük az átlátszóságot és a kis viszkozitást, amely viszont a tintasugaras nyomtatási vagy a keskeny résű (slot-die) bevonási eljárásokhoz hasonló oldatos feldolgozásokhoz szükséges [187]. A Pixelligent fokozatosan változó törésmutatójú rétegekkel is kísérletezik, hogy csökkentse a Fresnel-reflexiót, mivel a fény ilyenkor egy kisebb törésmutatójú hordozó irányába terjed. A második olyan nagyobb részecskék beillesztése a fény

[181] T. Yameda: „Latest development of polymer light-emitting material for printed OLED”, Fine Tech Japan, 2016. ápr.

[182] M. Boroson, T. Spencer, S. McClurg, J. Spindler, J. Knipping, M. Ruske, D. Chowdhury, R. Gafsi, K. Woo és B. Kong. „Flexible OLEDs on Corning Willow Glass”, OLEDWorks, 2016

[183] Display Supply Chain: „DSCC Releases Latest Quarterly OLED Supply/Demand and Capital Spending Report and Model – Tight Supply and Record Capital Spending Expected”, 2017. ápr. 18. (<http://www.displaysupplychain.com/oled-sd-41817.html>)

[184] J. Kreis: „OLED Manufacturing - Enabling better products through advanced manufacturing processes”, OLED Work Summit, 2016

[185] R. Mertens: „JOLED details their printing process and materials” (<https://www.oled-info.com/joled-details-their-printing-process-and-materials>)

szóródásába, amelyeknek méretei közel meg kell hogy egyezzenek a látható fény hullámhosszával a Mie-szóródás biztosítása érdekében. Az átlátszó elektróda és a szerves rétegek leválasztásához fontos a sima felület biztosítása.

Néhány évvel ezelőtt a Panasonic figyelemre méltó eredményeket ért el egy belső fényszóró réteggel, amely nagy törésmutató-kontrasztot hozott létre azért, hogy nagy törésmutatójú mikrostrukturált réteget alakított ki egy légrésben, a megoldást azonban nem tudta kereskedelmi termékévé érlelni. Gondot jelent az OLED-be bejutó levegő, ezért egy alternatív, kis törésmutatójú töltőanyagra lehet szükség. A DOE egyik új szilárdtest-világítási programja keretében a MicroContinuum kimutatta, hogy ilyen struktúrák előállíthatók polikarbonátban 1 μm -nél kisebb osztással roll-to-roll eljárás segítségével – amint azt az 5.25 ábra mutatja.

Az egyetemet kétféle módszert is alkalmazott 500 nm körüli átmérőjű szilícium-dioxid gömbök felhasználására [143]. Az egyik az ilyen gömbökön szorosan kialakított réteg tetején polimetil-sziloxán (PDMS) öntőformát hoz létre, amellyel azután az UV hatására kikeményedő műgyantába mintázatot nyomtatható. A másik módszer a gömböket egy maszk kialakításához használja nagy törésmutatójú zafir hordozó plazmás maratásához.

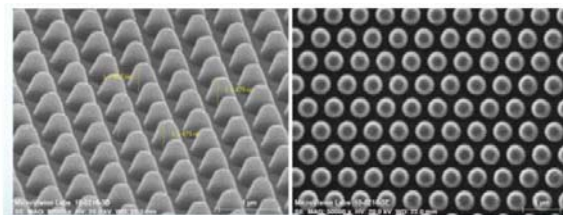
Elektródák

Két újabb fejlesztési eredmény csökkentette az átlátszó elektróda-struktúráknál az indium-ón-oxid (ITO) helyettesítésével, a több köteges struktúrák használatával és az ITO-leválasztás kisebb költségével kapcsolatos aktivitást. A több köteges struktúrák használata csökkenti a szükséges áramsűrűséget, így akár 100 mm-es panelek is készíthetők anélkül, hogy vezetékrácszatokra lenne szükség a homogén vezetőrétteg kiegészítésére. Az elmúlt években csökkent az indium-ón-oxid (ITO) nagy tömegben történő leválasztásának költsége, de még mindig nehéz a kis OLED-gyártók számára a mintázott ITO-struktúrák beszerzése, a házon belüli ITO-leválasztás tökéletessége pedig viszonylag magas.

Amint fentebb említettük, az ezüst nanovezetékek az egyik legvonzóbb ITO-alternatívák.

Bár a kereskedelmi beszállítók figyelme más alkalmazások felé fordult, a Sinovia kimutatta, hogy viszonylag vastag huzalok is beágyazhatók olyan polimer rétegekbe, amelyeknek felülete elég sima ahhoz, hogy lehetővé tegye hosszú élettartamú OLED-

5.25 ábra – OLED fénykivonási mintázat (Forrás: Dennis Slafer, MicroContinuum, DOE SSL OLED Stakeholder Meeting, Corning NY, 2016. okt. [188])



Mintázat polikarbonát filmben megismételve (tömb osztása: ~ 750 nm x 480 nm magasság)

panelek leválasztását [189]. A rétegeket standard oldatos feldolgozási technikákkal, például „széles résű szerszámmal” (slot die) készített bevonattal vagy gravírozással lehet leválasztani. A Sinovia demonstrálta, hogy filmjeiből a Vitriflex gátrétegeivel kombinálva flexibilis, integrált hordozók készíthetők [190]. A vállalatnak már 10^{-5} g/m²/nap-nál kisebb vízgőz-átviteli sebességeket és 5 $\Omega/\square$ -nál kisebb lap-ellenállást sikerült elérnie. A fennmaradó kihívás a fénykivonás javítása. Az ezüst vezetékek bizonyos mértékű „homályosságot” okoznak, ezért más fényszóró részecskékre vagy fókuszáló struktúrákra lehet szükség a DOE-célok eléréséhez.

A katódleválasztás akadályozhatja a folyamat ciklusidejének jelentős csökkentését. A preferált párologtatási technika viszonylag lassú, de nem károsítja az alul lévő szerves rétegeket. A porlasztás gyorsabban elvégezhető, de jobban megterheli a törékeny szerves anyagokat. Az alumínium katódok ezüsttel vagy egy olyan struktúrával való helyettesítése, amely kevésbé érzékeny a felületi plazmonok gerjesztésére, is szükségessé teheti a gyártási eljárás módosítását.

Gátrétegek

A rugalmas OLED-es megjelenítők iránti kereslet óriási beruházást igényelt a műanyag hordozókhoz és bevonatokhoz szükséges többrétegű gátak előállításához. Jelentős megrendeléseket kapott az Applied Material olyan szerszámokra, amelyek igen nagy hordozók kezelésére alkalmasak a kemény, szervesetlen rétegek plazmával megnövelt kémiai gőzleválasztásához (PECVD), a Kateeva-hoz pedig lágyabb szerves rétegek tintasugaras nyomtatására alkalmas szerszámokra futott be jelentős megrendelés.

A nagytömegben gyártó cégek számára ezeknek az eszközöknek a termelékenysége indokolta teszi magas tökéletességüket, de az OLED-es világítás kisebb hordozóihoz és kisebb mennyiségéhez alkalmasabbak lehetnek más, alternatív technikák. A szervesetlen rétegekhez az atomos réteg-leválasztást az európai

Beneq, Encapsulix és a Meyer Burger, valamint az amerikai Lotus Applied Technologies részesíti előnyben. A Vitriflex és az Aixtron kidolgozott olyan módszereket, amelyekkel a többrétegű filmek szerves komponenseit a kemény rétegekkel együtt leválasztható, lágy rétegekkel lehet helyettesíteni. A Vitriflex konstruált egy olyan fizikai gőzfázisú roll-to-roll leválasztó szerszámot, amelynek hat leválasztó zónája van és 1,4 m szélességű anyag esetén évente kb. egy millió négyzetméter kapacitással rendelkezik [191]. Az Aixtron OptaCap rendszere PECVD eljárást alkalmaz a max. 470 mm szélességű hordozók sheet-to-sheet módszerrel történő feldolgozásához [184].

Tokozás (lezárás)

Van több olyan tokozási módszer, amely megőrzi az OLED-panelek vékony profilját és kis súlyát. A többrétegű gáttal rendelkező, ultravékony üveg vagy műanyag panel a felső elektróda tetején laminálható. Ügyelni kell arra, hogy a széleken ne juthasson be oxigén vagy nedvesség. Néhány cégtől – ilyenek pl. az Addison Clear Wave, a DELO, a Henkel, az LG Chem, a SAES Getters, és a 3M – beszerezhetők gátréteggel vagy abszorbeáló tulajdonságokkal rendelkező ragasztóanyagok. A lefelé emittáló struktúrákhoz fedőréteggént vékony fémlehet használni, amely mechanikai stabilitást, hőelvezetést és hatékony felületi gátat is

[186] G. Cooper és G. Chen. „Light Extraction for OLEDs”, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, Kalifornia, 2015

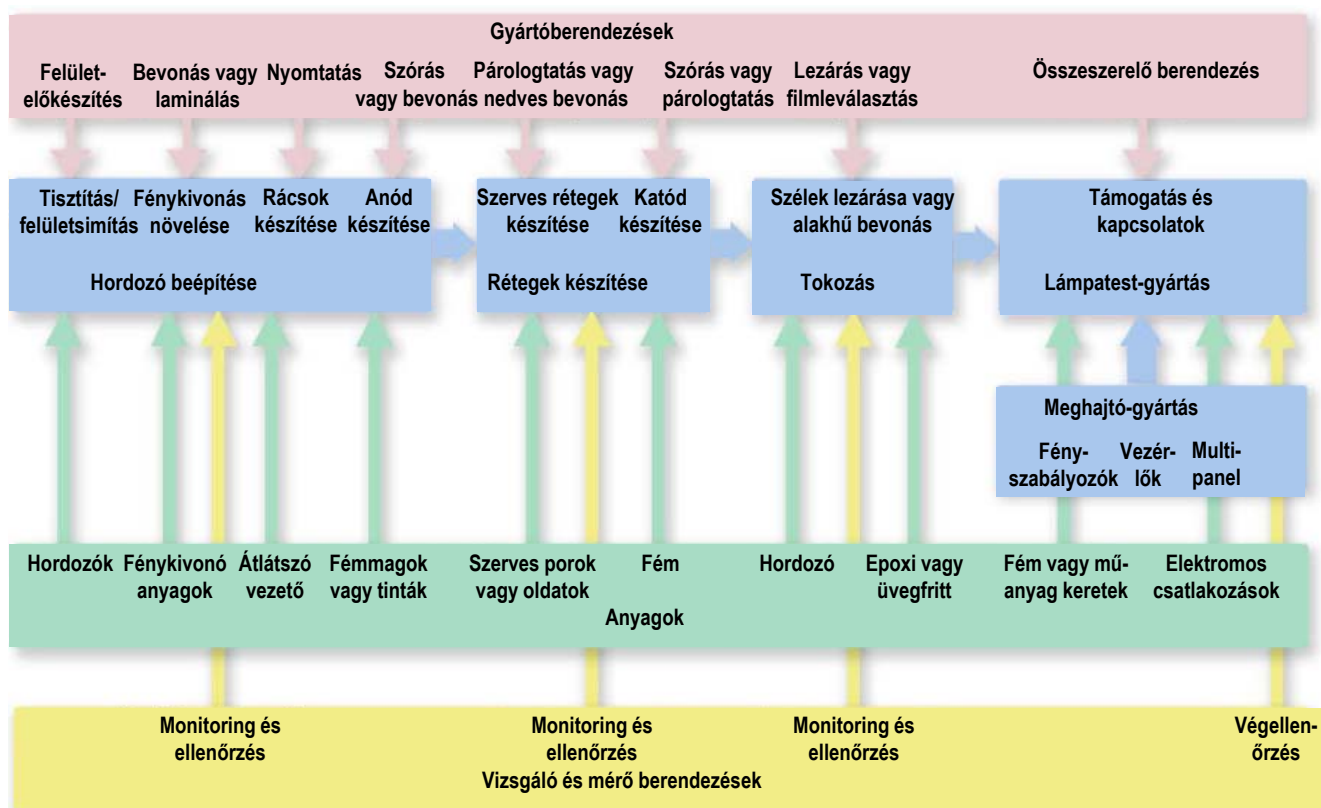
[187] P. Guschl, X. Wang és M. Weinstein: White Paper: Inkjet Printing of Zirconia Nanocomposite Materials”, Pixelligent, Baltimore, Maryland, 2016

[188] D. W. Slafer: R2R Manufacturing of Enhanced OLED Substrates”, DOE SSL OLED Stakeholder Meeting, Corning, New York, 2016

[189] G. Buckhard: „Innovative Manufacturing Techniques: Integrated Substrates for OLED Lighting”, DOE OLED Stakeholder Meeting, Corning, New York, 2016

[190] W. Gaynor: „Integrated Plastic Substrates for OLED Lighting”, DOE OLED Stakeholder Meeting, Corning, New York, 2017

[191] R. Prasad: „Transparent Ultra-Barrier Films for OLED Devices”, SID Symposium, Paper 15.4, 2017



5.26 ábra – Az OLED-alapú szilárdtest-világítási ellátólánc (Megjegyzés: A kék boksok és a kék nyilak a fő gyártási folyamatot jelölik. Az ellátólánc támogató elemei gyártóberendezésekre, anyagokra, valamint vizsgáló és mérő berendezésekre vannak felosztva. Ezek a támogató elemek a megfelelő nyilakkal jelölt módon csatlakoznak a fő gyártási folyamathoz.

biztosít. Ezt a megoldást az LG Display már alkalmazta.

A széleken létrejövő hatások egy vékony gátréteg in-situ leválasztásával minimalizálhatók. Kerülni kell azonban a magas hőmérsékletű folyamatokat az alsó rétegek sérülésének megakadályozására, és mintázatra is szükség van a széleknél lévő elektromos kontaktusok bevonásának elkerülése érdekében.

Éleknél történő behatolás akkor is fel-lephet, ha viszonylag vastag rétegek vannak az OLED belső struktúrájában. A leválasztás során tintasugaras nyomtatással, széles résű szerszámmal” (slot die) készített bevonással vagy gravírozással mintázatot alakítható ki az ilyen rétegeknek a panel széleitől való elkülönítésére. Alternatívaként a nemkívánatos anyag a leválasztás után lézeres leégetéssel eltávolítható.

5.3.6 Az ellátólánc vázlata

Bár az OLED-panelek vagy -lámpatestek gyártásában részt vevő vállalatok száma viszonylag kicsi, sok anyag- és berendezés-szállítótól és gyártási eljárástól függenek. A különböző beszállítók szerepét az 5.26 ábra szemlélteti.

HOLUX Kft. 1135 Budapest, Béke u. 51-55.

HOLUX Központ és Mérnökiroda Tel.: (06 1) 450 2700 Fax: (06 1) 450 2710
 HOLUX Vevőszolgálat Tel.: (06 1) 450 2727 Fax: (06 1) 450 2710
 HOLUX Üzletház Tel.: (06 1) 450 2718 Fax: (06 1) 320 3258
 HOLUX Fényszaküzlet Kőrmend Tel.: (06 94) 594 315 Fax: (06 94) 594 316
 HOLUX Fényszaküzlet Nyíregyháza Tel.: (06 42) 438 345 Fax: (06 42) 596 479
 HOLUX Fényszaküzlet Szeged Tel.: (06 62) 426 819 Fax: (06 62) 426 702
www.holux.hu www.fenyaruhaz.hu e-mail: hoso@holux.hu

Minőségirányítási
rendszer



A MEE Világítástechnikai Társaság
tagja

