

1 Szilárdtest-világítás 2016

(Forrás: *www.doe – DOE SSL Program, "R&D Plan," edited by James Brodrick, Ph.D., 2016. jún., megjelent folytatásban a HOLUX Hírek №161...167. számaiban*)

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 sokszorozható oktatási vagy non-profit célokra a szerzői jog tulajdonosának külön engedélye nélkül, amennyiben hivatkozás történik a forrásra a következőképpen: *DOE SSL Program, "R&D Plan," edited by James Brodrick, Ph.D.*

VEZETŐI ÖSSZEFOGLALÓ

A szilárdtest-világítás (SSL) forradalma mélyreható változást hoz abban a tekintetben, ahogy használjuk a világítást és ahogy vélekedünk róla, és óriási lehetőséget reprezentál jelentős energiamegtakarítások elérésében. A világításra fordított energia a globális energiafelhasználás jelentős részét képezi. Az emelkedő energiaárak, a klímaváltozással kapcsolatos növekvő aggodalom és az energiafüggetlenség iránti igény következtében a globális világítástechnikai piac a nagyobb energiahatékonyságú fényforrások irányába tolódik el.

A világ legtöbb régiójában – még azokban is, ahol van ez irányú kormányzati támogatás – a meglévő világítási berendezéseknek 10%-nál kisebb hányada használ szilárdtest-világítási termékeket. Az Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériumának (a továbbiakban: DOE) becslése szerint például 2015-ben az Egyesült Államokban felszerelt lámpafoglatoknak mindössze 6,4%-ában volt fényemittáló diódán alapuló (LED-) lámpa [1]. Mindenesetre a

legtöbb előrejelzés óriási növekedést jósol a következő 5-10 évben, s azt, hogy a szilárdtest-világítás meghatározó világítási technológia lesz az eladások, az előállított fény teljes mennyisége és a felszerelt eszközök tekintetében. Ezek drámai növekedési előrejelzések egy nagy piac és jelentős kihívások az ipar számára. A fennmaradó kihívások között szerepel a hatékonyság folyamatos növelése, az árak további csökkentése, a gyártási volumen növelése, az integráció és installáció hatékony kiépítése és olyan új értékek és funkciók – pl. szabályzások és csatlakoztatás – integrálása, amelyek felgyorsíthatják az elfogadást és további energiamegtakarításokkal szolgálhatnak. E kihívásoknak való megfelelés lehetőséget is kínál az Egyesült Államok számára, hogy biztosítsa domináns szerepét e termékek technológiájában és gyártásában.

Az Egyesült Államokban az előrejelzések szerint a LED-es világítás fogja a felszerelt világítási rendszerek többségét adni 2030-ra, az általános világítás által generált lumenórák mintegy 88%-át reprezentálva ezzel [2]. A szilárdtest-világítási fényforrások nagy fényhasznosítása döntő tényező a nagyobb mértékű elfogadás tekintetében. A LED-es világítás már most hatékonyabb lehet, mint valamennyi elterjedt technológia, de még van lehetőség a fejlődésre. A teljesítőképesség javulásával kapcsolatos meglehetősen konzervatív előrejelzéseket felhasználva a DOE megállapította, hogy 2030-ra a LED-technológia évente potenciálisan 261 TWh megtakarítást képes elérni, ami 40%-os csökkenés a LED-nélküli esetre kiszámítható villamosáram-fogyasztáshoz képest. A jelenlegi jelentésben körvonalazottakénál – a K+F tevékenységbe történő folyamatos beruházások révén – elérhető sokkal agresszívabb előrejelzések feltételezésével az évi megtakarítás 2030-ra 395 TWh-ra is növekedhet, ami 60%-os csökkenést jelentene a villamosáram-fogyasztásban [2]. Ez a megtakarítás kb. 4,5 x 1015 BTU primer energiaforrásnak felel meg, ami közel kétszerese a 2030-ra szélenergiával és hűszeneszenes napenergiával történő villamosáram-előállítás előrelépésnek. Átlagos 0,1 USD/kWh tarifával számolva ez évente kb. 40 milliárd USD megtakarításnak felel meg [2]. Ahhoz azonban, hogy a jelen elemzésben feltételezett teljesítőképesség-szinteket elérhessük, jelentős, folytatódó javulásra van szükség a fényhasznosítás és az ár terén. Páratlan energiafogyasztás-csök-

Jelen dokumentum az Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériuma által 2015-ben készített tanulmány (I. a HOLUX Hírek 142-148. számaiban) évenkénti – ezúttal az első ilyen, azaz 2016. évi – aktualizálása, javítása, bővítése. – A Szerk.

kentési lehetőségei okán ez kiemeli a szilárdtest-világítás és K+F tevékenységének fontosságát minden energiapolitikával kapcsolatos vita esetén, hiszen ezáltal növelhető az ország energiabiztonsága, csökkenthető az üvegházhatást okozó gázok kibocsátása és pénz takarítható meg az elektromos energiafelhasználás terén.

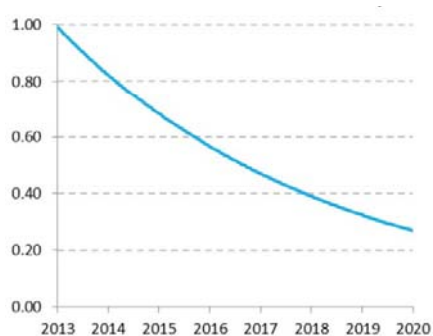
A DOE szilárdtest-világítási programja lefedtetett néhány kemény célkitűzést és úgy alakította programját, hogy lebontsa a technológiai gátakat és felgyorsítsa az elfogadást. A DOE támogatása fontos a tekintetben, hogy 2025-re el lehessen érni a 200 lm/W-nál nagyobb lámpatest-fényhasznosítási célt, csökkenteni lehessen a szilárdtest-világítás gyártási költségeit és óriási energiamegtakarításokat lehessen elérni. Ehhez és a LED-ek és OLED-ek eszköztéchnológiái fejlődésének fenntartása érdekében a DOE szorgalmazza a K+F tevékenység folyamatos előtérbe állítását. A LED-csomagok fényhasznosításának növelését egyre nehezebb lesz elérni, ezért K+F tevékenységre van szükség az alapvető technológiai korlátok – például az áramhatásfok-esés, a zöld LED-ek „hatásfok-rése” – leküzdésére, valamint hogy új, nagy hatásfokú, szűk vonalszélességű, lefelé konvertáló anyagok kifejlesztésére van szükség. A szilárdtest-világítás azonban sokkal többet kínál, mint csupán nagyobb fényhasznosítást: óriási lehetőséget a világítás teljesítőképességének és árának javulása tekintetében a jobb vezérelhetőségnek, az új funkcióknak, a speciális világítási teljesítőképességek alkalmazásának, az új formatervezőknek és a megcélzott jobb közérzetnek és teljesítőképességnek okán. A szilárdtest-világítási fényforrások fénye eredendően szabályozható és azonnal kontrollálható; könnyen egybeépíthetők érzékelő és szabályozó rendszerekkel, így további energiamegtakarításra van lehetőség jelenlétérzékelők, a napfény kihasználása és a fényszintek helyi szabályozása segítségével. A szilárdtest-világítás a világítástechnikai ipar legújabb innovációi „sűrűjében” van az okos, csatlakoztatott, intelligens és adaptív világítás tekintetében.

[1] DOE SSL Program: „Adoption Analysis”, 2016. márc.

[2] DOE SSL Program: „Energy Savings Forecast of Solid-State Lighting in General Illumination Applications”, 2014. aug. (<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/energysavingsforecast14.pdf>).

A világítási rendszereken belüli új funkcióképességek hozzáadott értéket teremthetnek azért, hogy optimális világítást szolgáltatnak a benntartózkodók és az elvégzendő feladatok számára valósidejű vezérlések, programozott érzékelőkkel megvalósított reakciókkal vagy tanítható algoritmusokkal. A szilárdtest-világítás a fényspektrum mentén teljes színszabályozás lehetőségével kecsegtet és pontos szabályozást tesz lehetővé azért, hogy olyan fényt szolgáltat, amely csökkenti a kápráztatást, a szórt fényt és optimalizálja a hasznos fénykomponenst. A szilárdtest-világítás új szabályozási szinteket tesz lehetővé, amelyekkel új világítási lehetőségek teremthetők sokféle különböző területen, például a kertészetben és az egészségügyben.

800lm/A19 LED-lámpa relatív árának alakulása



A legtöbb LED-es világítástechnológiát eddig érthető módon úgy tervezték, hogy a rövid távú piaci lehetőségeket célozzák meg retrofit cserelámpák és lámpatestek formájában. A világ becslült 50 milliárdnyi lámpafoglalata mellett ezek a formák nyilvánvalóan óriási piacot és energiamegtakarítást reprezentálnak, de rajtuk túllépve ki fog szélesedni a világítás koncepciója és egészen új világítási paradigmákat fog létrehozni. Ugyanígy az OLED-ek is egy egészen új megközelítést kínálnak a világítás számára kis megvilágítási szintjük, lapos kivitelük és felülethez alakítható formájuk okán.

A szilárdtest-világítással kapcsolatos viták elkerülhetetlenül gyakran a beszerzési árakra, az elfogadás egyik fő akadályára koncentrálnak. Az elmúlt néhány év során jelentős előrehaladás volt tapasztalható mind a LED-es világítási termékek vonalán A LED-csomagok ára 1 USD/klm-re, a LED-alapú, szabályozható, 60W-os A19-es (Ø60mm-es) cserelámpáké pedig 8USD (10USD/klm) alá esett.

Noha ez még mindig magasabb a hagyományos izzólámpák vagy a kompakt fénycsövek áránál, a visszatérítések és az össz-

tönzők tovább csökkenthetik az árat 5 USD alá.

Várható, hogy bizonyos ideig a szilárdtest-világítási termékek beszerzési ára magasabb marad a hagyományos világítási termékekénél, de a nagyobb működési hatékonyság és a hosszabb üzemi élettartam (alacsonyabb karbantartási és cserekölttség) okán a LED-es világítás már most erősen versenyképes a teljes tulajdonlási költség (TCO) tekintetében számos világítástechnikai alkalmazás esetén – bizonyos gyakori alkalmazási területeken 2 évnél rövidebb megtérülési időszakokat eredményezve.

Ezenkívül az új értéket teremtő funkciókkal az árparitás már nem olyan fontos a fogyasztói elfogadás tekintetében.

Az OLED-ek árképzése statikus volt az elmúlt évben – kevés új panel és termék látott napvilágot. A LED-technológia gyors fejlődése azonban mozgó célt teremtett az OLED-termékek számára a világítási teljesítőképesség és az árképzés tekintetében. Az OLED-gyártók még mindig optimisták a tekintetben, hogy néhány fontos áttöréssel – a fénykivonás és a gyártási kihozatal növelésével – az OLED-ek értékes kiegészítő lehetőséget fognak kínálni a LED-es világítási megoldások mellett.

A DOE szilárdtest-világítási programja kidolgozott egy átfogó K+F stratégiát a LED-es és OLED-es technológia fejlesztéseinek támogatására és az energiamegtakarítások maximalizálására. Ez a DOE SSL R&D Plan elnevezésű dokumentum a többéves MYPP program (DOE SSL Multi-Year Program Plan) és a korábbi ütemterv (DOE SSL Manufacturing R&D Roadmap) egységesítése.

A K+F tervet az iparági szakértőkkel együtt dolgozták ki a 2015. szeptemberében és októberében megtartott kerekasztal-beszélgetéseken, valamint a DOE által 2016. februárjában az észak-karolinai Raleigh-ben megrendezett szilárdtest-világítási K+F workshop-on elhangzottak alapján. A terv tükrözi az iparág résztvevőinek nézeteit azokról a legfontosabb K+F témákról, amelyek növelni fogják a fényhasznosítást, csökkentik a költséget, lebontják az elfogadás előtt álló akadályokat és hozzáadott értéket teremtenek a szilárdtest-világítási megoldásoknál a következő 3-5 év során. A megbeszélések foglalkoztak azzal a kérdéssel, hogy hol szükséges K+F a LED- és OLED-technológiák terén – az alapvető technológiai kutatástól és termékfejlesztéstől a gyártás kutatás-fejlesztéséig. A K+F témák meghatározásával azonban arra nincs garancia, hogy megfelelő K+F megközelítések

nyújtsanak be a témákhoz.

A kerekasztal és workshop megbeszélések során talált legfontosabb kihívások a következők:

LED-alapú világítás K+F prioritásai

- **Emitter-anyagok:** áramsűrűség és termikus esés, a zöld és a vörös emisszió határfoka és a vörös emisszió termikus stabilitása kérdéseinek megoldása.

- **Lefelé konvertáló anyagok:** hatékony, stabil és szűk vonalszélességű anyagok kifejlesztése.

- **A fényre adott fiziológiai válaszok:** az emberek, állatok és növények fényre adott válaszainak megértése, amivel lehetővé válik olyan világítástechnikai termékek kifejlesztése, amelyek javítják a közérzetet, növelik a termelékenységet és minimalizálják a mesterséges fény negatív hatásait, miközben energiát takarítanak meg az alkalmazások során.

- **Tokozió anyagok:** olyan megoldások célul tűzése, amelyek javítják a LED-csomag fényhasznosítását és kiterjesztik működési tartományait a hőmérséklet és a fényáram tekintetében.

- **Tápellátás:** hatékony és robusztus tápegységek kifejlesztése, amelyeknek igen nagy az energiahatékonysága és minimalizálják a villogást a lámpatestek működési tartományában, valamint növelik a lámpatestek funkcióképességét.

- **Tökéletesített lámpatestek:** lámpatest-koncepció kidolgozása a hatékonyság és a hozzáadott érték növelésére adott világítási alkalmazások területén.

- **Rugalmas lámpatest-gyártás:** gyártási eljárások kifejlesztése a gyártás egyszerűsítésére a lámpatest-termékek szélesebb tartománya számára.

OLED-alapú világítás K+F prioritásai

- **Anyagkutatás:** olyan emitterrendszerek (azaz emitterek, hordozók, transzport-anyagok) kifejlesztése, amelyek hosszú élettartamot és ugyanakkor nagy határfokot érnek el, különösen a kék emitterek esetén, ahol a teljesítőképesség lemaradt.

- **Fénykivonás:** költséghatékony és gyártható fénykivonó megoldások kifejlesztése, amelyek jelentős javulást tesznek lehetővé a panelek fényhasznosítása terén a szerves réteg/anód hullámvezető üzemmódjaiban és/vagy csökkentik a felület plazmonikus veszteségeit. A kibocsátott fény eloszlásának vezérelhetősége plusz előny lehetne.

- **Lámpatest-fejlesztés:** az OLED-világítás piaca kerülésének felgyorsítása a termékek megkülönböztethetősége, integrálhatósága, könnyű felszerelése vagy más fontos jellemző segítségével, amely segíti az

OLED-es világítás vonzerejét és megvalósíthatóságát.

- Tökéletesített gyártási technológiák: a kihozatal és a megbízhatóság növelése.
- Gyártás rugalmas hordozókra: a komfortos/rugalmas OLED-es világításhoz szükséges eljárások és anyagok tökéletesítése lehetőleg roll-to-roll (R2R) gyártás alkalmazásával.

1.0 Bevezetés

Az Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériuma (DOE) Szilárdtest-világítási programja az USA 2005. évi energiapolitikai törvénye 912. szakaszának megfelelően 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. Célja a következő: *2025-re kifejleszteni olyan modern szilárdtest-világítási technológiákat, amelyek a hagyományos világítási technológiákkal összehasonlítva nagyobb energiahatékonyságúak, hosszabb élettartamúak és versenyképes árúak – 50%-os termékrendszer-fényhasznosítást célozva meg a napfény spektrumának látható részét szorosán reprodukáló világítással.*

Az energiamegtakarítások maximalizálása érdekében a program a K+F tevékenység több területét támogatja:

- Alaptechnológia-kutatás – Alkalmazott kutatás, amely felöleli azokat a tudományos erőfeszítéseket, amelyek új ismeretekre vagy a vizsgált téma megértésére irányulnak a szilárdtest-világítás speciális alkalmazása tekintetében. Célja a tudományos elvek, a technikai alkalmazások és az alkalmazások előnyeinek demonstrálása.
- Termékfejlesztés – Kereskedelmi életképes, modern szilárdtest-világítási anyagok, eszközök vagy lámpatestek kifejlesztése az alap és alkalmazott kutatás koncepcióinak felhasználásával.
- Gyártás kutatás-fejlesztése – Modern gyártási eljárások kifejlesztése a szilárdtest-világítási fényforrások és lámpatestek költségeinek csökkentésére és a termékek konzisztenciájának és minőségének javítására az USA-ban történő gyártás kifejlesztéséhez nyújtott támogatás további előnyével.
- Alkalmazott technológia kutatás-fejlesztése – Ez a munka a szilárdtest-vil-

gítási technológia előnyeit monitorozza, helyszíni és laboratóriumi kiértékeléseket szolgáltat és a megjelenő termékek és rendszerek elfogadását akadályozó tényezők megszüntetésén dolgozik.

A jelen dokumentum, a DOE Szilárdtest-világítási K+F terv (a továbbiakban K+F terv évente aktualizálásra kerül. A K+F terv a DOE többéves MYPP programjának (DOE SSL Multi-Year Program Plan) és 2015 előtt publikált ütemtervének (DOE SSL Manufacturing R&D Roadmap) egységesítése. (Korábbi dokumentumok: <http://energy.gov/eere/ssl/technology-roadmaps>)

A K+F terv elemzéseket és iránymutatást ad a futó K+F tevékenységekkel kapcsolatban a szilárdtest-világítási technológia elősegítésére és az energiamegtakarítások növelésére.

A K+F terv évenkénti aktualizálása tükrözi a szilárdtest-világítással kapcsolatos célok elérésében tapasztalható előrehaladást és a program céljainak elérésére legnagyobb hatással bíró K+F prioritások eltolódását. A terv melléklete alapvető háttéranyagokat tartalmaz a LED- és OLED-termékekről, valamint tartalmazza a felhasznált rövidítések jegyzékét és a program háttérinformációit. A jogszabályokkal és irányelvekkel kapcsolatos részleteket a jelen dokumentum nem tartalmazza, de megtalálhatók a szilárdtest-világítás weboldalán (www.ssl.energy.gov/about.html) és a következő címen: energy.gov/eere/ssl/partnerships.

2.0 A szilárdtest-világítás hatásai

A szilárdtest-világítás óriási lehetőséget kínál a világítás hatásfokának, teljesítőképességének és árának javításához, valamint új alkalmazások és előnyök megteremtéséhez. A LED- és OLED-eszközökkel kapcsolatos kezdeti motiváció a nagy fényhasznosítás ígérete és az olcsó gyártás lehetősége volt. Az ipari szakértőket segítette, hogy az alacsony költségeket a félvezetőipar tömeggyártási technológiájának LED-ekre történő alkalmazásával, az OLED-eknél pedig a roll-to-roll (R2R) gyártástechnológiák bevezetésével el lehetett érni. Bár még mindig sok a fejlesztendő, a szilárdtest-világítás már elkezdte beváltani ezeket az ígéretek, hiszen folyamatosan demonstrálja ezt a hagyományos fényforrásokét meghaladó, állandóan javuló fényhasznosításával és alacsony áraival, amelyek ésszerű idő alatti megtérülést és alacsonyabb teljes tulajdonlási költségeket (TCO) tesznek lehetővé. Ezek a tulajdonságok hozzájárultak a szilárdtest-

világítás növekvő 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, ami további energiamegtakarítást jelent. A szilárdtest-világítási technológia fejlődésével világossá vált, hogy hatása sokkal több, mint csupán az energiamegtakarítás. Megvan a lehetősége arra is, hogy jótékony hatást gyakoroljon a környezetre, a kertesetekre, az állattartásra, a közlekedés biztonságára, az emberi egészségre és a termelékenységre. Mindezeket az előnyöket úgy lehet realizálni, hogy közben jelentős mennyiségű energiát takarítsunk meg a hagyományos világítástechnológiákhoz képest.

A LED-es és OLED-es világítást úgy lehet kialakítani, hogy olyan specifikus spektrális teljesítményeloszlása legyen, amely adott alkalmazásokhoz illeszkedik, vagy aktív módon vezérelhető, lehetővé téve a kisugárzott fény spektrumának dinamikus változtatását. A legújabb kutatások például azt mutatták, hogy az emberi szervezet fiziológiailag reagál a napfény spektrumának nap közbeni változására, és ezt a változó spektrumot most LED-alapú beltéri világítással szimulálni lehet. [3]. Statikus spektrum felhasználásával olyan világítás-technikai termékek tervezhetők, amelyek növelik a láthatóságot vagy a színteljesítményt és kiemelik a speciális színeket vagy terméktípusokat (pl. a Lumileds CrispWhite technológiáját így hirdetik: „feltárja a leggazdagabb fehéreket, élénk vöröseket és az előforduló egyéb színeket” [4]. Olyanok is tervezhetők, amelyek elősegítik a növekedést vagy akár speciális termények tápértékét [5].

Noha a szilárdtest-világítás energiamegtakarítást és sok más ígéretet hordoz, ezeknek az ígéreteknek a realizálásához folyamatos K+F tevékenységre van szükség. A következő fejezetekben a szilárdtest-világítás e kulcsfontosságú előnyeit fogjuk megvitatni.

[3] G. C. Brainard, J. P. Hanifin, J. M. Greeson, B. Byrne, G. Glickman, E. Gerner and 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.

[4] Lumileds: „LUXEON CoB With CrispWhite Technology”, 2016. (<http://www.lumileds.com/products/cob-leds/luxeon-cob-with-crispwhite>)

[5] T. Pocock: „Tuning the Spectrum for Plant Growth”, DOE SSL Technology Development Workshop, Portland, Oregon, 2015. nov. (http://energy.gov/sites/prod/files/2015/11/t27/pocock_keynote_portland2015.pdf)

2.1. táblázat – Tipikus 2015-ös árak és paraméterek a szilárdtest-világítás és a kategóriájukban legjobb hagyományos világítástechnológiák esetén

2015-ös terméktípus	Fényhasznosítás (lm/W)	CCT (K)	Hasznos élettartam ¹ (óra)	Ár (USD/km)
60mm átmérőjű LED-lámpa (szabályozható, melegfehér) ²	78	2700	25 000	10 USD
PAR38-as LED-lámpa (melegfehér) ²	70	3000	28 000	19 USD
T8 LED-cső (semleges fehér) ²	107	4100	50 000	10 USD
15cm átmérőjű mélysugárzó (melegfehér) ²	64	3000	40 000	29 USD
60cm x 120 cm-es LED-es mennyezeti lámpatest (melegfehér) ²	94	3500	56 000	29 USD
Csarnokvilágító magas/alacsony mennyezetekhez (melegfehér) ²	102	4000	90 000	23 USD
LED-es útvilágító lámpatest ²	96	5000	50 000	49 USD
OLED-es lámpatest ³	43	3000	40 000	870 USD
Nagy Int., nagy telj. kisülőlámpás rendszer ⁴	115	3100	15 000	3 USD
Lineáris fénycsöves rendszer ⁴	108	4100	25 000	4 USD
Nagy Int., kis telj. kisülőlámpás rendszer ⁴	104	3000	15 000	4 USD
Retrofit kompakt fénycső (Ø60mm)	70	2700	12 000	2 USD
Szabályozható retrofit kompakt fénycső (Ø60mm)	70	2700	12 000	10 USD
Retrofit halogénlámpa (Ø60mm)	20	2750	8 400	2,5 USD
Izzólámpa (Ø60mm)	15	2760	1 000	0,63 USD

Megjegyzések: 1. Nem szilárdtest-világítási technológiák esetén a termék élettartamának meghibásodás miatt bekövetkező végét jelöli. Mivel a LED-eknél fokozatosan csökken a fénysűrűség a katasztrofális meghibásodás bekövetkeztéig, a LED- vagy OLED-termékek hasznos élettartamát az L70-es értéket (ahol a termék kezdeti fénysűrűségének 70%-át produkálja) adtuk meg [6].

2. 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 többet a mediánhoz 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 [7]. Ezen értékelés alapján a LED-ek esetén az 1. kvartilist használtuk a tipikus beszerzési ár jellemzésére és az ehhez az árhoz illeszkedő termékek átlagos fénysűrűségét, korrelált színhőmérsékletét és élettartamát tüntettük fel.

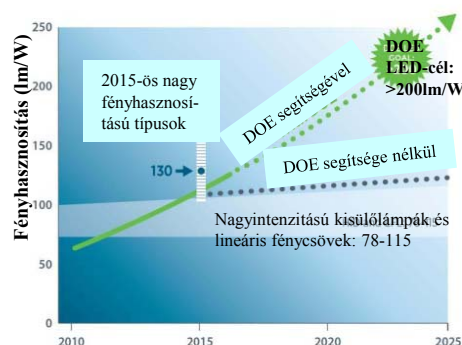
3. Az Acuity Brands Luminaires cég „Chalina 5-Panel Brushed Nickel OLED Pendant” elnevezésű függesztékére vonatkozik, amely a Home Depot-ban kapható 2016. áprilisában [8].

4. Tartalmazza az előítelt veszteséget is.

2.1 Fényforrások fényhasznosítása és energiamegtakarítása

Bizonyos termékek 150lm/W-hoz közelítő fényhasznosítása mellett a LED-es fényforrások hatékonyabbak lehetnek, mint az izzólámpák, a halogénlámpák, a kompakt és lineáris fénycsövek és a nagyintenzitású kisülőlámpák. A fogyasztók azonban gyakran a kisebb hatékonyságú termékeket választják a drágább, ferleskategóriás termékek helyett. A 2.1 táblázat összehasonlítja a 2015 során vásárolt szilárdtest-világítási termékek és a kategóriájukban legjobb, versenytársnak tekinthető hagyományos világítástechnikai termékek árát és teljesítőképességét. A táblázat azt mutatja, hogy a LED-termékek már most legalább olyan – ha nem nagyobb – fényhasznosításúak, mint az elterjedt többi technológia, de beszerzési áraik még mindig magasabbak.

A LED-alapú szilárdtest-világítási termékek teljesítőképessége és ára tekintetében még jelentős javulásra van lehetőség. Az 5.1 fejezetben közölt elemzés azt mutatja, hogy a LED-csomagok esetében a 255 lm/W elérhető teljesítőképességi cél, és a



2.1 ábra – A LED és az elterjedt fényforrások fényhasznosítási adatainak összehasonlítása (Forrás: LED Lighting Facts® Product Database)

laboratóriumi és kereskedelmi LED-csomagoknál már kitűnő eredmények születnek a cél elérésében. A 2.1 ábra azt mutatja, hogy a LED-es lámpatestek az elterjedt technológiáknál elérhető legjobb fényhasznosításnál akár 100 lm/W-tal is nagyobb értéket fognak kínálni. Az ábra azt is mutatja, hogy a jelenlegi legjobb LED-termékeknek már jó a fényhasznosítása, de a DOE LED Lighting Facts® adatbázisában sok olyan termék is van, amely alacsonyabb fényhasznosítást és az elterjedt technológiáknál alig nagyobb előnyt kínál. A Lighting Facts® adatbázisból kapott eredményekből kitűnik, hogy a LED-es világítástechnikai gyártók hogyan választhatják a fényhasznosítást az ár, az élettartam, a színminőség, a fényeloszlás és más paraméterek rovására. Az OLED-technológia még mindig gyermekcipőben jár, de a nagy fényhasznosítás és az alacsony ár, valamint a formai kialakítás és a fényeloszlás új opciói tekintetében ígéretes. A 6.1 fejezet elemzi, hogy az OLED-technológia hogyan tudna elérni 190 lm/W-ot és kínálna ugyanakkor kisebb fénysűrűségű és kisebb kápráztatású fényforrást.

2.2 Fényhasznosítás

A lámpa és a lámpatest fényhasznosítása a világítási rendszerek energiahatékonyságának fontos mutatója, de nem mondja el a teljes történetet. Egy lámpatest valódi hatékonyságát az is befolyásolja, hogy a keletkezett fény milyen jól éri el a megcélzott alkalmazást és szolgáltat megfelelő megvilágítást. Két olyan mutató is van, amely segít a termékek közötti hatékonyság összehasonlításában adott alkalmazás esetén: az alkalmazási hatékonyság és a felhasználási hatékonyság.

Az alkalmazási hatékonyság azt mutatja meg, hogy mekkora teljesítményt kell felvenni ahhoz, hogy a célterületen el lehessen érni a specifikált megvilágítási kritériumot [9].

[6] DOE SSL Program: „Lifetime of White LEDs”, 2009. szept. (http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/lifetime_white_leds.pdf)

[7] Lawrence Berkeley National Laboratory: „The Evolving Price of Household LED Lamps: Recent Trends and Historical Comparisons for the US Market”, 2014. nov. (<http://eetd.lbl.gov/sites/all/files/lbnl-6854e.pdf>)

[8] Acuity Brands: „Chalina OLED Pendant Product Specifications”, 2014. dec. 15. (http://www.acuitybrands.com/products/detail/316294/acuity-brands/chalina-pendant/oled-decorativependant-for-consumers/-/media/products/acuity_brands/316294/document/chalina_pm.pdf)

[9] DOE SSL Program: „Energy Efficiency of LEDs Technology Factsheet”, 2013. márc. (http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/led_energy_efficiency.pdf)

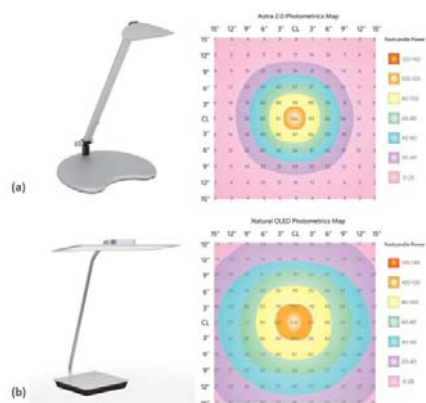
A felhasználási hatékonyság a munkafelületet elérő nettó fényáram és a rendszerben lévő lámpák által kibocsátott teljes fényáram hányadosa [10]. Az olyan világítási megoldás, amely a megkívánt megvilágítási szintek eléréséhez kevesebb fényt használ fel, jobb felhasználási hatékonyságot reprezentál. Ha egy lámpatest a fény nagyobb százalékát irányítja a célfelületre, a megkívánt megvilágítást kevesebb energiával tudja létrehozni. Ez különösen fontos, tekintettel arra, hogy a szilárdtest-világítás jellemzői olyan új lámpatest-konstrukciókat tesznek lehetővé, amelyek jobb fényfelhasználáshoz és így nagyobb energiamegtakarításhoz vezethetnek a fényforrás nagyobb fényhasznosításán túl. Például a LED-ek kis mérete jobb optikai kontrollt és irányíthatóságot tehet lehetővé, az OLED-eket viszont nagy méretük, kis fényűrűségük és kis kápráztatásuk folytán a célfelülethez igen közel lehet alkalmazni. A LED és OLED fényforrások fényhasznosításának maximalizálásához valószínűleg jóval túl kell lépni a megszokott formákon – a lámpán és a süllyesztett lámpatesten – olyan megoldások felé, amelyek maximalizálják az alkalmazási hatékonyság mellett az optikai, elektromos és termikus hatékonyságot is.



2.2 ábra – A Cree „Edge Area Square” térvilágító lámpatestjei az Edgewater-i (Kolorádó) piacén (Forrás: John Edmond, Cree Inc., SSL R&D Workshop, San Francisco, Kalifornia, 2015. jan. [11])

Az új kültéri LED-es térvilágítók demonstrálták, hogy lényegesen alacsonyabb teljes fényáram mellett képesek megfelelő megvilágítási szintekre, mint az általuk helyettesített hagyományos világítási termékek. Ezt jobb fényeloszlással érik el, amely csökkenti a célfelület túlvilágítását, javítja a megvilágítás egyformaságát és kevesebb olyan veszteségi fényt produkál, amely a célfelületen kívülre esik.

A 2.2 ábra a LED-alapú kültéri lámpatestek jobb fényhasznosítására mutat be egy speciális példát. Itt egy parkoló Cree-gyártmányú LED-ekkel szerelt lámpatestekkel megvalósított rekonstrukció látható, amely 66%-kal csökkentette az energiafelhasználást a nagyintenzitású kisülőlámpás lámpatestekéhez képest a jobb fény-



2.3 ábra – A Workrite Ergonomics asztali lámpái fényeloszlásának összehasonlítása – (a) Astra 2.0 egykarú LED-es asztali lámpa – (b) Natural OLED-es asztali lámpa (Forrás: Workrite Ergonomics Website, 2016. május [12, 13])

hasznosításnak és a kisebb teljes fényáramnak köszönhetően. Ráadásul lényegesen nagyobb a megvilágított parkolóterület, ami nagy előny a gépkocsivezetők és a gyalogosok biztonsága tekintetében.

A hatékony fényhasznosítás különösen fontos az OLED-ek és a kis fényűrűségű planáris LED-rendszerek értékelése szempontjából; e fényforrások kis fényűrűsége és szórt fénye következtében a célfelülethez igen közel lehet alkalmazni őket, túl nagy kápráztatás nélkül, azaz kevesebb fénnel lehet megfelelő megvilágítást elérni, vagy megfordítva: nagyobb megvilágítás biztosítható elfogadhatatlan káprázás nélkül. A 2.3 ábra két felfejeztős asztali lámpát mutat be a Workrite Ergonomics kínálatából: az egyik LED-es, a másik OLED-es kivitelű, és közel azonos (1140, ill. 1163 lx) megvilágítást hoznak létre a célfelület közepén. Ugyanakkor a Natural OLED-es asztali lámpa 442 lument szolgáltat nagyobb kiterjedésű felületen, míg az Astra 2.0 306 lm-je jóval koncentráltabb [12, 13].

Új konstrukciókkal, architektúrába történő beépítésekkel és új világítási elrendezésekkel tovább lehet javítani a fényhasznosítást, amint a tervezési és alkalmazási lehetőségek a világítási technológiák számára teljes mértékben kiteljesednek. A fényhasznosítás másik szempontja a vezérlők felhasználása, amellyel minimalizálni lehet a fényforrás fogyasztását a világítási feladat veszélyeztetése nélkül. A LED-ek és OLED-ek természetüknél fogva szabályozhatók (azaz fényerősségük változtatható és azonnal ki/bekapcsolhatók), így a világításszabályozás teljes palettájával kompatibilisek. A szabályozókat a 2.5 fejezetben fogjuk tárgyalni.

2.3 Továbbfejlesztett világítási teljesítőképesség és konstrukció

A LED-es világítástechnológiák többségét rövidebb távú piaci lehetőségek kielégítésére tervezték retrofit (csere-) lámpák és lámpatestek formájában. A világon megközelítőleg 50 milliárd lámpafoglatat van felszerelve, ezért ezek a konstrukciók óriási piacot és energiamegtakarítási lehetőséget reprezentálnak. A lámpa- és a retrofit-formák segítik a gyors fogyasztói elfogadást azáltal, hogy megszokott formájú terméket és a meglévő termékekhez hasonló használhatóságot kínálnak. Ugyanakkor a tipikus lámpaformák bonyolulttá teszik a LED-csomagoknak a világítási termékekbe történő beépítését. A legtöbb lámpakonstrukciónál a LED-csomagok számára nincs természetes hőelvezetési lehetőség. Sok lámpánál szükség van a LED-technológia természetéből adódó 180°-ot meghaladó fényeloszlásra. A tápegységek beépítése az egyes lámpákba költséges és rossz hatásfokú lehet. A LED-termékek beépítői jelentős munkát végeztek olyan termékek kifejlesztésével, amelyek eleget tesznek ezeknek a kihívásoknak, de az örökölt formák nem képesek kihasználni a LED-technológiával kapcsolatos egyedi sajátosságokat és tervezési rugalmasságot, és mindig belekényszerítik a LED-technológiát egy kevésbé optimális konstrukcióba.

A retrofit lámpatestek nagyobb rugalmasságot tesznek lehetővé, mivel tipikusan nagyobb térrel rendelkeznek a beépítéshez. Így optimálisabban és költséghatékonyabban lehet a LED-es világítási termékek beépítése. De a retrofit lámpatesteknél a világítás elrendezését és a megkívánt fényeloszlást gyakran a lecsereelni szándékozott örökölt technológia szabja meg, nem pedig az, amelyet optimálisan el lehetne érni, ha a teljes világítási rendszert újragondolnánk. Azt is az örökölt világítási technológiák szabják meg, hogy hogyan lehet a retrofit lámpatestet illeszteni és csatlakoztatni az adott épülethez. Integrált, süllyesztve szerelt világítás esetén például a LED-es termékekhez kisebb mélységek és térfogatok kellenek, ezért tömörebb épületarchitektúrák alakíthatók ki, A lámpatestek elektromos csatlakozása az épületben lévő

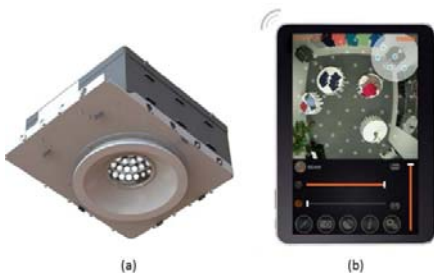
[10] E. L. Elliot, Ed.: Good Lighting and the Illuminating Engineer, Volume 7, Illuminating Engineering Publishing Co., 1912, p. 190.

[11] J. Edmond: „Reinventing Lighting”, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, Kalifornia, 2015. jan. 27. (http://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/edmond_reinventing_sanfrancisco2015.pdf)

[12] Workrite Ergonomics: „Astra 2 Single Arm”, 2016. (<http://workriteergo.com/astra-2-single-arm/>)

[13] Workrite Ergonomics: „Natural OLED Desk Lamp”, 2016. (<http://workriteergo.com/natural-oled/>)

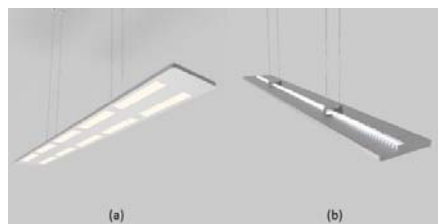
egyenáramú hálózatok felhasználásával is javítható, így ugyanis nem kell mindegyik LED-lámpánál vagy -lámpatestnél átalakítani a váltakozóáramot egyenárammá. Ez megkönnyítheti a megújuló energiaforrásokhoz – pl. a napkollektorokhoz vagy szélenergiákhoz és azok teleprendszeréhez való közvetlen csatlakozást anélkül, hogy DC-AC, majd a LED-ek működtetéséhez AC-DC átalakításra lenne szükség. A formatényezők és az épületbe való integráláson túl a szilárdtest-világítás a tulajdonságok és tervezési rugalmasság új tartományait kínálja. A LED-es világítási technológiára és a fény hatékony felhasználására jó példa az Osram távvezérelhető OmniPoint™ világítási rendszere (lámpatest, meghajtó és applikációs szoftver), amely lehetővé teszi, hogy a felhasználó azonnal átformálja a kimeneti fényt (azaz a sugárzási szöget, a fény irányát, eloszlását, alakját és erősségét) egy érintőképernyős drótnélküli interfész segítségével (<https://www.sylvania.com/enus/innovation/videos/Pages/OmniPoint.aspx>).



2.4 ábra – (a) Az Osram OmniPoint™ lámpatest és (b) a felhasználói interfész (Forrás: Jerry Ryu, Osram Sylvania, SSL R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016. február [14])

Amint az a 2.4(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 kiemelő világítására is felhasználható az igényeknek megfelelően. A 2.4(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 [14].

Az OLED-ek nem képesek leutánozni a legtöbb lámpa és lámpatest formáját, ami egyszerre hátrány és előny is. Amíg ugyanis ez gátolja az OLED-technológia közeljövőben történő elfogadását, ugyanakkor felgyorsítja az olyan, teljesen optimalizált világítási rendszerek és alkalmazások fejlesztését, amelyek ki



2.5 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 [15])

tudják használni e technológia egyedi sajátosságait (pl. a nagy felületet, a kis fénysűrűséget, a karcsú kivittelt és a siktól eltérő felületeket). Végül soron a nagy felületű, kis fénysűrűségű OLED-ek és az irányított fényű LED-fényforrások bizonyos kombinációjával lehetne olyan megoldást találni, amely maximalizálná a két világítási technológia sajátosságait és optimalizálná a világítási rendszert.

Az Acuity Brands kifejlesztette a Duet SSL™ technológiát, amely ötvözi az OLED- és LED-fényforrások használatát egyazon lámpatestben, optimalizálva ezzel a jobb fotometriai paraméterek kialakítását, javítva a világítás minőségét és a költséghatékonyságot. Amint az a 2.5 ábrán látható, a lefelé fordított OLED-ek fénye a célfelületre esik, míg a LED-ek felfelé irányul és az általános világításról gondoskodik, amely visszatükröződve a mennyezetről világítja be a teret. Ez a kombináció kihasználja az OLED-ek lágy, diffúz fényét ott, ahol a fény kölcsönhatásban van a felhasználóval, a LED-ek pedig költség-hatékony kiegészítő fényt szolgáltatnak a tér fénnel való megtöltéséhez.

Ez a két példa csupán bepillantást enged abba, hogy a szilárdtest-világítás miképpen tudja javítani a világítás teljesítőképességét és a világítási rendszer költségeit. Amint a termékfejlesztők, építészek és világítástervezők teljes alapossgal megismerik a szilárdtest-világítási technológiák lehetőségeit, a termékek új formai kialakításait, az új világítási elrendezéseket és az épületekbe való beépítés új lehetőségeit, nyilvánvalóvá válik, hogy a szilárdtest-világítási technológia nem csupán a fényforrások számára, hanem az optimalizált felhasználási hatékonyság, az épületek és az építés hatékonysága, valamint a világítás teljesítőképessége és ára tekintetében is teljes optimalizálásról gondoskodik.

2.4 Jobb környezeti fenntarthatóság

A szilárdtest-világítási technológia jelentős környezetvédelmi előnyöket és lehetőségeket kínál. A jobb fényhasznosítás nyújtotta

előnyök túlmutatnak a kisebb energiafogyasztáson, az energiamegtakarításból adódó költségsökkenésen és az energiabiztonságon. A megnövelt fényhasznosítás és a vele kapcsolatos energiamegtakarítás azt jelenti, hogy az elektromos áram előállításához felhasznált fosszilis tüzelőanyagok elégetésekor kevesebb üvegházhatást okozó gáz és más szennyezőanyag keletkezik. A szilárdtest-világításra való áttérés jelentős mértékben hozzájárul rövid távon az üvegházhatást okozó gázok csökkentéséhez [16]. A szilárdtest-világítási technológia további környezetvédelmi előnyöket is kínál, például a mérgező, a ritka, a kritikus vagy energiaigényes anyagok kisebb mennyiségben való felhasználását [17]. Ezenkívül a kibocsátott fény spektrumának és optikai eloszlásának új szabályozási szintjei minimalizálhatják a mesterséges fénynek az ökoszisztémára gyakorolt hatását.

Az USA Energiaügyi Minisztériuma által támogatott, 2013-ban elvégzett életcikluselemzés (LCA) azt mutatta, hogy a LED-termékeknek csökken az energiafelhasználása a teljes életciklus – a termékek gyártása, szállítása és használata – során. A LED-ek fényhasznosításának és élettartamának növekedése következtében az életciklus alatti energiafelhasználás ma kb. a fele az 5 évvel ezelőtti LED-ekének.

Az LCA-tanulmányból az is kiderül, hogy a szilárdtest-világítás anélkül képes csökkenteni a világítás energiafelhasználását és megőrizni a teljesítőképesség-szinteket, hogy nagy mennyiségű toxikus vagy ritka anyagot használjon fel. (A LED-ek drámai módon képesek csökkenteni a világítás ritkaföldfém-felhasználását – a Minisztérium kritikus anyagok stratégiájával összhangban (http://energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf).

[14] J. Ryu: „Ultimate Lighting Design Freedom &”, DOE SSL R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016. feb. http://energy.gov/sites/prod/files/2016/02/f29/ryu_application_raleigh2016.pdf

[15] Acuity Brands: „Acuity Brands Unveils Luminaires Using New Duet SSL Technology at Lightfair International”, 2015. máj. 5. (<http://news.acuitybrands.com/US/ALL-Brands/acuity-brands-unveils-luminaires-using-new-duet-ssl-technology-at-lightfair-international/s/8d94f8e6-a974-4f18-bec0-f0892303e3e4>)

[16] McKinsey and Company: „Reducing U.S. Greenhouse Gas Emissions: How Much at What Cost?”, 2007. dec. (<http://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability-and-resource-productivity/our-insights/reducing-us-greenhouse-gas-emissions>)

[17] 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)

A fénycsőves világítástechnológiától eltérően a LED-ekhez és az OLED-ekhez nincs szükség higanyra vagy ólomra, ezért sokkal hatékonyabbá teszik a ritkaföldfém-anyagok felhasználását. Az LCA-tanulmány azt is mutatja, hogy a levegő, a természeti erőforrások, a víz és a talaj tekintetében a LED-alapú szilárdtest-világításnak jóval kisebb a negatív hatása, mint az izzólámpás világításnak, és mivel a LED-technológia tovább tökéletesedik, a kompakt fénycsőekénél is kisebb lesz a hatása. A tanulmány arra a következtetésre jutott, hogy a LED-alapú szilárdtest-világítás máris javulást mutat a világítás fenntarthatósága terén, és az előnyök tovább fognak erősödni a fényhasznosításban bekövetkező további javulások realizálódása során [17].

Noha a LED-alapú szilárdtest-világítási termékek máris jobb fenntarthatóságot igazolnak, a környezeti hatások további csökkentéséhez még több erőfeszítésre lenne szükség. A következőkben a LED-es világítástechnikai iparon belüli néhány kezdeményezést mutatjuk be:

- A fény ökológiai hatásainak csökkentése éjszaka – például a LED-termékek spektrumának igényre szabásával lehetővé vált olyan kültéri világítás tervezése, amely csak minimálisan zavarja a tengeri teknősök keltetését (<http://www.myfwc.com/wildlifehabitats/managed/sea-turtles/lighting/>). Annak érdekében, hogy jobban megérthessük a fénynek az állatokra kifejtett hatását és egyéb lehetőségeket találjunk a LED-termékek számára, a DOE 2016. áprilisában szervezett egy találkozót állatkutatók, LED-technológusok és a világítás hatáskutatóinak részvételével, hogy megvitassák az állatok reagálását a fényre. A találkozóról készült jelentés a megbeszélések összefoglalójával együtt hamarosan meg fog jelenni.

- A kültéri térvilágítás fényszennyezésének minimalizálása. Az International Dark-Sky Association útmutatásai javaslatokat fogalmaznak meg az éjszaka felfelé kibocsátott „haszontalan” fénykomponens csökkentésére (<http://www.darksky.org/>). A LED-es térvilágítás teljes dimmelhetőséget és a fényeloszlás kitűnő kontrollját kínálja. Mindkét tulajdonság felhasználható a fény ökoszisztémára éjszaka kifejtett hatásának minimalizálására – a megvilágítás biztonságos és hatékony szintjeinek fenntartása mellett. Van némi aggodalom a tekintetben, hogy az út- és térvilágításból nagyobb kék tartalmú (nagyobb színhőmérsékletű) fény jut az atmoszférába, mint a hagyományos nagy-nomomású nátriumlámpás világítás esetén,

ami az ég nagyobb mértékű „parázslását” okozza. Azonban éppen most készült el egy átfogó tanulmány, amely tárgyalja az égbolt parázslását előidéző spektrumot és a bizonyos LED-es közvilágítások által kínált javított optikai kontrollnak köszönhetően kisebb felfelé irányuló fény-mennyiséget.

- „Anyagmentesíteni”, de legalábbis csökkenteni a szilárdtest-világítási termékekhez felhasznált anyagok mennyiségét, különösen az energiaigényes anyagokét (pl. az alumíniumét). Átgondolt, új konstrukciókkal drámai módon lehet csökkenteni a LED-lámpákhoz vagy LED-es lámpatestekhez szükséges anyagok mennyiségét. Erre példa a Philips SlimStyle vagy a Cree 4-flow lámpája (l. a 2.6 ábrán), amelyeknek nincs alumínium hűtőbordája.

- A termék életciklusának megértése, hogy a termék élettartamának végén újra fel lehessen használni, vissza lehessen forgatni vagy újra lehessen hasznosítani a lámpatesteket vagy a komponenseket [18].

- A gyártás hatékonyságának javítása a kihozatalok növelésével, az anyagfelhasználás csökkentésével és a berendezések energiafelhasználásának mérséklésével.



2.6 ábra – Alumínium hűtőbordák nélküli lámpák: (a) Philips SlimStyle; (b) Cree 4-flow; (c) Osram Filament-Style LED (Forrás: (a) Philips honlap, 2015. május [19]; (b) Cree honlap, 2015. május [20]; (c) Osram honlap, 2016. május)[21]

2.5 Egészség és termelékenység

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 (<http://www2.meethue.com/en-us/>) – és a specialitások – például a Telumen Light Replicator (<http://www.telumen.com/products2.html>) – az emitált spektrumot aktív módon képesek szabályozni különböző mértékű spektrális felbontással. Noha a LED-termékeknek igényre szabott spektruma lehet, a legtöbb LED-es világítástechnikai terméknél még nem lehet aktív módon szabályozni a kibocsátott spektrumot. A LED- vagy OLED-fényforrások kibocsátott spektrumának dinamikus változtatása a szilárdtest-világítás energiamegtakarításán túl számos hozzáadott értéket képviselő tulajdonság előtt nyitja

meg az utat. Néhány olyan új alkalmazási terület, amelyet a LED-ek színének állíthatósága és spektrumuk igényre szabása tesz lehetővé: az emberi egészség és termelékenység, a kertészetek és állattenyésztetek világítása.

A spektrum igényre szabásának a képessége segít jobban megérteni azt, hogy milyen a legmegfelelőbb fény egy adott feladathoz, a kertészet termőképességének optimalizálásához, az emberi fiziológia pozitív befolyásolásához és az új alkalmazások kidolgozásához. Az emissziós spektrum dinamikus szabályozása további értéket 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 alkalmas 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.

2.5.1 Az emberi egészség és termelékenység

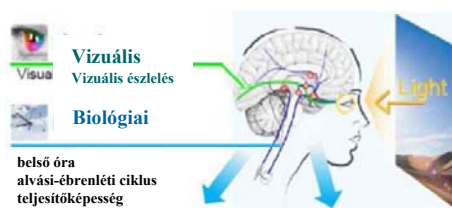
Az emberek jelentős mennyiségű természetes és mesterséges fénynek vannak kitéve, amelyeknek minden részének van valamilyen hatása a fiziológiánkra – a fényforrás típusától függetlenül.

[18] C. Chipkatti: „SSL Systems: Opportunity for Sustainability Beyond Energy Savings”, DOE SSL Technology Development Workshop, Portland, Oregon, 2015. nov. (http://energy.gov/sites/prod/files/2015/11/f27/chipkatti_lifecycle_portland2015.pdf)

[19] Philips: „SlimStyle LED Dimmable A-Shape”, 2016 (<http://www.usa.lighting.philips.com/prof/lamps/led-lamps-and-systems/led-lamps/slimstyle-a-shaped-dimmable-led>)

[20] Cree: „A Better LED Bulb”, 2015 (<http://creebulb.com/media/document/file/pr/product-document-gen3-point-5.pdf>)

[21] Osram: „LED Retrofit Classic A”, (http://www.osram.com/osram_com/products/lamps/led-lamps/consumer-led-lamps-with-filament-style-led-technology/led-retrofit-classic-a/index.jsp)



2.7 ábra – Hogyan befolyásolja a fény a biológiai rendszereket? (Forrás: Andreas Wojtysiak, OSRAM, SSL R&D Workshop, San Francisco, CA, 2015. január [22])

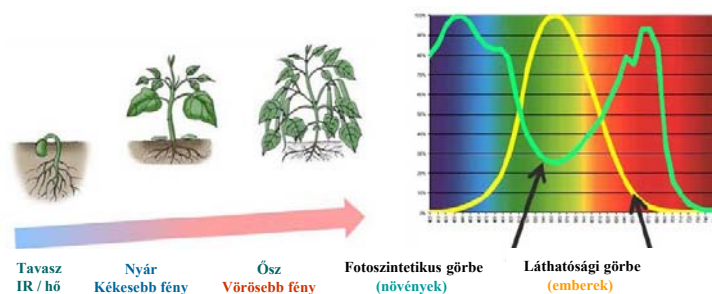
A legfrissebb kutatások jelentősen elősegítették annak megértését, hogy a fény nem csupán a látást teszi lehetővé, hanem igen fontos jelzés biológiai rendszereink számára, befolyásolják a cirkadián ritmust, a pupillareflexiót, az éberséget és még sok minden mást, amint azt a 2.7 ábra mutatja [3]. Azt is kimutatták, hogy a fény hatásos kezelést jelent sokféle egészségi állapotnál, pl. a szezonális affektív zavar (SAD) és a demencia esetén [22]. 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.

Számos esettanulmány kimutatta, hogy a világítás spektrumának „beigazítása” a nap folyamán javítja az éberséget és a termelékenységet, valamint segít szinkronizálni a belső cirkadián órát. A fényszintek 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 2.8 ábra mutatja. Este csökkenteni kell a spektrum kék tartalmának nagyságát, mivel az elnyomja a melatonin-termelést, és így nehezebb lenne elaludni.

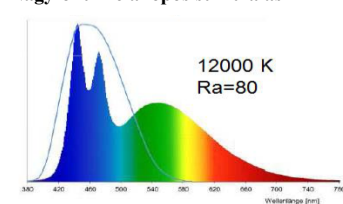
A spektrális „finomhangolás” alkalmazásával kapcsolatos tanulmányok a következő eredményeket hozták [22]:

- 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

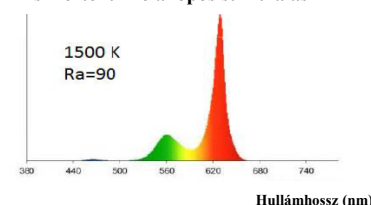
2.10 ábra – A fény hatása a növények fejlődésére (Forrás: Robert Spivock, GE, SSL R&D Workshop, San Francisco, Kalifornia, 2015. január [24])



Nagyfokú melanopos stimulálás



Kis mértékű melanopos stimulálás

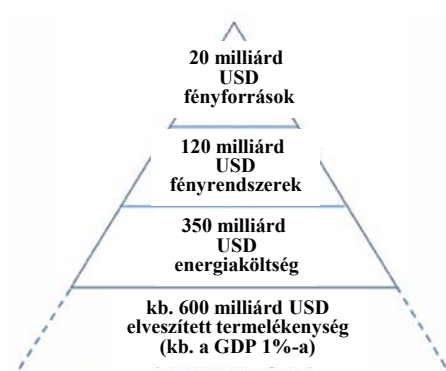


2.8 ábra – A fény napközbeni aktiválása (felső ábra) és kisebb cirkadián-hatása az esti és éjszakai órákban (alsó ábra) (Forrás: Andreas Wojtysiak, Osram, SSL R&D Workshop, San Francisco, Kalifornia, 2015. január [22])

aktivitás az utasok számára a repülőgépek utasterében

• Az unipoláris depresszió enyhítésére szolgáló terápia időtartamának csökkenése
A fent leírt élettani hatásokat fel lehetne használni a munkaerő termelékenységének fokozására. Túl korai lenne megmondani, hogy e tulajdonságoknak mekkora lehet a hatása, de a termelékenységnek már igen kis javulása is igazolhatja a beépített személyi fényszabályzókat vagy a fehér szín-spektrum napközbeni változtatásának megvalósításához szükséges plusz költségeket. A világítás és a hatékonyabb világítási rendszerek élettani hatásának jobb megértése is növelheti az eredményeket az oktatási intézményekben. A LED-technológia alkalmas lehet arra, hogy a fényáram, a spektrum és a fényeloszlás megkívánt szabályozását megvalósítsuk ilyen rendszerekben.

A világítás világgazdaságra gyakorolt hatását az International Solid State Lighting Alliance (ISA) becslése alapján a 2.9 ábra mutatja. 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 potenciál-



2.9 ábra – A világítás hatása a világgazdaságra 2014-ben (Forrás: ISA, Global Solid State Lighting Industry Status Report and Market Trends 2014, 2014 [23])

jának a realizálása. Ez származhat közvetlenül a munkahelyek jobb megvilágításából vagy – indirekt módon – például az oktatás és az orvosi ellátás lehetővé tételével a fejlődő országokban [23].

2.5.2 Növénytermesztés

Az ültetvények világítása egyre növekvő fontosságú alkalmazási területet képvisel, amely a szilárdtest-világítási fényforrások spektrumának igényre szabásán és állíthatóságán alapul. Mivel a virágzás, a lombosodás, a növény magassága, a biomassa felhalmozódása, a növény immunitása és védelme, stressztűrő képessége és a phytoceutikus anyagok mind fény által vezérelt tulajdonságok, a fény spektrumában bekövetkező változások a növénytermesztés különböző aspektusait befolyásolják, például a növény méretét, a csírázási folyamatot, a virágzást, a vegetációt és még a tápértékét is [5].

[22] A. Wojtysiak: „The Physiological Impact of Lighting”, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, Kalifornia, 2015. jan. 29. (http://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/wojtysiak_physiological_sanfrancisco2015.pdf)

[23] International Solid-State Lighting Alliance: „Global Solid State Lighting Industry Status Report and Market Trends 2014”, 2014

[24] R. Spivock: „Horticultural Lighting: DOE Emerging Trends”, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, Kalifornia, 2015. jan. 27. (http://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/spivock_horticultural-lighting_sanfrancisco2015.pdf)

A fotoszintézis-aktivitás szempontjából a spektrum kék és vörös tartománya a legfontosabb, amint az a 2.10 ábrán látható. A fotoszintézis főként a növények leveleiben megy végbe a zöld pigmentek felhasználásával, amelyek a fény különböző hullámhosszait képesek elnyelni (főként a kék és a vörös tartományban), és energiájukat a központi klorofill-molekulának adják át a fotoszintézis lefolytatásához.

A növénytermesztéshez használt igényre szabott hullámhosszúságú világítás energiahatékony beltéri gazdaságok kialakítását teszi lehetővé, és a spektrum dinamikus szabályozása javíthatja a hozamot. Japán látványos eredményeket produkált a beltéri salátatermesztésben a fukushimai katasztrófa miatti földszennyezéstől megóvott kültéri ültetvényeknél.

A LED-es világítás megcélzott hullámhosszúságának felhasználása a következő példamutató eredményeket hozta, amint azt a GE Lighting a 2015. évi DOE SSL R&D workshopon bemutatta [24]:

- A kültérihez képest 100-szoros termelékenységnövekedés (napi 10 000 fej saláta)
- A kültérihez képest 2,5-szer gyorsabb növekedés
- A kültérihez képest 40% hulladék-csökkenés (50%-ról 10%-ra)
- A kültérihez képest 1% vízfelhasználás
- A fénycsöves világításhoz képest 40%-kal kevesebb teljesítmény felhasználása

A Rensselaer Polytechnic Institute által végzett kutatások kimutatták a spektrum igényre szabásának lehetőségét a növények tápértékének javítása terén. 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 [5]. A különböző spektrális fénylevelű lámpák alatt növesztett vörös saláta különböző mennyiségű antociánt állított elő, amint azt a 2.11 ábra mutatja.



2.11 ábra – Az antocián-termelés hatása a vörös salátában (Forrás: Tessa Pocock, Rensselaer Polytechnic Institute, SSL Technology Development Workshop, Portland, Oregon, 2015. november [5])

2.5.3 Haszonállat-tenyésztés

A haszonállat-tenyésztetek világítása egy másik lehetőségét reprezentálja annak,

hogy a szilárdtest-világítás hogyan tudja javítani a termelékenységet és a közérzetet az energiamegtakarítás mellett. Jelenleg a legtöbb baromfinevelőnek izzólámpás a világítása az alacsony ár, a könnyű szabályozhatóság és a könnyű felszerelés okán. Az ilyen típusú világítás üzemeltetéséhez szükséges elektromos energia azonban a baromfitenyésztők üzemeltetési költségének jelentős részét teheti ki. A LED-es világítás használata csökkenteni tudná az energiaköltségeket, a rövid élettartamú lámpák csere költségét és – ha megfelelően tervezték – vízhatlan és robosztus is lehet a baromfinevelők zord környezeti viszonyai mellett. Ezeknek az előnyöknek mindegyikét el lehetne érni, miközben a fényáram teljes mértékű szabályozását és a régebbi vezérlőrendszerekkel való kompatibilitást is kínálják. Ezenkívül a LED-es világítás spektrumát és erősségét is lehetne szabályozni az állatok viselkedésének befolyásolására, például csökkenteni a csirkék tömörülését a baromfinevelőben és ezzel csökkenteni a tollcsipkedést, ami növeli a termelékenységet és javítja a közérzetet [25].

A beltéri haszonállat-tenyésztés más típusaihoz is előnyös lehet a LED-es világítás. A világítás befolyásolja a sertés-tenyésztést, és kutatják a tejtermelést és a vízikultúrákat is. A termelékenységre és a közérzetre kifejtett hatások teljes megértéséhez és az optimális spektrumok, optikai eloszlás és világításszabályozás meghatározásához azonban még több kutatásra van szükség. Az állatok (ideértve a haszonállatokat is) fényre adott reakciói megértésének elmélyítése érdekében a DOE 2016. áprilisában Chicagóban tudósok részvételével szervezett egy találkozót az állatok fényre adott válaszainak megvitatására. A találkozóról készült jelentés a megbeszélések összefoglalójával együtt hamarosan meg fog jelenni a DOE SSL Program elnevezésű weboldalán.

2.6 Az elfogadás akadályai

Az előző fejezetekben részletesen megvittuk a szilárdtest-világítási technológia eredményeinek köszönhető energiaügyi, gazdasági, teljesítőképességi és alkalmazási előnyöket. A szilárdtest-világítással elérhető sok előny és járulékos funkció ellenére azonban még számos akadálya van a szilárdtest-világítási termékek elfogadásának. Ide tartozik a beszerzési ár, valamint a megbízhatóság és a kompatibilitás. A következő fejezetek áttekintést adnak ezekről a szempontokról, a megbízhatóságról részletesebb információ pedig az 5.3.5 pontban található.

2.6.1 Beszerzési ár

A szilárdtest-világítási termékek elfogadásának legfőbb akadálya a LED-es és OLED-es világítási termékek magasabb beszerzési ára. Beszerzési árak gyorsan esett az elmúlt néhány év alatt, miközben a kapható termékek és formai kialakítások szaporodtak. Ugyanakkor beszerzési ár tekintetében maradtak drágábbak az elterjedt egyéb fényforrásoknál, de bizonyos retrofitlámpák ára 2-3 USD-re lecsökkent. A retrofitlámpák esetén a gyártók bizonyították, hogy képesek kompromisszumokra például a fényhasznosítás, az élettartam, a fénylevelű és/vagy a színminőség tekintetében az ár érdekében. Ez lehetővé teszi a fogyasztók számára, hogy eldöntsék: a világítástechnikai szempontok vagy az ár a fontosabb számukra.

Ugyanakkor az alacsony ár előtérbe helyezésének megvan az a veszélye, hogy a termékminőség sérül. Ha a hővezető anyagokat (például alumínium hűtőbordákat) költségkímélési okokból csökkentik vagy elhagyják, a LED-lámpák fényhasznosítása, élettartama és színeltolódása láthatja ennek kárát. Ha kevesebb LED-et használunk, és így „keményebben” hajtjuk meg őket, ismét a színeltolódás, az élettartam és a fényhasznosítás okozhat gondot. Az olcsóbb összeszerelési technikák is kompromisszumra vezethetnek a minőség és a korai kiesések növekedése tekintetében. Az alacsonyabb ár irányába tett erőfeszítéseknek nem szabad teljesítőképességi vagy élettartam-problémákat okozniuk, különben csökkenni fog a fogyasztók bizalma a LED-technológiában, csökken az elfogadás és a teljes megtakarított energia mennyisége. Szerencsére a LED-ek alapvető fényhasznosítása és tokozott kivitelük technológiája terén bekövetkezett fejlődés tovább fogja csökkenteni majd az alacsonyabb árú termékek eléréséhez szükséges teljesítőképességi kompromisszumokat. Ezek a fejlesztések megnyitják az utat a drágább – kitűnő fényhasznosítású és más paraméterek tekintetében csak kevés vagy semmilyen kompromisszumot nem igénylő – termékek lehetsége előtt.

Noha a beszerzési ár elijesztő marad, a nagyobb működési hatékonyság és a hosszabb üzemi élettartam (alacsonyabb karbantartási és csere költség) már biztosítja a LED-es világítás erős versenyképességét a teljes tulajdonlási költségek (TCO) tekintetében. A TCO-analízis magában foglalja a rendszer egész élettartama során fel-

[25] DOE SSL Program: „2016 Animal Responses to Light Meeting Report”, várható online megjelenés: 2016. jún.

merült összes költséget. A megtérülési periódus az az időtartam, amely ahhoz kell, hogy a fogyasztónak megtérüljön egy nagyobb energiahatékonyságú termék magasabb beszerzési ára az alacsonyabb üzemeltetési költségek eredményeként. Az alacsonyabb üzemeltetési költségek meggyőzőek a kereskedelmi és ipari alkalmazásoknál, ahol a világítás tipikusan napi 10 óránál hosszabb ideig működik. Ennek eredményeként a tipikus kereskedelmi LED-rendszerek várható megtérülése 5-7 év a lineáris fénycsövekkel és nagyintenzitású külsőlámpákkal szerelt rendszerekkel összevetve. Ez a megtérülési idő tovább csökken a nagyobb fényhasznosítású, felsőkategóriás LED-termékek esetén. Egy lakásvilágítási LED-lámpa tipikus megtérülési ideje rövidebb, mint 2 év halogénlámpákkal és szabályozható kompakt fénycsövekkel összevetve; a fogyasztói szinten eladott világítás azonban egyre kevésbé a teljes tulajdonlási költséggel kapcsolatos megfontolásoktól függ, sokkal inkább a beszerzési ártól. Ennek az is az oka, hogy az átlag lakossági felhasználó rövidebb időtartamokban használ világítást, és nincs karbantartási költség a fényforrások beszerelése vagy cseréje kapcsán. Ezért – noha a csökkenő árak segítettek a LED-ek elfogadásában – a beszerzési ár még mindig jelentős akadály a lakossági fogyasztók esetén. Amint a fogyasztók kezdik megérteni a drágább termékek teljes energiafogyasztási és teljesítőképességi előnyeit, várhatóan növekedni fog a nagy fényhasznosítású, nagy megbízhatóságú világítás piaca.

2.6.2 Megbízhatóság

A nagy energiahatékonyság mellett a LED-ek hosszú élettartamokat ígérnek, amelyek jóval meghaladják az 50 000 üzemórát, ami sokkal hosszabb, mint a hagyományos fényforrásoké. Az olyan termékek esetén, amelyeknek az élettartama több év, vagy akár több évtized, normál működés során a meghibásodások igen lassan jelennek meg. Ezért az ilyen hibák észlelése laboratóriumi vagy gyári körülmények között igen nehéz, de fontos tudni róluk, és meg kell tudni becsülni a termék hasznos élettartamát.

A LED-csomagok általában nem katasztrofális módon hibásodnak meg, azaz nem szűnnek meg fényt emittálni, hanem idővel lassan csökken a fényáramuk. A degradációs mechanizmusokról sok mindent tudunk, de ez a tudás nem teljes. A LED-csomagok hasznos élettartamát gyakran azzal a ponttal adják meg, ahol a fényáram 30%-kal lecsökken, és ezt 70%-os fény-

áram-megtartásnak (L70) nevezik. Korábban úgy vélték, hogy maga a LED-fényforrás fényáram-csökkenése határozza meg a LED-es világítástechnikai termékek élettartamát, de ez nem így van. A végtermék különböző komponensekből és alrendszerekből áll, amelyek a LED-csomagtól függetlenül is meghibásodhatnak. A LED-fényforrás fényáramának L70-es értékre csökkenését jóval megelőzően, normál üzemelés mellett is előfordulhat az optika degradációja, a tápegység meghibásodása és a forrasztások leválása. Ezenkívül katasztrofális, félig-véletlenszerű, rövidtávú meghibásodások is előfordulhatnak a szerelési hibák, anyaghibák vagy tervezési hibák következtében. A vizsgálatok azt mutatják, hogy a lámpa- és lámpatest-meghibásodások többségéért a tápegység komponens- és gyártási hibái a felelősek. A rossz lámpatest-konstrukció okozta túlmelegedés is drámai módon lecsökkentheti a LED-csomagok élettartamát, és a nedvesség behatolása is fontos hibamechanizmus lehet és meghatározhatja a kültéri lámpatestek élettartamát. A világítások épületrendszerekbe történő integrálását is körültekintően kell elvégezni. A korai felhasználók nagy számban tapasztaltak olyan meghibásodásokat, amelyeknek oka a felszerelési folyamatok félreértelmezése vagy a világítási termékek és az épületek elektromos rendszere közötti inkompatibilitás volt. A helyes felszerelés, a túlfeszültség elleni védelem és az épületrendszerbe történő integrálás kritikus tényező a világítási rendszer megbízhatósága tekintetében. Ezek azonban nem alapvető akadályai az elfogadásnak, hanem inkább rövidtávú megfontolások, mivel a termékek fejlődnek és egyre jobban ismertté válik az elektromos rendszer befolyása a szilárdtest-világítási termékekre. A különböző mechanizmusok megértéséhez és az új megbízhatósági modellek kidolgozásához további munkára van szükség a rendszer-megbízhatóság megbízható megértése, modellezése és kommunikálása érdekében. A DOE szilárdtest-világítási programja finanszírozott speciális K+F tevékenységeket ezen a területen és támogatott egy ipari konzorcium, a LED Systems Reliability Consortium (LSRC), létrehozását is a tevékenységek koordinálására és a jobb megértés elősegítésére. Az LSRC-t és erőfeszítései az 5.3.5 fejezetben részletezzük. Mindenesetre sok munka van még hátra a komponensek és alrendszerek teljesen megbízható adatbázisának megteremtéséhez a lámpatest-tervezés segítésére és a fogyasztók meggyőzésére arról, hogy a LED- és OLED-termékek olyan hosszú

ideig fognak működni, mint ahogy azt megígérték.

2.6.3 Színtabilitás

A LED-csomagok élettartama körüli vitákat a fényáram-megtartás dominálja, de a színeltolódás is fontos teljesítőképességi szempont, ami akadály lehet a vásárlásnak vagy meghibásodást okozhat, ha már felszerelték. A LED-lámpák és a LED-es lámpatestek színtabilitása más és más a különböző termékeknél és potenciálisan ugyanazon termék különböző alkalmazásai esetén is. A színtabilitást nem szabad összekeverni a színekonzisztenciával. A színtabilitás egy termék azon képességét jelenti, hogy mennyire tud állandó színpontot megőrizni az élettartama során, míg a színekonzisztencia azonos lámpa- vagy lámpatest-típuson belül az egyedek színvariációira utal.

A színtabilitás fontossága az alkalmazástól függ. Például egy múzeumban vagy áruházban fontos a fényforrások nagyfokú színtabilitása, míg az útvilágításnál kevésbé lényeges. A színtabilitás ott is fontos, ahol több lámpát vagy lámpatestet használnak falmosáshoz, vagy ahol a tárgyakat a szín alapján ítélik meg, például kórházakban vagy gyárakban.

A LED-lámpák és LED-es lámpatestek színtabilitását több tényező befolyásolja. A környező levegő hőmérséklete, a meghajtó áram és a lámpa vagy lámpatest hőelvezető rendszerének kialakítása mind-mind befolyásolhatja a LED pn-átmenetének hőmérsékletét, ami viszont hatással van a kimeneti jellemzőkre. Nagyobb gondot okoz a hosszú távú színtabilitás szempontjából az a hatás, amit a magas működési hőmérséklet fejthet ki bizonyos anyagokon. A LED-csomag konstrukciójától függően a fényporrétegek besűrűsödhetnek, felkunkorodhatnak, rétegződhetnek vagy más módon változtathatják a konvertált fotonok mennyiségét. Ez még akkor is előállhat, ha nem túl magas a környezeti hőmérséklet. Az optikai útvonal más anyagai – a műanyagok, a ragasztó vagy epoxi rétegek – pedig idővel elszíneződhetnek. A hőmérsékletingadozások – amelyeknek vizsgálata nem része a szabványosított tesztljárásoknak – is súlyosbíthatják a degradációs mechanizmust bizonyos LED-termékeknél.

A LED-csomagok fényáram-állandóságától eltérően jelenleg nem áll rendelkezésre szabványos módszer a jövőbeni színtabilitás megőrzésére szabványos tesztljárások felhasználásával. Nincsenek meg-honosodott módszerek a gyorsított vizsgálatokra sem, ráhagyva így az egyes gyár-

tókra, hogy kidolgozzák saját tesztelési eljárásaikat és „jóslási” modelljeiket. A színeltolódás megijósására vonatkozó konszenzusos módszer nagy kihívást jelent, mivel a különböző konstrukciós anyagok és gyártási eljárások befolyásolhatják az eredményeket; mindenesetre az Illuminating Engineering Society (IES) dolgozik ezen a kérdésen.

2.6.4 Kompatibilitás

A LED-alapú világítás számára a legnagyobb rövid távú piaci lehetőség a meglévő világítási formai kialakítások lemásolása, a fény előállításának különbözősége azonban számos kompatibilitási problémát okozhat. Az inkompatibilitás a fizikai megjelenés, a méretek és a fényeloszlás eltéréseiből származhat. Ez olyan LED-termékeket eredményezhet, amelyek nem illeszkednek jól a meglévő lámpatestekbe vagy olyan fényeloszlást produkálhatnak, amelyek nem felelnek meg a helyettesítendő termék fényeloszlásának. Inkompatibilitás származhat a teljesítőképességi jellemzők – fényáram, színhőmérséklet és színminőség – különbözőségéből is. A helyettesítendő termék színhőmérséklete is különbözhet akár azonos típusú szomszédos lámpák esetén is – legyenek azok akár hagyományos, akár LED-technológiájúak, különösen akkor, ha a fogyasztó nem figyel a csomagoláson lévő ismertetésre és rossz terméket választ.

Lehetnek eltérések a teljes fényáramban is a termékváltozatok, a túlzott paramétermegadások vagy a rossz termékválasztás (pl. a watt és a fényáramot definiáló lumen összekeverése) miatt. Ezek a kompatibilitási kérdések különböző gyártóktól származó, azonos elnevezésű termékek vagy azonos alkalmazásra szánt különböző termékek esetén is előfordulhatnak. Valamennyi kompatibilitási probléma fogyasztói elégedetlenséget és a LED-technológia iránti bizalomvesztést eredményezhetnek, aminek hosszú távon negatív hatásai lehetnek a technológia elfogadására.

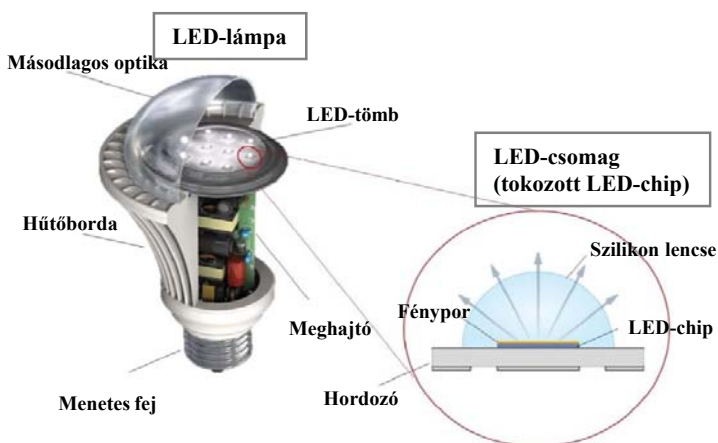
A lineáris fénycsöveket helyettesítő termékek esetén még bonyolultabb a helyzet. A helyettesítésükre készülő LED-csövek vagy kompatibilisek a meglévő fénycső-előtétekkel, vagy saját LED-alapú tápegységük van, vagy közvetlenül a hálózathoz kell csatlakoztatni őket. Mindegyik megoldásnak megvannak az előnyei és hátrányai is, de ez a bő választék zavaró lehet a fogyasztó számára. A különböző megoldások ugyanis eltérő szerelési költségszinteket és bonyolultságot jelentenek és eltérő világítási teljesítőképességeket eredményezhetnek (pl. a meglévő előtéteknek nagyobbak a veszteségei, mint a LED-hez tervezett tápegységeké).

A régebbi fény szabályozós kapcsolókkal vagy világításvezérlőkkel való kompatibilitás is gyakran okoz problémát a szilárdtest-világítási termékeknek. A LED-es és OLED-es világítás szokásosan a 120V (vagy 230V) váltakozó hálózati feszültség hatékony átalakítását igényli alacsony egyenfeszültségre. Amikor a bemeneti feszültséget különböző fény szabályozási technológiákkal szabályozzuk, villogás, hallható bűgás, nem lineáris és/vagy inkonzisztens fény szabályozás állhat elő.

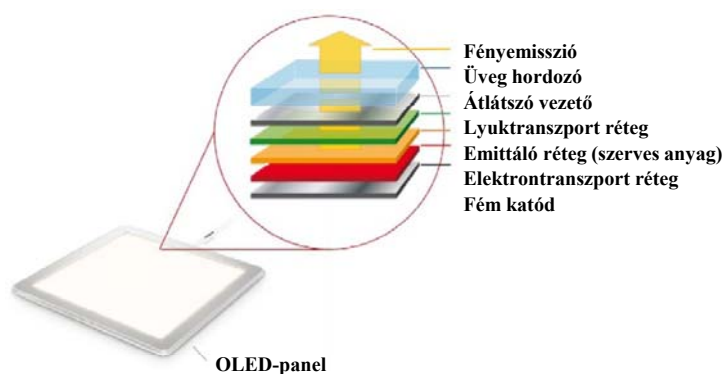
2.6.5 Végkövetkeztetés

Noha ezek az akadályok elbátortalanítják az elfogadást, gyorsan növekszik a LED-es világítástechnológia piaci részesedése. Ezek az akadályok nem jelentenek alapvető korlátozásokat a szilárdtest-világítási technológia számára, inkább egy nagy, körülhatárolt piac normális zavarainak tekinthetők. Amint a LED- és OLED-technológia tovább tökéletesedik és egyre érettebbé válik, ezek az akadályok tovább fognak csökkenni.

A tanulmányban szereplő kifejezések értelmezése



A LED-lámpák komponensei (Forrás: a) <http://electronics.stackexchange.com/questions/76883/how-do-led-light-bulbs-work>; b) Tuttle & McClear, LED Magazine 2014. február)



Az OLED-panelek szokásos felépítése

3.0 A szilárdtest-világítás piaci hatása

A szilárdtest-világítási termékek számára óriásiak a globális lehetőségek. Az elektromos áram árának növekedése, a klímaváltozással kapcsolatos egyre nagyobb aggodalom és az energiafüggetlenség iránti igény következtében a globális világítástechnikai piac az energiahatékony fényforrások irányába tolódik el. 2015. decemberében 195 ország képviselői találkoztak Párizsban, hogy elfogadják az első globális klímaváltozási megállapodást, amelynek során megállapodtak abban, hogy küzdeni fognak az éghajlatváltozás ellen és intézkedéseket és beruházásokat foganatosítanak az alacsony széndioxid-kibocsátású, rugalmas és fenntartható jövő érdekében [26]. Az ENSZ környezetvédelmi programja (UNEP) az *en.lighten* kezdeményezésben (<http://www.enlighteninitiative.org/>) úgy becsüli, hogy 2010-re a világításra fordított energiafelhasználás 2815 TWh-ra emelkedett, ami a teljes globális villamosáram-felhasználás 15%-ának felel meg [27].

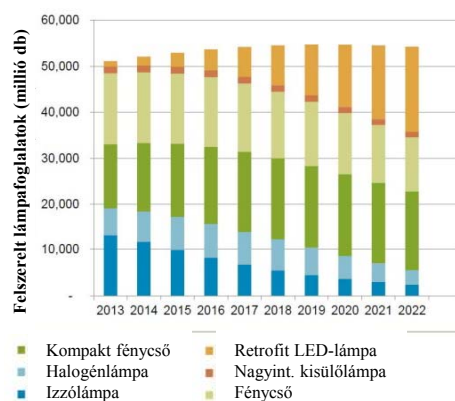
A fejlődés és a nagyobb hatékonyságú világítás piacra vitelének fontosságát a légszennyezés és a globális felmelegedés elleni küzdelemben elismerte Dr. Ernest Moniz, az Egyesült Államok energiaügyi minisztere is a decemberi párizsi COP21 találkozón. Dr. Moniz ismertette a Tiszta energia miniszteriális (CEM) munkát és a Globális világítási kihívást (GLC), amely 10 milliárd LED-lámpa elosztását tervezi a világon a következő öt év során.

A CEM-nek küldött 2015. évi jelentésében a Nemzetközi Energia Ügynökség megjegyezte, hogy a globális elektromos energia-felhasználás évente 4%-kal növekedett az elmúlt évtizedben. Kiemelték a szilárdtest-világítás ebben megnyilvánult szerepét, de figyelmeztettek arra, hogy „a világítástechnikai termékekkel kapcsolatos energiahatékonysági előírások az eladásokat a gyenge energiahatékonyságú izzólámpáktól a halogénlámpák, nem pedig a jóval nagyobb fényhasznosítású kompakt fénycsövek és LED-lámpák irányába tolták el”. Megállapították, hogy „a nagy megtakarítások eléréséhez agresszívebb politikákra van szükség” [28]. Ugyanakkor a szilárdtest-világítási technológiában a folyó K+F tevékenységnek köszönhetően elért fejlődés tovább fogja csökkenteni az árakat, javítja a fényhasznosítást és a világítási paramétereket, ezáltal gyorsítva az elfogadást számos piacon – a politikai irányelvektől függetlenül.

3.1 Globális világítástechnikai piac: jelenlegi helyzet és lehetőségek

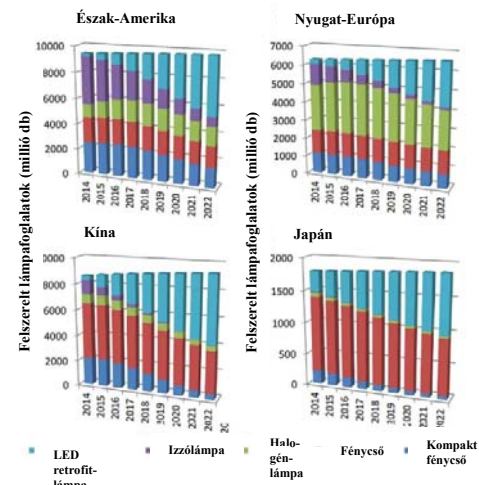
Amikor a LED-ek felhasználási arányait összevetjük, fontos különbséget tenni a termékeladás, az árbevétel és a felszerelt lámpafoglalatok között. Mivel a LED-lámpák és a LED-es lámpatestek tipikusan drágábbak a hagyományos technológiáknál, az értékesítések piaci részesedése az árbevétel alapján nagyobb lesz, mint a darabszámokra vetítve. A LED-ek behatolása a felszerelt lámpafoglalatok területére lassabban fogja követni a piaci részesedés növekedését, mivel azokat a meglévő fényforrások helyettesítésére használják és ezért az eladások többségét képviselik.

Számos vezető világítástechnikai cég nemrégiben arról számolt be, hogy a LED-lámpák és a LED-es lámpatestek eladása bevételüknek több mint 40%-t teszi ki (Acuity Brands (55%), Osram (48%), Philips (50%) és Zumtobel (63%)) [29, 30, 31, 32]. Ugyanakkor a felszerelt lámpafoglalatokra kifejtett hatás kicsi. Mind az IHS, mind a Strategies Unlimited úgy becsüli, hogy 2015 végére a világ felszerelt lámpafoglalatának 6%-ába került LED-lámpa. Amint az a 3.1 ábrából látható, az IHS előrejelzése szerint 2022-ig a világ összes felszerelt lámpafoglalatába történő behatolás 40% alatt marad.



3.1 ábra – A világszerte felszerelt lámpafoglalatok alakulása világítástechnológiánként (Forrás: Will Rhodes, IHS, Smart Lighting Conference, Berlin, 2015. május [33])

A 3.2 ábra az elfogadást földrajzi régiók szerint tünteti fel. Japán vezet a LED-ek korai elfogadásában, miután a fukushimai katasztrófát követően az energiamegtakarítás kiemelt fontosságúvá vált. Vélhetően most más ázsiai országok – például Kína és India – veszik át a vezető szerepet [34]. Az országos és a regionális kormányzatok kínában jelentős mértékben támogatják a vállalatokat az ipar minden szintjén, az epitaxiagyártástól a lámpatestek össze-



3.2 ábra – A felszerelt lámpafoglalatok alakulása régióként és világítástechnológiánként (Forrás: Stephanie Pruitt, Strategies Unlimited, 2015. november [34])

szerezéséig. Ezenkívül – Európával és Észak-Amerikával összevetve – a kínai gazdaság gyors növekedése következtében az újonnan felszerelt világítási rend nagyobb hányadát teszik ki a világítási üzletágnak, mint a meglévő berendezések cseréje vagy korszerűsítése.

[26] COP21: „United Nations Conference on Climate Change”, 2015. dec. (<http://www.cop21.gouv.fr/en/195-countries-adopt-the-first-universal-climate-agreement/>)

[27] United Nations Environment Programme: „Green Paper: Policy Options to Accelerate the Global Transition to Advanced Lighting”, 2014. nov. (http://www.enlighteninitiative.org/Portals/0/documents/globalforum/Green_Paper_FINAL%20reduced.pdf)

[28] International Energy Agency: „Tracking Clean Energy Progress 2015”, 2015. máj. (http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Tracking_Clean_Energy_Progress_2015.pdf)

[29] Acuity Brands: „Acuity Brands Reports Record Second Quarter Results”, 2016. ápr. 6. (<http://www.acuitybrands.com/investors/news-releases>)

[30] OSRAM: „Strong Second Quarter Results: Q2 FY16 Earnings Release”, 2016. ápr. 27. (<http://www.osram-group.com/~media/Files/O/OSram/documents/en/publications/quarterlyreports/2016/2016-q2-osram-earnings-release.pdf>)

[31] Philips: „Philips Reports Q1 Comparable Sales Growth of 3% to EUR 5.5 Billion and a 14% Improvement in Adjusted EBITA to EUR 374 Million”, 2016. ápr. 25. (http://www.philips.com/corporate/resources/quarterlyresults/2016/Q1_2016/philips-first-quarter-results-2016-report.pdf)

[32] Zumtobel Group AG: „Q1-Q3 2015/16 Results”, 2016. márc. 2. (http://www.zumtobelgroup.com/download/Analyst_Presentation_Zumtobel_Group_Q3_2015-16.pdf)

[33] W. Rhodes: „Illuminating Your IQ, Smart Lighting Market Market Today and Future”, Smart Lighting, Berlin, Németország, 2015. máj.

[34] S. Pruitt: „Testimony to National Academy of Science Committee on Solid State Lighting”, Washington, DC, 2015. nov.

A LED-es világítástól eltekintve van egy nyilvánvaló különbség a három kontinens között a lineáris fénycsövek, illetve az energiaigényes izzólámpák és halogénlámpák helyzete tekintetében. 2014-ben a rendelkezésre álló fényforrásfoglalatok kevesebb mint 25%-ában volt energiaigényes lámpa, míg Európában és Észak-Amerikában ez az arány közelebb volt az 50%-hoz [34]. Továbbá Európában és Észak-Amerikában is rendelkezéseket vezettek be a hagyományos általános világítási izzólámpák értékesítésének tilalmával kapcsolatban. Sajnos, az izzólámpák értékesítésének csökkenésével a kompakt fénycsövek eladása is csökkent. A kompakt fénycső-eladás csökkenésének részben az az oka, hogy a fogyasztók LED-lámpákra álltak át, de vannak persze olyanok is, akik „lefelé korszerűsítettek” a kevésbé energiahatékony halogénlámpák felhasználásával [35]. Ezeknek az általános világítási lámpákkal kapcsolatos eladási trendeknek az az oka, hogy alacsonyabb energiamegtakarítások adódtak az eredetileg előrejelzeteknél.

3.1.1 Egyesül Államok

A DOE szilárdtest-világítási programja számos elemzést támogat annak érdekében, hogy meg lehessen határozni a szilárdtest-világítás helyzetét és lehetőségeit az Egyesült Államok világítási piacán. A DOE minden évben váltakozva jelentet meg „pillanatfelvételt” a felszerelt LED-ek jelenlegi helyzetéről (legutóbb 2015. júliusában „A fényemittáló diódák elfogadása a szokásos világítási alkalmazások területén” címmel) és az USA jövőbeli világítás-technikai piacára vonatkozó előrejelzést (legutóbb, a 2014. augusztusában kiadott és 2016 során aktualizált „A szilárdtest-világítás energiamegtakarítási előrejelzései az általános világítás területén” címmel). Mindkettő szolgál inputokkal a másik számára. Noha az USA világítás-technikai piacról magas szintű áttekintést nyújtunk a következőkben, érdemes elolvasni a teljes jelentést is a következő címen: <http://energy.gov/eere/ssl/market-studies>.

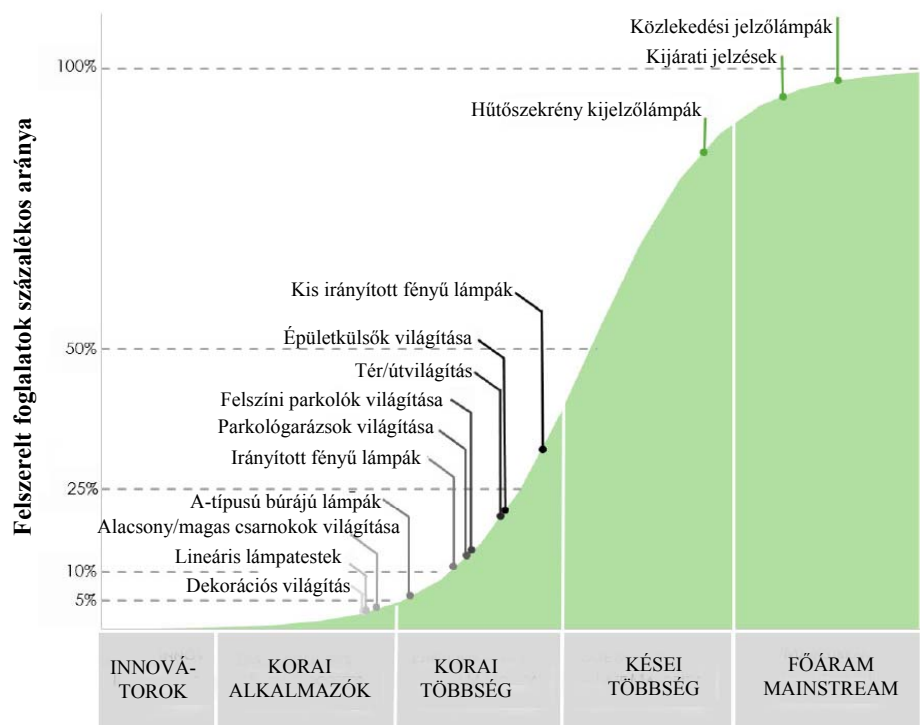
Helyzet

2015 végére összesen 473 millió LED-es rendszert szereltek fel az Egyesült Államokban, több mint kétszer annyit, mint 2014-ben. Ez 278 trillió Btu energiamegtakarítást eredményezett, ami kb. évi 2,8 milliárd USD költségmegtakarításnak felel meg [1]. A 3.1 táblázat részletesen ismerteti a felszerelt rendszereket és az alkalmazások szerinti energiamegtakarításokat.

Alkalmazás ¹	2014 LED az összes százalékában (%)	2015 LED az összes százalékában (%)	2015 LED felszerelt darab ² (millió)	2015 energia-megtakarítás (tBtu)	Becsült megtakarítási potenciál ³ (tBtu)
A-típusú búrás	2,4	6,0	202	42,7	542
Irányított fényű	5,8	11,0	127	55,3	321
Irányított fényű, kicsi	21,8	32,1	16,3	24,5	34
Dekorációs	1,5	3,0	36,9	5,0	190
Lineáris lámpatestű	1,3	3,2	31,5	59,3	1819
Alacsony/magas csarnokvilágító	2,2	3,7	5,4	40,5	1192
Beltér összesen	2,8	6,1	419	227	4097
Tér/útvilágítók	12,7	20,0	9,1	10,0	210
Parkológarázs	5,0	13,0	5,0	6,4	140
Felszíni parkolók	9,7	13,9	4,0	10,2	253
Épületkülsők	11,5	21,2	14,7	10,5	71
Kültér összesen	10,1	17,9	32,7	37,1	674
Egyéb	3,3	8,0	21,4	13,3	196
Mindösszesen ⁴	3,0	6,4	473	278	4967

3.1 táblázat – Felszerelt LED-es rendszerek és energiamegtakarítások alkalmazások szerint

1. A szilárdtest-világítási alkalmazások és az egyes kategóriákba tartozó termékek definícióit l. az eredeti közlemény 8.1 mellékletében.
2. Az „installációk” a 2014-ben felszerelt LED-lámpák és LED-es lámpatestek összes számát adják.
3. A „becsült megtakarítási potenciál” az az elméleti energiamegtakarítás, amely akkor adódna, ha valamennyi lámpatestet „éjszaka” az adott alkalmazásban a DOE LED Lighting Facts® adatbázisában 2015-ben található legjobb LED-termékre cserélnék le. Fontos megjegyezni, hogy ennek a „legjobb LED-terméknek” jóval nagyobb a fényhasznosítása, mint az általában kapható termékeké.
4. Az értékek kerekítés miatt nem növelhetők.



3.3 ábra – A LED-es világítás százalékos részesedése a különböző alkalmazási területeken 2015-ben (Forrás: Navigant Adoption Analysis, 2016. március [1])

Az utóbbi előrelépések dacára, hosszú utat kell még megtenni, amint azt a 3.3 ábra mutatja. Majdnem valamennyi alkalmazás 20%-nál alacsonyabb LED-résarányt mutat, a kulcsfontosságú lineáris és csarnokvilágító lámpatesteknél pedig ez az arány kisebb mint 4%. A lehető legnagyobb potenciális energiamegtakarítás mennyiségi meghatározásához úgy becsülték, hogy ha az USA mind a 7 milliárd lámpatestét egy éjszaka a rendelkezésre

álló legjobb LED-es lámpatestre cserélnék le (2015-ben), ez 4967 trillió, kerekén 5 kvadrillió Btu energiamegtakarítást eredményezne [1]. A jövő LED-termékei fényhasznosításának várható növekedése folytán ez a potenciál tovább fog nőni..

[35] National Electrical Manufacturers Association: „LED A-Line Lamp Shipments Posted Another Strong Quarter to Close 2015”, 2016. febr. 29.: (<https://www.nema.org/news/Pages/LED-A-Line-Lamp-Shipments-Posted-Another-Strong-Quarter-to-Close-2015.aspx>).

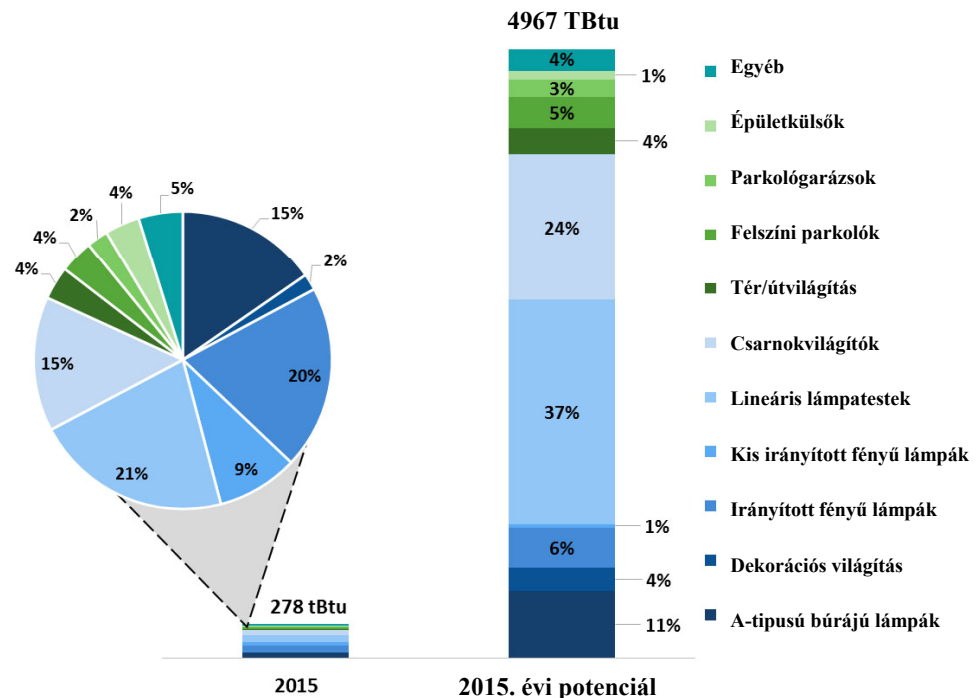
Több mint 3 milliárd A-típusú búrba szerelt típusával az általános világítási lámpák az Egyesült Államokban felszerelt összes fényforrásnak közel a felét teszik ki, és ezeknek 6%-a volt LED-es 2015 végén [1]. A felszerelt fényforrások száma azonban az energiamegtakarításnak csak egy részét adják, az elterjedt technológiákéhoz képesti nagyobb fényhasznosítás és az egyes világítási rendszerek hosszabb üzemi élettartama is jelentős szereplő. Emiatt az olyan alkalmazások mint például a lineáris lámpatestek és a kereskedelmi és ipari létesítményekben elterjedten használt és hosszú élettartamú csarnokvilágítók hasonló vagy nagyobb energiamegtakarítást jelentettek 2015-ben a kisebb mértékű LED-es részarány ellenére. Ezek kínálják az USA energiamegtakarításának legnagyobb részét – a teljes megtakarításnak mintegy 60%-át –, amint azt a 3.4 ábra mutatja.

Előrejelzés

A LED-ek alkalmazására vonatkozó előrejelzések az Egyesült Államokra nézve hasonlóak a globális előrejelzésekhez, amelyek szerint a LED-ek kis, de növekvő részét teszik ki a világítási piacnak. A DOE 2014-es szilárdtest-világítási előrejelzése szerint a szilárdtest-világítás közel felét fogja kitenni az Egyesült Államok teljes világítástechnikai szállításainak (lumenórán megadott fény-előállítási képességben mérve), és körülbelül 40%-át adja (lumenórákban) a felszerelt fényforrás-foglalatoknak 2020-ra [2].

A jelentésben van két olyan forgatókönyv, amely különösen érdekes a DOE szilárdtest-világítási K+F programja szempontjából. Az egyik a szilárdtest-technológia számára egy konzervatív ár-teljesítő-képesség pályán alapul, a másik pedig egy agresszív ár-teljesítmény előrejelzésen, amely a DOE szilárdtest-világítási céljából származik. Az eredmények összevetése annak a plusz energiamegtakarításnak a meghatározására szolgál, amely egy agresszív K+F tevékenységből származhat. A tanulmány azt állapította meg, hogy 2030-ra – a történeti ár- és fényhasznosítás-javuláson alapuló konzervatívabb pálya figyelembevételével – a LED-technológia évi 261 TWh megtakarítási potenciált kínál, ami a LED-ek nélküli kontrafaktuális forgatókönyv szerinti háztartási elektromosenergia-fogyasztáshoz képest 40%-os csökkenést jelent. Ez a 261 TWh megtakarítás évente 3 kvadrillió BTU elsődleges energiaforrás-megtakarításnak felel meg.

Továbbá, ha a DOE szilárdtest-világítási programjának céljai megvalósulnak, az

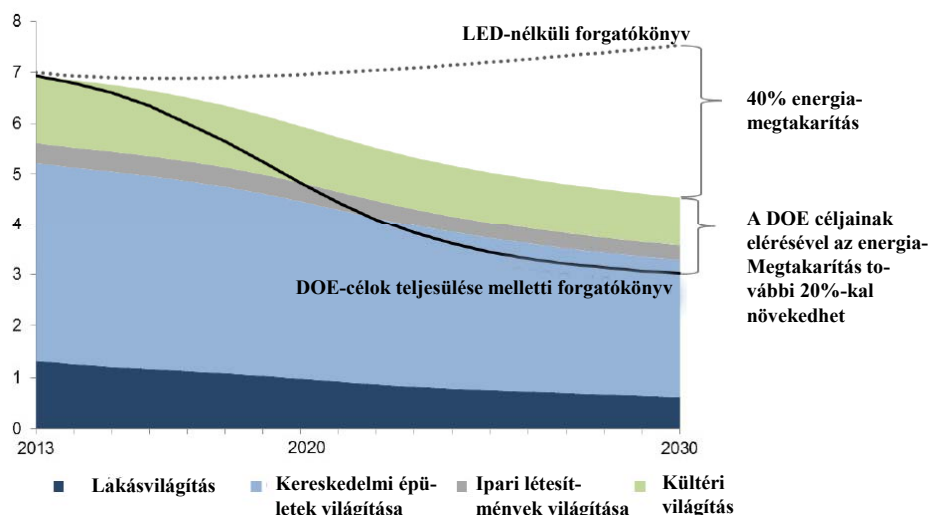


3.4 ábra – A LED-ek 2015. évi és potenciális energiamegtakarításai (Forrás: Navigant Adoption Analysis, 2016. március [1])

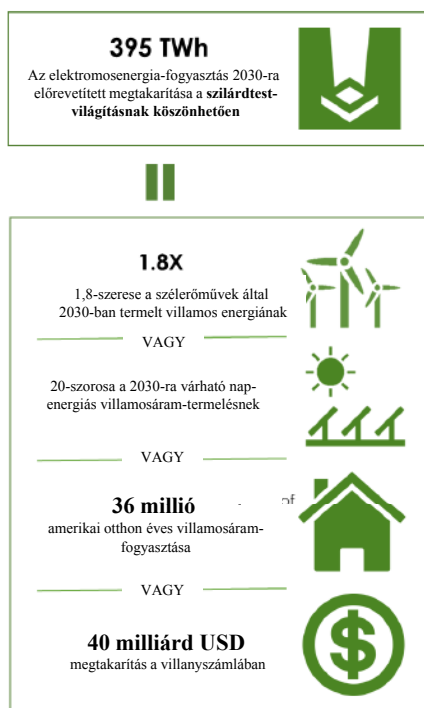
éves teljes energiamegtakarítás 2030-ra 60%-kal nőne, ami 134 TWh további háztartási elektromos energiát, azaz 1,5 kvadrillió BTU elsődleges energiaforrást lehetne megtakarítani [2].

A 3.5 ábra mutatja az egyes forgatókönyvekhez tartozó energiamegtakarításokat és a DOE szilárdtest-világítási programja K+F prioritásainak és mérföldköveinek (részletesen l. a 7.2 fejezetben) fontosságát, amelyek az agresszív ár- és teljesítőképesség-javulásokat segítik. A háztartások 2030-ra becsült 395 TWh elektromosenergia-fogyasztása kb. 4,5 kvadrillió BTU elsődleges energiaforrásnak felel meg, amely közel kétszerese a szélerőművek és 20-szorosa a napenergi-

ával 2030-ban várhatóan előállított elektromos energiának (3.6 ábra). A villamos áram átlagos kiskereskedelmi ára a végfelhasználók számára végfelhasználói szektoronként és államonként 2014-től 2015. februárján át napjainkig” c. tanulmány 5.6B táblázata alapján (http://www.eia.gov/electricity/monthly/pm_table_grapher.cfm?t=empt_5_06_b) ez 0,10 USD/kWh tarifával számolva kb. 40 milliárd USD éves megtakarításnak felel meg [2]. Ez jól mutatja, hogy a szilárdtest-világítás páratlan lehetőséget kínál az elektromos áram fogyasztásának csökkentésében, ezáltal javítva a hazai energiabiztonságot és csökkentve az üvegházhatást okozó gázok kibocsátását.



3.5 ábra – Az USA energiamegtakarítási előrejelzései, ha a DOE szilárdtest-világítási programjának céljai megvalósulnak (Forrás: DOE SSL Program „Energy Savings Forecast of Solid-State Lighting in General Illumination Applications”, 2014. augusztus [2])



3.6 ábra – Az USA szilárdtest-világításból adódó villamosenergia-megtakarítási előrejelzése 2030-ra a szél- és napenergiával megtakarítható elektromos energiával és az amerikai háztartások éves elektromosenergia-fogyasztásával összevetve

3.1.2 Ázsia

Az UNEP becslése szerint új irányelvek hiányában a világítás energiaigényének 57%-a 2030-ban Ázsiából fog származni [27]. Ezért az ázsiai fejlesztések kulcsfontosságúak lesznek a globális energiaigény csökkentésében.

Japán

Japán élenjár a LED-es világítás korai elfogadása terén, amit a villamos áram magas tarifája, a nukleáris erőművekből származó villamos áram lecsökkent mennyisége és a japán LED-gyártók gyors technológiai fejlődése ösztönzött. Amíg az új lámpatestek több mint 70%-a LED-fényforrásokat tartalmaz, a LED-es retrofitlámpák nem nagyon népszerűek [36]. 2015-ben az eladott cserelámpáknak mindössze 8%-a – 28 millió darab – volt LED-es [37]. A domináns versenytárs jelenleg a fénycsőes világítás, a kormány azonban 2020-ra javasolta betiltani a fénycsövek gyártását és importját [38].

Kína

Kína most a szilárdtest-világítás legnagyobb piacának számít és a LED-es világítási termékek legnagyobb gyártóbázisával rendelkezik. A gyártás megközelítőleg fele a hazai piacra kerül. Az exportra szánt termékeknek körülbelül a felét vezető

3.2 táblázat – A LED-lámpák és LED-es lámpatestek belföldi eladása Kínában és a részesedésük a felszerelt foglalatok terén

LED-termék típusa	2015. évi eladás (millió db)	2015. évi %-os részesedés
Körsugárzók	860	20
Spotlámpák	400	40
Mélyszugárzók	180	25
Fénycső-helyettesítők	800	30
Planáris lámpatestek	120	30
Útvilágító lámpatestek	8,9	33
Összesen	2369	-

nemzetközi gyártóktól származó chipekkel szerelik Kínában. A kínai gyártóktól származó chipekkel szerelt exporttermékeket főként olyan régiókban értékesítik, ahol a szellemi tulajdon védelmét nem veszik túl szigorúan. A 3.2 táblázat a Kínai Szilárdtest Szövetség (CSA) 2014. évi becsléseit mutatja a LED-termékek 2015-ös hazai piacára és a felszerelt fényforrás-foglalatok részarányára vonatkozóan [39]. A szilárdtest-világítási ipar gyors növekedését Kínában a kínai kormány és a regionális kormányzatok széleskörű támogatása segítette, ideértve a gyártóberendezések és világítástechnikai termékek vásárlásának támogatását, az ipari parkok fejlesztését és szabványosítási programok kidolgozását. A CSA becslése szerint a 2015-ben 6 milliárd LED-es világítástechnikai terméket gyártottak [40]. Az ellátólánc minden szintjén túlkínálat tapasztalható, és az erős árverseny miatt 20 000 cég 20%-a feladni kényszerült vagy összeolvadt másokkal [41]. A 800 lm fényáramú LED-lámpák gyári ára 1 USD, a retrofit LED-csőeké pedig 1,5 USD körülire esett le [42]. Az ország kormánya aggódik a túlzott mértékű termelés miatt, ezért véget vet a támogató programoknak, de a regionális kormányok közötti verseny az új gyárak alapítására még erős. Például a Jiangxi tartomány támogatja a szilíciumhordozón történő LED-gyártást és megalapította a „Nanchang Optical Valley”-t, amely 2020-ra kb. 7 milliárd USD bevételt tervez [43]. Amíg Kína az általa gyártott szilárdtest-világítási termékeknek körülbelül a felét exportálja, ezek a Kínából származó teljes világítástechnikai exportnak csak a felét reprezentálják. A kínai export fennmaradó 75%-át a hagyományos, nem szilárdtest-világítási fényforrások teszik ki [44]. A kínai LED-export 26%-a az Európai Unióba, 23%-a pedig az Egyesült Államokba irányul. A Közel-Keletre (6%), Dél-Koreába és Délkelet-Ázsiába (9%) irányuló kínai export növekszik, míg a Japánba (5%) és Oroszországba irányuló export részaránya csökken [40, 45].

India

Indiának ambiciózus kereskedelmi és iparosítási programja van, amelyet súlyosan korlátoz a rendelkezésre álló villamosenergia szűköse volta. 2015 januárjában Norendra Modi miniszterelnök elindított egy nemzeti programot a lakások, valamint a kereskedelmi és ipari létesítmények LED-alapú világítására, amely kulcsfontosságú tényező az energiahatékonyság növelése tekintetében [46]. Az új kormányzati program három alkalmazási területre fókuszál [47]:

- [36] Japanese Lighting Manufacturers Association: „Ministry of Economy, Trade and Industry production dynamics statistics”, 2016. (http://www.jlma.or.jp/tokei/pdf/kigu_tokei_nen.pdf)
- [37] Japanese Lighting Manufacturers Association: „2016 production and sales statistics graphs: Lamps”, 2016. (http://www.jlma.or.jp/tokei/pdf/lamp_graph01.pdf)
- [38] LEDinside: „Japan to Phase-out Incandescent and Fluorescent Lights by 2020”, 2015. nov. 27. (http://www.ledinside.com/news/2015/11/japan_to_phase_out_incandescent_and_fluorescent_lights_by_2020)
- [39] China-LED: „2014 China LED general lighting industry market research report released”, 2015. feb. 12. (<http://www.china-led.net/news/201502/12/18491.html>)
- [40] China-LED: „2015, China's semiconductor lighting industry and development survey data”, 2015. dec. 31. (<http://www.china-led.net/news/201512/31/31868.html>)
- [41] China-LED: „LED industry overcapacity, 4000 LED Companies exit from the market”, 2015. dec. 14. (<http://www.china-led.net/news/201512/14/31661.html>)
- [42] China-LED: „LED Price War, There are No Winners”, 2016. febr. 15. (<http://www.china-led.net/news/201602/15/32343.html>)
- [43] China-LED: „Silicon substrate LED industry will become a new growth pole of Jiangxi Province Industrial”, 2016. febr. 15. (<http://www.china-led.net/news/201602/15/32338.html>)
- [44] China Association of Lighting Industry: „2015 LED Products Exported to Ten”, 2016. márc. 11. (http://www.cali-light.com/cali/news/0311_18446.html)
- [45] China-LED: „State Data to See Opportunities: Which Countries Receive LED Lighting Industry Exports?”, 2015. máj. 16. (<http://www.china-led.net/news/201605/16/33539.html>)
- [46] ELCOMA: „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-homeand-street-lighting>)

• Mélysugárzók – Megcélózva a bemutatódtermeket, 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.

• Út- és utcavilágítás – A cél a meglévő 35 millió közvilágítási lámpa többségének lecserélése a következő néhány év alatt.

Az indiai belföldi gyártás erős támogatást élvez, noha a legtöbb LED-chipet és LED-csomagot importálják. India nagy kapacitással rendelkezik izzólámpák és kompakt fénycsövek gyártása terén, amelynek nagy részét most LED-termékek gyártására állítják át.

2009-ben az indiai energiaügyi minisztérium az energiahatékony projektek megvalósításának elősegítésére megalapította a következő vállalatokat: Energy Efficiency Services Limited (EESL), NTPC Limited (vegyestőke-érdekeltségű vállalat, India legnagyobb áramszolgáltatója), Power Finance Corporation (PFC), Rural Electrification Corporation (REC) és a villamosenergia államok közötti átvételére szakosodott POWERGRID. (Az EESL-lel kapcsolatos bővebb információ a következő címen olvasható: http://www.eeslindia.org/User_Panel/UserView.aspx?TypeID=1025.)

Az EESL irányítja a cserelámpák és közvilágítási lámpatestek beszerzését és elosztását. Egy tendersorozat több mint 100 millió LED-lámpát igényelt, amelyeknek beszerzési ára a 2014. januári 310 rúpiáról (5 USD-ről) 2016. márciusára 54 rúpiára (0,8 USD-re) csökkent [48]. E lámpák egy részét a szolgáltató vállalatok olyan programok alapján osztották szét, amelyekben a lakossági fogyasztók minimális előleg (rendszerint 10 rúpia) lefizetésével vásárolhattak lámpát és a fennmaradó összeget (kb. 95 rúpiát) a villanyszámlájukban elért megtakarításokkal havonta fizethették vissza [49]. A LED-lámpákat online is lehet vásárolni 99 rúpiáért (1,5 USD-ért) [50]. A LED-es cserelámpák elosztása folyamatosan gyorsult, 2016. májusára napi 600 000 – összességében több mint 100 millió – darabot érve el [51]. A LED-es közvilágítás támogatása a maga kevesebb mint 1 milliónyi installációjával – finansziális problémák miatt – kevésbé volt sikeres [52].

2014-ben az ELCOMA, az Indiai Elektromos Lámpa- és Alkatrészgyártók Szövetsége Vision 2020 címmel kiadott egy tanulmányt, amelyben ismerteti az indiai világítástechnikai ipar céljait és stratégiáját.

Az ELCOMA a következő célokat fogalmazta meg 2020-ra: fogyasztói igény generálása az energiahatékony világítási termékek iránt, hogy a világításra fordított energiafelhasználást 18%-ról 13%-ra lehessen csökkenteni; erős hazai gyártási kapacitás kiépítése az importfüggőség csökkentése érdekében (az Indiában gyártott LED-ek részarányának <40%-ról 80%-ra növelése) és az export lehetővé tétele (<5%-ról 25%-ra növelve az exportra gyártott termékek részarányát); valamint a világítástechnikai K+F és az oktatás támogatása a képzett munkaerő kiépítése érdekében (500 hallgató számára világítástechnikai oktatási programok és három kutatóközpont létrehozása 2020-ra [53].

3.1.3 Európa

A világítástechnikai ipar Európában jelentős ártrendeződésen megy keresztül. Noha a hagyományos lámpák globális gyártását az Osram és a Philips dominálja, mindketten lámpaüzletáguk leépítését tervezik, hogy a világítási szolgáltatásokra tudjanak koncentrálni [54, 55]. Az Osram a LED-fényforrások gyártásába további befektetéseket tervez, növelve tevékenységét a németországi Regensburgban és Malajziában. A Philips Lighting azt tervezi, hogy részvényeinek egynegyedét közforgalomba bocsátja azzal az elképzeléssel, hogy a következő években fennmaradó világítástechnikai részvényeit is eladja [57]. A Lumileds – a Philips különálló LED-gyártási üzletága – is azt tervezi, hogy leválik a Philipstől [58]. A Zumtobel – a legnagyobb európai lámpatestgyártó – nem gyárt ugyan LED-chipeket vagy LED-csomagokat, de úgy tűnik, jól alkalmazza azokat LED-es lámpatestei gyártásához, amelyek most eladásainak többségét teszik ki [32].

Amikor az izzólámpák értékesítésének korlátozásait először bevezették az Európai Unió területén, a halogénlámpákra kivételt engedélyeztek. A kivételezés az irányított fényű lámpákra 2016. szeptemberében megszűnik; a nem irányított fényű halogénlámpákra vonatkozó tilalom pedig 2018. szept. 1-jével lép hatályba [59, 60]. Az egyéb – például a rázásbiztos és a világos búrjú dekorációs lámpákra vonatkozó – kivételeket 2016. februárjában megszüntették [61].

2015. októberében a VITO független kutatási szervezet átfogó tanulmányt állított össze a szilárdtest-világítás energiamegtakarítási lehetőségeiről az Európai Unióban. A VITO becslései szerint 2013-ban 82 millió LED-lámpát értékesítettek, amely az összes lámpaeladás 5%-át reprezentálja és

ezzel az összes felszerelt LED-lámpa mennyisége 144 millió darab, ami a felszerelt fényforrás-foglalatok 1,3%-át teszi ki [62].

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

[48] India Times: „LED Bulb Prices in Range of Rs 75-95: EESL”, 2016. ápr. 5. (http://articles.economictimes.indiatimes.com/2016-04-05/news/72070430_1_eesl-rs-204-rs-104)

[49] LEDinside: „Jharkhand State in India Gives out More than 30,000 LED Bulbs Daily”, 2016. márc. 14. (http://www.ledinside.com/news/2016/3/jharkhand_state_in_india_gives_out_more_than_30000_led_bulbs_daily)

[50] Snapdeal: „Snapdeal Partners with EESL for the Domestic Efficient Lighting Program (DELP), a Government of India Initiative”, 2016 (<http://www.snapdeal.com/offers/delp-led>)

[51] EESL: „National Ujala Dashboard: Total LEDs distributed as on May 19, 2016”, Government of India Ministry of Power (<http://www.ujala.gov.in/>)

[52] EESL: „SLNP Dashboard: Total Streetlight Completed as on May 19, 2016”, Government of India Ministry of Power, 2016. máj. 19. <http://www.eeslindia.org/slnp/>

[53] ELCOMA: „ELCOMA Vision 2020”, 2014. (<http://www.elcomaindia.com/wpcontent/uploads/ELCOMA-Vision-2020.pdf>)

[54] OSRAM: „Osram Announces Name of Lamps Business: LEDVANCE”, 2016. jan. 15. http://www.osram.com/osram_co/p/press-releases/_business_financial_press/2016/osramannounces-name-of-lamps-business-ledvance/index.jsp

[55] New York Times: „Philips to Pursue I.P.O. of Lighting Business in Amsterdam”, 2016. máj. 3. : (http://www.nytimes.com/2016/05/04/business/dealbook/philips-to-pursue-ipo-of-lightingbusiness-in-amsterdam.html?_r=0)

[56] OSRAM: „Investments of About €3 Billion Create New Growth Prospects for Osram”, 2015. nov. 10. (http://www.osram.com/osram_com/press/press-releases/_business_financial_press/2015/investments-of-about-3-billion-create-new-growth-prospects-forosram/index.jsp?mkturl=q42015_1)

[57] Netherlands Times: „Philips Lighting IPO on May 27 Valued at up to €3.4 Billion”, 2016. máj. 16. (<http://www.nltimes.nl/2016/05/16/philips-lighting-ipo-may-27-valued-e3-4-billion/>)

[58] Bloomberg: „Philips Said to Face Headwinds on Sale of Lighting Business”, 2016. feb. 2. (<http://www.bloomberg.com/news/articles/2016-02-02/philips-said-to-face-headwinds-on-sale-of-lighting-business>)

[59] European Council for an Energy Efficient Economy: „EC Confirms: Mains-Voltage Directional Halogen Lamps to be Phased out September 2016”, 2015. szept. 15. <http://www.ecee.org/allnews/news/news-2015/2015-09-15a>)

[60] 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>)

[61] Lighting Europe: „Lighting Europe Guidance Document on Commission Regulation (EU) 2015/1428 of 25 August 2015”, 2015. dec. 10. http://www.lightingeurope.org/uploads/files/LE_Special_Purpose_Lamps_Position.pdf)

[62] VITO: „Preparatory Study on Light Sources for Ecodesign and/or Energy Labelling Requirements: Final Report, Task 7”, 2015. okt. 31. (<http://ecodesign-lightsources.eu/sites/ecodesignlightsources.eu/files/attachments/LightSources%20Task7%20Final%2020151031.pdf>)

A VITO azt jósolta, hogy a LED-lámpák értékesítése 2015-re 375 millió darabra (az összes lámpaeladás 22%-ára) fog növekedni és részaránya a felszerelt lámpafoglalatokban 800 millió darab (7%) lesz. A VITO a következő évekre különböző forgatókönyveket dolgozott ki, amelyek szerint a LED-ek elterjedésének részaránya felszerelt lámpafoglaltok terén 2020-ra 42-46% lesz. Előrejelzésük szerint az összes világítás (a felszerelt hagyományos és a szilárdtest-világítási fényforrásokra vetítve) átlagos fényhasznosítása a 2015-ös 65 lm/W-ról 2020-ra 87-94 lm/W-ra fog növekedni. 2025-re azt feltételezi, hogy a LED-ek részesedése 70-86%-ra fog nőni, az átlagos fényhasznosítás pedig 113-169 lm/W lesz. E becslések széles tartománya mutatja a további K+F tevékenység fontosságát a LED-ek fényhasznosításának növelése és a gyorsabb elfogadás támogatása terén [62].

3.1.4 Off-grid (hálózattól független) közösségek a fejlődő világban

A világításra fordított villamos energia felhasználásának csökkenése a szilárdtest-világítás terjedésével várhatóan jelentősen csökkenti majd a további energiatermelés igényét a legtöbb fejlett gazdaságban. Az elmaradott országokban a szilárdtest-világítás fő hatása az lesz, hogy kiváló minőségű világítást juttat el azokba a közösségekbe, ahol korábban nem volt

kielégítő világítás. A hálózattól független közösségek számára a szilárdtest-világítási fényforrások és a napelemes technológia fejlesztése messze megfizethetőbb megoldást kínál az elektromos fényforrások számára, mint a villamos áramot szállító hálózatok fejlesztése.

A fejlődő világban kb. 1,2 milliárd emberhez nem jut el a villamos hálózat, ehelyett több mint 27 milliárd USD-t költenek évente világítást adó üzemanyagra, például petróleumra. Ha ezeket a fényforrásokat napelemes lámpásokra cserélnék, ezt a költséget tizedére, évi 2,7 milliárd USD-re lehetne lecsökkenteni [63].

A pénzügyi megtakarításokon kívül a napelemes világítás jelentős környezeti és egészségügyi előnyöket is kínál. A petróleumlámpák égése feketeszenet állít elő, ami a globális felmelegedés második legnagyobb okozója, a jelenlegi felhasználás mellett évente 240 millió tonna CO₂-előállításnak felel meg. E fényforrások használata emellett tűzveszélyes is, a petróleum pedig toxikus, nagy mennyiségben tartalmaz nehéz részecskéket [64].

A Bloomberg New Energy Finance és a Lighting Global által a Global Off-Grid Lighting Association számára 2016-ban készített jelentés szerint a hálózattól független napelemes világítás piaca jelentős növekedést mutatott az elmúlt 5 évben: több mint 100 vállalat 20 millió darab márkás terméket értékesített. Ezek a lámpák kb.

100 millió embert látnak el fénnel, ami kevesebb mint 8%-a a potenciális piacnak. Afrika fő piacait Kenya, Tanzánia és Ethiopia jelentik, míg Ázsiában India jár az élen [65].

A gyorsabb elfogadás fő akadálya a szükséges elosztási infrastruktúrához és a potenciális vevőknek nyújtandó kölcsönök-höz szükséges finanszírozás szükségessége. A napelemes panelek és akkumulátorok ára nem csökken olyan gyorsan, mint a LED-es világítástechnikai termékeké. Ezért a legnagyobb jövőbeni hozzájárulás, amit a szilárdtest-világítási ipar tehet, az az, hogy 255 lm/W-ra növeli a LED-csomagok fényhasznosítását, ami felére csökkenti a panelek és akkumulátorok szükséges kapacitását, avagy megduplázná a napelemes lámpások fényáramát.

[63] ATKearney: „Investment and Finance Study for Off-Grid Lighting”, 2014. jún. (<http://docplayer.net/423352-Investment-and-finance-study-for-off-grid-lighting.html>)

[64] E. Mills: „Health and Safety Benefits of Modern Off-grid Lighting”, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2015. : https://www.lightingglobal.org/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/104_millshealth-lighting.pdf

[65] Bloomberg New Energy Finance and Lighting Global: „Off-Grid Solar Market Trends Report 2016”, 2016. febr. (<http://www.gogla.org/sites/www.gogla.org/files/archive/2016/03/Off-Grid-Solar-Market-Trends-Report-2016.pdf>)



Függelék, 8.2 táblázat – Kiegészítő információk – A szilárdtest-világítási ellátólánc – A LED-chipek, LED-csomagok és LED-es lámpatestek gyártói

Ellátólánc	Észak-Amerika	Európa	Ázsiai
Elemgyártók	- Cree - Lumileds - Bridgelux - Soraa - SemiLEDs - Luminus Devices	- OSRAM Opto Semiconductors - Optogan - Plessey Semiconductors	- Nichia - Toyoda Gosei - Toshiba - Sharp - Epistar - SemiLEDs - Optoelectronics - MLS Lighting - OptoTech - FOREPI - Everlight - Lumens - Kingbright - Samsung - LG Innotech - Seoul Semiconductor - Elec-Tech Opto - Epilight - HC SemiTek - Sanan Optoelectronics
LED-csomaggyártók	Mint fent	Mint fent	Mint fent és: - Lite-On - Unity Opto - Lextar
Lámpatestgyártók	- GE Lighting - Eaton/Cooper Lighting - Hubbell Lighting - Soraa - MSi - Kim Lighting - Acuity Brands - Cree Lighting Science Group - Feit	- Philips - Osram Sylvania - Zumtobel	Mint fent és: - Nationstar - Shenzhen Jufei - Honlitriconic - Refond - Panasonic - Toshiba - Sharp - LG - Samsung - Forest Lighting - Kingsun - Zhejiang Yankon - Shenzhen Changfang - Oppl Lighting - PAK Corp - Nationstar - NVC Lighting Tech Corp - FSL

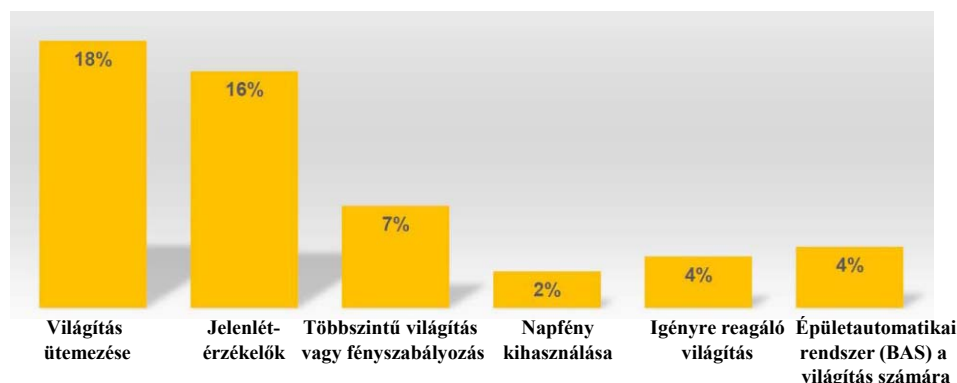
4.0 Csatlakoztatott világítás

A szilárdtest-világítás egy egészen új világítási rendszer paradigmája számára teremt lehetőséget. A „csatlakoztatott világítás”, „intelligens világítás”, „adaptív világítás” csak néhány olyan meghatározás, amely a világítástechnikai ipar legújabb innovációira utal, amelyeket a szilárdtest-világítás megjelenése tett lehetővé. A szilárdtest-világítás eredendően szabályozható, fényszíne spektrálisan állítható a tervezhető és könnyen, olcsón lehet további funkciókra is alkalmassá tenni érzékelők, processzorok és hálózati interfészek beépítésével. A szilárdtest-világítás, az olcsó érzékelők, okostelefonok és applikációk, valamint a Tárgyak Internete (IoT) együttes hatása várhatóan új világítási funkciókat tesz lehetővé – és példátlan adatserét is a világítási és egyéb épületenergetikai rendszerek, az Internet és más eszközök (pl. mobiltelefonok) között. Az, hogy a világítás mindenütt jelen van az épített környezetben a fejünk felett, egyedi és értékes lehetőséget biztosít arra, hogy hálózati csomópontok sűrű rendszerét hozzuk létre az adatgyűjtés és az adatoknak a környező épületekkel való megosztása érdekében. Ez nem csupán jobb világításvezérlést tesz lehetővé, hanem az épületenergetikai, biztonsági, térhasznosító rendszerek és egyéb, ma még fel sem ismert funkciók jobb vezérlését is.

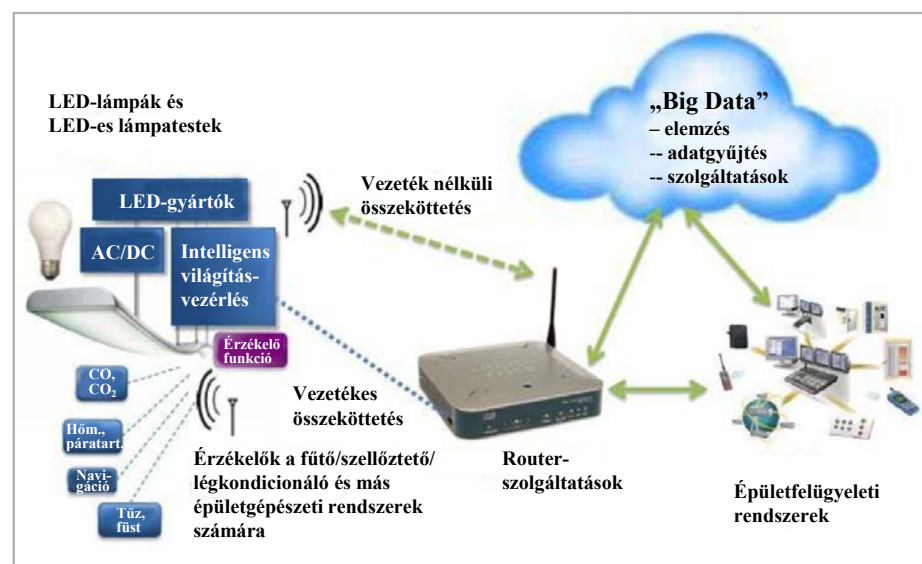
Noha a szilárdtest-világítás még fejlődőben van és a felszerelt lámpafoglatoknak csak kis részében terjedt el, ma már szinte általánosan elismert tény, hogy lényegében domináns technológiává válik a legtöbb világítási alkalmazás esetén. Ennek eredményeként a világítástechnikai termékek fejlesztői elkezdtek azon töprengeni, hogy hogyan lehetne ezt a lehetőséget kihasználni további funkcióképességet és értéket építve a szilárdtest-világítási lámpatestekbe, amelyek gyorsan le fogják cserélni a meglévőket. A csatlakoztatott világítási termékek fejlesztése kulcsfontosságú része ennek a stratégiának.

4.1 Világításszabályozás

Világításszabályozással jelentős mennyiségű energiát lehet megtakarítani, ha a fény nagyságát az adott tér és annak használói valósidejű igényeinek megfelelően állítjuk be. A vezérlőrendszerek jelenlétérzékelésen, napfény-hasznosításon, a nagy fényáramok levágásán, személyi terület szabályozáson vagy ezek bármilyen kombinációján alapulhatnak. Az ilyen sza-



4.1 ábra – A vezérlési technikákkal ellátott kereskedelmi épületek aránya az U.S. Energy Information Administration által 2012-ben elkészített Kereskedelmi épületek energiafogyasztási felmérése szerint (Forrás: Gabe Arnold, DLC, DOE Connected Lighting Systems Meeting, Portland, Oregon, 2015. nov. [67])



4.2 ábra – Világítás mint az Integrált vezérlőrendszer (ICS) része (Forrás: Tom Griffiths: Integrating the Internet of Awareness into our smart SSL systems, LEDs Magazine, 2015. február [68])

bályzórendszerek különösen jól alkalmazhatók a szilárdtest-világításhoz, és további 20-60% energiamegtakarítást jelenthetnek az alkalmazási terület és a felhasználás függvényében [66].

A világításszabályozók nagy energiamegtakarítási lehetőségei okán Kalifornia a fejlett fényszabályozók, jelenlét- és napfény-érzékelők használatának megkövetelését majdnem minden olyan alkalmazásra kiterjesztette, amely a legfrissebb „Title 24” épületenergetikai törvényükben szerepel (<http://www.dgs.ca.gov/dsa/Programs/progCodes/title24.aspx>). A jogszabály különösen az igényre szabottan reagáló és a napfényt kihasználó érzékelők, valamint a szigetek és nyitott terek jelenlétérzékelésének megkövetelésével bővült ki. E követelmények kielégítésére a szabályozóknak legalább 50%-kal le kell csökkenteniük a világítási teljesítményt

bizonyos területeken a használaton kívüli időszakokban. Most először írták elő, hogy a parkoló garázsokban, felszíni parkolóknak, be- és kirakodó területeken is fel kell szerelni olyan jelenlétérzékelőket, amelyek legalább egy, a teljes világítási teljesítmény 20-50%-ának megfelelő további szintre le tudják szabályozni a rendszert.

[66] E. Biery: „Creating Value Through Controls”, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, CA, 2015. jan. 27. (http://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/biery_controls_sanfrancisco2015.pdf)

[67] G. Arnold: „Why Lighting Systems Need to Evolve”, DOE Connected Lighting Systems Meeting, Portland, OR, 2015. nov. (http://energy.gov/sites/prod/files/2015/11/f27/arnold_whyevolve_portland2015.pdf)

[68] T. Griffiths: „Integrating the Internet of Awareness into our smart SSL systems (MAGAZINE)”, LEDs Magazine, 2015. feb. 23. (<http://www.ledsmagazine.com/articles/print/volume-12/issue-2/features/connectivity/integrating-the-internet-of-awareness-into-our-smart-ssl-systems.html>)

Noha számos fény szabályozásra alkalmas termék jó ideje kapható már a kereskedelemben, alkalmazásuk és az eredményül kapott energiamegtakarítás korlátozott bonyolult konfigurációjuk, magas áruk, a versenytársak által gyártott más eszközökkel való korlátozott kompatibilitásuk és azoknak szűk köre okán, akik tudják, hogy hogyan kell őket tervezni, felszerelni, beüzemelni és működtetni. A 4.1 ábra mutatja azoknak a kereskedelmi épületeknek a százalékos arányát, amelyek szabályozási stratégiákat használnak, és feltűn-teti a felszerelt szabályozórendszerek típusát is. Miután az épületeknek csak kis része használ jelenleg szabályozórendszereket, a LED-es lámpatestekbe beépített szabályozókkal jelentős lehetőségek nyílnak az energiamegtakarítások növelésére.

A szilárdtest-világítási termékek várhatóan katalizátorokká válnak, amelyek példa nélküli – nem csupán a fényáramra, hanem a fény spektrális összetételére vonatkozó – szabályozhatóságuk okán, valamint azért, mert alacsony költséggel lehet a LED-es lámpatestekbe további érzékelő, adatfeldolgozó és hálózati interfészeket beépíteni – megnyitják a világításszabályozás energiamegtakarítási lehetőségeit a hagyományos fényforrásokhoz képest. Noha a fénycsövek szabályozható előtétrel egybeépítve már régen képesek változtatható fényáram szolgáltatására, az ilyen előtétek magas ára akadályozta az alkalmazásukat. Egyéb okok, amelyek miatt a világítás-szabályzó rendszerek nem érték el teljes lehetőségeiket, a következők:

- A telepítés, a beindítás és az üzembe helyezés bonyolultsága, amely korlátozta az épülettulajdonosokat és épületüzemeltetőket abban, hogy kihasználják a felszerelt rendszerek teljes képességeit, vagy hogy módosítsák azokat (akár újbóli beüzemelésel) a terek konfigurációjának vagy igénybevételének változása esetén.
- A felhasználói interfész bonyolultsága, amely néha a rendszerek működésképtelenségét eredményezi, mivel a karbantartók nem tudták beállítani a világítás-szabályzókat a megkívánt működésnek megfelelően.
- A különböző gyártók rendszerkomponensei közötti kompatibilitás hiánya, ami korlátozta az épülettulajdonosokat és épületüzemeltetőket a felszerelt rendszerek módosításában (pl. új vagy jobb érzékelők vagy jobb felhasználói interfésszel rendelkező szoftver beépítésében). Ez különösen fontos a helyiség konfigurációjának vagy igénybevételének változása esetén, vagy ha a beszállító technológiát, protokollt vált, vagy kilép a piacról.

- Korlátozott képesség a paraméterek (különösen az energiafogyasztás) számszerűsítésére és lejelentésére, amelyet néhány közüzemi energiahatékonysági program (bizonyos esetekben a tulajdonosok és az üzemeltetők programja) kezdeményezett drága és időigényes mérési és igazolási programok végrehajtására.

A beépített érzékelőkkel rendelkező, intelligens, hálózatba kötött világítástechnikai eszközök össze tudják gyűjteni az adatokat és ki tudják cserélni azokat egymás között úgy, hogy a világításszabályozás egészen új módon valósítható meg új adattovábbítások, algoritmusok és adatelemző szolgáltatások felhasználásával. A 4.2 ábra bemutatja, hogyan tudnak ezek a rendszerek együttműködni. A hálózatba kötött szilárdtest-világítási rendszerekből származó adatok által lehetővé vált szolgáltatások értéke részben vagy teljes egészében ellensúlyozhatná az érzékelők, hálózati interfészek és más kiegészítő komponensek többletköltségét.

A csatlakoztatott világítástechnikai eszközök által összeállított rendszerek adatgyűjtési platformokká válhatnak, amelyek még nagyobb világítási és nem világítással kapcsolatos energiamegtakarításokat tesznek lehetővé az épületekben és a városokban – és még sok minden mást is. A hasznos adatok gyűjtésének és cseréjének ez a képessége és az a lehetőség, hogy a gyorsan terjedő Tárgyak Internetje gerincül szolgálhatnak a szolgáltatások, előnyök és bevételi források széles körét kínálja, amelyek megnövelik a világítási rendszerek értékét és ezeket a fejlesztéseket beviszik az épületfelügyeleti rendszerbe, amelyek régóta elszigetelten működnek. Most azonban, amikor a lehetőség még a tervezőasztalon van, a technológia-fejlesztők tolonganak versenyző ötletekkel arra vonatkozóan, hogy e lehetőségek mennyire tudnak együttműködni az iparágukkal és hogy azok mennyire versenyképesek.

Mivel a szabályozók egyre fontosabbakká válnak, számos lámpa- és lámpatest-gyártó – egyedül vagy szabályozógyártó cégekkel partnerségben – elkezdett szabályozóeszközöket beépíteni termékeibe. Például a Cree SmartCast és a Philips SpaceWise lámpatestek olyan, amely teljesen integrált világításszabályozást tartalmaz. A Cree SmartCast világításszabályzó technológiája jelenlétérzékelést és napfény-kihasználást tesz lehetővé a színhőmérséklet helyszíni szabályozhatósága mellett. A lámpatestek jelenlét- és fényérzékelőkkel, valamint dimmer-kapcsolókkal vannak felszerelve és vezeték nélküli hálózattal

kapcsolódnak egymáshoz. A rendszer lehetővé teszi a lámpatestek automatikus beüzemelését a helyiségben Cree-gyártmányú távvezérlő segítségével (<http://www2.cree.com/smartcast-landing-page>). A Philips SpaceWise világításszabályzó technológiája (<http://www.usa.lighting.philips.com/products/product-highlights/space-wise-wireless-lightingcontrols.html>) hasonló megoldást kínál beépített érzékelőkkel és vezeték nélküli szabályzókkal, amelyek plug-and-play hálózat képességeit teszik lehetővé a lámpatestek könnyű csoportosíthatóságával, automatizált kalibrálással és a napfény kihasználásával.

Egyéb rendelkezésre álló szabályzótermékek közé tartoznak az épületfelügyeleti megoldások, amelyek a LED-es lámpatestekbe építve fejlett érzékelőket tartalmaznak (ilyen pl. az Enlighted cég Energy Manager-e), amelyek elvégzik az érzékelő által begyűjtött összes adat elemzését (<http://www.enlightedinc.com/products/page/#energy-manager>). Amellett, hogy a rendszer gyűjtőpontja az érzékelők által az energiafelhasználással, a kihasználtsággal és a környezetvédelemmel kapcsolatosan rögzített adatoknak, web-alapú felhasználói interfészül is szolgál a világítási rendszer vezérléséhez és az épületfelügyeleti rendszer teljesítőképességének optimalizálásához. A valós idejű adatokba történő betekintéssel a létesítménymenedzserek informált módon képesek beállításokat végezni az energiafogyasztással kapcsolatban vagy javítani tudják az egyes területek komfortját.

4.2 Kommunikáció

A legtöbb nagy világítástechnikai cég olyan előnyös szabályozórendszer-architektúrát valósított meg, amely a világításnak az érzékelőkhöz, kapcsolókhoz, fény-szabályozókhoz és vezérlőpanelekhez való csatlakoztatásához vezetékes vagy vezeték nélküli megoldásokat használ. Annak ellenére, hogy nincs általánosan elfogadott architektúra, a világításvezérlő rendszerek sok meglévő kommunikációs protokollt használnak – például a DALI-t (digitálisan címezhető világítási interfészt) vagy a DMX512-t. A kommunikációs protokollok alapvető módon azt teszik lehetővé, hogy az eszközök egy kölcsönösen érthető standard nyelv használatával kommunikálni tudjanak egymással.

Az elmúlt évtizedben széles körben elterjedt a csatlakoztatott eszközök használata. A Wi-Fi, a Bluetooth és a ZigBee technológiák már sok eszközben megtalálhatók, megkönnyítve ezzel használatukat és javítva képességeiket. Az okostelefonok és

táblagépek gyors piaci elfogadása elindított egyfajta változást is a tekintetben, ahogy az eszközöket szabályozzuk. A vezeték nélküli csatlakoztatott rendszerek irányába történő eltolódással könnyebb lesz használni a világításszabályzókat, és az energiafelhasználás csökkentésén túl lehetőség nyílik új, értékteremtő funkciók megvalósítására is. Például a felhasználó egy meglévő szabályzórendszert az okostelefonra letölthető szoftver-applikáció segítségével el tud érni. Az eszközök hálózatba szervezésének megkönnyítése kapcsán jött létre például a The Connected Lighting Alliance a nyílt, vezeték nélküli protokollok (pl. a ZigBee (IEEE 802.15.4), a Bluetooth és a Wi-Fi) támogatására.

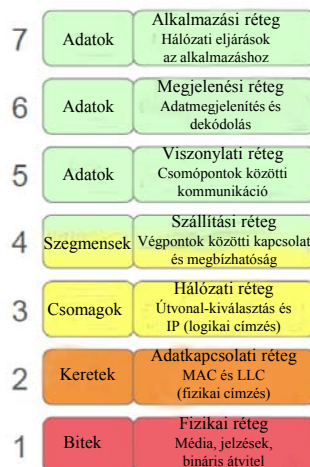
E vezeték nélküli technológiák mellett a Power over Ethernet (POE) az egyik olyan vezetékes megoldás, amely nagyobb figyelmet érdemel a világításszabályzás számára. Szószólói – például a Cisco – azt jósolják, hogy a világítás ugyanolyan pályát fog befutni, mint más technológiák, amelyek a Cisco IP munkahely-szolgáltatásával kapcsolatosak – pl. a telefónia, a biztonsági rendszerek és jelenlegi, Building Automation and Control (BAC) protokollon alapuló épületfelügyeleti rendszerek. POE-re alkalmas LED-es lámpatestek jelentek meg a piacon – például a Cree SmartCast POE LED-es tükrös/rácsos lámpatestei és mélysugárzói, vagy a Philips PowerBalance POE LED-es tükrös/rácsos lámpatestei.

4.3 Interoperabilitás (kompatibilitás)

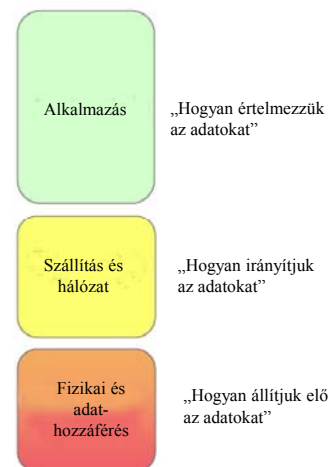
Amint a szilárdtest-világítás számos új jätékost (pl. félvezetőgyártókat és mikroelektronikai rendszerfejlesztőket) hozott a világítástechnikai iparba, a világítás, a kommunikációs hálózatok, a „big data” és a fejlett analitika – valamennyit a Tárgyak Internete tette lehetővé – is jelentősen meg fogja változtatni a világítástechnikai ipar látképét. A kihívás a közös platformokban és protokollokban való megegyezés, amelyek lehetővé teszik a használható adatok átvitelét a világítási eszközök, más épületfelügyeleti és szabályzórendszerek és a Felhő között. Az interoperabilitás szükségessége döntő fontosságú, hogy több eszköz, applikáció, hálózat és rendszer tudjon együttműködni és megbízható és biztonságos módon legyen képes az adatcserére.

A legtöbb jelenlegi világításszabályzó rendszer védett (saját tulajdonú) hardvert és szoftvert használ, lényegében arra kényszerítve a felhasználót, hogy valamennyi terméket egyetlen szállítótól vásároljon meg a kompatibilitás biztosítása érdekében. Mivel a műszaki adatok idővel felte-

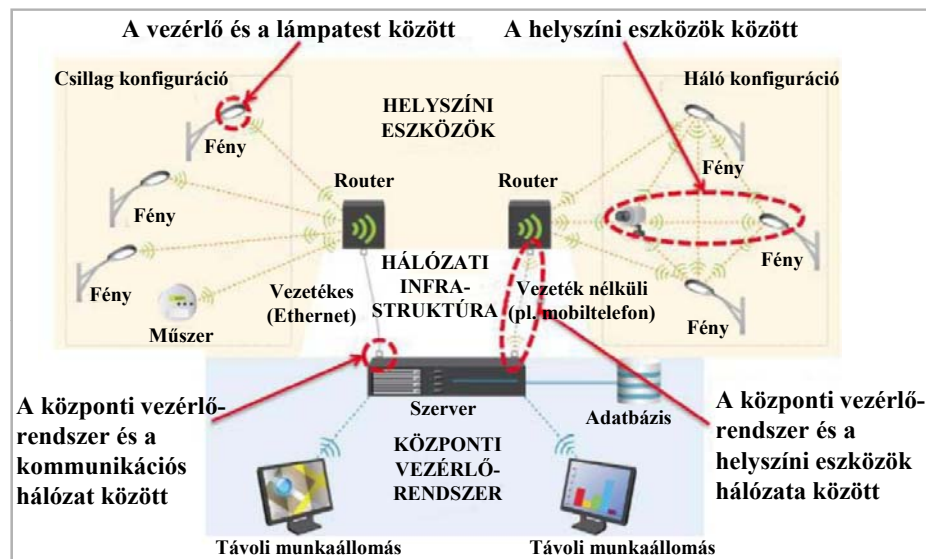
OSI modell



Egyszerűsített OSI modell



4.3 ábra – A Nyílt rendszerű architektúra (OSI = Open System Interconnection) modell bemutatja, hogy az alkalmazások hogyan tudnak kommunikálni egy hálózaton keresztül. A referenciamodell egy hálózati keretet definiál a protokollok megvalósításához hét szinten. Az OSI referenciamodell célja a fejlesztők irányítása oly módon, hogy az általuk kidolgozott digitális kommunikációs termékek és szoftverprogramok együtt tudjanak működni egymással. (Forrás: Michael Poplawski, DOE SSL Market Development Workshop, Detroit, Michigan, 2014. november [69])



4.4 ábra – Lámpatestek, érzékelők, műszerek, routerek és vezérlőrendszerek – együttműködésben (Forrás: Michael Poplawski, DOE SSL Market Development Workshop, Detroit, MI, 2014. november [69])

hetőleg változni fognak, egyetlen szállítóra hagyatkozni növeli a felhasználó kockázatát, amikor új világítási rendszer felszerelését fontolgatja, függőséget hozva létre egy olyan beszállítóval kapcsolatban, aki vagy képes, vagy nem ezeket a változó igényeket kielégíteni. Ebben a helyzetben a felhasználó azzal a döntéssel szembesül, hogy kezdje teljesen újjal, vagy éljen együtt a meglévő, egyre alkalmatlanabb rendszerrel.

A hálózatba szervezett szabályzórendszerek számos réteget tartalmaznak, amint azt a 4.3 ábra mutatja; vannak fizikai és adatösszekötő rétegek (ahol az adatok létrejönnek), majd továbbító és hálózati rétegek (ahol az adatok kezelése és értelmezése folyik [69]. A különböző rétegeknél

számos kérdés felmerül, ilyen például a lámpatestek és a vezérlőeszközök, valamint a központi vezérlőrendszer és az eszközhálózat közötti együttműködés. Ezeket a kérdéseket foglalja össze a 4.4 ábra.

Konkrétabban alkalmazás-szintű kompatibilitásra van szükség annak biztosításához, hogy az eszközök és rendszerek ne csak „hallják” egymást, hanem meg is értsék, hogy mit mondanak egymásnak. Számos jelenlegi világítástechnikai protokoll alacsony szintű interoperabilitásra fókuszál, ami olyan, mintha több résztvevő be tudna

[69] M. Poplawski: „Control System Interoperability: Can We Talk?”, DOE SSL Market Introduction Workshop, Detroit, Michigan, 2014. nov. 13. http://energy.gov/sites/prod/files/2014/11/f19/poplawski_interoperability_detroit2014.pdf

csatlakozni egy telekonferenciába anélkül, hogy először meggyőződnenek arról, beszélnek-e közös nyelvet. Ha nem, akkor az információcsere tolmács nélkül nem megy. A szabványosított kommunikációs protokollok segíthetnek növelni az interoperabilitást, és egyszerűbb rendszerszintű integrációt kínálnak. Az ilyen szabványok következtében a vevők könnyebben tudnak választani a versengő beszállítók között, ezzel lecsökkentve azok beruházási kockázatát. Mivel mentesülnek attól, hogy a jövőben egyetlen beszállítótól fűgjenek.

A szabványos kommunikációs protokollok is előnyök lehetnek a beszállítók számára, mivel támogatják a piaci növekedést, ami valamennyi piaci szereplő számára jó. Több csoport is dolgozik közös specifikációk és szabványok összeállításán, amelyek támogatják a javított interoperabilitást – ideértve a ZigBee Alliance-t, a Thread Group-ot és az Open Connectivity Foundation-t. A DOE segíteni szándékozik az ipari konzorciumokat abban, hogy teljes mértékben fel tudják tárni a jövő rendszereinek a lehetőségeit. Amíg a kompatibilitást kevésbé fontosnak tűnhet a viszonylag kicsi, önálló világítási rendszereknél (például 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 költségeivel együtt. Ezeknek a Wink, Belkin’ WeMo és Apple’s HomeKit rendszerekhez hasonló megoldások segítségével történő beépítése lehetővé teszi a fogyasztók számára, hogy egyszerű interfésszel szabályozni 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 applikációval a felhasználók könnyen tudják monitorozni és szabályozni az otthonukban lévő eszközök energiafelhasználását. Sok más otthoni integrációs rendszer viselkedik hasonló módon. A legtöbb csatlakoztatott világítási termékhez (pl. Philips Hue, GE Link, Cree Connected, OSRAM Lightify lámpák). áthidalóra vagy hub-ra (ismétlő elosztóra) van szükség ahhoz, hogy egy helyi Wi-Fi hálózathoz lehessen csatlakoztatni



4.6 ábra – Szolgáltatások, amelyeket egy város kaphat, ha érzékelőkkel ellátott LED-es úvilágítási rendszert alkalmaz (Forrás: Himamshu Prasad, DOE SSL R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016. febr. [71])

(A fent említett termékekről bővebb információ a következő weboldalokon található:

Wink: <http://www.wink.com/> – **Belkin’s 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/> – **OSRAM Lightify:** http://www.osram.com/osram_com/tools-and-services/tools/lightify---smart-connected-light/ – **Cree Connected:** <http://creebulb.com/products/standard-a-type/connected-60-watt-replacement-soft-white-ledbulb/>)



4.5 ábra – Intelligens lakásvilágítási termékek: a Cree „Connected” és a GE „Link” lámpája a Wink cég Hub & App. vezérlőjével (Forrás: Wink [70])

A 4.5 ábra bemutat néhány olyan kapható terméket, amelyek a lakások energiagazdálkodási platformjaihoz használhatók. Az otthoni automatarendszerek közötti kompatibilitás leegyszerűsíthetné a modern világításszabályzó eszközök és otthoni energiagazdálkodási rendszerek használatát és elősegíthetné elfogadásukat.

4.4 Csatlakoztatott világítási alkalmazások

4.4.1 Energiamonitorozás

Hogy az energiamegtakarításban érdekelt vállalatok (ESCO-k) nem investáltak többet a világításszabályozásba, annak egyik fő oka a bizonytalanság az elérhető energiamegtakarítási szintek terén. Tudják, hogy a megtakarítások erősen változhatnak és számos tényezőtől függenek, ideértve az igénybevételi szinteket és a szabályzórendszerek működésének a felhasználók általi átállításait. A bizonytalanság enyhítésére a

közművek és az ESCO-k néha igénybe vesznek manuális méréseket és ellenőrzéseket is a világításienergia-megtakarítások meghatározásához. Ez jóval magasabbra tolhatja a projekt költségeket és alááshatja költséghatékonyságukat.

A csatlakoztatott világítási termékek csökkenthetik az energiamegtakarítások mérésének költségeit, ha rendelkeznek azzal a képességgel, hogy az energiafelhasználást saját maguk mérjék és jelentsék. Az energiamérő berendezések installálása után egy ilyen berendezés felszereléséhez, leszereléséhez és az összegyűjtött adatok hozzárendelése feleslegessé válna. A további hardver-költség szerény lehetne, különösen hosszú távon, mivel a szükséges komponensek miniatürizáltak és be vannak építve a lámpatestek meglévő nyomtatott áramköri paneljeibe. E képesség birtokában a közművek a tényleges, nem pedig a becsült megtakarításokon alapuló ösztönzőket tudnának kínálni az ügyfeleknek. Az ESCO-k is a tényleges megtakarítások alapján tudnák visszatéríteni az ügyfelektől érkezett befizetéseket. Így mindkét vállalatcsoport meggyőzőbb szolgáltatási formát kínálhatna a fogyasztóknak, és lényegesen alacsonyabb költségek adódnának a világításszabályzó projektektől érkező energiafelhasználási adatok gyűjtése és feldolgozása terén. A beépített energiamérő és riportkészítő képességekkel rendelkező lámpatestektől származó energiafelhasználási adatok más energiavezérlési folyamatok számára is lehetőségeket teremtenek. A DOE érdekelt az ilyen adatokkal dolgozó energiapiacok kialakításának és fejlesztésének lehetőségeiben; a különbö-

[70] Wink: „Wink: A Simpler Way to a Smarter Home” (<http://www.wink.com/>)

ző piaci szereplők (ideértve az épülettulajdonosokat is), akik szeretnék realizálni a rendelkezésre álló – és feltehetőleg piac-képes – épületenergetikai szolgáltatások értékeit, ugyancsak érdekelt lehetnek. A DOE az ipari partnerekkel azon dolgozik, hogy segítse megtalálni és kiértékelni az energiafelhasználási adatok kiaknázását és széleskörű hozzáférhetőségét, és azonosítani a felszerelt világítási rendszerek energiafogyasztásának költséghatékony mérési technikáit.

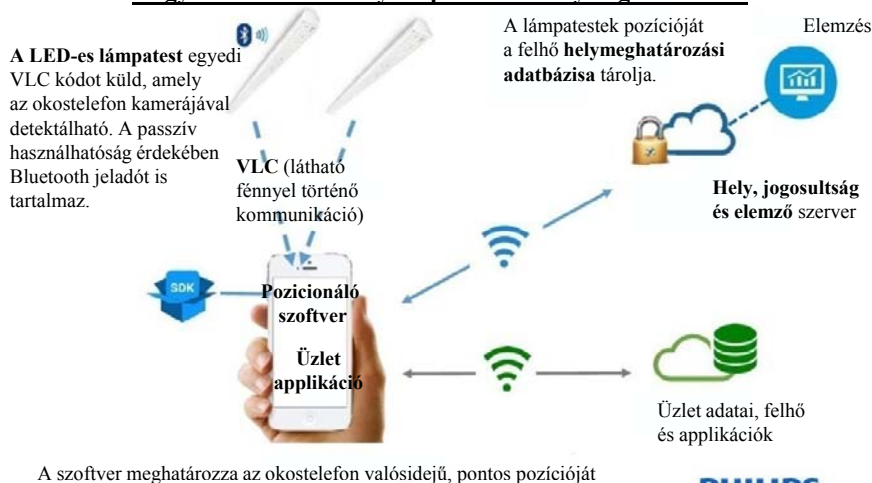
4.4.2 Nem világítással kapcsolatos adatok elemzése

A világítás egy olyan, mindenütt jelen lévő infrastruktúra, amelyet nyilván le lehet cserélni hálózatba kötött szilárdtest-világítási eszközökkel, sűrű érzékelőrendszer gerincét képezve ezzel. A sokféle jelenlét- és napfény-érzékelő mellett más típusú szenzorokat is fel lehet szerelni, például széndioxid-tartalmat, rezgést, hangot és légköri nyomást mérő eszközöket. Ezek az adatgyűjtés és adatcsere korábban nem ismert módjait teszik lehetővé és azt is, hogy az épület-tulajdonosok/üzemeltetők kezeljék és megismerjék fizikai környezetüket a nagyobb termelékenység, hatékonyság és biztonság érdekében.

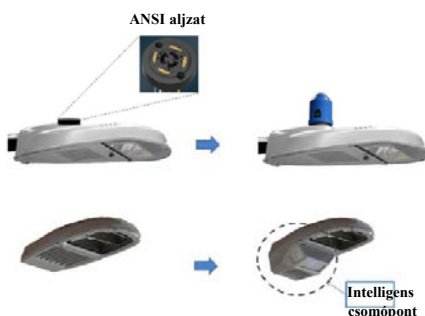
Intelligens városok

Ahhoz, hogy intelligens várost lehessen kialakítani, érzékelők sűrű hálózatára van szükség különféle változók adatainak szolgáltatásához. Ilyenek a levegő minőségének monitorozása, az időjárás figyelmeztetések, a video-megfigyelés, a parkolóhely-keresés és a forgalmi helyzetek jelzése. A LED-es útvilágító lámpák felszerelése a nagyobb energiahatékonyság, az alacsonyabb karbantartási igények, a hosszabb élettartamok okán drámai megtakarításokat biztosítanak a városok számára és felhasználható olyan érzékelő-hálózat beépítésére, amely hozzáadott értéket termel a város számára, amint azt a 4.6 ábra mutatja. A vezeték nélküli szabályozók beépítésével és az adatok intelligens platform segítségével történő hasznosításával a LED-es útvilágító lámpatestek olyan vezeték nélküli kommunikációs hálózatként működnek, amelyek külön-külön kiépítve megfizethetetlenek lennének. Az útvilágítási oszlopok ideális helyek a környezetvédelmi érzékelők és a biztonsági infrastruktúra számára – kamerák vagy akusztikus detektorok beépítéséhez, amelyek valós időben érzékelik a pisztolylövéseket és értesítik erről a rendőrséget. Az adatokat központi vezérlőhöz lehet továbbítani, amelyeket azután irányítópultok készí-

Hogyan működik a fény-alapú beltéri helymeghatározás?



4.8 ábra – A beltéri helymeghatározó koncepciók látható fénnel történő kommunikációt (VLC) használnak és az okostelefon kameráját a megkívánt információk a vevőhöz történő eljuttatásához (Forrás: Philips Lighting, 2016 [73])



4.7 ábra – LED-es útvilágító lámpatest beépített érzékelőkkel (Forrás: Himamshu Prasad, DOE SSL R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016. febr. [71])

séhez lehet felhasználni az önkormányzati alkalmazottak számára, hogy informálódhassanak és felelősségi körüknek megfelelően intézkedhessenek.

A városok pénzt fognak megtakarítani, mivel a LED-es világítás energiahatékonyabb az elterjedt nagynyomású nátriumlámpás világításnál és mivel csak az egyes lámpatestek által ténytelen felhasznált energiáért fizethetnek az átalánydíjas tarifa helyett. Ezenkívül az önkormányzatok alkalmazottai beprogramozhatják, hogy mikor kell a közvilágítást be- és kikapcsolni, illetve fényerősségüket módosítani (például 100% fényerősséget állítva be 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. Noha az érzékelők bizonyos többletet

jelentenek a közvilágítási lámpatestek végső árát tekintve, az amerikai ANSI-szabvány szerinti 7-csapos aljzat lehetővé teszi a gyártók számára, hogy könnyen beszereljenek érzékelőket a lámpatestekbe (l. a 4.7 ábrát). A közvilágítási lámpatestek aljzatába vezeték nélküli csomópont (pl. a GE Lighting LightGrid-je) is beszerelhető, amely a következő értékes tulajdonságokkal szolgál [71, 72]:

- pontos, közmű-szintű fogyasztásmérés oszloponként – azért fizetünk, amit ténylegesen felhasználtunk;
- csomópontba épített GPS-chip – mindig ismerjük a szabályozók és a lámpatestek pontos helyét;
- a csomópont automatikusan csatlakozik a hálózathoz és percek alatt beazonosítja a helyet, lecsökkentve ezzel a beüzemelési időt;
- „egy eszközös” szabályzás – nincs szükség speciális elektronikára a lámpatestben – a csomópont egyszerűen csatlakozik a külső aljzathoz, ezért bármikor könnyen beépíthető;
- hálózatkiesés esetén programozott ütemezés szerinti működés.

Beltéri helymeghatározás

A LED-es világítást sikerrel használják beltéri helymeghatározáshoz áruházakban és más nagy forgalmú épületekben a látható fénnel való kommunikáció (VLC)

[71] H. Prasad: „Intelligent Cities”, DOE SSL R&D Workshop, Raleigh, NC, 2016. febr. (http://energy.gov/sites/prod/files/2016/02/f29/prasad_connected_raleigh2016.pdf)

[72] GE Lighting: „LightGrid™ Outdoor Wireless Control System”, 2016 (<http://www.gelighting.com/LightingWeb/na/solutions/control-systems/lightgrid-outdoor-wireless-controlsystem.jsp>)

[73] M. Hansen: Interjú: Personal Correspondence with Philips Lighting, 2016. máj.

segítségével személyre szabott, helyfüggő szolgáltatásokat nyújtva ezzel a vásárlók/bérlők számára egy mobiltelefonos applikációval. A VLC olyan technológia, amely az információt kapcsolás vagy moduláció – a LED-ek ki-bekapcsolása – segítségével olyan gyorsasággal képes továbbítani, amit szemmel nem is lehet követni. Ez lehetővé teszi az adatok vezetékes nélküli továbbítását a vevő eszközökhöz az adó lámpatestek által kibocsátott fénytartományon belül. A VLC technológia egyedi kódot bocsát ki, amelyet bármilyen mobiltelefon kamerájával lehet detektálni. A vezérlő szoftver és a Felhő megoldás beazonosítja a kódot és pontosan meghatározza az okostelefon helyzetét az adott áruházzal. A VLC mellett – amely valószínű és pontos (10-15 cm-en belüli) helymeghatározást nyújt, a lámpatest Bluetooth Low Energy (BLE) jeladót is tartalmaz a vevő haladásának nyomon követésére, amíg a telefont el nem teszi (és így nem tudja használni a VLC-t). Néhány világítástechnikai gyártónak vannak olyan lámpatestei, amelyek rendelkeznek VLC és BLE jeladó technológiával a kereskedők számára, akik azután ezeket a lámpatesteket igen pontos beltéri helymeghatározó szolgáltatásokhoz tudják felhasználni – kiegészítve azzal a képességgel, hogy hely-specifikus adatokat (például kedvezményre jogosító kuponokat vagy egyes termékek elhelyezkedését az áruházzal) tudnak továbbítani az okostelefont használó vásárlóknak (l. a 4.8 ábrát).

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 folyamatos bevételi forrás kialakításának képessége a beruházás visszatérülésének felgyorsításával megváltoztatja a LED-eknek a kereskedő általi elfogadását.

A vevő számára kifejlesztett applikáció-alapú szolgáltatásokon kívül a LED-es lámpatestekbe beépített jeladók lehetővé teszik, hogy a beltéri elemzések során mérjék az áruházzal 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

- megtudják a csúcsforgalom idejét;
- hozzáigazítsák a munkaerő-igényt;

- maximalizálják a visszatérő vásárlók értékét;
- becsalogassák a vevőket.

A beltéri helymeghatározás képessége a környező külső terek feltérképezésével együtt új lehetőségeket teremt az adatelemzésekben, ami működési hatékonysághoz, nagyobb biztonsághoz és nagyobb bevételekhez vezethet a repülőtereken, bevásárló és logisztikai központokban, egyetemeken és egészségügyi intézményekben.

Szélessávú kommunikációk VLC felhasználásával

A VLC felhasználásával történő szélessávú kommunikáció új forrásai megteremtésének lehetősége fontos lehet a jövőben ahhoz, hogy meg lehessen birkózni a mobiltelefonok globális adatforgalmának folyamatos (2015-ben 74%-os) növekedésével.

A Cisco előrejelzése szerint a mobiltelefonok globális adatforgalma 2015 és 2030 között közel nyolcszorosára fog növekedni, és az összetett éves növekedés üteme (CAGR) 2015 és 2020 között 53% lesz, amint azt a 4.9 ábra mutatja [74]. A mobiltelefonok globális forgalmának növekedésében a világszerte kiépült mobil hálózatok elérő vezetékes nélküli eszközök növekvő száma az egyik meghatározó tényező.



4.9 ábra – A Cisco előrejelzése szerint 2020-ra havonta 24,6 exabyte lesz a mobiltelefonok adatforgalma (Forrás: Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2015-2020 White Paper, 2016. febr. [74])

A kommunikációs sávzélesség növelésének területén (Li-Fi) folyik K+F tevékenység, habár ilyen tulajdonsággal rendelkező termékek még nem kaphatók. A VLC területén olyan fejlesztésekre van szükség, amelyek lehetővé teszik a nagyobb adatátviteli sebességeket, ami a világítással való adattovábbítás egyik nagy kihívása. További kutatási tevékenységre van szükség a LED-ek modulációs sebességének növelésére, ami növelné az átviteli sebességet és értékessé tehetné ezt a plusz kommunikációs funkcióképességet. A nagyobb átviteli sebesség eléréséhez szükség lehet a nagyobb modulációs sebességű lézerdiodák (LD) vagy szuperluminesz-

cens diódák (SLD) kifejlesztésére. Egyéb rendszer-szintű kihívásnak tekinthető a Li-Fi jel átviteli 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 vezetékes csatlakozókkal kell rendelkezniük.

4.5 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 [75]. Az Internethez csatlakoztatott világítási rendszer a hekkerek számára belépési pontokul szolgál minden olyan dologhoz, amely a tűzfal mögött van, például személyi számítógépekhez, kiskereskedelmi fizetési terminálokhoz vagy egy kormányhivatal érzékeny adatbázisához.

Rendkívül fontos, hogy a gyártók biztonságot építsenek be a termék- és szoftverfejlesztésük folyamatába – már a kezdetektől fogva. A tesztek azt mutatták, hogy gyakran még a legalapvetőbb biztonsági óvintézkedéseket sem követik, köztük a titkosítást és hitelesítést, a világos szövegű protokollokat az érzékeny információk (pl. jelszavak) átviteléhez és a gyári jelszavak használatához a vevői környezetekben [75]. A felhasználói adatok, a magánszféra biztonsága, a hozzáférés biztosítása és a hálózathoz csatlakoztatott eszközök védelme az illetéktelen hozzáférésekkel szemben döntő fontosságú lesz azon cégek számára, akik szeretnék megnyerni és megőrizni az intelligens világítási termékek vásárlóinak bizalmát.

4.6 Végkövetkeztetés

A DOE elsősorban azért szándékozik segíteni a csatlakoztatott szilárdtest-világítási rendszerek technológiáját, mert az még nagyobb energiamegtakarítást tesz lehetővé, mint amekkora a hagyományos fényforrásokra való áttéréssel elérhető. Ez a nagyobb energiamegtakarítás nem csupán a csatlakoztatott rendszerek fejlettebb világításszabályzási lehetőségeiből következik, hanem egyéb végfelhasználók is okozhat-

[74] Cisco: „Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015-2020”, 2016. febr. 1. (<http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visualnetworking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>)

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

ják – épületenergetikai rendszerek, kültéri csatlakoztatott világítási rendszerek és mások, amelyek valószínűleg többlet-költséget 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, amint azt a fentiekben ismertettük. Ezek a plusz szolgáltatások hozzáadott értéket, bevételi forrásokat generálnak és olyan funkciókat, amelyek rész-

ben vagy egészében kiegyenlíthetik a javított energiavezérlési szolgáltatásokból adódó többletköltségeket, olcsóvá 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 a jelenlegi világítási rendszereknél. 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. E workshopok az állami és magánszektorok által megkívánt magas prioritású K+F beruházások meghatározását is elősegítik.



Függelék, 8.3 táblázat – Kiegészítő információk – A LED-es ellátólánc – Eszköz- és anyag-ellátók

Ellátólánc		Észak-Amerika		Európa		Ázsia	
Eszköz-szállítók	Epitaxia-növesztés	• Veeco Instruments		• Aixtron		• Taiyo Nippon Sanso	
	Lapka-gyártás	• Plasma-Therm • Lam Research • Ultratech		• JPSA • Temescal		• Oxford Inst. Plasma Tech • EV Group • SUSS MicroTec • Logitech	
	LED-tokozás	• Palomar Tech • Heller		• Nordson ASYMTEK		• Besi	
	Lámpatest-összeszerelés	• Speedline Tech • Conveyor Tech		• ASM Siplace • Assembleon		• ASM Pacific Tech • TOWA • Disco • Kulicke & Soffa (K&S)	
	Teszt és ellenőrzés	• KLA-Tencor • Cascade • Microtech • Wentworth Labs • Orb Optronix		• Lighting Sciences Inc. • Gamma Scientific • Radiant Zemax		• SphereOptics • Daitron • Optest • Nanometrics • Chroma • Rudolph Tech • Labsphere	
				• Laytec • Bede • Bruker • Instrument Systems		• Cameca • SUSS • MicroTec • Ismeca	
						• Quatek • Fittech Co • QMC	
						• Shibuya • Panasonic • Fujikom	
Ellátólánc		Észak-Amerika		Európa		Ázsia	
Anyag-szállítók	Hordozók	• Rubicon • Silian • Cree • Kyma		• Monocrystal • Ammono • St. Gobain • Soitec		• Astek • STC • LG Siltron • Crystalwise Tech	
	Vegyianyagok	• SAFC Hitech • Dow Electronic Materials • Air Products		• SAES Pure Gas • Pall Corporation		• Air Water Inc. • TeraXtal • ProCrystal • Crystaland • Samsung	
	LED-csomagok	• Bergquist Company • Cambridge America • CofanUSA • Indium Corp.		• DuPont • Laird Tech / • Cookson Electronics		• Showa Denko KK • Matheson Tri Gas	
	Fényporok/lefelé konvertáló anyagok	• Intematix • Dow Electronic Materials • Philips Lumileds (internal) • GE (internal)		• Phosphortech • QD Vision • Nanosys • Pacific Light Tech		• Chin-Poon • Gia Tzoong • HolyStone • Iteq • Leatec	
	Tokozás	• Momentive Performance Materials (InvisiSil)		• NuSil • Dow Corning		• Polytronics Tech • TA-I Tech • Tong Hsing • Univacco Tech • Taiflex	
				• Wacker Chemie (LUMISIL)		• Viking Tech • Zhuhai Totking • Denka • Kyocera • NRK	
				• Merck • Osram Opto Semiconductors (internal)		• Nichia (internal) • Mitsubishi Chemical Corp • Shin-Etsu • Denka	
				• Wacker Chemie (LUMISIL)		• Shin-Etsu	

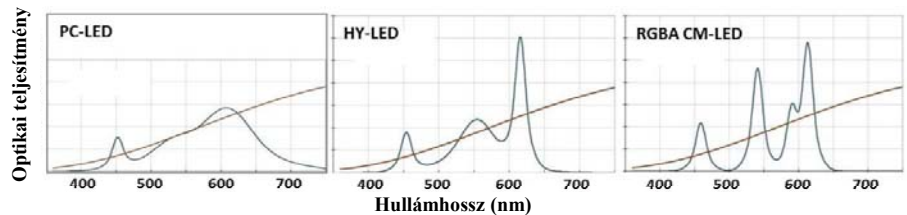
5.0 A LED-technológia és LED-gyártás helyzete – lehetőségek és kihívások

A LED-es világítástechnológia drámai módon fejlődött az elmúlt 10 év alatt. A technológiai fejlesztések lehetővé tették, hogy a LED-ek a rendelkezésre álló legnagyobb fényhasznosítású fehér fényforrások közé kerüljenek. 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, és erre szükség is van. A technológia növelheti a fényhasznosítást és javíthatja a többi paramétert is, például a színminőséget, a fénycsugárterjedést, a formatényezőket és az épületekbe való beépítést. A LED-es világítás gyártástechnológiája 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 javítás 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-es lámpatestekre is, és megfelelő határfelületet nyújtanak az elektromos táplálás, az épületbe való integrálás, a hőelvezetés és az optikai fénycsugárterjedés között.

5.1 A LED-csomagok technológiája

Ez a fejezet a fehér fény előállítására háromféle általánosan használt architektúrát tárgyal, amelyeknek szimulált optikai eloszlása az 5.1 ábrán látható. A fényporkonverziós LED (pc-LED) egy kék LED-et tartalmaz, amely zöld és vörös hullámhosszú lefelé konvertáló rendszereket (szokásosan fényporokat) táplál, így hozva létre a fehér fényt. A hibrid LED (hy-LED) egy zöld hullámhosszú lefelé konvertáló rendszert tápláló kék LED-en alapul; az eszközben a kék és zöld fény azután összekeveredik egy vörös LED fényével a fehér fény létrehozásához. Az RGBA színkeveréses LED (cm-LED) 4 primer (vörös, zöld, kék és narancs-sárga) LED fényének összekeverésén alapul.



5.1 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 csúcs hullámhossz és a relatív intenzitás mindhárom esetben az az értékek, amelynél maximális a sugárzás fényhasznosítása (LER) 3000K meleg fehér színhőmérséklet, „standard” $R_a = 80$ és a kilencedik mélyvörös Munsell-színre vonatkozó $R_9 > 0$ színvisszaadási 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

Ebben a részben a három felépítés kvantitatív elemzését ismertetjük úgy, hogy a 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 hatékonysági veszteségeket és a megcélzott javításokkal kapcsolatos lehetőségeket. Ezeket a hatékonysági kitörési lehetőségeket és hatékonyság-javulásokat az 5.1 és 5.2 táblázat részletezi.

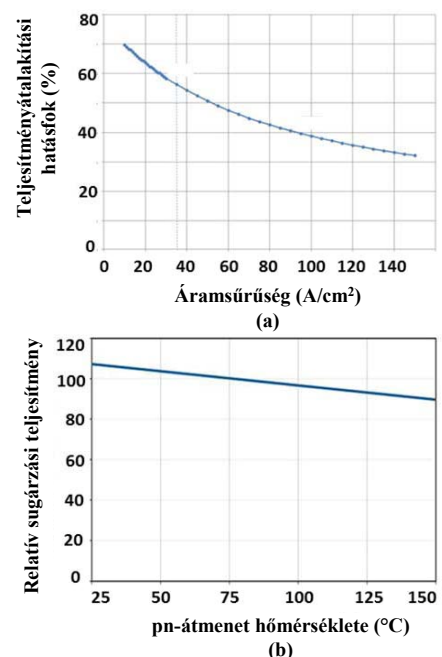
Mindhárom fehér fényt adó struktúra esetén négy fontos teljesítőképességi jellemző idézhet elő fényhasznosítás-romlást, ha optimalizáljuk őket (különösen, ha egyszerre): a meghajtóáram sűrűsége, a működési hőmérséklet, a korrelált színhőmérséklet és a színvisszaadási index. A velük kapcsolatos kompromisszumokat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

1. A meghajtóáram sűrűsége (35 A/cm^2)

A meghajtóáram meghatározza a LED-csomagban keletkező fényáram nagyságát. A „Hero” 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 (amelyet később tárgyalunk) a kék LED-ek fényhasznosítása nagyobb áramsűrűségeknél csökkenni fog, amint az az 5.2(a) ábrán látható. Az egységesítés érdekében a fejezet valamennyi elemzése 35 A/cm^2 -rel meghajtott LED-csomagra vonatkozik.

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

Ez az a hőmérséklet, amely a diódát alkotó p- és n-típusú félvezetők közötti átmenetnél működés közben fellép. A T_j átmenet-hőmérséklet befolyásolja az eszköz fényhasznosítását. Amint az az 5.2(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 (részletezését l. az 5.2 fejezetben). A korábbi évek adataival és célkitűzéseivel való konzisztencia érdekében a következő elemzések hangsúlyozzák a standard ($T_j = 25^\circ\text{C}$ -os) szobahőmérsékleten történő üzemelést. Mivel



5.2 ábra – Példák az áramhatásfok-esésre (a) és a termikus hatásfok-esésre (b) (Forrás: a Cree XLamp XT-E adatlapja [76])

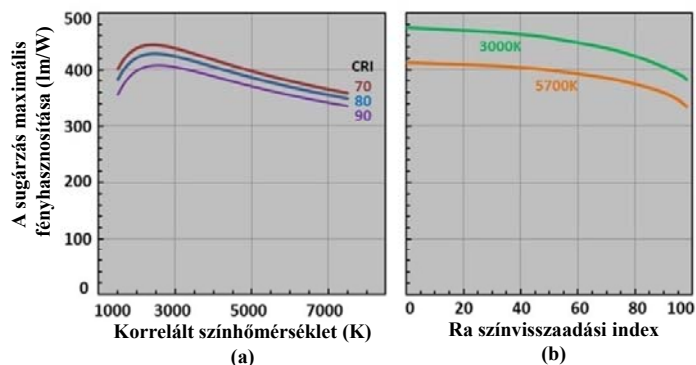
[76] Cree: „Cree® XLamp® XT-E LEDs Datasheet”, (<http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/Data%20and%20Binning/XLampXTE.pdf>)

azonban a LED-csomagokat gyakran „keményen” meghajtják (35 A/cm²-es vagy ennél nagyobb áramsűrűséggel), azok gyakran „melegen” (25 °C-nál magasabb T_j hőmérsékleten) üzemelnek. Ezért a „meleg” állapotú teljesítőképességük 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.

4. Színvisszaadás (Ra = 80, R9 > 0)

A fényhasznosítás és a színvisszaadás minősége között inverz összefüggés áll fenn. Amint az az 5.3(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 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.)

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 „hűség indexet” és a „garnut indexet” is. (*<https://www.ies.org/store/product/ies-method-for-evaluating-lightsource-color-rendition-3368.cfm>)



5.3 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 [77])

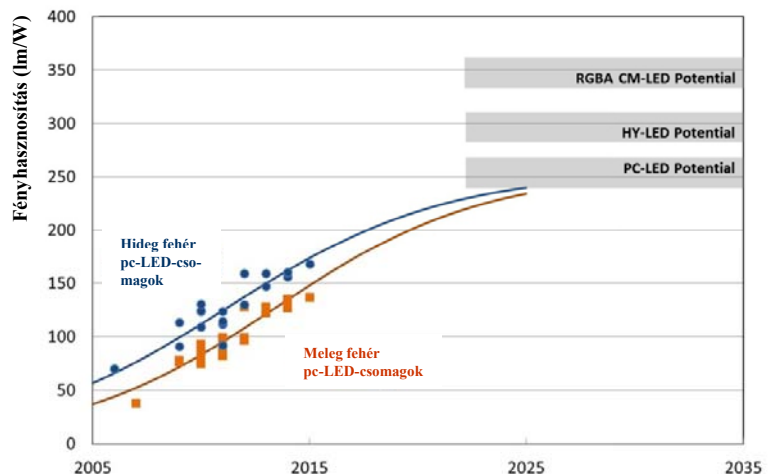
5.1.1 A fényporkonverziós pc_LED-ek jelenlegi helyzete

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-et kell „meghajtani”), a „hőmérséklet robusztusság” (csak az InGaN kék LED és a fényporos lefelé konvertálók működhetnek viszonylag magas hőmérsékleten) 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). Az 5.4 ábra mutatja a pc-LED-ek fényhasznosításának alakulását a 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. Az alapvető ok a kék LED fényhasznosításának növekedése; egyeb

tökéletesítések is történtek a fényporoknál (a hatékonyság és a hullámhossz hozzáillesztése a szem érzékenységehez) és a LED-csomagok (optikai fényszórás/fényelnyelés) hatékonysága terén.

E javulások ellenére még sok a tennivaló. Amint azt az 5.4 ábra alsó szürke sávja mutatja, 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, az 5.5 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 bal-

[77] P. C. Hung and 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, pp. 405-412, 2013.



5.4 ábra – Kereskedelmi LED-csomagok fényhasznosítása 25 °C-on és 35 A/cm² bemeneti áramsűrűség mellett mérve – Megjegyzés: kék = hideg fehér (5700K) – adatok (körök) és logisztikus illeszkedés (görbe); narancssárga = meleg fehér (3000K) – adatok (négyzetek) és logisztikus illeszkedés (görbe). A 2015 vége felé mért kereskedelmi termékek elérték a kb. 160 lm/W értéket hideg fehér és a kb. 140 lm/W értéket meleg fehér típusok esetén. A távlatilag elérhető fényhasznosítást a háromféle LED-felépítés (pc-LED, hy-LED, RGB-CM-LED) esetén a szürke sávok mutatják.

oldalán és 137 lm nagyságú fehér fényt kapunk az ábra jobb oldalán egy fényporkonverziós pc-LED esetén.

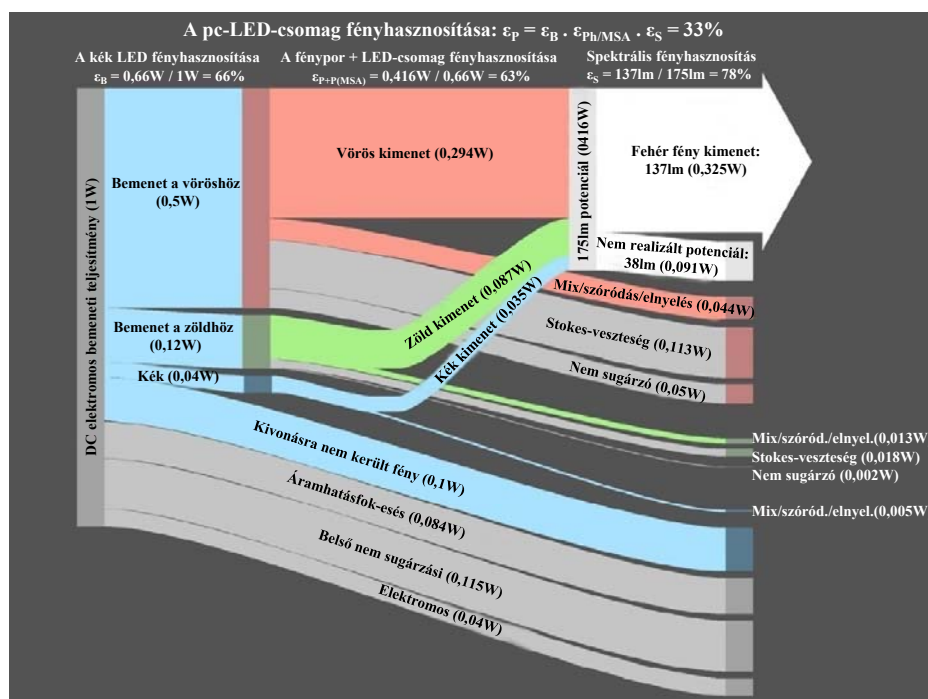
A kék LED az 1W elektromos energiát 66%-os hatékonysággal 0,66W kék optikai energiává alakítja át. Közben a kék LED ennek az elektromos energiának a 34%-át, azaz 0,34W-ot elektromos ellenállás-veszteségek, valamint a kis áramsűrűségen injektálódó elektronok és lyukak sugárzást nem eredményező rekombinációja folytán adódó belső kvantumhatásfok-veszteségek, 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 elveszt.

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 elvész: 0,244W a fényporokban gerjesztett elektronok és lyukak sugárzást nem adó rekombinációjából eredő belső kvantumhatásfok-veszteségek, a zöld és vörös fotonoknak a kék fotonokéval szembeni eredendő Stokes-vesztesége és a zöld, kék és vörös fotonok keverése és szóródása (és néha elnyelődése a LED-csomag belsejében) folytán előálló keverési/szóródási/elnyelési veszteség formájában.

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 fényporkonverziós 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 (0,416 W x 414 lm/W) fényporkonverziós 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 fényporkonverziós és a keverési/szóródás/elnyelés 63%-os hatásfokának, valamint a fehér fény 78%-os spektrális hatásfokának az eredménye.

Ezek az alcsoporthoz osztott hatékonysági becslések és a teljes hatékonysági értékek



5.5 ábra – Az elektromos áram és a látható fény energiájának folyamatábrája egy 2015 végén a kereskedelembe 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 [78]. 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 (veszteségi) ágakra a fehér fény előállításakor. A különböző útvonalak színei a szobában forgó teljesítmény típusára utalnak: a szürke az elektronikus gerjesztést, a színes a különböző RGB hullámhosszak, a fehér pedig a színek kombinációjából adódó fehér fényt jelöli. Az egyes veszteségi ágaknál jelöltük az abszolút teljesítményt és a közvetlenül megelőző anyagi ágban képviselt százalékos értékét is.

meleg fehér fényre vonatkoznak. A becslések a korábbi és a jelenlegi kereskedelmi fényporkonverziós pc-LED-ek hideg fehér változatainál valamivel nagyobbak, mivel ezek a vörös fény kisebb optikai energia-hányadát igénylik, és ismeretes, hogy a vörös fény nagyobb veszteségeket okoz a pc-LED felépítésekben, mint a kék vagy a zöld. A legfontosabb veszteség a Stokes-hatásfok-esés (25% vörös esetén, szemben a zöld 15 és a kék 0%-ával). A második legfontosabb veszteségfaktor a fehér fény 15%-os spektrális hatásfokvesztesége, mivel a jelenlegi 80nm-es FWHM vörös fényporkonverziós vonalszélessége a fény jelentős átsugárzását okozza a mélyebb vörös felé, ahol az emberi szem kevésbé érzékeny. Ezt részletesebben az 5.1.2 fejezetben fogjuk tárgyalni.

5.1.2 A fényporkonverziós pc-LED architektúra lehetőségei és kihívásai

Amint azt a fentiekben tárgyaltuk, a jelenlegi, modern, kb. 137 lm/ fényporkonverziós kereskedelmi pc-LED-ek hatásfoka 33% körüli. Mivel ennél a konstrukciónál eredendően fellép Stokes-hatásfok-veszteség, 100% hatásfok nem lehetséges. Amint azt az 5.1 és 5.2 táblázat mutatja, a jelenlegi spektrális optikai teljesítmény-eloszlású pc-LED-ek maximális fényhasz-

nosítása legfeljebb 220 lm/W (LER x Stokes-veszteségek) lehet – még akkor is, ha az összes többi veszteséget kiküszöböljük. 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 az 5.4 ábrán a szürke sávok és a történeti adatokat összekötő megközelítő logisztikus görbék.

Megjegyezzük, hogy a pc-LED-ekre meghatározott felső érték megközelítőleg azonos a meleg és a hideg fehér fény esetén is. Ennek 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 spektrális hatásfoka a hideg fehér fényénél.

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

Másrészt a fényporkonverziós pc-LED felépítéseknél a vörös fénynek nagyobb a Stokes-vesztése, mint a kéknek, ezért a meleg fehér fénynek eredendően kisebb a fénypor + keverési/szórási/abszorpciós hatások, mint a hideg fehérnek. Ezek a hatások kioltják egymást, aminek 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). Ilyen nagy fényhasznosítás eléréséhez számos tökéletesítésre lesz szükség – a zöld és a vörös fényporok 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 az 5.5 ábra és az 5.1 és 5.2 táblázat mutatja.

1. lehetőség/kihívás: A fénykivonás és a keverési/szórási/abszorpciós hatásfok javítása

Amint az az 5.5 ábrából, valamint az 5.1 és 5.2 táblázatból látható, a kék LED fény jelentős hányadát (kb. 13%-át) nem sikerül kivonni a kék LED-ből, és a fehér (kék, zöld és vörös) fénynek ugyancsak jelentős részét (kb. 13%-át) nem lehet kivonni a fehér fényű LED-csomagból a keverési/szórási/abszorpciós veszteségek miatt. Mindezt összevetve, e két veszteségi csatorna minimalizálása a hatásfoknövelés jelentős eszköze lehet. Az alapvető kihívás mindkét veszteségi csatorna esetén a kék fényt emittáló InGaN felvezető, 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 becsapdázódik 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 lehet hasznosítani foton-reemisszió segítségével, de nagyobb részük elvész a parazita abszorbensek (pl. a fémkontaktusok, közbenső fázisok, erősen adalékolt, sugárzás szempontjából sötét felvezetőrétegek) folytán. Az egyik kihívás olyan módok kidolgozása, amelyekkel a fény mind a kék, mind a fehér LED-csomagokból sokkal gyorsabban tud kilépni (és a

csapdázási idő sokkal rövidebb). A lehetséges megoldások közé tartoznak a kisebb törésmutatójú anyagok, az új mikro- és nano-optikai alakok, geometriák, vagy a koherens és részben koherens irányított fénynyalábok. Egy másik kihívás olyan felépítések és anyagok kifejlesztésére vonatkozik, amelyek minimalizálják a parazita abszorbenseket, vagy legalább annak a mértékét, amellyel a fény kölcsönhatásba lép a parazita abszorbensekkel.

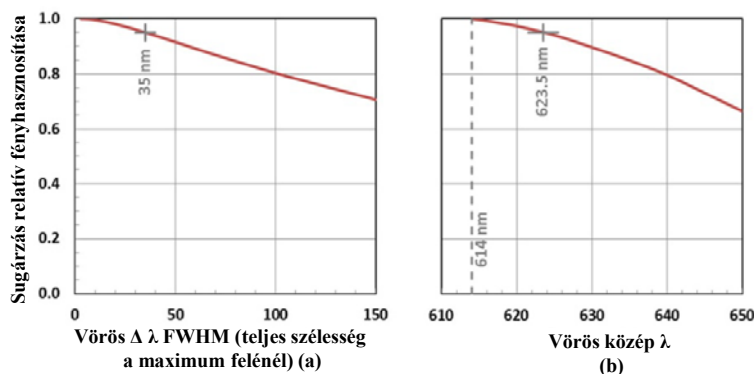
2. lehetőség/kihívás: A vörös lefelé konvertáló anyag vonalszélességének csökkentése

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 az 5.6(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 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 az 5.6(b) ábrából látható, a relatív LER annál nagyobb, minél közelebb van a középső emissziós hullámhossz a 614nm-hez. A 623,5nm-es középső hullámhossz 5%-os, a 630nm-es pedig 10%-os hatásfokromlással jár.

3. lehetőség/kihívás: A kék LED hatásfok- esése

Amint az az 5.2, 5.5 ábrából és az 5.1 és 5.2 táblázatból látható, a kék LED hatásfoka óriási mértékben javult, de még mindig nagyobb alacsony áramsűrűségeknél. A jelenlegi „legjobb” kutatási eredmények 80%-ot meghaladó hatásfokú LED-csomagokat eredményeztek, de csak viszonylag alacsony áramsűrűségek mellett. Az olcsó fényhez, a nagyobb piaci behatoláshoz és végső soron a legnagyobb energiamegtakarításhoz szükséges nagyobb áramsűrűségek esetén a hatásfokok csökkennek. Az áramsűrűség 10 A/cm²-ről 35 A/cm²-re történő növekedésénél bekövetkező úgynevezett „hatásfokcsökkenés” kb. 10%, 100 A/cm² esetén pedig 15% körüli. A kihívás az lesz, hogy „kijátsszák” a hatásfokcsökkenést 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 lézardiódáknál alkalmazott stimulált emisszió), vagy a töltéshordozók sűrűségének csökkentésével (sávszerkezet/



5.6 ábra – A fehér fényű sugárzás relatív fényhasznosítása

Megjegyzés: A fehér fény relatív LER fényhasznosítása (a) a vörös fénypor FWHM vonalszélességének növekedésével a vörös fény adott, 614nm-es közép hullámhosszánál és (b) a vörös közép hullámhosszának növekedésével adott 7nm 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 (35nm FWHM és 623.5 nm közép hullámhossz).

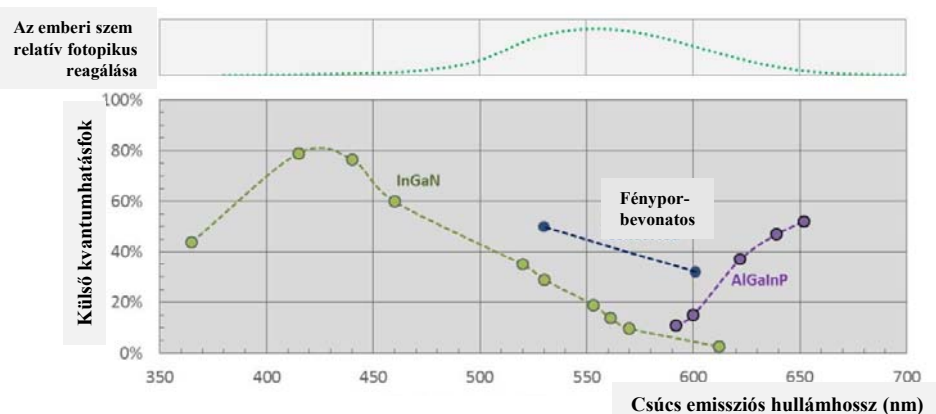
transzport módosításával, vagy alternatív geometriák alkalmazásával, mint amilyenek az alagút-injektálással összekapcsolt egymásra épített aktív tartományok. E megoldások közül a legfontosabb az, hogy megértsük és kontrolláljuk az epitaxiális anyagok bonyolult szintézisfolyamatait úgy, hogy közben megőrizzük a jelenlegi LED-struktúrákhoz gondosan kidolgozott anyagminőséget [79].

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

A hibrid hy-LED architektúra kék LED, 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 görbéjét 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-veszteség 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, amint azt az 5.4 ábra középső szürke csíkja mutatja. 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.

Ennek a felépítésnek is van azonban két fontos hátránya. Mindkettő a vörös LED-hez jelenleg használt AlInGaP-technológiával van összefüggésben. Az egyik az, hogy az AlInGaP-technológián alapuló vörös LED-ekkel összefüggő termikus hatásfokosítás jóval nagyobb, mint az InGaP-en alapuló kék LED-ekkel kapcsolatos. Ezekhez az igen különböző termikus viselkedésekhez szükség van egy vezérlőrendszerre a konzisztens színpont megőrzése érdekében, ami növeli a bonyolultságot és a költségeket. Várható, hogy az emberközpontú világítás számára egyre növekvő érdeklődésre számot tartó, állítható színhőmérsékletű fényforrások lefelé fogják hajtani az ilyen vezérlőrendszerek költségeit, s így minimalizálni fogják a jövőben ezt a hátrányt. A másik – amint az



5.7 ábra – Az emberi szem fotopikus reagálása a hullámhossz függvényében – és alatta: A „legjobb kutatási eredményként” született LED-ek külső kvantumhatásfoka a hullámhossz függvényében

(Forrás: Pattison, Tsao és Krames, *Acta Horticulturae: Light-Emitting-Diode Technology Status and Directions: Opportunities for Horticultural Lighting*, 2016. május [80])

5.7 ábra alsó részletében látható –, hogy az AlInGaP-alapú vörös LED hatásfoka a rövidebb vörös hullámhosszúságoknál csökken. 614 nm-nél – amely az ideális vörösnek tekinthető, mivel még elég hosszú a jó színvisszaadás biztosításához, de még elég rövid az emberi szem jó érzékenységehez (észszerűen magas LER mellett) – a kutatások mai állása szerint a LED-ek külső kvantumhatásfoka 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 hatásfokosítása. De a legfontosabb az, hogy tökéletesíteni kell a vörös LED-eket.

4. lehetőség/kihívás: A vörös LED hatásfokának javítása

Ez egy fontos, de kemény kihívás. Ha egy fényporkonverziós pc-LED-ben a még éppen 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 járó látványos alapvető korlátokat: egy kedvezőtlen sávszerkezetet az alacsony vörösben mind a töltéshordozótranszport/gátlás és a sugárzást előállító (a tiltott sáv közvetlen vagy közvetett átélése következtében előálló) töltéshordozó-rekombináció számára. Az AlInGaP új változata, vagy talán egy teljesen eltérő anyagrendszer (pl. InGaP) megoldást jelenthet. A félvezetőanyagok összetételének és sávszerkezetének teljes kiaknázását gyakran a szokásos hordozók rácsaival

összefüggő feszültségek korlátozzák, habár a legutóbbi fejlesztések áttörést hoztak e problémák leküzdésében, ideértve a metamorf epitaxiát (amelyben a feszültség okozta hibák minimalizálódnak a rács-állandók fokozatos eltolásával) és a nanokompatibilitást (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.

5.1.4 Hipotetikus színkeverés RGBa cm-LED architektúra: lehetőségek és kihívások

A négy színű színkeverés RGBa cm-LED felépítés – amelynél valamennyi szint közvetlenül LED-ek állítanak elő – tekinthető a fehér fényt előállító struktúrák végső megtestesítőjének. Nem kellene a hullámhosszakat lefelé konvertálni, és így nem lépnének fel fényporkonverziós vagy Stokes-veszteségek. Amint azt az 5.4 ábra felső szürke csíkja 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 forrásszínek fehér fénné történő összekeverésénél lépnek fel.

[79] E. Nelson, I. Wildeson and P. Deb: „Efficacy Droop in c-plane AlInGaP LEDs”, DOE SSL R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016. febr. : (http://energy.gov/sites/prod/files/2016/02/f29/nelson_leddroop_raleigh2016_0.pdf)

[80] P. Pattison, J. Tsao and M. Krames: „Lighting-Emitting-Diode Technology Status and Directions: Opportunities for Horticultural Lighting”, *Acta Horticulturae*, vol. VIII International Symposium on Light in Horticulture, 2016. máj.

Léteznek különböző megfontolandó színkeveréses cm-LED kialakítási lehetőségek: háromszínű RGB, négy színű RGBA és talán még az ötszínű RYGBA is. A jelen fejezet a négy színű RGBA-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.

Fontos megjegyezni, hogy ezt a felépítést némileg hipotetikusnak kell tekinteni. Van ugyan olyan speciális típusok, amelyek ezzel a felépítéssel készültek, a zöld és a borostyánsárga LED-fényforrások alacsony hatásfoka, valamint a vörös és borostyánsárga AlInGaP-alapú LED-fényforrások termikus stabilitása korlátozza teljesítmőképességüket. Nevezetesen a megközelítőleg 540, illetve 575 nm-es ideális hullámhosszúságú zöld és borostyánsárga LED-ek éppen az úgynevezett „zöld rés” kellős közepén vannak. Amint az az 5.7 ábrából látható, a hatásfok csökken, ha a zöld emissziós hullámhosszakokat akár a rövid, akár a hosszú hullámhosszak felől közelítjük. Amíg az InGaP alapú kék és lila LED-ek teljesítmőképessége az elmúlt néhány évtized alatt gyorsan javult – alacsony áramsűrűségeknél 95%-ot elérő belső kvantumhatásfokokkal – az indiumtartalomnak a zöld spektrális tartomány emissziója érdekében való növelése gyorsan csökkenti a hatásfokot. Például ha a hullámhosszat eltoljuk a 450 nm-es kétről az 500 nm-es cian irányába, a teljesítmény-átalakítási hatásfok (PCE) megfelelő, s ha tovább toljuk el 525 nm-ig, további feleződés következik be.

5. lehetőség/kihívás: A zöld/borostyánsárga LED hatásfokának növelése

A jó hatásfokú LED-ek megvalósítása a zöld résben (pl. a zöld és a borostyánsárga LED-eké) ezért kulcsfontosságú technikai kihívás, és a megoldások nehezen megfoghatóknak bizonyultak. Egyre több a bizonyíték arra, hogy a zöld LED-ek teljesítmőképességét komolyabban korlátozza az áramesés, mint a kék LED-ekét és az Auger-rekombináció is felelős érte. Ezért az áramesés csökkentésével kapcsolatos alapkutatások mind a kék, mind a zöld LED-ek számára előnyös lehet [81]. Egy másik megoldandó kérdés a zöld és borostyánsárga emissziójához elegendő

5.1 táblázat – A kék, zöld, borostyánsárga és vörös fényforrások jelenlegi és jövőbeni, célul kitűzött hatásfokai a fehér fényű LED-csomagok becslált (optikai keverési/szórás/abszorpció) hatásfokaival együtt

A szín-források és ehér fényt előállító keverékük tulajdonságai				Mértékegység	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/cm ² -nél		0,88	0,91	0,94	0,97	0,98	
			Hatásfok-esés 35 A/cm ² -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		
				Im/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	Im/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		
		Spektrális tulajdonságok	Hullámhossz (középső)	nm	540	540	540	540	540	
			Hullámhossz (FWHM)	nm	100	80	70	50	50	
			Sugárzási fényhasznosítás	Im/W	486	486	499	552	552	
Borostyánsárga 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	
				Im/W	534	611	611	611	611	
Vörös források	LED vagy LD	Hatásfokok	LED hgtásfoka		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	
			Sugárzási fényhasznosítás	Im/W	304	304	304	304	304	
	Fénypor	Hatásfokok	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	Im/W	313	314	308	304	304	
LED-csomag (optikai keverés/szórás/elnyelés) hatásfoka					0,87	0,89	0,90	0,93	0,95	

indiumhányadot tartalmazó InGaP és a szokásos hordozók közötti rács-illesztetlenséggel kapcsolatos feszültség. Elképzelhető, hogy ebben segítenek az InGaP alapú vörös LED-ekkel kapcsolatos kutatási eredmények (pl. a metamorf epitaxia és a nano-kompatibilitás). Ha olyan InGaP-et lehetne előállítani, amely hatékonyan emittálna a vörösben, akkor ebből a zöld és a borostyánsárga is húzhatna hasznót. 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 monokromatikus vörös, borostyánsárga és zöld LED-ek előállításának egy másik alternatívája a fényporkonverziós megoldás, amely előnyt élvez a kék InGaP LED-ek igen nagy teljesítmény-átalakítási hatásfokából, a megkívánt szín ugyanis a kék fény teljes egészében történő átalakításából keletkezik. Ez egy olyan teljes átalakítási hatásfokot eredményez, amely jelentősen meghaladja a közvetlenül emittáló félvezetőket, lényegében kiküszöbölve a Stokes-veszteség hátrányait. A zöld és a borostyánsárga/vörös LED-ek összehasonlítása az 5.7 ábrán látható, amely azt mutatja, hogy a hullámhossz lefelé konverálásával előálló zöld és borostyán-

sárga/vörös LED-ek hatásfoka jelenleg jóval nagyobb, mint a közvetlenül zöld és vörös/borostyánsárga fényt emittáló LED-eké még akkor is, ha figyelembe vesszük a hullámhosszak lefelé konvertálásánál adódó járulékos Stokes-veszteségeket is. Ezért a hatékony keskeny sávú lefelé konvertáló anyagok kifejlesztése fontos közbenő lépés lenne a fehér fényű színkeveréses cm-LED-ek felé. Az 5.1 táblázat összefoglalja a kék, zöld, borostyánsárga és vörös fényforrások különböző hatásfokait (mind a fényporkonverziós, mind az esetlegesen közvetlen emittáló típusok esetére).

5.1.5 Általános következtetések és jövőbeni kilátások

A fényporkonverziós pc-LED, a hibrid hybrid LED és a színkeveréses cm-LED felépítések összevetésével a következő végkövetkeztetéseket lehet tenni:

- A fényporkonverziós pc-LED felépítést jelentős mértékben 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%-os hatásfokának 95%-ra történő növelésével, a

[81] B. Hahn: „Closing the Green Efficiency Gap... Status and Recent Approaches”, DOE SSL R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016. febr. (http://energy.gov/sites/prod/files/2016/02/f29/hahn_leddroop_raleigh2016.pdf)

5.2 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 5.1 táblázatban felsorolt rész-hatásfokokon alapulnak.

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 ₉ =80, R ₉₀ >0	Fénykonverziós 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
			Alapvető (Stokes+spektrális veszteségek)	lm/W	256	281	300	306	306
		A fehér fény fényhasznosítása	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
					0,09	0,09	0,09	0,12	0,12
	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
			Alapvető (Stokes+spektrális veszteségek)	lm/W	335	335	337	343	343
		A fehér fény fényhasznosítása	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
					0,13	0,14	0,14	0,14	0,14
	Hipotetikus színkeverés RGBA CM-LED	A fehér fény forrás- teljesítményének megoszlása	Kék		0,29	0,24	0,27	0,27	0,27
			Zöld		0,20	0,20	0,15	0,15	0,15
			Borostyánsárga		0,20	0,20	0,15	0,15	0,15
			Vörös		0,38	0,42	0,44	0,44	0,44
			Alapvető (Stokes+spektrális veszteségek)	lm/W	390	400	400	400	400
		A fehér fény fényhasznosítása	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

vörös fénypor emissziós vonalszélességének 35 nm FWHM körülire történő szűkítésével és a kék LED hatásfokosságának 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 nagyobb tökéletesítési lehetőségei vannak, de adódhatnak további nehéz kihívások is: növelni kellene a hatásfokot (a jelenlegi kb. 20%-ról 80%-ra) és a vörös LED 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 teljesítményképeségi 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 némileg 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 hatásfokossággal). Igen kíváncsok tehát a 100 A/cm²-es és e feletti működési áramsűrűség és a 85°C-os és ennél magasabb működési hőmérséklet. Valójában számos LED-csomagot már most is rutinszerűen a pn-átmenet 85°C-os hőmérsékletén mérnek, ami közelebb van a végső eszköz működési hőmérsékletéhez, és ez – amint azt az 5.2(b) ábra mutatja – tipikusan 10-13% hatásfok-csökkenést mutat a pn-átmenet 25°C-os hőmérsékletéhez képest.

5.3 táblázat – A lámpatestek jelenlegi és célul tűzött hatásfokai. A LED-csomagok fényhasznosításai az 5.2 táblázatban feltüntetett „felturbózott” hatásfokokon alapulnak.

A fehér fény végfelhasználói lámpatesttel történő előállításának és irányításának tulajdonságai és hatékonysága	Mérték- egység	Jelen	Jövő (célok)				
		2015	2018	2020	2025	Cél	
Meghajtó hatásfoka	%	0,88	0,91	0,93	0,95	0,95	
LED-csomag fényhasznosítása (25 °C-on)	lm/W	137	175	208	237	255	
Termikus hatásfokosság	%	0,88	0,91	0,93	0,95	0,95	
Lámpatest (optikai) hatásfoka	%	0,90	0,92	0,94	0,95	0,95	
Fehér fényt előállító/irányító lámpatest fényhasznosítása	lm/W	95	133	169	203	218	

Másodszor: minél jobban megismerjük a fénynek az emberekre és az emberi teljesítményekre kifejtett hatását, annál fontosabbak lesznek a fény spektrális jellemzői. A CRI-vel mért jobb színvisszaadási minőség egyre fontosabbá válik, és sok alkalmazás már most is CRI 90 vagy legalábbis 80-nál nagyobb értéket igényel. Egyéb spektrális jellemzőket is szükség lehet majd kontrollálni – például a fentiekben az új IES TM-80 irányelvekkel összefüggésben tárgyaltakat. Amint azt a korábbiakban említettük, a CRI-nek 3000K-nél 80-ról 90-re történő megnövekedése a jelenlegi fénykonverziós pc-LED-ek hatásfokát 15-25%-kal csökkenti, és más megkívánt spektrális formák hasonló hatásfokcsökkenést eredményezhetnek.

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 eszközstruktúrák kifejlesztéséhez.

5.2 A LED-es lámpatestek technológiája

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. Ebben a fejezetben ezeket az egyéb komponenseket, valamint e komponenseknek a fehér fény előállítását és továbbítását végző rendszerre kifejtett hatását fogjuk tárgyalni.

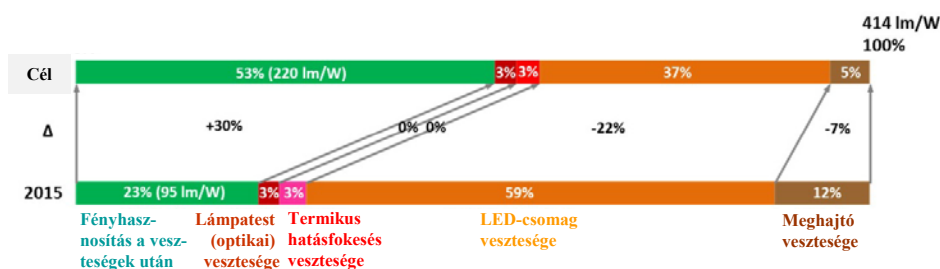
5.2.1 A lámpatestek fényelőállításí hatások: haladás, lehetőségek, kihívások

Egy LED-es lámpatest fehér fény előállításí hatások csak akkora lehet, mint a "szívét" képező LED-csomag. A lámpatest egyéb alkotóelemei – a bemeneténél lévő tápegység és elektromos meghajtó, illetve a mechanikai és termikus hűtőrendszer, valamint a másik végén a fény terítését és/vagy irányítását végző optika – csak további veszteséget termel. A lámpatestek alkotóelemeivel kapcsolatos fejlesztések (és jövőbeni célok) – a meghajtó hatásokának, 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 – az 5.3 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 egyedi 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 – 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 megelőző két 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 jóslható azoknak a hatásfok- és teljesítőképesség-előnyöknek köszönhetően, amelyeket a régebbi formatényezőjű lámpákkal nem lehet elérni.

A lámpatestek komponenseivel kapcsolatos nagyobb hatásfokok lehetőségeit az 5.8 ábra mutatja. Az ábra alapján két K+F prioritást fogunk tárgyalni az integrált lámpatestek hangsúlyozásával.



5.8 ábra – Az elektromos energia látható fényre történő átalakításánál fellépő veszteségek

Megjegyzés: Jobbról balra haladva láthatók az elektromos energia látható fényre történő átalakításának a különböző csatornában fellépő százalékos veszteségei a modern, kereskedelemben kapható lámpatesteknél – baloldalon az eredeti elektromos energia zöld látható fényre 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, 2015-ös állapotot, a felső a hosszú távú célt mutatja, a középen feltüntetett százalékos változások a különböző csatornák potenciális javulásainak a következménye. A LED-csomagok javulása az 5.2 táblázatban feltüntetett „felturbózott” hatásfokokon alapul.

6. lehetőség/kihívás: Elektromos meghajtó

A lámpatest bemeneténél található a tápegység, amely a váltakozó áramú hálózati feszültséget a LED-csomaggal (-csomagokkal) kompatibilis feszültséggé és árammá alakítja át, és vezérlőfunkciókat is tartalmazhat, például fény szabályozhatóságot (amire egyre nagyobb az igény). Sokféle meghajtó-konfiguráció alkalmas különböző számú LED-csomag, különböző áramköri felépítés és különböző szintű – váltakozó- és egyenáramú – bemenet táplálására. Amint az az 5.3 táblázatból látható, a „legjobb” meghajtó-hatások már észszerű módon magasnak tekinthetők, és további javulásra is van lehetőség. A meghajtók feltehetőleg leggyengébb tulajdonsága nem a teljesítőképesség, hanem a megbízhatóság. A meghajtók megbízhatósága jelenleg a leggyengébb láncszem a lámpatest összes többi komponense között. A meghajtók megbízhatóságának növelése jelentős lehetőség/kihívás – ideértve a számos al-komponensük alapvető megbízhatósági határait is. Lehetőség van a meghajtók teljesítőképességének a javítására is, ami a leszállított állapotukban adódó hatásfokot és villózást illeti, és lehetőség van további szabályzási és kommunikációs funkciók beépítésére is az energiamegtakarítás növelése és a lámpatest 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 integrálása is –, miközben egy adott világítási alkalma-

zásnál új értéket teremtünk és energiát takarítunk meg – nos ez a lehetőségek/kihívások szélesebb perspektívája. Ez a lehetőség/kihívás magában foglal sok előzőekben tárgyalt témát, és kiemelt kutatási területet képez, amint azt majd a 7. fejezetben ismertetni fogjuk.

Ami a hőhőztartást illeti, a LED-fényforrások – a hagyományos izzó lámpákkal szemben – nem sugároznak hőt, ezért a veszteségek által generált hőmennyiséget magának a lámpatestnek a segítségével kell elvezetni. Ezért aztán a LED-csomagok üzemi hőmérsékletét azok hűtése, üzemi árama és a környezeti hőmérséklet határozza meg. Amint az az 5.2(b) ábrán látható, a termikus hatásfok-esés a LED hatásfok-esésében nyilvánul meg, amikor azt megemelt hőmérsékleten üzemeltetjük. A tökéletesített hűtés és/vagy a csökkentett 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 pályáinál 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 világítástechnikai termék formatényezőjétől függően a lencsék, reflektorok, optikai keverőkamrák, távolban elhelyezett fényporok és diffúzorok sokféle elrendezését alkalmazhatja.

[82] Philips: „Details of the 200lm/W TLED Lighting Technology Breakthrough Unraveled”, 2013. ápr. 11. (<http://www.newscenter.philips.com/main/standard/news/articles/20130411-details-of-the-200lm-w-tled-lighting-technology-breakthrough-unraveled.wpd#>. VWiVYM9Viko)

[83] Cree: „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>)

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 rövidebb az időtartam, 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 TLED-lámpa prototípusának kifejlesztését, amelynek színhőmérséklete 3000 és 4500K között változtatható, CRI színvisszaadási indexe nagyobb mint 80 és R9 értéke > 20 [82]; 2014-ben a Cree jelentett be egy 3200 lm koncepciójú lámpatestet, amelynek fényszennyezése meghaladja a 200 lm/W-ot 80-as CRI mellett termikus egyensúlyi állapotban, miközben az ANSI 3000K-re vonatkozó színspecifikációin belül marad [83]; végül 2014-ben az Osram egy 3900 lm fényáramú LED-cső kifejlesztését jelentette be, amely hasonló a Philipséhez, de fényszennyezése 215 lm/W – vagy vezérlőegységgel kombinálva 205 lm/W – 3000K és CRI 90 mellett [84]. Ezek a K+F termékek kielégítik az 5.2. táblázatban bemutatott 2020-as célokat, és azt igazolják, hogy gondos rendszer-optimalizációval lényegesen jobb teljesítőképesség érhető el.

7. lehetőség/kihívás: LED-es lámpatestek funkcióképességének beépítése

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 szabályzását 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 körültekintő elhelyezése jelentősen javíthatná annak hatásfokát. Az optikai

sugárnyaláb formálása egy másik ilyen funkcióképesség. Bizonyos útvilágítási 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 a lehetősége még arra is, hogy a GaN-alapú meghajtó elektronikat 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.

5.2.2 A világítás „végfelhasználásának” hatásfoka: előre tekintés

Miután a lámpatest előállította, a fényt el kell juttatni a környezethez és végezetül a felhasználóhoz. Amíg az előző részek az „előállítás” hatásfokát tárgyalták, ez a szakasz a fény „végfelhasználási” hatásfokára fókuszál, ami túlmutat a 2.2 fejezetben tárgyalt „felhasználási” hatásfokon.

A mesterséges fény „végfelhasználási” hatásfoka abszolút értelemben 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 reflexiós tényezője, az emberi szem kisméretű apertúrája és a térhez és a megvilágított tér térszögéhez képesti kis látószöge, valamint a térben annak megvilágítási idejéhez képest eltöltött, 100%-nál rövidebb idő.

E veszteségi tényezők mindegyikét nem lehet kiküszöbölni. Az érzékelő-alapú, valósidejű szabályzók agresszív és körültekintő alkalmazásával azonban egy nagyságrenddel le lehet őket csökkenteni. A szilárdtest-világítást különösen gyors kapcsolási sebességek, a fény fókuszálási és irányítási lehetősége jellemzik, miközben színösszetevői abszolút és relatív fényerősségét állítani lehet. Ezzel a képességgel el lehet képzelni egy olyan, érzékelő-alapú szabályzórendszert, amellyel az emberi használatnak megfelelően való időben, igényre lehet szabni a világítás elhelyezését, spektrális összetételét* és fényszennyezését. (*Például a múltban, amikor a spektrális hatásfokra hivatkoztunk, azt abban az értelemben tettük, hogy

a kibocsátott spektrum milyen hatásfokkal illeszkedett az emberi szem reagálóképességéhez, miközben megtartotta az emberi környezetben található tárgyak „tipikus” minőségű, jó színvisszaadását. Nemrég azonban megjelentek a színvisszaadás minőségét mérő olyan új módszerek, amelyeknél adott környezetekben bizonyos tárgyak (zöld autópálya-jelzések, műtő környezetek stb.) kiemelését kívánhatjuk anélkül, hogy nemkívánatos vagy szükségtelen hullámhosszakban fényt veszítsenék.) E területen jelentős jövőbeni lehetőségek vannak (pl. érzékelők, mikro-optoelektromechanikai rendszerek (MOEMS-ek), emberi vizuális érzékelés, világítási architektúrák és szabályzók), amelyek a következő évtizedben nagyobb figyelmet kaphatnak. Úgy becsülik, hogy két-háromszoros javulási tényezőre van lehetőség a felhasználási hatásfokban, és ezek spekulatív módon tükröződnek az 5.3 táblázat „végfelhasználási hatásfok-szorójával” kialakított jövőbeni célokban.

8. lehetőség/kihívás: A felhasználási hatásfok mérése

Mielőtt a felhasználási hatásfok javulásában konkrét, mérhető előrehaladást lehetne elérni, először mérni kellene tudni. Az, hogy hogyan kell mérni a felhasználási hatásfokot, nagy kérdés, amire jelenleg nincs válasz, de ez még nem olyan dolog, amely a közvélemény érdeklődésének középpontjában lenne. Szükségünk van az érzékelők új generációjára, amelyek valószínűleg mérni tudják, hogy az emberi szem mekkora fényt észlel és hogy a helyiség lámpatestei mennyi fényt bocsátanak ki úgy, hogy ebből az arányból meg lehessen határozni a felhasználási hatásfokot? Vagy egyszerűen csak támaszkodni lehet a négyzetméterenként előállított lumen és a helyiség négyzetméterenkénti igénybevételének algoritmusára? A lehetőség fontos, mivel ha mérni tudjuk – még ha csak előzetesen is – a világítástervezők elkezdhetnek intelligensebb tervezőrendszerekkel/komponensekkel dolgozni, amelyek lehetővé tesznek majd javulásokat a felhasználási hatásfokban.

[84] 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)

5.3 A LED-gyártás helyzete

5.3.1 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 adja a gyártás ellátóláncát.

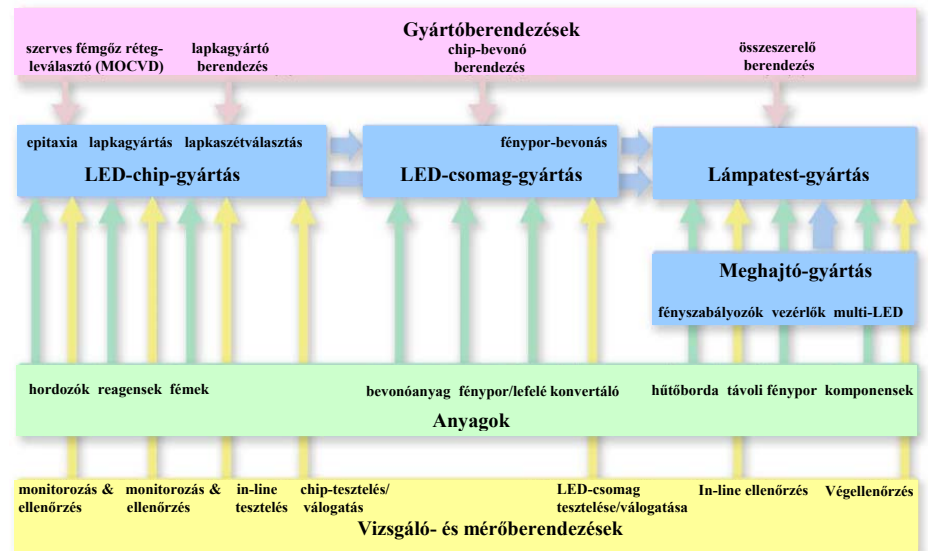
Az 5.9 ábrán bemutatott ellátólánc a LED-alapú szilárdtest-világítás gyártásának jelenlegi helyzetét reprezentálja, de meg kell jegyezni, hogy állandóan változik és folyamatosan fejlődni és érni fog. Például meg lehet, hogy egy vertikálisan integrálódott gyártó e folyamatok közül jelenleg számos vállalaton belül végez el, de a gyáripar fejlődésével az ellátólánc általában egyre jobban széttagozódik az optimális gyártási határfok 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 félvezető 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 végző lámpatest vagy lámpa előállításához. 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.

5.3.2 A LED-csomag („tokozott chip”) gyártása

Gyártási módszerek

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



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

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



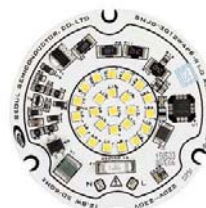
L1: chip+optika



L2: LED-nyák



L2+: beépített LED-ek+optika



L2+: beépített LED-ek+meghajtó



L2+: beépített LED-ek+hűtőborda

5.10 ábra – A LED-komponensek beépítési formái

A képek forrásai: a) Lumileds, Luxeon T adatlap, 2015 [85]; b) Lumileds, Luxeon XR-TX adatlap, 2016 [86]; c) Seoul Semiconductor, Acrich2.5 adatlap, 2015 [87]; d) Seoul Semiconductor, Acrich3 adatlap, 2016 [88]; e) Frost & Sullivan, hűtőbordára szerelt áramkör, 2013 [89]

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 költségteremtő: a retrofit-lámpák költségének csak mintegy 18%-át képviseli, a LED-es beltéri és kültéri lámpatestek esetén pedig ez az arány 7% vagy még kisebb. Ahhoz, hogy a költségeket csökkenteni lehessen a teljesítmőképesség folyamatos javítása mellett, koncentrált erőfeszítésekre van szükség a gyártás egész ellátólánca mentén. Ezek az erőfeszítések a jobb minőségű és olcsóbb nyersanyagokra, a tökéletesített epitaxiális növesztő berendezésekre és technológiára,

az optimalizált lapkafeldolgozó berendezésekre és a nagyobb hatékonyságú tokozó módszerekre, anyagokra és berendezésekre fognak koncentrálni.

[85] Lumileds: „Luxeon T Datasheet”, 2015, <http://www.lumileds.com/uploads/383/PB106-pdf>

[86] Lumileds: „Luxeon XR-TX” adatlap, 2016, <http://www.lumileds.com/uploads/598/PB160-pdf>

[87] Seoul Semiconductors: „Acrich2.5-30W” adatlap, 2015. okt. 2., http://www.seoulsemicon.com/_upload/Goods_Spec/SMJQ13XXFNSX_Rev1.5.pdf

[88] Seoul Semiconductor: „Acrich3-Indoor Modules”, 2016. ápr. 1., http://www.seoulsemicon.com/upload/Goods_Spec/Specification_SMJE-XD12W4PD_Rev1.2.pdf

[89] Frost and Sullivan: „Frost and Sullivan Honours Cambridge Nanotherm for its Chip on Heat Sink Technology for Thermal Management”, 2013. dec. 19., <http://www.best-practices.frostmultimedia-wire.com/cam-2013>

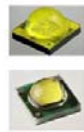
Egyre nagyobb a piaci igény olyan integrált modulok („light engine”-ek) iránt, amelyek a LED-eket és a meghajtót is tartalmazzák. A különböző integrálási szinteket az 5.10 ábra illusztrálja. Az 1. szint (L1) a tokozott LED-chipekre vonatkozik, a 2. szint (L2) áramköri panelre szerelt LED-ekre vagy meghajtó 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 alacsonyabbak legyenek a gyártási költségek a minőség és megbízhatóság megőrzése mellett. Ez lefordítva kisebb rendszerméretet 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. az 5.11 ábrát):

- Nagyteljesítményű (1-5W-os) LED-csomagok, tipikusan a kis optikai fénysűrűségű termékekhez (pl. irányított fényű lámpákhoz) vagy ahová nagy megbízhatóság szükséges (pl. útvilágításhoz).
- Közepes teljesítményű (0,1-0,5W-os) LED-csomagok, amelyeket tipikusan nem irányított fényű világításhoz (mennyezeti tükrös/rácsos lámpatestekhez, hagyományos izzólámpaburába szerelt lámpákhoz) használnak.
- Közvetlenül a hordozón kialakított (chip-on-board) LED-csomagok, amelyeket szokásosan olyan termékekhez alkalmaznak, amelyek kis optikai fénysűrűségről nagy fénysűrűségre van szükség (pl. csarnok-világítók esetén).



Nagyteljesítményű LED-csomagok: kerámia hordozó, öntött lencsék



Közepes teljesítményű LED-csomagok: szerelőkeret, polimer tokozás



Közvetlenül hordozóra szerelt chip (COB): fém magas flip-chip, fényporbevonattal nyák, kerámia nyák

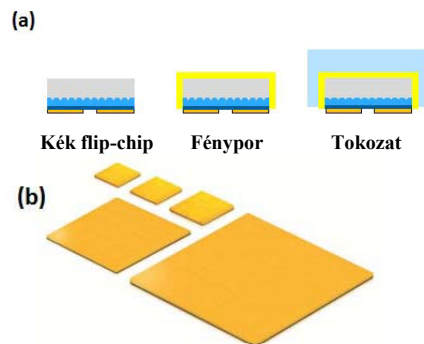
5.11 ábra – Nagyteljesítményű, közepes teljesítményű, közvetlenül a hordozón létrehozott (COB) és chip-méretű (Chip Scale) LED-csomagok

- Chip-méretű LED-csomagok (chip scale packages = CSP) – nevezik néha tokozás 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, 1mm²-es chipet tartalmaznak (vagy több ilyen egy nagy tömbben), amelyet a jó hűtés érdekében kerámia hordozóra szerelnek. A chipet ezután fényporral vonják be, majd egy félgömb alakú szilikon lencsét öntenek rá. Néhány nagyteljesítményű LED-konstrukció a nagy chipen kívül több kis, sorba kötött chipet is tartalmaz a nagyfeszültségű konstrukció létrehozásához, amely – megfelelően csoportosítva egy meghajtóval – növelheti a rendszer fénysűrűségét.

A közepes teljesítményű LED-eket eredetileg kiemelő és háttérvilágításra használták, de 2012-ben megtalálták az utat az általános világítás felé is, amint a chipek teljesítményének javulása az általános világítási alkalmazásokhoz megfelelő fénysűrűségeket ért el. A közepes teljesítményű LED-ek olcsó, fröccsöntött műanyagból és vezető vázból állnak, amely tipikusan 1-3 kis LED-chipet tartalmaz. A chipek egy, a műanyag üreget körülvevő, ezüst bevonatú fém vezető vázra vannak szerelve. Az üreg szilikonba kevert fényporral 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 (MCPCB) vagy kerámia hordozóra szerelt kis chipeket tartalmazó nagy tömbökből áll. A LED-ek fényporral kevert szilikon tokozóanyaggal vannak lefedve. Kis optikai fénysűrűségről nagy fénysűrűségre van szükség (akár 14 000



5.12 ábra – (a) A chip méretű LED-csomagok (CSP) gyártási fázisai (b) Újabb példák a kereskedelmi CSP-k méretezhetőségére (Forrás: (a) Shatil Haque, DOE SSL R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016. febr. [90], (b) Samsung Media Center, 2016. máj. [91])

lm-es) fénysűrűséget szolgáltatnak, 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 gyártónak előnyös, akiknek nincs a diszkrét LED-csomagok fém magú nyomtatott áramköri panelre 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-termékeket gyártók számával együtt folyamatosan növekszik.

[90] S. Haque: „Wafer Scale Packaging Manufacturing Challenges”, DOE SSL R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016. febr., http://energy.gov/sites/prod/files/2016/02/f29/haque_led-mfg_raleigh2016.pdf.

[91] Samsung: „Samsung Introduces Full Line-up of LED Components Based on Chip-Scale Packaging Technology”, 2016. márc. 14., <http://www.samsung.com/us/samsungsemiconductor/mediacenter/index.html>

A jelenlegi chip-méretű LED-termékek többsége alapként ún. „flip-chipet” használ, amelyre aztán ráviszik a fényport és a tokozóanyagot, amint azt az 5.12(a) ábra mutatja. A huzalkötés és a szerelőkeret vagy kerámiahordozó elhagyása kisebb méreteket és alacsonyabb költségeket tesz lehetővé. A CSP gyártók alakhú fényporbevonatot 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 lecszerelésével kapcsolatos különböző világítási alkalmazások igényeit, amint az az 5.12(b) ábrán látható.

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

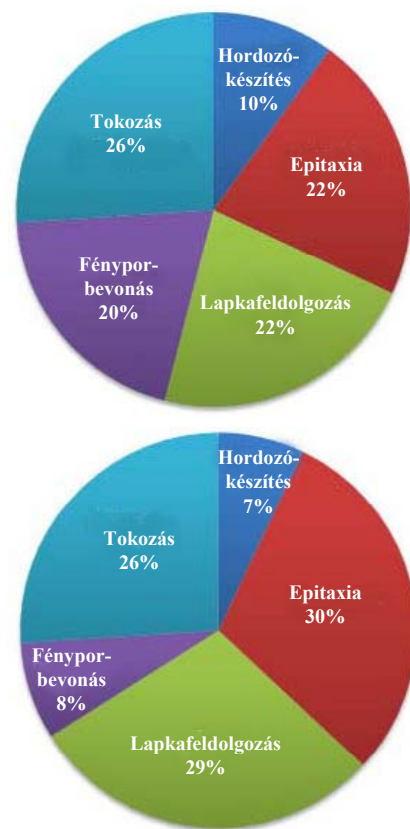
- Az elfordulás és elhajlás következtében a sokkal kisebb chip-méretű CSP LED-eknek a nyomtatott áramkörü panelra történő beigazításához pontosabb gyártásra van szükség.
- A sugárnyaláb beállítása korlátozhatja a chipek sűrűségét és befolyásolhatja a szekunder optika konstrukcióját.
- A chip-méretű CSP LED és a nyomtatott áramkörü panel közötti nyíróerő befolyásolja a mechanikai kötés megbízhatóságát.
- 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 (SMT) gyártósoraihoz tipikusan használt tesztelő és válogató berendezéseknél.

A LED-csomagok költsége

A nagy és közepes teljesítményű LED-csomagok tipikus költségmegoszlását az 5.13 ábra mutatja. A nagy teljesítményű LED-ekre vonatkozó adatok esetén tömeggyártást tételezünk fel, amelynek so-

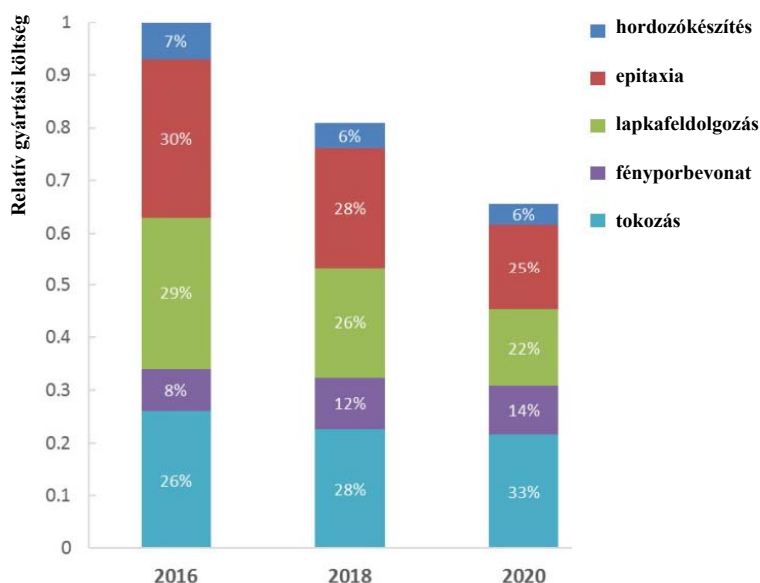
rán 100 mm átmérőjű zafirhordozóra 1 mm²-es elemeket visznek fel és a chipeket kerámatokokba zárva állítanak elő meleg fehér, fényporkonverziós pc-LED-fényforrásokat. A közepes teljesítményű, meleg fehér, fényporkonverziós pc-LED-ek adatai hasonló méretű vezetővázas műanyag hordozóra szerelt, 0,5 mm²-es chipekre vonatkoznak. A költségek megoszlása a nagy teljesítményű 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 árkülönbséget is jelent.

Az 5.13 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 epitaxianövesztés költségei sem maradnak le sokkal mögöttük. Ezek a megoszlások azt sugallják, hogy sokkal átfogóbb megközelítésre van szükség a költségcsökkentéshez. Az 5.14 ábra azt mutatja, hogy a nagy teljesítményű LED-csomagok költsége idővel változhat, amint a volumenek tovább növekednek, s 2020-



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

ra a 2016-os érték kb. 65%-ára csökkenhet le. Várható, hogy a hordozó-, az epitaxia- és a lapkafeldolgozás viszonylagos részaránya csökkenni fog ebben az időszakban, míg a tokozása és a fényporé növekszik.



5.14 ábra – A nagy teljesítményű LED-csomagok gyártási fázisainak várható költségei (Forrás: A DOE SSL Roundtable and Workshop résztvevőitől származó adatok)

Bőven van lehetőség az innovációra ezen a területen és a Minisztérium (DOE) számos különböző megközelítést fontolgat a költségsökkentésre, 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

5.3.3 Kereskedelmi megfontolások

A LED-csomagok ára

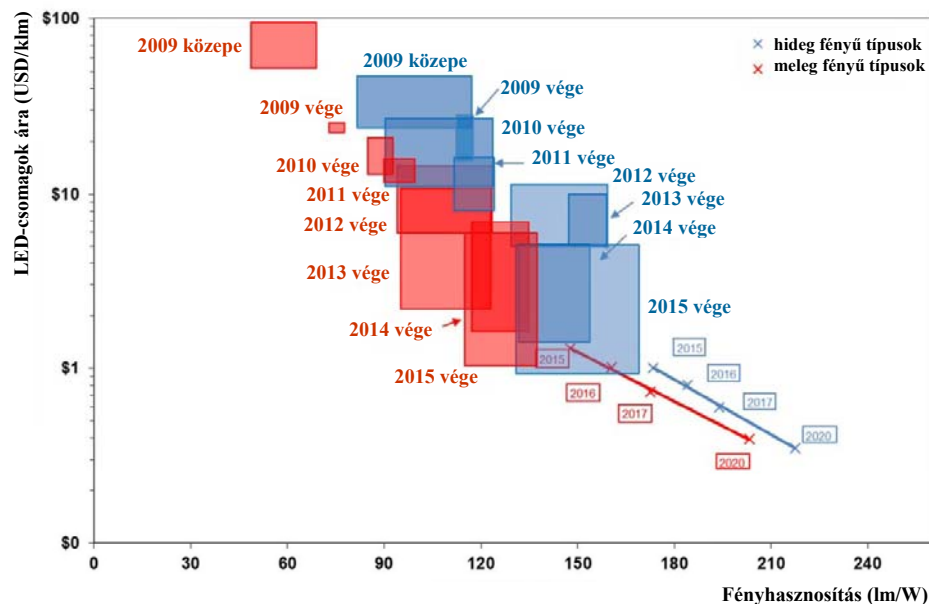
A múltban a LED-alapú lámpák vagy lámpatestek költségeiben a LED-csomagok ára volt a meghatározó, az elmúlt években azonban gyors árcsökkenés volt tapasztalható a műanyag tokozóanyagok és a chip-méretű CSP LED-csomagolási módszerek bevezetése mellett.

Az árbecslések ebben a fejezetben az 1000 darabos mennyiségekben nagy kereskedelmi elosztóktól – Digi-Key, AVNET, Newport és Future Electronics – vásárolt LED-csomagok tipikus kiskereskedelmi árait reprezentálják. A különböző 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 USD/klm-ben kifejezett ár és a fényhasznosítás rögzített, 35 A/cm²-es áramsűrűség és a pn-átmenet 25°C-os hőmérséklete mellett értendő, ha csak másképp nincs jelezve. Az újonnan bevezetett LED-csomagokat általában 85°C-on mérték és a mért értéket 25°C-ra normalizálták a gyártók által rendelkezésre bocsátott adatok felhasználásával.

A LED-csomagok fényhasznosításának és árának alakulása az 5.15 ábrán látható. Valamennyi időintervallumot egy-egy olyan négyszög ábrázol, amelynek területét a legnagyobb fényhasznosítású és a legalacsonyabb árú termékek összekötése adja. 2015 során a hideg fehér típusokra 168 lm/W-os, a meleg fehér változatokra pedig 137 lm/W-os fényhasznosítást, valamint rendre 0,9, illetve 1,0 USD/klm árat jelentettek.

HOLUX Hírek N°165 p.8

A LED-csomagok ár/fényhasznosítás jellemzőinek jelenlegi és várható értékei



5.15 ábra – A LED-csomagok 1 W/mm² (35 A/cm²-nek megfelelő) és 25 °C esetén adódó ár-fényhasznosítás értékei – Megjegyzés: A hideg fehér LED-csomagoknál CCT=5700K és CRI=70, a meleg fehér típusoknál pedig CCT=3000K és CR=80 értékeket tételeztünk fel. A téglalapok kiegészítésül az egyes periódusokra érvényes maximális fényhasznosítás és legalacsonyabb ár alapján készültek, a maximális fényhasznosítás azonban a legalacsonyabb árak esetén elképzelhetően nem érhető el.

Paraméter	2014	2015	2017	2020	Goal
Hideg fehér fényhasznosítás (lm/W)	158	168	194	218	255
Hideg fehér ár (USD/klm)	1,4	0,9	0,6	0,35	0,3
Meleg fehér fényhasznosítás (lm/W)	131	137	164	208	255
Meleg fehér ár (USD/klm)	1,7	1,0	0,7	0,36	0,3

5.4 táblázat – A LED-csomagok árának és teljesítőképességének előrejelzése (1 W/mm² és 25°C esetére)

A gyors árcsökkenés a közepes teljesítményű LED-csomagok megjelenésével és a normalizálási eljárás módosításával van összefüggésben, amely lehetővé teszi az ilyen LED-csomagok nyomon követését. Az 5.15 ábra ár-fényhasznosítás előrejelzéseket is tartalmaz összehasonlításai célzattal, amelyeket az 5.4 táblázat foglal össze. Az ár-előrejelzéseket hozzáigazítottuk a közepes teljesítményű eszközökkel kapcsolatos alacsonyabb árakhoz. A fényhasznosítási előrejelzéseket hasonlóképpen módosítottuk úgy, hogy azok az előrejelzettől lassabb fejlődést mutassanak, különösen a hideg fehér termékek esetén. Amint azt a fentiekben említettük, a normalizálási folyamatban is végeztünk módosítást. A LED-csomagokat most 1W/mm² teljesítménysűrűsége normalizáltuk a 35 A/cm²-es áramsűrűség helyett. A tipikus nagyteljesítményű LED-csomagok esetén ez a két érték lényegében megegyezik, ezért a történeti adatok megtarthatók.

Annak érdekében, hogy nyomon lehessen

követni aki és közepes teljesítményű LED-csomagok teljesítőképességeit, egy második – 0,3 W/mm²-es – kritérium bevezetését is tervezzük, így ezeket a LED-csomagokat optimális működési feltételeikhez közelebbi körülmények között lehet mérni. A teljesítménysűrűsége történő normalizálással a különböző LED-csomag konfigurációk könnyen kezelhetők, mivel csak a bemeneti áramot, a bemeneti feszültséget és a fényáramot kell megmérni a fényhasznosítás és a kilolumenenkénti ár kiszámításához, amennyiben a lapka teljes belső felülete ismert. A legtöbb nagy gyártó jelezte, hogy kész közölni a Minisztériummal a lapkák területére vonatkozó információt erre a célra. Az adatokat továbbra is 25 és 85°C-on fogjuk megadni, ha ez utóbbi a LED-csomagra specifikált teszt-hőmérséklet. Csak azokat a LED-csomagokat választjuk ki, amelyek eleget tesznek az 5700K/70, 3000K/80 és 3000K/90 színhőmérséklet/színvisszaadási index kombinációnak.

5.3.4 A LED-es lámpatestek gyártása

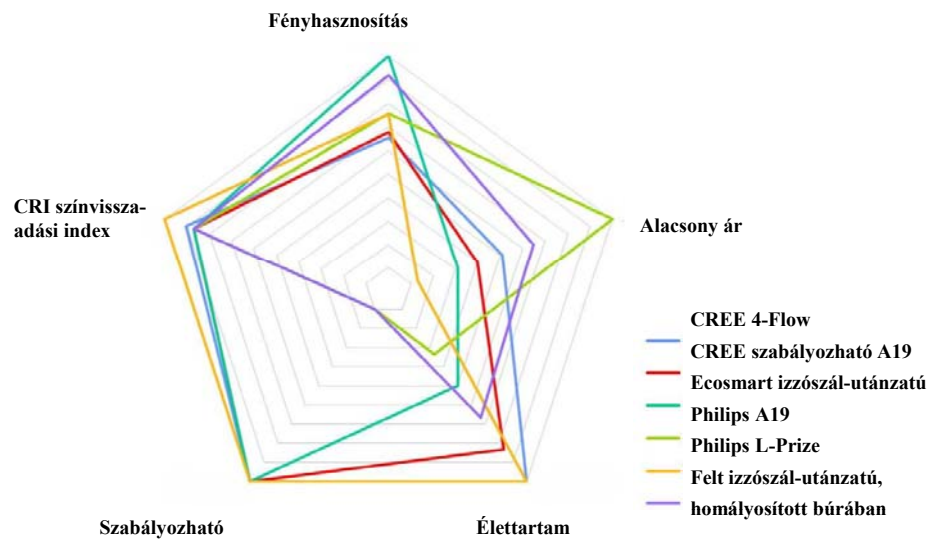
Gyártási módszerek

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 formatényező és a költség, teljesítőképesség, termékonzisztencia és megbízhatóság közötti optimális egyensúly elérése érdekében.

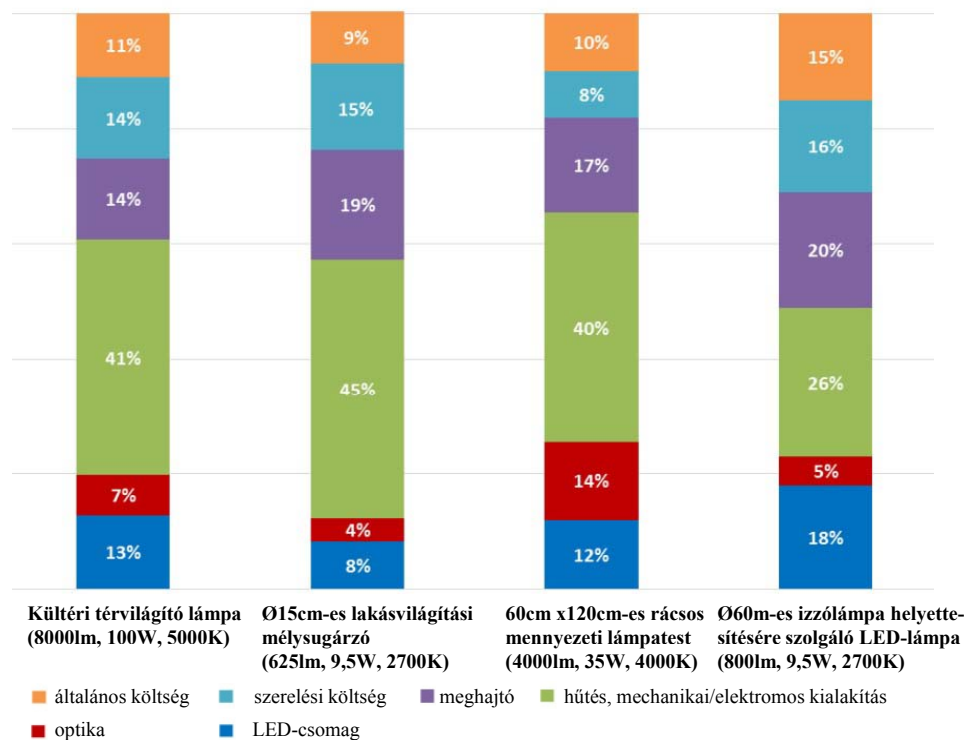
E funkciók és a szükséges kompromisszumok közötti egyensúly a világítási alkalmazástól, a fogyasztói profiltól, a világítás elvárt teljesítőképességétől és árától függ. Például egy 15 cm átmérőjű lakásvilágítási mélysugárzó 67 lm/W leadására képes, míg egy felső kategóriás ipari mélysugárzó ugyanattól 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 termékkritériumainak 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 színeltolódáshoz vezet, ezzel befolyásolva a lámpatestek megbízhatóságát és garantált élettartamát. Ez önmagában is kompromisszumot jelent a LED-fényforrás tervezésénél. A többi alrendszer-konstrukciók – hűtőborda, meghajtó és optika – további kompromisszumokhoz vezetnek. Valamennyi apró kompromisszumnak és ezeknek a termékkonstrukcióra és a gyártási költségekre kifejtett hatásának figyelembe vétele határozza meg a fényhasznosítást, a színhőmérséklet, a színvisszaadási index, a garantált élettartam és a költség azon szintjét, amelyen a különböző lámpatestek piacra kerülnek.

Az 5.16 ábra bemutatja ezeket a kompromisszumokat különböző – hagyományos, A-típusú izzólámpabúrába szerelt – LED-



5.16 ábra – A különböző, A-típusú búrájú LED-lámpák minőségi jellemzőinek összehasonlítása
Megjegyzés: Az „ár” esetében a magasabb értékelés alacsonyabb beszerzési árnak felel meg



5.17 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.

lámpa esetén. A minőségi tényezők – mint amilyen a kiváló színvisszaadás, a szabályozhatóság és a nagyobb L70 élettartam – mind-mind magasabb árat jelentenek. Az olcsóbb LED-lámpák nem szabályozhatók és nincs hosszabb élettartamuk vagy nagyobb 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 formatényezőjű lámpatesteknek kisebb a fényhasznosítása, mint a többinek, nem jelenti szükségképpen azt, hogy bizonyos LED-es lámpatesteket nem lehetne olyan nagy fényhasznosítással vagy olyan nagy megbízhatósággal gyártani, mint a többieket, inkább a gyártónak az adott végfelhasználási esetre kidolgozott speciális kompromisszumát tükrözi. Vannak bizonyos esetek – például a keskeny sugárzó spotlámpákhoz szükséges, kis méretű világítási konstrukciók –, amelyeknek fényhasznosítás-korlátaik le-

Ellátólánc		Költségtenyező		
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
	Hordozók	• Átmérő	• Minőség	• Szabványosítás
Anyag- beszállítók	Vegyianyagok	• Minőség/tisztaság	• Ömlesztett szállítási rendszerek	• In-line tisztítás
	Csomagolóanyagok	• Szabványosítás	• Műanyag csomagolóanyagok	• Műanyag zsugorfoliák
	Fénypor	• Minőség/hatásfok • Konzisztencia	• Stabilitás (termikus és optikai áramlás)	• Megbízhatóság
	Tokozyanyagok	• Minőség	• Megbízhatóság	• Stabilitás (termikus és optikai áramlás)
Elemgyártás		• Gyártásközi ellenőrzés/ folyamatszabályozás	• Kihozatal • Tesztelés	• Teljesítmény • Állbeszköz-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 megfelelőség)	• Modulrendszer kialakítása • Teljesítmény

5.5 táblázat – A LED ellátólánc:
meghatározó költségtenyezők

hetnek a nagy területek megvilágítására szolgáló tükrös-rácsos lámpatestekéhez képest (miután a kis spotfények eléréséhez kis fényforrás-méretekre van szükség), de ez nem alapvető dolog 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, gyártásuk teljesen különvlik, 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 (ideértve a „gyártásra, ill. szerelésre tervezett konstrukciókat”) és tökéletesített tesztelési eljárásokat fejlesztettek ki.

A LED-es lámpatestek költsége

A lámpák és lámpatestek tipikus költségmegoszlása függ az alkalmazástól. Az 5.17

ábra összehasonlítja egy kültéri térvilágító lámpa, egy beltéri lakásvilágítási mélysugárzó, egy LED-es tükrös-rácsos lámpatest és egy 60mm átmérőjű retrofitlámpa költségeinek megoszlását (az adatokat revideáltuk a közösségektől érkezett észrevételek alapján). Látható, hogy a különböző formatervezőjű fényforrások viszonylagos költségei jelentősen eltérhetnek. Az utóbbi években érezhető volt a LED-csomagok árának gyors csökkenése terén mind a lámpatesteknél, mind a retrofitlámpáknál.

A rezsiköltségek valódi költségelemet reprezentálnak, különösen a 60mm átmérőjű lámpák esetén, ezért feltüntetjük a költség-grafikonban az anyagköltségekkel együtt. A rezsiköltségek a költségdiagramban a gyártástechnológiára, a termékfejlesztésre, a dokumentációra, a tokozásra, az in-line és a megfelelőségi ellenőrzésre, a kiszállításra és az elosztásra vonatkoznak. A kiskereskedelmi ár egy további 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 ma már nem ez a helyzet. A legtöbb lámpatestnél a hűtési/mechanikai/elektromos alrendszer lett a domináns költségtenyező, azaz a ház, a hűtőbordák, az elektromos csatlakozások és a mechanikai rögzítő elemek költségei. A továbbiakban a LED-csomagok költsége gyorsan tovább fog csökkenni, ezért a jövőbeni költségcsökkentést többnyire a teljes rendszer optimalizálásával lehet majd elérni az

egyes költségelemekre fektetett hangsúly helyett.

Egy adott termék esetén érdemes megfigyelni, hogyan változik a költségmegoszlás az idők során. Az 5.18 ábra azt mutatja be, hogy egy közönséges 60mm átmérőjű, 60W-os izzólámpa helyettesítő retrofit LED-lámpájának a gyártási költsége várhatóan hogyan változik 2015 és 2020 között. A költségtenyezők közül a legnagyobb változást a LED-csomag költsége képviseli, amely várhatóan a 2015-ös 23%-os részaránnyól 2020-ra 10% körülire fog csökkenni. Amint azt a fentiekben említettük és az 5.17 ábrán látható, a relatív költségek jelentősen eltérnek az adott lámpatestek és lámpatípusok esetén, ezért a lámpatestekre nem lehet egy általános költségmegoszlást előrevetíteni. Amíg az egyenes költségcsökkentési folyamat az egyik megközelítés a költségek leszorítására, a rendszerek áttervezése sokkal gyakoribb módja a költségcsökkentés nagyobb ugrásainak eléréséhez a rendszerkomponensek mennyiségének és típusának módosításával. 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 teljesítőképességének – a fényhasznosításnak, élettartamnak, színminőségnek stb. – károsítása

nélkül képesek csökkenteni a költségeket.

A LED ellátólánc egyes fő elemeinek legfontosabb költségtényezőit az 5.5 táblázat foglalja össze.

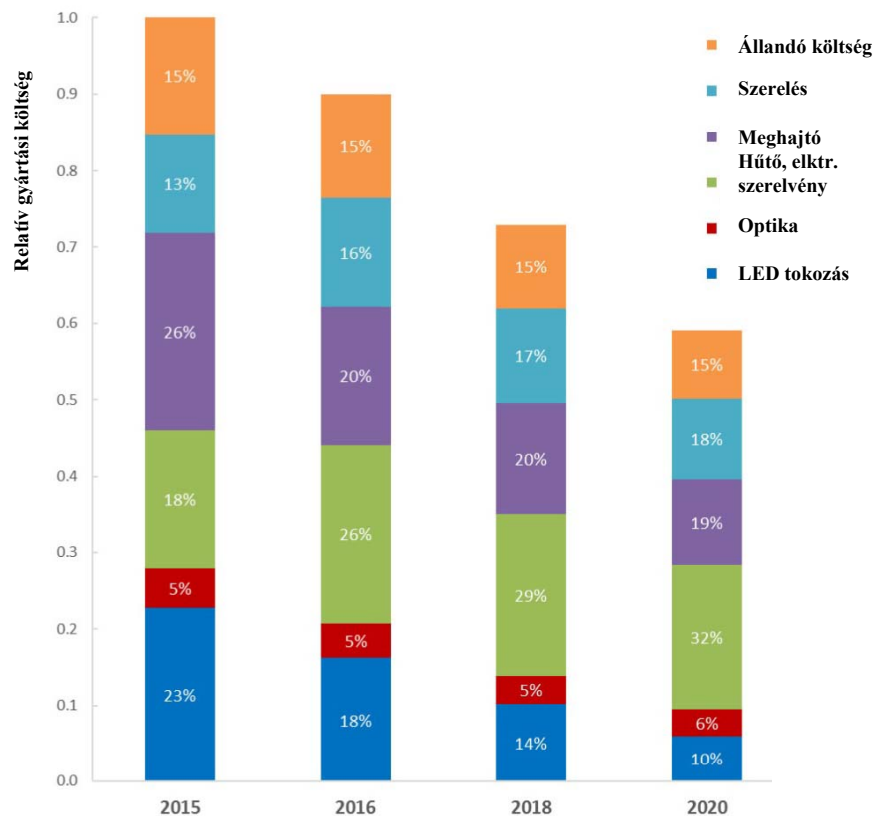
5.3.5 Megbízhatóság és színeltolódás

Fényáram-tartás

A LED-ek ritkán mutatnak katasztrofális meghibásodást, ezért paraméter-hibákat kell számításba venni, pl. a fényáram, fényerősség, fényeloszlás, színhőmérséklet, színvisszaadási index vagy fényhasznosítás degradálódását vagy eltolódásait. Ezek közül a fényáram csökkenése kapta a legnagyobb figyelmet, mivel korábban azt gondolták, hogy a LED-fényforrás fényáramának degradációja az egész termék élettartamának elsődleges meghatározó tényezője. S noha ma már ismeretes, hogy nem ez a helyzet, a lumen- vagy fényáram-tartást használják még mindig a LED-lámpa vagy a LED-es lámpatest élettartamának megadásához – főként azért, mert a LED-ek fényáram-tartásának mérésére és előrejelzésére léteznek szabványosított módszerek

A LED-ek hasznos élettartamát gyakran azzal az időponttal adják meg, ahol a fényáram az eredeti értékének 70%-ára csökken, ez az L70-es érték. 2008-ban az IEC megjelentette az IES LM-80-at, amely egy jóváhagyott módszer a szilárdtest-(LED-) fényforrások, tömbök és modulok fényáram-tartásának mérésére [92]. Ehhez az eljáráshoz 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 lámpatestben lévő LED-csomag eléri az L70-et. és az IES dokumentált is egy előrejelzési eljárást, az IES TM-21-et [93]. Ez a műszaki dokumentum kimondja, hogy az előrejelzések nem haladhatják meg az LM-80 tesztadatai tényleges óráinak megállapított többszörösét, ami segít elkerülni a gyártónak 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 szűk-képpen 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. Mindenestre a fényáram-tartás előrejelzései segít-



5.18 ábra – A tipikus 60mm átmérőjű (A19) izzólámpák helyettesítésére alkalmas LED-lámpák (Forrás: a DOE SSL Roundtable és Workshop résztvevői)

hetnek 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 az USA Energiaügyi Minisztériumának (az RTI International által díjazott) „Alaptechnológiák kutatási program”-ja igen sokféle LED-csomagra megvizsgálta. E program célja a LED-csomagok meghibásodási módjainak meghatározása és egy olyan szoftver kifejlesztése volt, amely megkísérli szimulálni a hibaarányokat, hogy összefüggésbe hozza a LED-csomag viselkedését a rendszer-megbízhatósági eredményekkel. Az analízis során kifejlesztettek egy módszert több gyártó LM-80 adatainak elemzésére, hogy új felismerésekre juthassanak az élettartamot befolyásoló LED-szintű tényezőkről. Az elemzés részletes képet ad a fényáram-tartásról és a színeltolódási viselkedésről számos gyártó különböző felépítésű és konstrukciós anyagú LED-termékére. A tanulmány megállapította, hogy a chip- és csomag-szintű konstrukciós anyagoknak közvetlen hatása van a LED-ek hosszú távú teljesítőképességére.

A különböző LED-csomag kiviteleknek (részletesen l. az 5.3.2. fejezetben) a konstrukciós anyagoktól és a gyártási eljárás-

soktól függően különböző sajátos, „veleszületett” jellemzőik vannak. A közepes teljesítményű LED-eknek általában gyorsabb a fényáram-degradációja, mint a nagyteljesítményűeké. A fényáram gyorsabb csökkenését főként a közepes teljesítményű LED-ekhez használt műgyanta test degradációja okozza, míg a nagyteljesítményű LED-eknél stabilabb kerámia hordozót alkalmaznak. A közepes teljesítményű LED-ekhez legáltalánosabban használt műanyag a hőre lágyuló polifitalamid (PPA) műgyanta. Magas hőmérsékleten és hosszú üzemelés után a tokozóanyagok elszíneződhetnek, megrepedezhetnek vagy rétegződhetnek, ami fényáram-csökkenéshez és színeltolódáshoz vezet, amint az az 5.19 ábrán látható.

A különböző minőségű műgyantáknak különböző a fényáram-degradációs viselkedése, amint azt az 5.20 ábra mutatja. A tökéletesített műgyanták – pl. az EMC epoxi öntő kompozit – csökkenthetik a hagyományos közepes teljesítményű LED-ekkel összefüggő termikus megszorításokat. Az EMC műgyanta alapú közepes teljesítményű LED-ek jobban ellenállnak a degradációnak, mint a PPA alapúak, és magasabb üzemi hőmérsékletekhez alkalmasak. Az 5.20 ábra összehasonlítja a PPA és EMC műgyantát használó tipikus közepes teljesítményű LED-csomagok fény-

áram-degradációját a kerámia hordozóra épülő tipikus nagyteljesítményű LED-ekével.

Színeltolódás

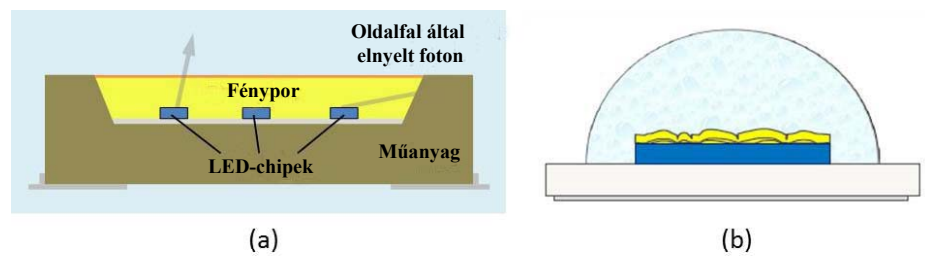
Noha a fényáram-tartás fontos, a LED-csomagok másfajta paraméterhibáit sem szabad figyelmen kívül hagyni. A színeltolódás például bizonyos alkalmazásoknál károsabb lehet, mint a fényáram-csökkenés, azonban nehezebb megjósolni. Eddig a színeltolódás mennyiségi megadására a legjobbnak a $\Delta u'v'$ bizonyult, amely megadja a színeltolódás nagyságát a CIE 1976-os színdiagramjában (u' , v'). A $\Delta u'v'$ -a színhőmérséklet és a Duv eltolódásait foglalja magában (Duv = a feketetést u-v színhelyétől mért távolság), de nem adja meg az eltolódás irányát, csak a nagyságát.

Az a pont, ahol a színeltolódás már észrevehetővé válik, az alkalmazástól függ. Ha a színváltozás lassan, igen hosszú idő alatt (pl. 25 000 óra alatt) következik be, az nem kifogásolható feltéve, ha valamennyi fényforrás azonos mértékű és azonos irányú színeltolódást szenved. Sajnos, jelenleg nem áll rendelkezésre szabványos módszer a színtabilitás előrejelzésére az LM-80 mérési adatok felhasználásával.

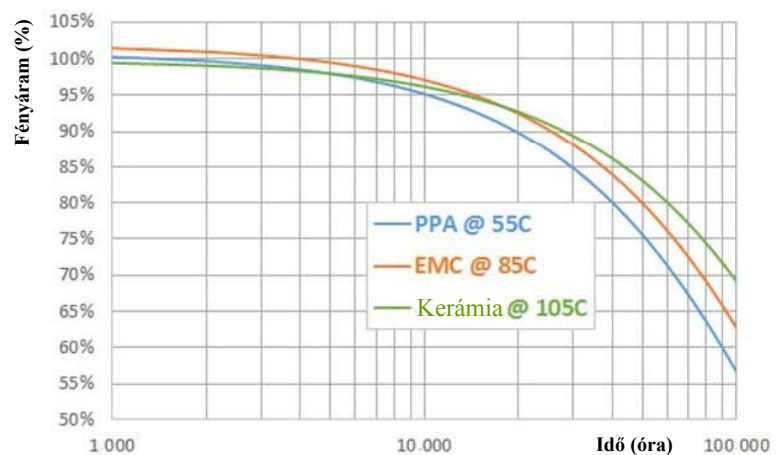
A LED-ek színpont-stabilitását befolyásoló tényezők közé tartoznak a fénypor, az emitter és a tokozóanyagok öregedés okozta változásai. Az emitterek sugárarama idővel csökkenést mutathat; a fényporoknál a kvantumhatásfok csökkenhet vagy eltolódások léphetnek fel az emissziós spektrumban az oxidáció következtében, a tokozóanyagok pedig megrepedezhetnek, oxidálódhatnak és elsárgulhatnak, vagy megváltozhat a törésmutatójuk. A magasabb hőmérsékletek felgyorsítják ezeket a nagyobb színeltolódáshoz vezető degradációs mechanizmusokat, amint az az 5.21 ábrán látható, de a színeltolódás nagysága a hőmérséklet függvényében változni fog a tokozóanyagok és a gyártási folyamatok változtatásával.

A színeltolódás irányát a tokozóanyagban bekövetkező domináns degradációs mechanizmusok befolyásolják, amelyek viszont a tokozóanyagoktól és a konstrukciós módszerektől függenek. A sárga, kék és zöld színek irányába történt színeltolódásokat a CIE 1976-os színdiagramjának felhasználásával az 5.22 ábra mutatja.

A fénypor berepedezhet és rétegződhet, amint az az 5.19b ábrán látható, és eltolódást okozhat a spektrum sárga színe felé a fényporon áthaladó kék fotonok által megtett út megnövekedése miatt. Ez a LED-csomag állandósult sárga eltolódása (l. az 5.23 ábrát) a határoló színeltolódási



5.19 ábra – (a) oldalfal elszíneződését és (b) fénypor rétegfelválását mutató LED-csomag sematikus képe (Forrás: Monica Hansen: *Strategies in Light*, Las Vegas, Észak-Karolina, 2015. febr. [94])



5.20 ábra – Tipikus közepes teljesítményű, PPA és EMC műanyag-hordozós és nagyteljesítményű, kerámiahordozós LED-csomagok fényáram-degradációja (Forrás: Monica Hansen: *Strategies in Light*, Las Vegas, Észak-Karolina, 2015. febr. [94])

mechanizmus a nagyteljesítményű LED-csomagoknál.

A közepes teljesítményű LED-csomagok műgyantájának elszíneződése (5.19a ábra) nemcsak a fényáram csökkenését okozza a LED-csomag oldalfalai által elnyelt fény miatt, hanem színeltolódáshoz is vezet. Az oldalfalaknak ütköző fotonok hosszabb utat tesznek meg a fényporon keresztül és végül melegebb színhőmérsékletű lesz, mint azoknak a fotonoknak, amelyek a LED felső felületét visszaverődés nélkül hagyják el. Amint az oldalfal elszíneződik, a melegebb fehér komponenst adó fotonok egyre nagyobb mértékben abszorbeálódnak, ami a kék szín irányába történő eltolódást eredményez, amint a rövidebb utat megtevő (hidegebb fehér) fotonok dominánssá válnak.

Az RTI International által végzett gyorsított élettartam-vizsgálatokat (ALT) felhasználó kísérleti tanulmányok betekintést nyújtottak a LED-csomagok tokozóanyagának a színpont-stabilitásra kifejtett hatásába. Magas hőmérsékletű, nedves üzemi élettartam-vizsgálatot (WHTOL) végeztek nagyteljesítményű LED-eken 85 °C-os hőmérséklet és 85% páratartalom beállításával. A meleg fehér LED-eknél 3500 órás gyorsított élettartam-vizsgálat után volt

látható színeltolódás, amely a vörös/narancssárga tartomány emissziós spektrumában bekövetkezett jelentős változásnak volt köszönhető, amelynek során a fő csúcs 610nm-ről kb. 580nm-re tolódott el, amint az az 5.24 ábrán látható.

A tanulmány arra a következtetésre jutott, hogy a spektrális eltolódást a vörös fénypornak a WHTOL tesztelésnél jelenlévő nedvesség oxigéntartalma miatti degradációja okozta, aminek következtében a vörös emisszió hullámhosszának csúcsa a rövidebb hullámhosszak felé tolódott el. A rövidebb hullámhosszúságú vörös emisszió végül is azt okozta, hogy a meleg fehér LED-emisszió a zöld spektrális tartomány irányába tolódott el.

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

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

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

A lámpatestek megbízhatósága

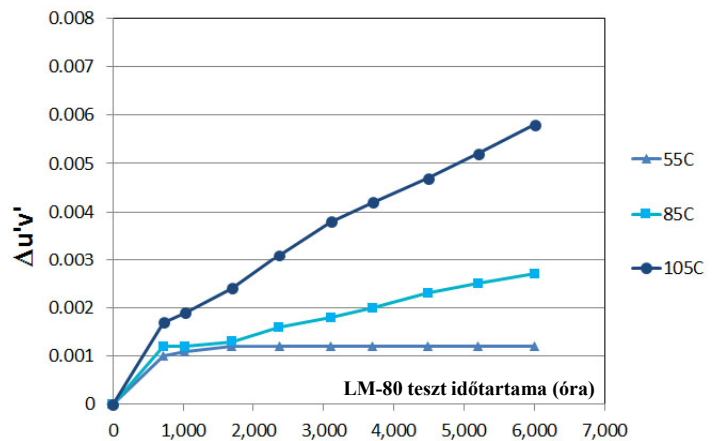
Az élettartam végét minden világítási technológiánál a fénycsökkenés jelzi, ami azonban a LED-es lámpatesteknél kevésbé nyilvánvaló lehet. A LED-ek 50 000 óráig vagy még tovább képesek fényt emittálni, a kibocsátott fény azonban folyamatosan halványul, vagy a szín tolódik el lassan – elképzelhetően egy olyan pontig, ahol a kis fényáram vagy az elfogadhatatlanul nagy színeltolódás gyakorlati meghibásodásnak minősül. Ez a paraméter-típusú meghibásodás függ a rendszer konstrukciójától és attól, hogy az hogyan csökkenti a hőnek a LED fényforrásokra és az elektronikus komponensekre kifejtett hatását

Amikor a LED-lámpákkal összeépített lámpatestek megjelentek a piacon, először azt gondolták, hogy a LED-csomagoktól származó LM-80 tesztadatokból az integrált termék degradációs jellemzőit is meg lehet jósolni. Ma már a további kutatás eredményeként tudjuk, hogy az elektronika vagy a meghajtó meghibásodása, vagy az optikai komponensek degradációja gyakran jóval azelőtt bekövetkezhet, mielőtt a LED-ek fényáram-csökkenése meghibásodást okozna. Emiatt a hasznos élettartamot nehéz ellenőrizni. Az első kihívás annak meghatározása, hogy hogyan definiálható a rendszer meghibásodása:

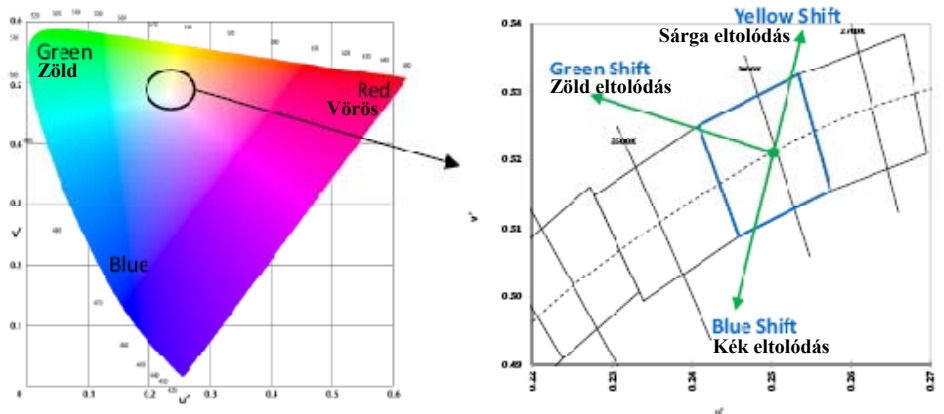
- csak ha garanciális igényt generál?
- nem elégtí ki a DLC, Energy Star vagy CA Title 24 követelményeit?
- eltolódtak a teljesítőképességi paraméterek?
- megnövekedett a feszültség-ingadozás vagy villogás?
- lecsökkent a fényhasznosítás?

A hiba meghatározása mellett meg kell állapítani a rendszer meghibásodásának az okát – megnövekedett hőmérsékletek, hőciklusok, feszültség-lökések, ismétlődő kapcsolgatás stb. Hogyan lehet ezeket a rendszerhibákat leutánozni „észszerű” idő alatt hibaeloszlás készítése érdekében? Sok gyártó kidolgozott szabadalmaztatott eszközöket saját konstrukcióik termék-élettartamának megbecsléséhez a legfontosabb komponensek – LED-csomag, meghajtó és optikai összetevők – adatainak felhasználásával, ami lehetővé teszi az egész lámpatest teljesítőképességének meghatározását. Noha léteznek ilyen gyakorlatok bizonyos gyártósorokra és alkalmazásokra, jelenleg nincs az egész ipar által elfogadott protokoll.

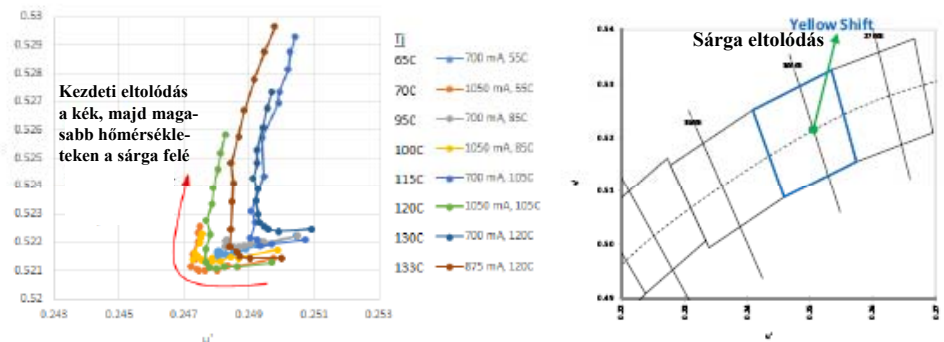
A LED-rendszerek Megbízhatósági Konzorciuma (LSRC) 2014-ben publikált egy tanulmányt „LED-es lámpatestek élettartama: Javaslatok a tesztlésre és riport-



5.21 ábra – LED-csomagok színeltolódása a hőmérséklet függvényében
(Forrás: Monica Hansen: *Strategies in Light*, Santa Carla, Kalifornia, 2016. márc. [95])



5.22 ábra – A LED-csomagok színeltolódási irányai az 1976 A CIE 1976-os színháromszögében
(Forrás: Monica Hansen: *Strategies in Light*, Santa Carla, Kalifornia, 2016. márc. [95])



5.23 ábra – Nagyteljesítményű LED-csomag állandósult sárga eltolódást mutató színeltolódása
(Forrás: Monica Hansen: *Strategies in Light*, Santa Carla, Kalifornia, 2016. márc. [95])

készítésre (harmadik kiadás)” címmel, amelyben felülvizsgálták azokat a tanulmányokat, amelyeknek célja a potenciális hibamechanizmusok meghatározása, és további adalékokkal szolgál a termék-élettartam tisztázásához [96].

Néhány erősen felgyorsított többváltozós tesztet és más rendelkezésre álló adatot vettünk alapul annak kiderítéséhez, hogy mely meghibásodások lehetnek jelentősek és hogyan lehetne azokat felgyorsítani. A hibamechanizmusokkal kapcsolatos infor-

mációk némelyike egy olyan, erősen felgyorsított teszt-sorozatból származik, amelyet az RTI International korlátozott számú termék-mintán végzett el. Származnak

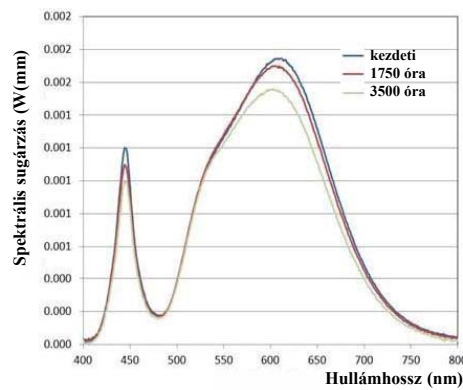
[95] M. Hansen: „Package Impact on Color Shift in LEDs”, *Strategies in Light*, Santa Carla, Kalifornia, 2016. márc.

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

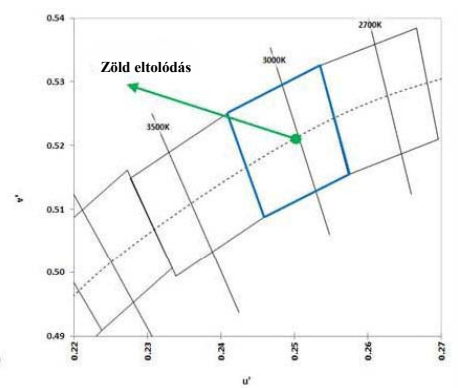
információk a Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) által a Philips L-Prize díjat nyert LED-es Alamp-jén végzett tesztből is. A szisztematikus, helyszíni adatok ritkák (és a jelentett hibák irányába mutatnak), és nem adnak további betekintést azokra a területekre, amelyekre nagyobb figyelemnek kellene irányulnia. Kaptunk információkat az LSRC tagjaitól is, amelyek segítettek a fontos hibamechanizmusokkal kapcsolatos diszkussziókban. Az LSRC tagjai által leggyakrabban megfigyelt hibamódokat az 5.25 ábra foglalja össze.

A LED-meghajtók és azok komponensei jelentős mértékben járulnak hozzá a meghibásodásokhoz. A meghajtó meghibásodásainak fő okozójaként általában az elektrolitkondenzátort tekintették, noha az elmúlt években kiderült, hogy a meghajtó sok egyéb komponense is meghibásodhat. Az 5.26 ábra 15cm átmérőjű LED-es mélysugárzó meghajtó komponenseinek meghibásodásait tekinti át, ami azt mutatja, hogy a meghajtó sokféle elektromos alkatrészre képes meghibásodni.

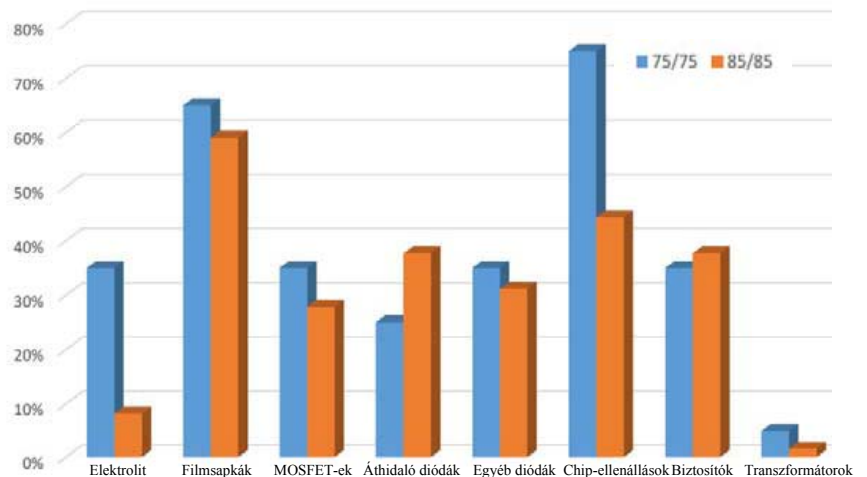
Habár nem tekintették a legnagyobb megbízhatósági problémának ebben a felmérésben, a színeltolódás igazi kihívás marad, mivel a színeltolódási mechanizmusok egyedülállóak a LED-es világítástechnikai iparban, s nincs másik olyan iparág, amelytől át lehetne venni kidolgozott eljárásokat. A gyorsított tesztek fentiekben kiemelt eredményei kapcsán nagyobb gondot fordítanak a színeltolódásnak a hasznos élettartamot korlátozó hatására olyan termékcsoportoknál és alkalmazásoknál, amelyeknél a szín fontos. Ennek megfelelően továbbra is hangsúlyt kell fektetni a színeltolódás okainak megértésére és olyan módszerek kidolgozására, amelyekkel meg lehetne jósolni a teljesítőképességre kifejtett hatásukat.



5.24 ábra – 75 °C-on és 75% relatív páratartalom mellett végzett gyorsított teszt azt mutatja, hogy a vörös fényfor hullámhossza 3500 óra elteltével 610nm-ről 580nm-re tolódik el, ami általános zöld eltolódást okoz (Forrás: Monica Hansen: *Strategies in Light*, Las Vegas, Észak-Karolina, 2015. febr. [94])



5.25 ábra – A megfigyelt legáltalánosabban előforduló meghibásodások LSRC Member Survey (Forrás: Next Generation Lighting Industry Alliance LED Systems Reliability Consortium, 2014. szept. [96])



5.26 ábra – A meghajtó komponenseinek meghibásodása 15cm átmérőjű mélysugárzók esetén 75°C-os hőmérséklet és 75% relatív nedvességtartalom (kék), illetve 85°C-os hőmérséklet és 85% relatív nedvességtartalom (narancssárga) mellett végzett gyorsított teszt esetén (Forrás: Lynn Davis, RTI International, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, Kalifornia, 2015. jan. [97])

6.0 Az OLED-technológia helyzete

Az elmúlt néhány évben több nagy teljesítőképességű panel vált hozzáférhetővé. 2014-ben az áttörések közé tartoztak a többlépcsős OLED-struktúrákon alapuló, nagy fényerősségű panelek (a Philipstől), a javított színminőség és élettartam (az LG Chem-től) és a rugalmas panelpéldányok (szintén az LG Chem-től) [98, 99]. Közben a kilolumenenként ár drasztikusan csökkent 200 USD/klm körülire. Noha számos technikai fejlesztés történt, 2015 többnyire az ágazat átalakításának és konszolidálásának az éve volt. 2014-et követően a Panasonic kivonult az OLED-világítás területéről, az LG Display megvásárolta az LG Chem OLED-világítási üzletágát és a Philips OLED-világítási részlegét eladta az OLED Works-nek [100, 101, 102]. Ráadásul az Osram – annak ellenére, hogy 2014-ben piacra dobta a 3000 cd/m² mellett 65 lm/W fényhasznosítást mutató és 15 000 órás L70 élettartamú ORBEOS SDW-058+ paneljét, újabban az általános világítási alkalmazások helyett inkább a gépjárművilágításra alkalmas OLED-ekre fókuszál [103, 104]. Más cégeknél késlekedés volt tapasztalható a gyártás terén. A nanjingi First O-Lite-nál a tömeggyártás további töké és a kínai vevők utáni keresés miatt tolódott, a Konica Minolta tokiói nagykapacitású gyártósoráról sem jelentettek termékspecialitásokat vagy jelentős eladásokat. Noha a termék-teljesítmény (fényhasznosítás, élettartam, szín) és a költségmutatók nem jeleztek drasztikus javulást az elmúlt években, a gyártási kihozatal és a termék-megbízhatóság terén mutatkozott előrehaladás – az OLED-es projekteket most harmadik fél teszteli teljesítőképességük kiértékelése érdekében. Az egyik ilyen tesztelés a gateway átjárókkal kapcsolatosan az Aurora Lighting Design-nak az Illinois-álambeli Grayslake-ben lévő telepén folyik [105].

Amíg a panelek gyártástechnológiája nagyjából változatlan maradt, jelentős fejlődés volt tapasztalható az alapvető K+F terén, megnyitva ezzel az utat a jövő fejlesztései előtt. Az OLED-anyagokkal kapcsolatos K+F tevékenység olyan területeken vezetett eredményekre mint a termikusan támogatott késleltetett fluoreszcencia, az indium-mentes emitterek és az alternatív átlátszó vezetőanyagok. A belső fénykinyeréses megközelítéseket jól megtervezték, és folyamatban van ezeknek a paneltermékekbe történő integrálása. Megnőtt az érdeklődés a hajlítható vagy rugal-

mas (üveg vagy műanyag) hordozók iránt, és a rugalmas struktúrákhoz alkalmas barrier(gát)-filmek egyre megbízhatóbbakká válnak.

Az elmúlt évek során a gyártással kapcsolatos fejlesztések is a középpontba kerültek. Ezen a területen elengedhetetlenek a további erőfeszítések az OLED-panelek árának csökkentéséhez a piaci elfogadási szintek növelése érdekében. Különösen a lámpatestgyártók számítanak tízszeres kihozatal-javulásra a panelek költségeinek csökkentéséhez és megbízhatóságuk növeléséhez a vevői elvárások kielégítése érdekében. A jobb vastagságmérési módszerek kidolgozásához költség-hatékony tömörség- és szemcsesökkentési stratégiák vizsgálata folyik. A gyártási módszerek javításával együtt olyan alternatív OLED-rétegekkel kapcsolatos vizsgálatokat is végeznek, amelyek egyszerűsíthetik a gyártási folyamatot a rétegek számának csökkentésével vagy a folyamatnak a gyártási feltételekre kevésbé érzékenyebbé tételével (pl. robusztusabb anyagokkal, egyszerűbb rétegezés-sel, egyetlen fehér-emitteres eszközökkel stb.). Végezetül, növekszik az érdeklődés a roll-to-roll leválasztási folyamatok mint további költségcsökkentési lehetőségek iránt is.

6.1 A technológia helyzete

Ez a fejezet az OLED-panelek és az OLED-es lámpatestek teljesítőképességeit ismerteti a fényhasznosítás, az élettartam és a színminőség vonatkozásában. Mindegyik teljesítőképességi kritériumot külön-külön fogjuk tárgyalni, és kitérünk a technikai kihívásokra és célokra is. A teljesítőképességi célokat összevetjük a jelenlegi adatokkal a fényhasznosítással kapcsolatos kompromisszumok illusztrálására, amelyek a megkívánt élettartam, színminőség és egyedi formatervezők realizálásához szükségesek.

Fejlesztés alatt vannak azok a jellemzők, amelyek megkülönböztetik az OLED-eket a többi hatékony fényforrástól, és az OLED termékínálat folyamatosan bővül. A következő fejezetekben pillanatképet adunk a termékek elérhetőségéről és a közeljövő lámpatestjeinek trendjeiről.

6.1.1 Az OLED-panelek fényhasznosítása

A panelek hatásfoka stagnált az elmúlt néhány év során. 2014-ben a Konica Minolta bemutatott egy 15 cm²-es panelt, amelynek 1000 cd/m²-en 139 lm/W, 3000 cd/m²-en pedig 126 lm/W volt a fényhasznosítása [106]. A kezdeti értékhez képesti

50%-os fényáramcsökkenés (L50) a Konica Minolta paneljei esetében kb. 55 000 óra volt 1000 cd/m²-en működtetve azokat. A Panasonic 133 lm/W-ot ért el egy nagyobb, 100 cm²-es panellel, amelynek L50-es élettartamáról 100 000 óránál nagyobb értéket közöltek 1000 cd/m² esetén – ez kb. 10 000 órás L70-es értéknek felel meg 3000 cd/m²-es működtetés esetén [107]. 2016 elején azonban még nem volt kapható olyan kereskedelmi panel, amely meghaladta volna az LG Chem 2013-ban kínált első paneljei 60 lm/W-os értékét. A késlekedés oka részben a belső fénykivonási megoldások alkalmazásának nehézségei okozzák. A panelek külső fénykivonó filmeket használnak, amelyek a fénykivonási hatásfokot mintegy 1,6-szeresére képesek megnövelni.

[97] L. Davis: „Accelerated Life Testing Results for SSL Luminaire Electronics”, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, Kalifornia, 2015. jan. http://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/davis-l_reliability_sanfrancisco2015.pdf.

[98] LEDs Magazine: „Philips Delivers Brighter OLED panels, Drives Cost Down (UPDATED)”, 2014. okt. 14. (<http://www.ledsmagazine.com/articles/2014/10/philips-delivers-brighter-oled-panelsdrives-cost-down.html>)

[99] LG Chem: „LG Chem Exhibits the World's Top Performing OLED Light Panels at Light and Building 2014”, 2014. ápr. 1. (<http://www.lgchem.com/global/lg-chem-company/informationcenter/press-release/news-detail-623>).

[100] LEDinside: „Panasonic to Shutdown OLED Business”, 2014. ápr. 1. (http://www.ledinside.com/news/2014/4/panasonic_to_shutdown_oled_business)

[101] OLED-info: „LG Display Acquires LG Chem's OLED Lighting Business”, 2015. okt. 19. (<http://www.oled-info.com/lg-display-acquires-lg-chems-oled-lighting-business>)

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

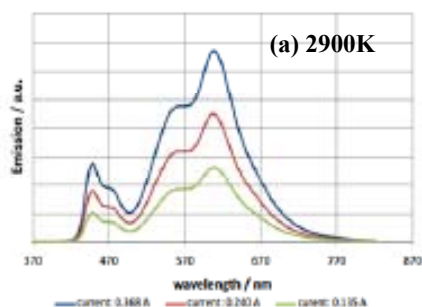
[103] T. Reusch: „OLED for Automobile Applications”, DOE SSL R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016. febr. (http://energy.gov/sites/prod/files/2016/02/f29/reusch_application_raleigh2016.pdf)

[104] Osram: „ORBEOS SDW-058+: The Next Step to General Lighting”, 2014. (<http://www.osram-oled.com/oled/en/products/orbeos-sdw-058-plus/index.jsp>)

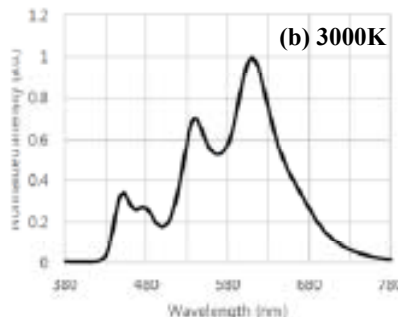
[105] DOE SSL Program: „GATEWAY Demonstrations: OLED Lighting in the Offices of Aurora Lighting Design, Inc.”, 2016. márc. (http://energy.gov/sites/prod/files/2016/04/f30/2016_gateway_auroraole.pdf)

[106] OLED-info: „Konica Minolta break their own record with world's most efficient OLED panel (139 lm/W)”, 2014. jún. 7. (<http://www.oled-info.com/konica-minolta-break-their-own-record-worlds-most-efficient-oled-panel-139-lmw>)

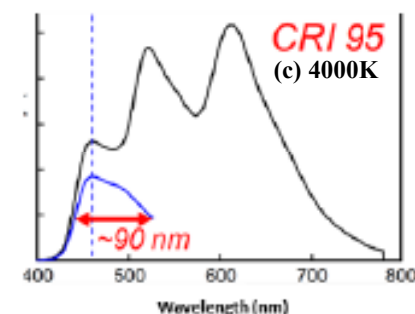
[107] T. Komoda: „Key Technologies for Realization of High Efficient White OLED for Lighting Application”, China International OLEDs Summit, Shanghai, China, 2015. jan.



Philips: CRI 80, R9 0, LER 330lm/W



LG Chem: CRI 89, R9 31, LER 328lm/W



Panasonic: CRI 95, R9 77, LER 300lm/W

6.1 ábra – Kereskedelmi és laboratóriumi OLED-panel spektrális fényeloszlása
(Forrás: (a) OLEDWorks FL300 adatlap, 2016 [111]; (b) LG Display OLED Light User Guide, 2015 [112]; (c) T. Komoda: „Overview of White OLED Technologies for Lighting Application”, *Printed Electronics USA*, 2014. nov. [110])

Laboratóriumi körülmények között már bemutatott olyan belső fénykivonási technikákat, amelyek a kivonást 2,0...2,2-szeresére tudják megnövelni, de ezeknek az eszközöknek az integrálása a kihozatal és a teljesítőképesség negatív befolyásolása nélkül komoly kihívás. A fényhasznosítás javulása a kereskedelmi paneleknél várhatóan tovább javul 2016-ban. Az LG Display bejelentette, hogy az üvegalapú tokozással ellátott, 2mm vastagságú, nagy fényhasznosítású paneljei most már tömeggyártásban készülnek. Ezeknek a paneleknek 90 lm/W a fényhasznosítása 2700K, illetve 85 lm/W 4000K színhőmérséklet esetén [108]. 2016 harmadik negyedévében kaphatók lesznek vékonyfilmmel vagy fémfóliával tokozott vékonyabb panelek, amelyeknek 70-75 lm/W lesz a fény-

hasznosítása. Az OLEDWorks tervezi a Brite 2 FL300 család piacra dobását, amelynek tagjai 3000K színhőmérséklettel, kitűnő színminőséggel (CRI>90 és R9>50) és 60 lm/W-nál nagyobb fényhasznosítással készülnek 2016 harmadik negyedévének végétől [109].

A következő részekben körvonalazzuk azokat a tényezőket, amelyek meghatározzák a panelek fényhasznosítását. Közzöljük az OLED-es világító panelek gyakorlati teljesítőképességi limitjeit is, és mérőföldkövet jelölünk meg, amelyek számításba veszik a fényhasznosítással, a színminőséggel és az élettartammal kapcsolatos kompromisszumokat..

Spektrális hatások

Az OLED-ek fehér fényét két vagy három különböző szint kibocsátó emitter állítja elő. Az emitterek relatív fénysűrűségét úgy kell megválasztani, hogy jó színminőség és nagy fényhasznosítás adódjék, és a rétegvastagságnak egyformának kell lennie a panel egészére érvényes jó szintartás érdekében. A 6.1(a) és (b) ábra az OLEDWorks (korábban Philips FL300) és az LG Display (korábban LG Chem) kereskedelmi paneljeinek spektrumát mutatja, a 6.1(c) ábrán pedig a Panasonic egyik laboratóriumi paneljének spektruma látható. A Panasonic paneljének 460 nm-es csúccsal és 90 nm-es FWHM-mel (teljes szélesség a maximum felénél) rendelkező kék emittora van [110]. Az OLED-eknek a fényporkonverziós pc-LED-ekéhez hasonlóan viszonylag széles vörös emissziós vonalszélessége miatt kompromisszumra van szükség a színminőség és a fényhasznosítás között. Ez az összehasonlítás azt mutatja, hogy vannak kompromisszumok a fényhasznosítás és a színminőség között, amelyeknek gyakran 10% nagyságrendjébe eső LER-csökkenés (LER = sugárzás fényhasznosítása) a büntetése az élénk vörösökkel jellemezhető (nagy R9 értékű) kitűnő színvisszaadás biztosítása esetén. Az OLED-eknél az ideális LER 360 lm/W-nak tételezhető fel, ezért a 6.1 ábrán bemutatott példák spektrális hatásfoka 85 és 92% közé esik.

A keskenyebb sávzélességű vörös emitterek segíthetnének csökkenteni a fényhasznosítási problémát a jobb színminőségű eszközök esetén. Az anyagfejlesztők fontolgatják a kék emissziós spektrumok „hozzászabását” is az eszközök fényhasznosításának növelése érdekében. A kiemelő fényt adó alkalmazásokhoz „mélykék” emitterekre van szükség, ezek az emitterek azonban hajlamosak a rövidebb élettartamra, ezért a mélykék emissziós profilra

az OLED-es világítási alkalmazásokhoz nincs szükség. Az OLED-es világítástechnikai ipar természetes tendenciát mutat arra, hogy azt használja, ami a kiemelő fényt adó iparágtól rendelkezésre áll, ahol a K+F alapok támogatni tudják az anyagok intenzív igényre szabását, de lehet, hogy itt az idő az OLED-es világítási eszközök fényhasznosításának növelésére az emitterek spektrumának hozzáigazítása segítségével.

Elektromos hatások

Az elektromos hatások az emittált fotonok átlagos energiájának és a töltéshordozóknak az eszközbe való injektálásához szükséges energiájának a hányadosa. A tényező több összetevőből áll:

- injekciós és ohmos veszteségek, amelyek az áramnak az elektródáktól a fotonokat létrehozó rekombinációs tartományba történő haladásakor lépnek fel;
- ohmos veszteségek, amelyek az áramnak a panel felületén, az anód- és katódstruktúrák mentén történő eloszlásakor keletkeznek;
- Stokes-veszteségek.

A fotonok átlagos energiája enyhén változást mutat a korrelált színhőmérséklet és a spektrum más részleteinek változásával, mindenesetre a meleg fehér fény esetén 2,25 eV körüli. Ideális körülmények között ahhoz, hogy a spektrumot kb. 450 nm-re kiszélesítsük a kék tartományban, megközelítőleg 2,8V minimális meghajtófeszültségre van szükség. A meghajtófeszültségnek elég nagyra kell lennie a megkívánt áramsűrűség létrehozásához, amely egyrétegoszoros felépítésű eszköz esetén néhány A/cm².

Az egymásra épített eszközöknél nagy, 80% körüli elektromos hatásfok figyelhető meg. Vannak azonban olyan kompromisszumok a struktúra tervezésekor, amelyek módosítják az elektromos hatásfokot. A tandem struktúrájú eszközök nagyobb elektromos hatásfokot eredményezhetnek, mivel a különböző szerves anyagok vezetőképességét be lehet állítani úgy, hogy a feszültségesés az alacsonyabb

[108] LG Display: „LG Display OLED Light Catalog”, 2016 (http://www.lgoledlight.com/resources/LG_Display_OLED_light_Catalogue.pdf)

[109] OLEDWorks: „Brite 2 Shines”, 2016. márc.. (<https://www.oledworks.com/products/brite-2/>)

[110] T. Komoda: „Overview of White OLED Technologies for Lighting Application”, *Printed Electronics USA*, Santa Clara, Kalifornia, 2014. nov.

[111] OLEDWorks: „Lumiblade OLED Panel Brite FL300 ww Datasheet”, 2016. ápr. (<https://www.oledworks.com/wp-content/uploads/2016/04/Datasheet-Lumiblade-OLED-Panel-Brite-FL300-ww-1.pdf>)

[112] LG Chem: „OLED Light Panel: User Guide v1.0.” (http://www.plusopto.co.uk/cms/uploads/LG_Chem_OLED_Light_User_Guide.pdf)

energiájú emissziós réteg(ek)en kisebb legyen, mint a kéken, ami minimalizálja a Stokes-veszteségeket. A további anyag-interfészek azonban ohmos veszteségeket okozhatnak az eszközben. Ezért gondos tervezésre és anyagválasztásra van szükség a tökéletesítések realizálásához.

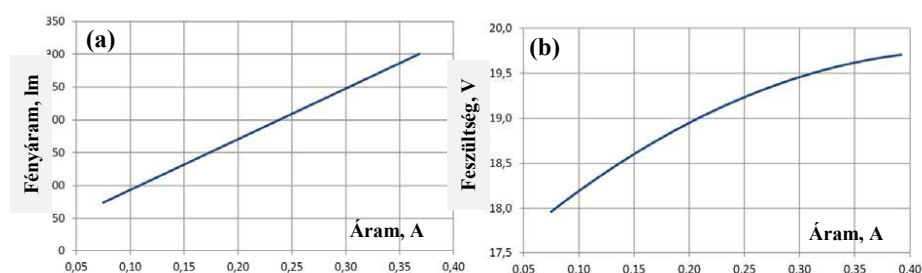
Az OLEDWorks hatréteges struktúrájú, 105 cm²-es emissziós felületű FL300-as paneljének adatai betekintést nyújtanak a fénysűrűség áram- és feszültség-függésébe. A 6.2(a) ábra azt mutatja, hogy a fényáram lineárisan változik az árammal. 0,12 A-nél kisebb áram esetén 10 kl/m² fénysűrűség érhető el. A 6.2(b) ábra pedig azt mutatja, hogy ez az áram 18,2 V meghajtófeszültséggel érhető el, ami rétegenként alig haladja meg a 3 V-ot, és így 74% hatásfokot eredményez.

Az FL300 igen nagy – 8300 cd/m² – fénysűrűség mellett működtetésre készült, amellyel 0,368 A esetén 300 lm érhető el [111]. A 100-ról 300 lm-re történő növekedés 12%-os hatásfok-csökkenéshez vezet. A meghajtófeszültség 18,2-ről 19,7 V-ra megkívánt növelése 8%-kal járul hozzá a hatásfok-csökkenéshez. Így az áramnak fénnyé történő átalakítása ezeknél a fluoreszkáló kék emittereket használó paneleknél csak 4%-kal csökken.

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 „fogadó” anyaggal párosítanak, amely kontrollálja a töltéstranszportot.

A fluoreszkáló emitterekben a triplett állapotból történő emisszió hiánya rendszerint 25% körüli korlátozza a belső kvantumhatásfokot a szingulett/triplett állapotok viszonya miatt. A triplett-triplett megsemmisülés azonban triplett-fúziót eredményezhet, amelynél további szingulett-excitonok formálódhatnak, ezért 40%-os belső kvantumhatásfokot is megfigyeltek már [113]. Viszont a foszforeszkáló molekulák közel 100%-os belső kvantumhatásfokot is mutattak. A fő probléma a foszforeszkáló molekulák kihasználásánál a stabilitás, gerjesztési energiájuk ui. sokkal hosszabb ideig fennmarad, mint a fluoreszkáló rendszereknél (jellemzően mikroszekundumokig nanoszekundumokig helyett). Ez az



6.2 ábra – A fényáram (a) és a meghajtófeszültség (b) áramfüggése (Forrás: OLEDWorks FL300 adatlap, 2016 [111])

energia átirányíthat más, sugárzással járó folyamatokhoz, ami csökkenti a belső kvantumhatásfokot és károsíthatja a rendszert, rövidebb élettartamokat és gyorsabb fényáram-degradációt okozva nagy fénysűrűség-szinteken történő működtetésnél. 15 évnyi kutatómunka eredményeként a vörös és zöld foszforeszkáló emitterek élettartama olyan szintekre emelkedett, amely már elegendő a legtöbb alkalmazáshoz. A nagyobb energiájú foszforeszkáló kék emitterek élettartama azonban továbbra is problémás. Ezért a legtöbb panelgyártó hibrid rendszereket használ, amelyekben stabil, alacsony belső kvantumhatásfokú kék fluoreszkáló emittereket vörös és zöld foszforeszkáló molekulákkal kombinálnak.

A University of Michigan és a University of Southern California kutatói olyan egyedi megközelítéssel dolgoznak, amely csökkenti a nagyobb fényerősségeknél megfigyelt fényhasznosítás-csökkenést. Amint azt a fentiekben említettük, a foszforeszkálás-esés hozzájárul a töltéshordozók egyensúlyának felborulásához és az exciton-kölcsönhatásokhoz (triplett-polaron és triplett-triplett kioltáshoz). Az ilyen kölcsönhatások „forró” polaron állapotot hoznak létre az adalék- vagy fogadó-anyagon, amely viszont degradációhoz vezet. Az emissziós tartományt „menedzser” anyaggal dopolva – amely befogja és hatástalanítja ezeket a forró polaronokat – növelhető az élettartam [114].

A kis szingulett-triplett elválasztású fluoreszkáló emitterekben a triplett-állapotból szingulett-állapotba történő termikusan aktivált felfelé konvertálás késleltetett fluoreszcenciát hozhat létre, amely nagy (akár 100%-os) belső kvantumhatásfokot eredményezhet, de túl korai még megmondani, hogy ez a jelenség a gyakorlatban felhasználható-e a rendszerek hatásfokának és élettartamának növelésére. A Kyushu University Japánban már végez K+F munkát termikusan aktivált késleltetett fluoreszcenciával (TADF) kapcsolatosan. Az egyetlen kutatói az eltelt néhány évben jelentős mértékben támaszkodtak a TADF-re a po-

tenciális OLED-alkalmazások demonstrálására. Legutóbb zöld TADF emitterek élettartamának nyolcszorosára történt növelését demonstrálták a lyuk-blokkoló réteg egyik oldalára vékony 8-hidroxi-kvinolinatolitium (Liq) rétegek felvitelével [115, 116]. Ezek a járulékos rétegek lehetővé teszik az elektronok transzportját az emitterbe, közben megakadályozva, hogy a lyukak kilépjenek az eszközből azelőtt, hogy hozzájárulnának az emisszióhoz. A Seoul National University kutatói 9-((6-fenil-1,3,5-triazin-2,4-diil)bis(benzen-5,3,1-triil))tetrakis(9Hkarbazol) (DDCzTrz) elnevezésű kék TADF anyagban mutattak ki élettartam-növekedéseket stabil karbazol donor és triazin akceptor komponens felhasználásával. A nagy adalékanyag-koncentrációnál adódó optimalizált töltéshordozó-egyensúly mellett nagy max. 19%) kvantumhatásfokokat jelentettek [117]. Egy másik cég, a Cynora vörösréz-alapú emitterekre fókuszálva dolgozik TADF anyagokkal [118].

[113] Y. Kondakov, T. D. Pawlik, T. K. Hatwar és J. P. Spindler: „Triplet annihilation exceeding spin statistical limit in highly efficiency fluorescent organic light emitting diodes”, *Journal of Applied Physics*, vol. 106, no.124510, 2009.

[114] M. Thompson: „OLED Materials”, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, Kalifornia, 2016. febr. (http://energy.gov/sites/prod/files/2016/02/f29/thompson_oledmtrl_raleigh2016.pdf)

[115] T. Furukawa, H. Nakanotani, M. Inoue és C. Adachi: „Dual Enhancement of Electroluminescence Efficiency and Operational Stability by Rapid Upconversion of Triplet Excitons in OLEDs”, *Scientific Reports*, vol. 5, no. 8429, 2015

[116] H. Nakanotani, K. Masui, J. Nishide, T. Shibata és C. Adachi: „Promising Operational Stability of High-Efficiency Organic Light-Emitting Diodes Based on Thermally Activated Delayed Fluorescence”, *Scientific Reports*, vol. 3, no. 2127, 2013

[117] M. Kim, S. Jeon, S. Hwang és Y. Lee: „Stable Blue Thermally Activated Delayed Fluorescent Organic Light-Emitting Diodes with Three Times Longer Lifetime than Phosphorescent Organic Light-Emitting Diodes”, *Advanced Materials*, vol. 27, no. 15, pp. 2515-2520, 2015

[118] T. Baumann: „Blue TADF emitters for efficient display and lighting”, DOE SSL R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016. febr. (http://energy.gov/sites/prod/files/2016/02/f29/baumann_oledmtrl_raleigh2016.pdf)

Tudományosabb szinten az EU elindított egy „Phebe”-nek nevezett projektet a TADF anyagok fejlesztésének és kereskedelmi forgalomba hozatalának támogatására – a TU Dresden-nel az emitterkonstrukciók és a Novaled-del a további anyagok és rétegfelépítési ismeretek vonalán [119].

Az alternatív és javított foszforeszkáló anyagokra vonatkozó kísérletek is tovább folytatódnak. Iridium-alapú foszforeszkáló emitterek alternatíváival kapcsolatos kutatásai során az Arizona State University (ASU) igazolta azt, hogy a Pt-alapú emitterek lehetnek olyan stabilak, mint az iridium-alapúak. Az ASU kutatói olyan egy-emitteres fehér eszközökkel próbálkoznak, amelyek kék monomer emisszió és narancssárga excimer emisszió kiegyensúlyozott arányának felhasználásával érnek el fehér fényt [120]. Az ilyen egy-emitteres rendszerek egyszerűsíthetők az OLED-ek gyártását, különösen az oldatfeldolgozású eszközök esetén.

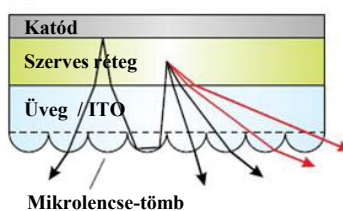
Fénykivonási hatások

A (fény)kivonási hatások a panel által emittált látható fotonok és az emissziós tartományban keletkezett fotonok hányadosa. A planár üveghordozókon kialakított egyszerű OLED eszközöknél a keletkező fénynek csak kb. 20%-a (17-25%-a) emittálódik a panelből. Ezt az elektrodákban, az átlátszó hordozókon és a belső rétegekben elnyelődött és becsapódott fotonok okozzák, amit a fotonok útvonala (azaz a szerves rétegek, az anód, a hordozó, a tokozó rétegek és a levegő) mentén adódó fénytörések eltérése okoz. A DOE célkitűzése a 70%-os fénykivonási hatások elérése, ami 3-3,5-szeres javulást jelentene. A jelenlegi termékek fénykivonási hatásfoka mindössze 30-35%, így bőven van tennivaló a javításra és az energiahatékonyság növelésére.

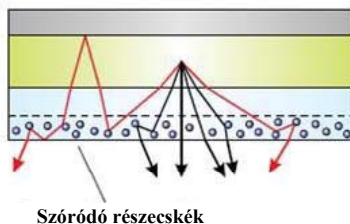
A fénykivonás növelésére több út is létezik:

1. Külső fénykivonó rétegek

A külső fénykivonó rétegek (EEL) texturált külső felületet hoznak létre a fény terítéséhez vagy a hordozóról kifelé történő irányításához, amint az a 6.3 ábrán látható. Noha a külső felület egyszerű érdesítésével is jelentős fényszórás érhető el, a külső fénykivonó rétegek rendszerint a hordozóra felvitt mikrolencse-tömbökből állnak, amelyeket néhány jól kipróbált eljárással lehet kialakítani. A mintázatok periodikusak vagy szabálytalanok is lehetnek, de periodikus struktúrák használatakor ügyelni kell az emissziós szögek változásával



6.3 ábra – A külső fénykivonás vázlata
(Forrás: Mark Thompson, University of Southern California, DOE SSL R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016. febr. [114])



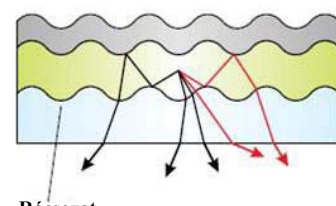
6.4 ábra – A belső fénykivonás vázlata
(Forrás: Mark Thompson, University of Southern California, DOE SSL R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016. febr. [114])

együtt változó színek elkerülésére. A felületi modulációkat a hordozó gyártása során lehet kialakítani, vagy a hordozóba lehet maratni annak elkészülte után. A legáltalánosabb eljárás az, hogy olyan strukturált polimer réteget visznek fel laminálással vagy in-situ leválasztással, amelynek fénytörési együtthatója illeszkedik a hordozóéval

A külső fénykivonó rétegeket az OLED hordozójára általában az eszköz legyártása és tokozása után viszik fel, így minimális módon zavarja meg az érzékeny OLED-rétegeket. A külső fénykivonó rétegek alkalmazása a jelenleg domináns módon alkalmazott fénykivonási módszer. Lamináláshoz szükséges filmeket több gyártó is szállít. Ezek a filmek hatékonyan kivonják a hordozóban a hullámvezető módusokban csapódódott fényt. A segítségükkel realizálható növekmény az 1,3-1,8-szoros tartományba esik, tipikusan 1,6-szoros.

2. Belső fénykivonó rétegek

A belső fénykivonó rétegek (IEL-ek) szórási központokból (mikrogömbökből, cirkónium részecskékből stb.) vagy a belső átmeneti rétegek időszakos tömbjeiből állhatnak. A belső fénykivonó rétegek ígéretesek, mivel megvan a képességük arra, hogy kivonják a szerves réteg/indium-oxid (ITO) hullámvezető módusaiban becsapódódott fényt és csökkentsék a hordozóban a merőlegestől való elhajlás miatt bennragadt fény mennyiségét is (l. a 6.4 ábrát). A belső fénykivonó rétegeket rendszerint a hordozó és az első elektróda közé iktatják be laminált vagy in-situ kialakított filmek formájában. Az egyik legnagyobb



6.5 ábra – A felületi plazmon-csatolás vázlata
(Forrás: Mark Thompson, University of Southern California, DOE SSL R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016. febr. [114])

kihívás annak biztosítása, hogy az elektrodák és a szerves rétegek leválaszthatók legyenek a belső fénykivonó rétegen, ezért a felület érdessége és kémiai összetétele kritikus fontosságú. Gyakran gondot okoz, ha a hordozó/ITO interfész fényszóró elemei feldurvíják a leválasztási felületet, ami az OLED eszköz elektromos zárlatát idézi elő. Ugyanakkor, ha a szóró elemek beágyazódnak a sík felületet létrehozó polimer mátrixba, a polimer anyag esetleg nem engedi a magas hőmérsékletű leválasztást és az ITO csúcsteljesítményéhez szükséges temperálásokat.

OLED-ekbe építhető mikrolencse-tömböket a Panasonic és mások már bemutatottak, de tömeggyártáshoz még nem használták fel őket [121, 122].

A mikrorészecskéknek nagy törésmutatójú kontrasztanyaggal rendelkező gazdaanyagba való bevitelével előállított fényszóró filmek is nehezebbnek bizonyultak, mint ahogy azt eredetileg várták. A belső fénykivonó rétegeknek az eszközökbe történő integrálásával kapcsolatos kihívások miatt ezeket az eljárásokat még nem alkalmazzák az OLED-panelek gyártásában. A fényhasznosításban elérhető növekedés azonban jelentős (két-háromszoros) lehet, ezért ez a legkövetkezetesebb és legvalószínűbb út a fénykivonáshoz a következő generációs eszközök esetén.

[119] OLED-info: „The EU launches a new project to commercialize TADF OLED emitters”, 2015. márc. 19. (<http://www.oled-info.com/eu-launches-new-project-commercialize-tadf-oled-emitters>)

[120] J. Li: „Efficient and Stable OLEDs Employing Square Planar Metal Complexes and Inorganic Nanoparticles”, DOE SSL R&D Plan, Raleigh, NC, 2016. febr. (http://energy.gov/sites/prod/files/2016/02/f29/li_oledmtrl_raleigh2016.pdf)

[121] T. Komoda, K. Yamae, V. Kittichungchit, H. Tsuji és N. Ide: „Extremely High Performance White OLEDs for Lighting”, SID Symposium Digest of Technical Papers, vol. 43, no. 1, pp. 610-613, 2012. jún.

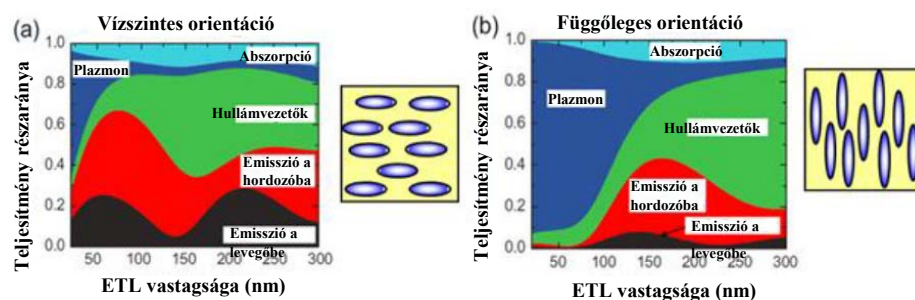
[122] K. Yamae, H. Tsuji, V. Kittichungchit, Y. Matsuhisa, S. Hayashi, N. Ide és T. Komoda: „High-Efficiency White OLEDs with Built-up Outcoupling Substrate”, SID Symposium Digest of Technical Papers, vol. 43, no. 1, pp. 694-697, 2012. jún.

3. A felületi plazmonikus veszteségek csökkentése

A fémfelülethez (tipikusan az OLED katódjához) nagyon közel lévő emittáló molekulák jelenléte felületi plazmon polaritonok (SPP) gerjesztését eredményezheti. A felületi plazmonvesztések csökkentésének legáltalánosabb módja az emitter és a fémlektroda közötti távolság növelése. Ez minimálisra csökkenti az SPP-khez való csatolást, ami egy ún. near-field („közelmezei”) hatás [123, 124]. Kidolgoztak használható vastag elektrontranszport rétegeket (ETL), de bizonyos vastagságon túl a vastagabb rétegek befolyásolják a fénytávitelt és a feszültséget. Egyik alternatív megközelítés a katód texturálása, amit a katód felületen egy interfész mintázat kialakításával lehet elérni (például a Novaled NET61 anyagának felhasználásával) a rétegezésen belül, ami a katód hullámosodásához vezet [125, 126]. A katód texturálásának másik módja a hordozó szinten végzett hullámosítás, amely az OLED rétegek formatartó leválasztásával transzformálódik át a katódra [127, 128, 129]. Az ilyen hullámosítások lehetővé teszik a felszíni plazmon-rezonancia módusok Bragg-szórását. Koo és társai a hordozón létrehozott csatolószerkezetek felhasználásával kialakított hullámosítással 2,2-szeres áramhatásfok-növekedést jelentettek [127]. Ugyanakkor nehéz megmondani, hogy a „texturázó” módszerből származó nyereségnek mekkora hányadát adja az ITO/szerves hullámvezető módusok miatti szóródás az SSP módusokéhoz képest. Ezenkívül ezek a megközelítések veszélyeztethetik az OLED eszköz teljesítményét a nem sík leválasztási felület miatt. A nem egyenletes rétegvastagság és árameloszlás az élettartam, a kihozatal és a színminőség tekintetében jelenthet problémát.

4. A Fresnel-visszaverődések csökkentése

A Fresnel-visszaverődések fokozatosan változtatott törésmutató-sémák vagy nagy törésmutatójú hordozók alkalmazásával csökkenthetők. Az eszközrétegek törésmutatóinak illesztése igen egyszerű módszer a fényáram növeléséhez. Például ha külső fénykivonó réteggel kombinálva nagy törésmutatójú hordozót használunk, akár háromszorosára is megnövelhető a fénykivonás. A probléma ezzel a módszerrel az, hogy nincsenek olcsó és mechanikailag robusztus, nagy törésmutatójú hordozók (üveg vagy műanyag). Egyik alternatív módszer a kisebb törésmutatójú szerves rétegyanyagok használata. Az egyik tanulmány megmutatta, hogy az igen kis



6.6 ábra – Vízszintes (a) és függőleges (b) emitter-elrendezések összehasonlítása
(Forrás: B. Scholz et al, Optics Express Journal Entry, 2012 [133])

törésmutatójú aerogél gazdaanyagokkal hogyan lehet 70%-os fénykivonási hatásfokú eszközöket előállítani [130]. A Pixelligent olyan módszert tett közzé, amely ötvözi a belső fénykivonó rétegek előnyeit egy fokozatos törésmutatójú réteggel a Fresnel-visszaverődések csökkentésére [131]. A technológia fejlesztését és a kapcsolódó gyártási problémák vizsgálatát a DOE finanszírozza a FOA (finanszírozási lehetőségek közzététele) és az SBIR (kisvállalkozások innovációs kutatásai) alap segítségével [132].

5. Irányított emitterek használata

Az emittáló molekulák sorba rendezhetők úgy, hogy a kibocsátott fény és az átmeneti dipólusmomentum megfelelőképpen orientálódjon. Ha a molekulák a hordozó síkjára merőlegesen vannak elrendezve, a dipólusok erősen csatolódnak a plazmonmódusokhoz, és a fény elvész. Adalékanyag (dopoló) dipólus által vezérelt elrendezés, elektrosztatikus adalékanyag-gazdaanyag kölcsönhatások vagy új anyagok kidolgozása használható az orientálódás elérésére. A módszer polimer OLED-ekhez történő hatékony felhasználását már bemutatták, és az újabb adatok azt sugallják, hogy ezzel a módszerrel akár kétszeresére is megnövelhető a fényhasznosítás [120]. A 6.6 ábra bemutatja, hogy a levegőbe történő fénykibocsátás mennyivel nagyobb vízszintes elrendezésű dipólusok esetén, mint függőlegesen elrendezett emittereknél.

A hatásfok felosztása és a kapcsolatos célok

A 6.1 táblázat négy OLED-eszköz hatásfokának becsléseit foglalja össze a jelenleg kapható kereskedelmi panelek és az idén várhatóan megjelenő következőgenerációs panelek összehasonlításával. Az első két oszlop az LG Display kereskedelmi paneljeire vonatkozik, a másik kettő pedig az OLEDWorks paneljeit reprezentálja. Az adatok 3000 cd/m² fényssűrűségeen történő működtetésre vonatkoznak. Mindegyik tandem felépítésű eszköz, jó egyensúlyt kínálva a fényerősség és az élettartam

közt. A gyártók az új termékek kifejlesztésénél gondosan mérlegelték az összes teljesítőképességi és költség kompromisszumot, így a kereskedelmi panelek hatásfokát a színminőség, a stabilitás vagy

- [123] M. Furno, R. Meerheim, S. Hofmann, B. Lüssem és K. Leo: „Efficiency and Rate of Spontaneous Emission in Organic Electroluminescent Devices”, *Physical Review B*, vol. 85, no. 11, p. 115205, 2012. márc.
- [124] W. Brütting, J. Frischeisen, T. Schmidt, B. Scholz és C. Mayr: „Device Efficiency of Organic Light-Emitting Diodes: Progress by Improved Light Outcoupling”, *Physica Status Solidi A*, vol. 210, no. 1, pp. 44-65, 2013.
- [125] OLED-info: „New microfabrication technology can enhance OLED light extraction efficiency”, 2012 (<http://www.oled-info.com/new-microfabrication-technology-can-enhance-oled-light-extraction-efficiency>)
- [126] S. Murano, D. Pavicic, M. Furno, C. Rothe, T. W. Canzler, A. Haldi, F. Löser, O. Fadhel, F. Cardinali és O. Langguth: „Outcoupling Enhancement Mechanism Investigation on Highly Efficient PIN OLEDs using Crystallizing Evaporation Processed Organic Outcoupling Layers”, *SID Symposium Digest of Technical Papers*, vol. 43, no. 1, pp. 687-690, 2012. jún.
- [127] W. H. Koo, S. M. Jeong, F. Araoka, K. Ishikawa, S. Nishimura, T. Toyooka és H. Takezoe: „Light Extraction from Organic Light-Emitting Diodes Enhanced by Spontaneously Formed Buckles”, *Nature Photonics*, vol. 4, pp. 222-226, 2010. febr.
- [128] W. H. Koo, S. M. Jeong, F. Araoka, K. Ishikawa, S. Nishimura, T. Toyooka és H. Takezoe: „Polarization Conversion in Surface-Plasmon-Coupled Emission from Organic Light-Emitting Diodes Using Spontaneously Formed Buckles”, *Advanced Materials*, vol. 23, no. 8, pp. 1003-1007, 2011
- [129] W. H. Koo, W. Youn, P. Zhu, X. H. Li, N. Tansu és F. So: „Light Extraction of Organic Light Emitting Diodes by Defective Hexagonal-Close-Packed Array”, *Advanced Functional Materials*, vol. 22, no. 16, pp. 3454-3459, 2012
- [130] L. H. Smith és W. L. Barnes: „Using a low-index host layer to increase emission from organic light-emitting diode structures”, *Organic Electronics*, vol. 7, no. 6, pp. 490-494, 2006
- [131] G. Cooper és G. Chen: „Light Extraction for OLEDs”, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, Kalifornia, 2015. jan. 28. (http://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/cooper_oledintegration_sanfrancisco2015.pdf)
- [132] DOE SSL Program: „Advanced Light Extraction Structure for OLED Lighting”, 2016 DOE SSL Project Portfolio, p. 39, 2016. jan.
- [133] [133] B. Scholz, „OLED Materials”, *Optics Express*, vol. 20, no. A205, 2012.

a költséghatékonyság feláldozása nélkül sikerült növelniük. Az LG a nagy fényhasznosítású panelekre helyezte a hangsúlyt, 50%-kal, 60-ról 90 lm/W-ra növelve meg a fényhasznosítást. Az OLEDWorks egyszerre növelte meg drasztikusan a fényhasznosítást és a színminőséget. A Brite 2 paneljeinek színvisszaadási indexe hatásos módon nagyobb mint 90, R9 értéke pedig az előzetes termékteszt szerint 76. 35%-os fényhasznosítás-növekedést is kimutattak a Brite 1 panelhez képest, ami 62 lm/W panel-fényhasznosítást jelent.

Amint az a 6.1 táblázatban látható, az OLED-eszközök jól teljesítenek a szín és az élettartam tekintetében. A fényhasznosítás is versenyképes, különösen a hagyományos fényforrásokkal összevetve, de még hosszú utat kell megtenni az eszközök fényhasznosításának optimalizálásáig. A költség változatlanul a fő kihívás marad az OLED-termékek elfogadásában.

A 6.7 ábra az OLED-veszteségek felosztását mutatja, összehasonlítva a legutóbbi adatokat a programban kitűzött célokkal és jelzi, hogy mekkora javulásokra van lehetőség. A 2014-es értékek az LG LL055RS1-62P1-es, három rétegezésű paneljére vonatkoznak. 60 lm/W-os fényhasznosítást mutatnak 150 mA-es meghajtóáram mellett, ha a 81 cm²-es fényt adó felületű panelt 8,5 V feszültséggel hajtják meg [108]. A cél 360 lm/W sugárzási fényhasznosítás és 190 lm/W panel-fényhasznosítás.

6.1.2 A panelek élettartama

Van néhány fontos mérőszám a panelek élettartamával kapcsolatosan. Az OLED-ek élettartamát szokásosan az L_p fényáram-megtartással adják meg, amely azt az időt jelenti órákban kifejezve, amely alatt egy fényforrás kezdeti fényáramának százaléka képes megőrizni. Itt is a LED-csomagok élettartamához hasonló értékek lennének kívánatosak, amelyeknél az L_{70} nagyobb mint 50 000 óra. Habár a fényáram-megtartás az élettartam analógiájának tekinthető, az üzemi élettartamot más hibamechanizmusok is befolyásolják – katasztrofális meghibásodások, elektromos hibák, színeltolódások (olyan pontig, amelynél a fény színe már nem felel meg az adott követelményeknek) és a fekete foltok kialakulása. Másik fontos mérőszám az OLED-ek tárolási élettartama, amely azt az időtartamot adja meg, amelynek során az OLED tárolható anélkül, hogy az alkalmazáshoz szükséges teljesítőképessége sérülne. Normál környezeti körülmények (20 °C körüli hőmérséklet, kis páratartalom) között 10 éves tárolási élettartam

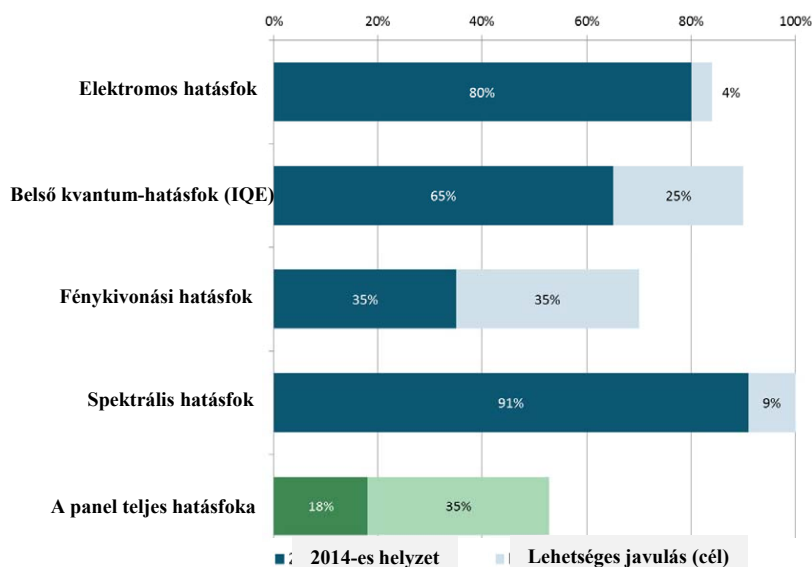
Forrás	LG	LG	OLEDWorks	OLEDWorks
Termék	LL055RS1-62P1 ¹	LL055RS1-92P1 ¹	Brite 1 ²	Brite 2
Megvilágítás (lm/m ²)	10 000	10 000	10 000	10 000
LER (lm/W)	328	328	336	302
Elektromos hatásfok (%)	80	80	73	70
Belső kvantum-hatásfok (%)	65	65	62	62
Fénykivonási hatásfok	35%	52%	31%	47%
Panel-hatásfok (%)	18	27	14	21
Panel-fényhasznosítás (lm/W)	60	90	46	62
CCT (K)	2700	2700	2900	2956
CRI (R _a)	>87	>87	80	93
CRI (R ₉)				76
Élettartam (L ₇₀) (óra)	40 000	40 000	>50 000	>50 000

6.1 táblázat – Az OLED-panelek hatásfokainak összetevői

Megjegyzés: Valamennyi adat az illető céggel folytatott kommunikáció alapján született

1. Háromrétegű hibrid fluoreszkáló kék emitterekkel és foszforeszkáló vörössel és zölddel: 2700K

2. Hatrétegű hibrid fluoreszkáló kék emitterekkel és foszforeszkáló vörössel és zölddel: 2700K és egy kettős réteg, foszforeszkáló emitterekkel [111]



6.7 ábra – Az OLED-panelek veszteségi csatornái és hatásfokai

várható. Az OLED-eszközök élettartamát számos tényező befolyásolja, köztük az anyagok robusztussága (pl. a hőstabilitás, a gazda anyag stabilitása), az eszköz architektúrája, az anyagok diffúziója az aktív tartományba és azoknak az anyagoknak az áthatolhatatlansága, amelyek védik az eszközt a víz és oxigén behatolásával szemben. Az OLED-ek élettartamával kapcsolatos legnagyobb kihívás a kék emittáló rendszereknek tulajdonítható. A kék emitterek által igényelt nagyobb energiák ui. tönkretelhetik a kötések és meghibásodásokat okozhatnak a helyi energiadisszipáció folytán. Ez a hatás súlyosbodik, amint az áramsűrűség nő a nagyobb fényssűrűség-szintek elérésére.

Az üzemi élettartam növelésére a következő módszerek vannak vizsgálat alatt:

- Olyan új anyagok kifejlesztése, amelyek nagyobb stabilitással kecsegtetnek (pl. gyorsabb sugárzási bomlási sebességek, nagyobb kötési szilárdságok).
- Eszközök tervezése a rekombinációs tartomány kiterjesztésére, így lecsökkentve az excitonok szuperonálódását, amely viszont lecsökkenti a két részecske (exciton-exciton, exciton-polaron) kölcsönhatását, meghibásodásokat okozva ezzel.
- Gerjesztett „állapot-irányítók” bevezetése, hogy meg lehessen szabadítani a rendszert a forró pontoktól, amelyek a gazdaanyag és az emitter molekuláris degradációjához vezetnek.

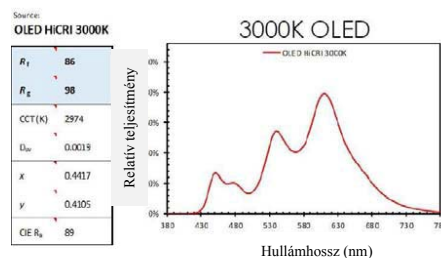
• Hosszabb hullámhosszúságú kék emitterek vizsgálata a megjelenítőknél használt mélykék emitterek által megkívánt nagyobb energiák elkerülésére.

• Az áramsűrűség csökkentése tandem eszközök használata és/vagy tökéletesített fénykicsatolás folytán.

Az áramsűrűség lecsökkentése az elmúlt néhány évben az OLED-panelek élettartam-növelésének legsikeresebb módja volt. A tandem eszközök és/vagy a javított kicsatolás fő előnye az, hogy a megkívánt fénymennyiség kisebb áramsűrűség mellett elérhető, ezáltal lassítva a meghibásodások kialakulásának és a fényáram-csökkenésnek a sebességét. Pl. a tandem architektúra magyarázza részben az LG Chem és az OLEDWorks által közölt nagy (40 000, ill. 50 000 órá) L70-es értékeket (3000 cd/m²-es kezdeti fénysűrűség mellett) [111, 134]. A fénykivonási technikáknak az eszközön áthaladó áram lecsökkentésére irányuló alkalmazása is hatásos lehet és közreműködhet a tandem eszközökkel együtt az élettartam meghosszabbításában. Ezek a megközelítések különösen fontosak, mivel a panel- és lámpatestgyártók egyre nagyobb üzemi fényerősség elérést tűzik ki célul. Például az Acuity Brands OLED-világítási ütemtervének célkitűzései max. 4000 cd/m² fénysűrűség kibocsátásával számolnak 2018-ra, és az OLEDWorks már gyárt 8300 cd/m²-en működő paneleket 10 000 órá élettartammal [111, 135]. A tandem architektúráknak sok előnyük van, de bonyolultabbak is, ami alacsonyabb kihozatalokat és nagyobb gyártási költségeket eredményez.

6.1.3 A panelek színminősége

A kapható OLED-es világítási panelek kiváló színminőséget mutattak. Az LG Displax paneljeinek színvisszaadási indexe meghaladja a 87-et. A 2700K-es paneljüknél ez a nagy CRI érték 60 lm/W fénymennyiséggel és 40 000 órá L70 értékkel párosul 3000 cd/m² kezdeti fénysűrűség mellett [108]. Előrelépést ért el a panelek közötti színeltérések csökkentése terén is, MacAdam ± 2 -t érve el a több panellel szerelt lámpatestek esetén. Az Acuity Brands arról számolt be, hogy piaci visszajelzései szerint jobb színminőségre van szükség az OLED-eknél ahhoz, hogy növekedjen elfogadásuk a csúcsminőségű és a funkcióvilágítás terén [135]. Az OLED-panelgyártók azzal reagáltak erre, hogy a kereskedelmi igényeknek jobban megfelelő, legalább 80-as CRI színvisszaadási indexű paneleket fejlesztettek ki (pl. OLEDWorks Brite FL300, MC Pioneer Velve). Néhány gyártó – pl. a Lumiotec és



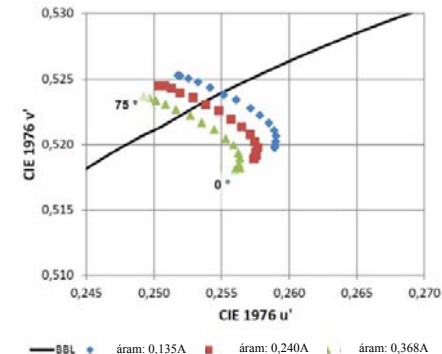
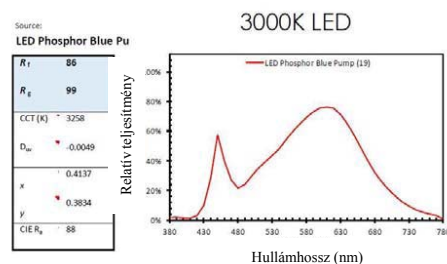
6.8 ábra – A 3000K-es OLED és LED-panelek T-30 értékeinek összehasonlítása

(Forrás: Mike Lu, Acuity Brands, OLED Stakeholder Meeting, Pittsburgh, Pennsylvania, 2015. szept. [139])

az LG Display – nagyobb, 90-es színvisszaadási indexet célzott meg [136, 137]. Az R9 értékek is növekednek, a D_{uv} pedig csökken. A mai legmodernebb eszközök 88-90-es CRI értéket érnek el 20-30-as R9 és 0,002-on belüli D_{uv} mellett. A színminőség megcélzott értékei: CRI>90, R9>50 és alacsony D_{uv}. A gyártócégek dolgoznak a célok eléréseért. Az OLEDWorks új Brite 2 panelje 90-nél nagyobb CRI és 50-nél nagyobb R9 értéket specifikál [138].

Az OLED-gyártók még nem használják a színminőség megadására a színhűség és a színskála új TM-30-as mérőszámát. A 6.8 ábra azonban azt mutatja, hogy az OLED- és LED-panelek hasonló, 89-es, ill. 88-as értékeket képesek elérni a feltüntetett fényforrások esetén.

Noha a jó színminőség nagyon fontos, nagyon nehéz kontrollálni. Az eszköz különböző emittáló komponensei által kibocsátott fény pontos arányai – amelyeket a rétegvastagság és az adalékanyagok koncentrációja is befolyásol – határozzák meg az OLED-eszközök fényének színét. Ezért a pontos kompozíciók és az egyforma vastagság a nagy felületek mentén döntő fontosságú a jó minőségű eszközök esetén. Az OLEDWorks FL300-as paneljénél a panel mentén rendszerint igen kicsi a színeltérés, az u'-v' szinkordináta két színpontja közötti $\Delta u'v'$ eltérés igen kicsi, kisebb mint 0,002. Fontos a panelek közötti színeltérés is, különösen akkor, ha azokat szorosan egymás mellé szerelik adott lámpatestben. Az FL300-as panelnél $u' = 0.255 + 0.006$, $v' = 0.521 + 0.005$ [111]. Az eszköz meghajtási körülményei is befolyásolják a színt és a fényerősséget, mivel a különböző emitterek különböző feszültségeket igényelnek. Ha a rétegvastagság, az összetétel vagy az áramerősség változik az eszköz mentén, színeltérések jöhetnek létre a panelek között, de egyes panelek belül is (6.9 ábra). Az emisszió szöge még nagyobb színeltolódást okozhat, amely szintén a 6.9 ábrán látható. Az ilyen eltérések különösen érzékenyek a mikroöreg-hatások vagy a fénykivonás növelésére használt periodikus struktúrák jelenlétére. Ezenkívül



6.9 ábra – A színpont változása a CIE 1976-os (u' , v') diagramján a meghajtóáram és az emisszió szög függvényében (Forrás: OLEDWorks FL300 adatlap, 2016 [111])

komplikációk léphetnek fel a különböző színű emittereknek az idő múlásával bekövetkező nem egyforma degradációja következtében is, ami idővel színeltolódáshoz vezet.

6.1.4 Formatényező

A paraméterek javítása mellett az OLED-fejlesztők azon is dolgoznak, hogy javuljon a formatényező is könnyű, rugalmas vagy hajlékony hordozók (pl. fémfólia, polimer, ultra vékony üveg) felhasználásával.

[134] LG Chem: „LG Chem OLED Light Brochure: You Create. We Light”, 2015 (<http://www.dnaoled.cz/download/panels/2015-lg-oled-brochure.pdf>).

[135] M. Lu: „OLED Lighting - Poised to Take Off”, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, Kalifornia, 2015. jan. (http://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/lu_oled_sanfrancisco2015.pdf).

[136] OLED-info: „Lumiotec's new P09 OLED lighting panels feature 45 lm/W, 40,000 hours lifetime”, 2014. febr. 2. (<http://www.oled-info.com/lumiotec-new-p09-oled-lighting-panels-feature-45-lmw-40000-hours-lifetime>).

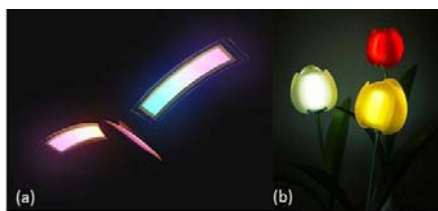
[137] LG Display: „LG Display OLED Light with High CRI”, 2016 (<http://www.lgoledlight.com/video/lg-chem-oled-light-with-high-cri.do>).

[138] OLEDWorks: „Brite 2 FL300 Family”, 2016. márc. (<https://www.oledworks.com/wp-content/uploads/2016/03/Product-sheet-Lumiblade-OLED-Panel-Brite-2-FL300-family-preliminary-March-2016.pdf>).

[139] M. Lu: „Hybrid OLED/LED Luminaires”, OLED Stakeholder Meeting, Pittsburgh, Pennsylvania, 2015. szept.



6.10 ábra – Az LG Display rugalmas OLED-panelekkel készült függesztékei (Forrás: LG Display OLED Light Catalog, 2016 [108])



6.11 ábra – A Konica Minolta könnyű, rugalmas OLED-panelekkel készült „Habataki” és „Tulip” lámpája (Forrás: Konica Minolta weboldal, 2016 [141])

A rugalmas/hajlítható hordozók bevezetésének legnagyobb akadálya a víznek és az oxigénnek a műanyag hordozókon és a burkolatokon való bejutását megakadályozó megbízható „gátak” kifejlesztése. Ultra vékony üvegből jó, áthatolhatatlan hordozó hozható létre, de a kezelés és a korlátozott rugalmasság problémákat okoz. A súly és a vastagság minimalizálására vékonyréteg tokozóanyagot lehet használni ultra vékony üveghordozókkal együtt. Az alternatív megközelítés igen vékony üveget használ mind hordozó-, mind gát-anyagként, jöllehet ehhez a megoldáshoz költséghatékony, nagy teljesítőképességű lezáró mechanizmusokat kell kidolgozni. A Corning és az OLEDWorks közösen kifejlesztette az 50 és 100 μm -es „Corning's Willow glass” elnevezésű üveget hordozó- és gát-anyag céljaira a rugalmas és formálható panelek számára. Az üveghordozó a Corning fénykivonási technológiáját is hasznosítja [140]. Igen könnyű, rugalmas panel-prototípusokat már több évvel ezelőtt bemutatnak, de csak most kerülnek piacra. Például a 6.10 ábrán láthatók olyan függesztékek rugalmas LG Display-panelekkel szerelve, amelyeket a 2016. évi frankfurti Light & Building kiállításon mutattak be. Az LG Display katalógusában most hat rugalmas panelből álló család található, amelyeknek vastagsága 0,41 mm, fényhasznosítása 50-55 lm/W 10 000 lm/m² fényűrűség, 2700 és 4000K színhőmérséklet, 87-es színvisszaadási index és 20 000 órás L70-es élettartam mellett [108]. Ezek a műanyag hordozókon

Paraméter	2015	2017	2020	2025	Cél
Panel-hatásfok ¹ (lm/W)	60	100	125	160	190
Lámpatest optikai hatásfoka	100%	100%	100%	90% ²	90% ²
Meghajtó hatásfoka	85%	85%	85%	90%	95%
Teljes eszköz-lámpatest hatásfok	85%	85%	85%	81%	86%
Eredő lámpatest-hatásfok ¹ (lm/W)	51	85	106	130	162

6.2 táblázat – Az OLED-es lámpatestek hatásfok-előrejelzései – Megjegyzések: 1. A hatásfok előrejelzések CRI >80 és CCT 3000 K paramétereket tételeznek fel. 2. Sugárnyaláb-formáló optika lehetséges használatát feltételező veszteségek

kialakított rugalmas panelek cserélték le a korábbi, ultravékony üvegen készült „hajlítható” paneljeiket, nagyobb tervezői szabadságot, alacsonyabb költségeket és könnyebb kezelést téve lehetővé. A Konica Minolta is gyárt fehér és állítható színtónusú rugalmas paneleket roll-to-roll gyártósorán Tokyóban, amint az a 6.11 ábrán látható. Ezeket a műanyag hordozókon kialakított, 0,35 mm vastagságú paneleket a 2016. évi japán Lighting kiállításon mutatták be. A rugalmas és hajlítható hordozók csökkentik a tervezési megszorításokat. Végül a tervezők az ilyen OLED-ek felhasználását háromdimenziós világító felületek formájában képelték el, különösen nem sík felületű architektúrák területén, valamint szűk helyeken, például gépjárműveknél, függőleges felületeken és helyi világításoknál

6.1.5 OLED lámpatestek hatékonysága

Fényhasznosítás

A jelenleg kereskedelmi forgalomban kapható lámpatesteknél a hatásfokot az OLED-paneleknek a lámpatestbe történő beépítése befolyásolja. Számos prototípus lámpatestet úgy alakítottak ki, hogy csupán a meghajtóban keletkező járulékos hatásfok-vesztesség, ami 15% körüli csökkenéshez vezet. Nem alkalmaznak optikákat, így a fényeloszlás közel olyan, mint a Lambert-sugárzóké. Noha vannak olyan lámpatestek, amelyeknek hatásfoka megközelíti a panelekét (azokénak kb. 85%-a), a legtöbb kereskedelemben kapható lámpatest a panelek hatásfokának csupán 70%-át adja. A DOE Gateway Demonstrations felmérése azt mutatta, hogy az Acuity Brands Trilia lámpatestei egy 2014-es installációban 46 lm/W rendszerhatásfokkal rendelkeztek, noha 60 lm/W névleges fényhasznosítású panelekkel voltak szerelve, azaz az összes veszteségük 24% volt [105].

A lámpatestek és a meghajtók konstrukciójának tökéletesítése segíthet csökken-

teni a veszteségeket. A 6.2 táblázat előrejelzései azt feltételezik, hogy az OLED-meghajtók hatásfoka a LED-meghajtókéhoz hasonlóan fog javulni, de csak mintegy kétéves késéssel, amire az OLED-specifikus meghajtóknak szükségük van az optimális üzemeltetés kidolgozásához. A készen kapható LED-meghajtók olyan feszültségekkel rendelkeznek, amelyek nem felelnek meg szükségképpen az OLED-panelek vagy -panelcsoportok feszültségeinek, ezáltal veszélyeztetik a rendszer fényhasznosítását. Az installációval kapcsolatos problémák enyhítésére az OLEDWorks most már olyan speciális meghajtókat kínál, amelyek kompatibilisek a paneljeikkel [142]. 2016-ban a DOE által szervezett SSL R&D Workshop-on hangsúlyozták az ilyen összetett OLED-modulok (-light engine-ek) kifejlesztésének szükségességét. Ez a megközelítés – a rétegek és a meghajtók összeegyeztetett fejlesztése – segíthetne az elektromos hatásfokkal kapcsolatos problémák leküzdésében.

A lámpatestek hatásfokának javítása mellett az OLED-es lámpatestek teljes felhasználási hatékonyságát a fényeloszlási profil is befolyásolhatja. Az OLED-ek által kibocsátott fény széles eloszlása többféle módon jól kihasználható. A mennyezetre szerelt vagy a magasból függesztett lámpatestektől származó fény jó egyensúlyt teremt a függőleges és vízszintes felületek megvilágítása között, ami fontos az arck és a fali dekorációk szemlélésénél. Ha a fényhasznosítást 100 lm/W-ra vagy a fölé lehetne növelni, az OLED jó eséllyel

[140] Corning: „Corning Announces Collaboration with OLEDWorks”, 2015. ápr. 13. (https://www.corning.com/asean/en/about-us/news-events/newsreleases/2015/04/news_center_news_releases_2015_2015041301.html)

[141] K. Minolta: „OLED Installation”, 2016 (<http://www.konicaminolta.com/oled/products/illumination.html>)

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



6.12 ábra – Az LG Lighting „csináld magad” szettje (Forrás: LG Display, 2015. febr. [143])



6.13 ábra – Felhasználó által igényre szabható világítás (a) az LG sínmoduljának és a (b) az Astel Lighting „Versa” termékének felhasználásával (Forrás: LG Display OLED Light Catalog, 2016 [108]; Astel Lighting, 2016 [144])

versenyezhetne az általános világítás többi fényforrásával. Helyi világítások esetén a munkafelületek közelében elhelyezett OLED-ek zavaró árnyékoktól mentes többletvilágítással szolgálnak.

A jövőbeli alkalmazásoknál szükség lehet a fénynyaláb formálására, hogy a fény oda fókuszálódjon, ahová kell, vagy hogy elkerüljük a kápráztatást. Valószínűtlen, hogy ez a panelen belül fog megtörténni, azaz a lámpatestekbe feltehetőleg külső optikai elemeket kell beépíteni. Habár bizonyos fényformáló optikák költséghatékonyak lehetnek a nagy fényerősségű OLED-es lámpatestekben, a csupasz panel számos alkalmazásnál elegendő marad, lecsökkentve ezzel a fényforrás és a lámpatest közötti költségnövelő tényezőket.

A lámpatestek hatásfokának várható fejlődését a 6.2 táblázat mutatja. Az optikai hatásfok 2020 utáni várható degradálódása a jobban irányított fényeloszlással összefüggő optikai veszteségeket reprezentálja, míg 2020-ig nem tételeztünk fel külső „fényterítést”.

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 hajlíthatóság, a rugalmaság és az átlátszóság. Az OLED-ek a színállíthatóságát, nagy fényhasznosítást, könnyű, vékony konstrukciókat is kínálnak, valamint diffúz fényt, ami megkülönbözteti őket a hagyományos világítástól.

Termékfejlesztés szempontjából fontos a megkülönböztető tulajdonságok beépítése. Várható, hogy a lámpatest-fejlesztés fel fog gyorsulni, amint a gyártók megegyeznek a közös panelméretekben és elektromos és mechanikai csatlakozási rendszerekben. A paneleket vagy panelcsoportokat megfelelő, hatékony meghajtó mechanizmussal ellátó összetett OLED-modulok (light engine-ek) kifejlesztése – ami egyszerűsíti a lámpatestgyártók számára a panelek lámpatestbe építését is – várhatóan fel fogja gyorsítani a lámpatestek termékfejlesztését és alkalmazását. Az LG és az OLEDWorks „csináld magad” szetteket kínál a fejlesztőknek; ilyen látható a 6.12 ábrán.

Úgy vélhető, hogy a meghajtó-technológiában a panelek beszerelésének megkönnyítése érdekében végzett fejlesztési munka is fel fogja gyorsítani az OLED-eknek a világítási rendszerekbe történő betervezését. A 6.13(a) ábra bemutatja az LG által kifejlesztett OLED-es sínmodult, amelynél az OLED-panelek alumínium háza az áramvezető sínhez való csatlakoztatás megkönnyítésére felszerelő konzollokkal van ellátva. Mindegyik panelnek van háza, amelynek hátuljához egy-egy DC-DC meghajtót építettek be, míg az áramvezető sánt egy AC-DC meghajtó látja el egyenfeszültséggel. A 6.13(b) ábrán a szlovén Astel Lighting „Versa lights” terméke mutatja be, hogy hogyan lehet modulszerű „csempe-formát” kialakítani.

A lámpatestgyártók számára tovább fogja növelni a tervezési lehetőségeket, amint az állítható fehér színárnyalatú, átlátszó, tükröfelületű vagy nyomtatott panelek tovább fejlődnek és kereskedelmi forgalomba kerülnek. A szín állíthatóságát több, saját meghajtó árammal rendelkező emitter egymás mellé helyezésével, vagy egy rétegezett felépítésű OLED töltésgeneráló rétegeinek feszültségvezérlésével lehet elérni. Laboratóriumi példányokat már készített mások mellett az UDC/Acuity és a drezdai Fraunhofer Institute, és állítható színtónusú prototípus panelek is megjelentek a Konica Minolta jóvoltából, az egyetlen kereskedelemben kapható állítható színtónusú OLED-panel azonban a Pioneer nevéhez fűződik [145, 146, 147]. A Pioneer a 2016. évi Light and Building kiállításon mutatta be ezeket az állítható fehér és RGB Velve paneljeit. Az állítható fehér paneljeinek színhőmérséklete 1200 és 6500K között változtatható, fényhasznosításuk 52 lm/W, 87 a színvisszaadási indexük, a maximális fényűrűségük 2000 cd/m², és a maximális fényerősséghez képesti L70-es fényáram-tartásuk 80 000 óra [148].



6.14 ábra – „Night Fly”, Fraunhofer FEP (Forrás: Fraunhofer FEP: „Full-Plastic OLED Lighting”, video, 2015. nov. [152])



6.15 ábra – Mirror OLED tükör, LG Display (Forrás: LG Display katalógusa [108])



6.16 ábra – Beágyazott OLED-panelek áramvezető, de átlátszó vezetékekkel (Forrás: LG Display OLED Light Catalog, 2016 [108])

[143] LG Display: „You Create We Light,” 2015 (<http://www.lgoledlight.com/index.do>)

[144] Astel Lighting: „Interior OLED Lights: Versa”, 2016 (<http://www.astellighting.com/interior-oled-lights/105-versa.html>)

[145] Fraunhofer FEP: „Transparent Color Tunable OLED”, 2015. febr. 5. (http://www.fep.fraunhofer.de/content/dam/fep/de/documents/Presse_Medien_JB/2015/Pressemitteilung_01_2015_EN.pdf)

[146] Konica Minolta: „Konica Minolta to Showcase OLED Lighting Panels, World's Thinnest and with World's First Color Tunable Function for Flexible Type”, 2014. febr. 12. (http://www.konicaminolta.com/about/releases/2014/0212_01_01.html)

[147] Universal Display Corporation: „Universal Display Corporation Presents OLED Display and Lighting Technology Advances” 2014. jún. 5. (http://s2.q4cdn.com/831534118/files/doc_news/2014/OLED_News_2014_6_5_General_Releases.pdf)

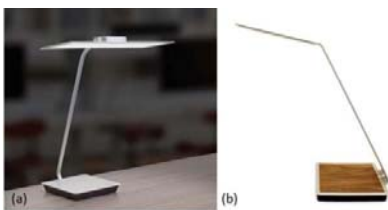
[148] MC Pioneer: „Specifications of OLED Lighting Modules with Adjustable Color and Brightness”, 2016 (http://mcpioneer-oled.co.jp/en/product/color_feature/color_specification/)

[149] Universal Display Corporation: „Transparent OLEDs”, (<http://www.udcoled.com/default.asp?contentID=608>)

[150] Samsung: „Samsung Drives Connected, Dynamic Viewing Experiences with New Lineup of SMART Signage Solutions at DSE 2016”, 2016. márc. 17. (<https://news.samsung.com/us/2016/03/17/samsung-drives-connected-dynamic-viewing-experiences-newlineup-smart-signage-solutions-dse-2016/>)

[151] UBI Research: „Transparent OLED Display Report 2016”, 2015. dec. 31. (http://www.ubi-research.com/transparent_oled_display)

[152] Fraunhofer FEP: „Full-Plastic OLED Lighting”, OLED-Info, 2016. ápr. 6. (<https://www.youtube.com/watch?v=CVtqpoGVWvM>)



6.17 ábra – OLED-es asztali lámpák
(a) „The Natural”, Workrite Ergonomics
(b) „Aerelight”, OTI Lumionics
(Forrás: (a) Darren Husley, Workrite Ergonomics [154], (b) Jacky Qiu, OTI Lumionics [155], DOE R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016. febr.)

Az átlátszó elektródákat katódnak és anódnak is lehet használni, ami olyan eszközöket eredményez, amelyek kikapcsolt állapotban átlátszóvá válnak. A Samsung demonstrálta, hogy aktív mátrixú OLED megjelenítőket lehet gyártani 45%-os átlátszósággal. Miután a TFT (vékonyréteg tranzisztoros) háttérlemez jelentős mennyiségű fényt blokkol, a világítási alkalmazásokban nagyobb értékek is elérhetők. Az UDC 70%-nál nagyobb értékeket jelentett [149, 150]; pedig az Osram 2012-ben kifejlesztette az RTW-078 elnevezésű paneljét, amelynek átlátszósága 57%, fényhasznosítása pedig 20 lm/W volt. A Fraunhofer Intézet (FEP) a 2016. évi LOPEC-en átlátszó, rugalmas paneleket mutatott be, köztük a 6.14 ábrán látható „night fly” elnevezésűt, amelyet a Flex+ projekt keretében fejlesztettek ki. Az átlátszó panelek kis fényhasznosítása részben a nagy átlátszóság követelménye miatt adódik, ez ui. korlátozza azokat a módszereket, amelyeket a fénykinyerés növeléséhez lehetne használni. Az átlátszó katódok használata is kihívásokat jelent, mivel átlátszóságuk lényegesen kisebb, mint a fém katódoké. Az UBI Research előrejelzése szerint az átlátszó OLED kijelzőpanelek piaca 2020-ra 5 milliárd USD-re növekedhet, így a megjelenítőpanelek ipara elősegítheti e problémák megoldását [151]. Az elsődleges piacot várhatóan a megjelenítő készülékek előlapjai fogják jelenteni az áruházakban.

Készíthetők olyan panelek is, amelyek kikapcsolt állapotban tükröfelületet adnak, ha nem használnak az eszközben szórt fényt kinyerő rétegeket. Ilyen esetben – ha a panel nem bocsát ki fényt – a felhasználó az átlátszó anódon és az OLED-rétegeken keresztül ráláthat az erősen tükröző katódra, ami tükörszerű képet mutat, amint azt az LG Display 6.15 ábrán bemutatott paneljei mutatják.

Az elektromos csatlakozások és meghajtók igénye néha korlátozza az új formai kialakítások bevezetését. Az LG Display azonban megmutatta, hogy az OLED-ek

stílusbeli előnyei kiterjeszthetők az aktív panelt olyan átlátszó vezető határolóréteggel körbevéve, amely az áramot az emittáló területre vezeti, amint az a 6.16 ábrán látható.

A nyomtatott eszközök érdekesek lehetnek olyan alkalmazásoknál, ahol logóra, képre vagy emissziós területek szegmentálására van szükség. A nyomtatott anyagok és a gyártás fejlesztését abban a reményben is folytatják, hogy ez a megoldás kikövezi az utat majd az olcsó, nagy felületű eszközök felé. A Sumitomo Chemical értékesítésre kínálja nyomtatott OLED Cosmos csempéit, amelyeknek fehér változatai a következő paraméterekkel rendelkeznek: 3100K színhőmérséklet, 72-es színvisszaadási index, 56 lm/W fényhasznosítás és 10 000 óras L70-es élettartam a kezdeti 1000 cd/m²-es fénysűrűsége vonatkoztatva.

A kreatív, de praktikus lámpatestek fejlesztésének elősegítése érdekében az OLEDWorks és a Corning egy OLED-es világítástervezési versenyt támogat, 10 000 USD-vel jutalmazva a győztes terveket [153]. Eközben az Európai Unió egy PI-SCALE elnevezésű, szabad hozzáférésű kísérleti gyártósort indított el, amely lehetővé teszi a vállalatok számára, hogy rugalmas OLED-eszközöket készítsenek autók, repülőgépek és dekorációs célú lámpatestek számára. (<http://pi-scale.eu/>)

6.1.6 Az OLED-termékek elérhetősége

Az OLED-eket jelenleg főként modulrendszerben, kicsiny, 100 cm²-es vagy még kisebb panelekből álló tömbökben használják. Ezek a panelek két- vagy háromdimenziós formában rendezhetők el – fényszobrokat, az architektúrális világítás új formáit kínálva ezzel. Ezeket a fényszobrokat kifinomult csillárok és művészi helyiségvilágítás kialakításához lehet felhasználni. Az LG Display kínálja a legnagyobb, 1000 cm²-es panelt [108]. Végül is a világítástervezők nagy méretű, méretben, alakban igényre szabható „fénylapokat” szeretnének OLED-formában látni.

Jelenleg az OLED-ek korlátozott fénysűrűségük és magas áruk miatt nem tekinthetők praktikus opciónak ahhoz, hogy elsődleges fényforrásnak használják őket egy helyiségben. Ma már sok támogató javasolja felhasználásukat falilámpákban és helyi világításokhoz egyéb, általános világítási fényforrással együtt. Az Acuity Brands és mások (pl. az Osram, a WAC és a Zumtobel) bemutattak hibrid felépítésű OLED-LED-es lámpatesteket [15]. Az ilyen konstrukciók megnövelik a fénysűrűséget és csökkentik a lumenenkénti költséget, ugyanakkor megőrzik az OLED-es



6.18 ábra – OLED-es hátsó helyzetjelző lámpák
(a) Audi TT RS 2016 (b) BMW M4 Concept Iconic Lights
(Forrás: (a) <http://www.beelighting.co.uk/news/> (b) BMW Blog, 2015 [156])



6.19 ábra – Az Audi Q7 hátsó helyzetjelző lámpája („ívelt”, rugalmas és „merev” változat) (Forrás: Thilo Reusch, OSRAM LED, DOE R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016. febr. [103])



6.20 ábra – (a) a GE Edge-Lit panelja (b) a Maxlite Direct-Lit lámpatestje (c) a Cooledge Flexible Direct-Lit technológiája
(Forrás: (a) GE Lighting Overview weboldal, 2012 [158], (b) Maxlite Direct-Lit LED adattal, 2015 [159], (c) Cooledge Flexible Direct-Lit Technology, 2016 [160])

lámpatest-konstrukciók esztétikus megjelenését, amint azt a 2.3 fejezetben ismertettük.

A kis fénysűrűségű OLED-eket szorosan a célfelület közelébe lehet felszerelni anélkül, hogy javítva ezzel a fényfelhasználást, hogy az kényelmetlenséget okozna a felhasználónak. Az amerikai Workrite Ergonomics és az OTI Lumionics OLED-es asztali lámpái 2015-ben jelentek meg a piacon. A Workrite Ergonomics 6,17(a) ábrán bemutatott *The Natural* („a természetes”) elnevezésű asztali lámpájába egy LG Chem gyártmányú panel van szerelve, maximális fénysűrűsége 32 lm/W fényhasznosítás mellett 442 lm, listaára 399 USD. Az OTI Lumionics „Aerelight” asztali lámpája (6.17(b) ábra) 7W-ot fogyaszt, listaára 299 USD [155].

[153] Corning: „Corning and OLEDWorks Announce OLED Lighting Design Open Innovation Contest”, 2016. ápr. 8. (<https://www.corning.com/worldwide/en/about-us/news-events/newsreleases/2016/04/corning-announces-oled-lighting-design-open-innovation-contest.html>)

[154] D. Husley: „Developing OLED Lighting Products”, DOE SSL R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016. febr. (http://energy.gov/sites/prod/files/2016/02/f29/husley_oledproducts_raleigh2016.pdf)

[155] J. Qiu: „OLED Luminaire Design Challenges”, DOE SSL R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016. febr. (http://energy.gov/sites/prod/files/2016/02/f29/qiu_oledproducts_raleigh2016.pdf)

Az OLED-ek egyik fejlődő piaca a gépjárművilágítás. Az OLED-eket az autók hátsó helyzetjelzőiben, belsőtéri világításánál, jelzőfényeiben és kiemelő világításához lehet felhasználni. A 2016-os sorozatban gyártott, felsőkategóriás Audi TT RS kupénak OLED-es hátsó helyzetjelző lámpája van (6.18a ábra). Az OLED-lámpák érdekes tulajdonsága, hogy a fényki-bocsátó területet mintázni lehet. Az Osram demonstrálta is ezt a megkülönböztető tulajdonságot OLED-es hátsó helyzetjelző lámpáinál [103]. Amíg a LED-ekhez reflektorokból vagy fényvezető struktúrákból álló optikai rendszerre van szükség a pontos LED-fényforrás által kibocsátott fény formálásához, az OLED-ek felületi sugárzók, amelyeket optikai rendszer nélkül lehet mintázni és szegmentálni a fényki-bocsátó felület formálására. Kétdimenziós fényekből háromdimenziós effektusokat lehet létrehozni különböző fény-sűrűség-szintekkel. Ezenkívül az egymástól függetlenül címezhető fényszegmensek felhasználásával az OLED-ekkel érdekes, dinamikus hátsó helyzetjelzési folyamatok hozhatók létre. Ilyen effektust látható a limítált példányban készülő – most éppen gyártásba vett – BMW M4 GTS kupénál (6.18b ábra).

Az Osram is vizsgálta átlátszó és rugalmas panelek autópánci alkalmazását. A Német Szövetségi Oktatási és Kutatási Minisztérium támogatásával indított R2D2 projekt keretében partnereivel, az Audival és a Hellával együtt a rugalmas OLED-ek hátsó helyzetjelzőlámpákban való felhasználásán dolgozott [157]. A 6.19 ábrán láthatók az Audi rugalmas és merev vörös OLED-paneljei egy Audi Q7-ben.

OLED-panelek kontra diffúz fényű LED-panelek

Az OLED-technológia kulcsfontosságú tulajdonsága a nagy felületű fényforrások diffúz természete. Az OLED-eket utánzó, nagy felületen diffúz fényt kibocsátó LED-es termékek egyre vonzóbbá válnak. Számos élvilágítású és direkt fényű termék kapható már. A 6.20 ábrán lehet látni néhány példát a LED-panelekre. A nagy teljesítőképességű és olcsó LED-ekkel készült ilyen termékek vonzó alternatívát

kinálnak az OLED-es lámpatestekkel szemben. A LED-panelek ára 25-40 USD/klm szemben az OLED-panelek 120 USD/klm-ével. Az alacsony áron kívül a LED-ek hosszú élettartamot mutatnak, és vannak olyan 3500K színhőmérsékletű panelek, amelyeknek fényhasznosítása meghaladja a 100 lm/W-ot. A LED-ek korlátai többnyire az esztétika és a formatényező. A direkt fényű paneleknél jelentős távolságra van szükség az emitterek és a fényt terítő optika között ahhoz, hogy megakadályozzuk az egyes fénypontokra való közvetlen rálátást. Az élvilágítású paneleknél az árak magasabbak és korlátozott az eszköz területe, hogy meg lehessen őrizni az egyforma fényerősséget a panel mentén,

a fény-sűrűség ui. az éltől távolodva csökken. További korlátozást jelent, hogy a hullámvezetős megközelítéseket nehéz lenne alkalmazni a rugalmas paneleknél. Így az igen vékony, opcionálisan mintázattal, átlátszósággal és rugalmassággal kombinált OLED-ek olyan terveket tesznek lehetővé, amelyek csupán LED-technológiával nem valósíthatók meg. Amint a kifejezetten a nagyobb mennyiségekhez tervezett gyártósorok elkezdene nagyobb mennyiségeket gyártani az OLED-panelek-ből, remélhető, hogy a költségek csökkenni fognak, és így ár és teljesítmény szempontjából versenyképes termékek jelennek meg a piacon.

8.4 táblázat – Az OLED-ek ellátólánca: globális berendezés- és anyagellátók

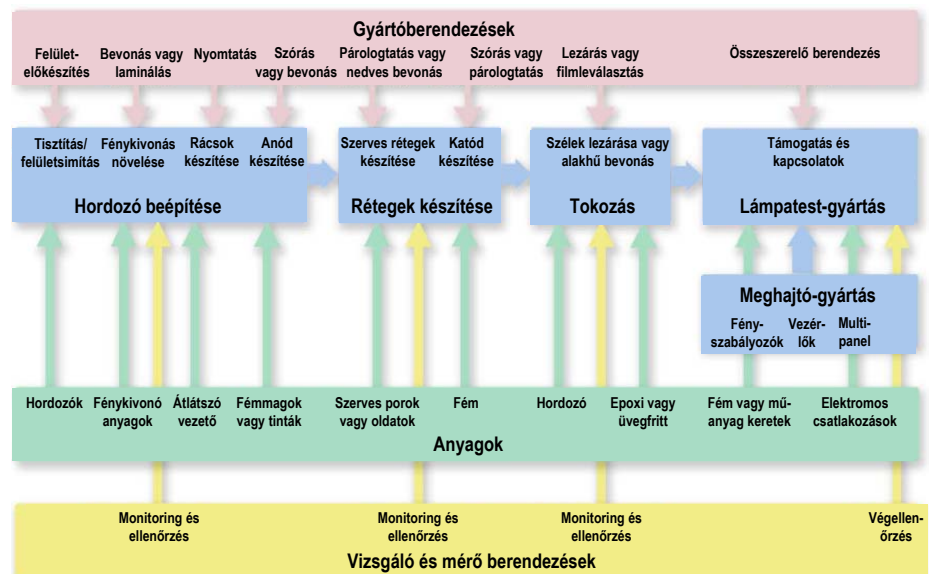
Ellátólánc	Észak-Amerika	Európa	Ázsia
Berendezés-szállítók			
Gőzfázisú leválasztás	• Kurt Lesker • Trovato Mfg	• Aixtron • VG Scientia • Von Ardenne	• AMS • Canon Tokki • Choshu • GJM • Hitachi Zosen • Jusung • SFA • SNU Precision • Sunic Systems • ULVAC • YAS
Bevonók, nyomtatók és mintakészítők	• Dimatix • NovaCentrix • nTact • Sono-Tek • Xenon Corp	• 4Jet Technologies • Ceradrop • Coatema • Manz • Mbraun • Meyer Burger	• Dai Nippon Screen • Screen Holdings • Seiko Electron • Sung Am Machinery • Tazmo • Tokyo Electron • ULVAC
Tokozás	• Applied Materials • Coherent • Kateeva • Lotus • Veeco	• Aixtron • Beneq • Encapsulix • Kurdex	• AsiaTree • Avaco • Canon Tokki • Fujifilm • HB Industries • Jusung • Shimadzu • ULVAC • Wonic IPD • YAS
Teszt és ellenőrzés	• Colnatec • Radiant Zemax	• Laytec • Instrument Systems • SEMPA • Schenk Vision • VG Scientia • Vinci Tech	• Chroma ATE • Hitachi High-Tech • Kisco Uniglobe • KMAC • Konica Minolta • Micro Inspection • Micronics
Anyagok			
Hordozók	• Alcoa • DuPont-Teijin • Pilkington • Corning • PPG	• ArcelorMittal • St. Gobain • Schott Glass	• Asahi Glass • LG Chem • Nippon Electric Glass • SKC Kolon • Ube
Fénykivonó anyagok	• 3M • Pixelligent • DuPont • PPG • R-Display • UDC	• Covestro	• Kimoto Tech • Toppan Printing
Aktív szerves anyagok		• BASF • Cynora • Merck • Novald • Ossila • Sensient	• Aglaia • Doosan • Dow Electro-Materials • Duksan Hi-Metal • eRay Opto • Hodogaya • Idemitsu Kosan • Jilin Optical • Kyulux • LG Chem • Lumtech • Mitsubishi Chem • Mitsui Chemical • Nippon Steel Sumikin • Nissan Chemical • RuiYuan • Samsung SDI • Sumitomo Chemical • Sun Fine Chemical • Wan Hsiang OLED
Vezetők	• Cambrios • Chasm • DuPont • ElectronInks • Intrinsic Materials • Micro-continuum • Sinovia	• Agfa • Genes'Ink • Heraeus • Inkron • SEFAR AG	• DNP • Nagase • OLED Materials Solutions
Tokozás	• DuPont • 3M • Vitroflex	• Delo • Henkel • SAES Getters • Sud-Chemie • Tesa	• Dynic • Fujifilm • Futaba • Jindal • LG Chem • Konica Minolta • Samsung SDI • Tera Barrier

6.2 Az OLED-gyártás helyzete

A következő rész a legújabb fejlesztésekre és azokra a fontos kihívásokra koncentrál, amelyekkel az OLED-gyártásnak szembe kell néznie. Az OLED-gyártás folyamatát viszonylag független gyártási lépések sorozatával lehet definiálni, amelyeket gyártóberendezések, anyagok és vizsgálóberendezések támogatnak. A gyártási folyamatok, gyártóberendezések, anyagok és vizsgálóberendezések összessége alakítja ki az OLED-gyártás ellátóláncát, amelyet igen részletesen tárgyalt a 2014-es szilárdtest-világítási gyártási ütemterv (http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_mfg_roadmap_aug2014.pdf).

Az elmúlt három év során az OLED-gyártás – lévén, hogy a tesztpanelek elkerültek a világítástervezőkhöz és az egyedi vásárlókhöz – kilépett a K+F-fázisból a hatékony gyártásra tervezett gyártósorokkal dolgozó kísérleti gyártás fázisába. Ilyen gyártósorokat fejlesztett ki a dél-koreai LG Chem, a német Osram és Philips, a kínai First O-Lite, a japán Konica-Minolta és az egyesült államokbeli OLEDWorks, amelyek csatlakoztak a franciaországi Astron Fiamm-hoz, valamint a japán Lumiotech-hez és Kaneka-hoz, akik már évek óta készítenek paneleket és értékesítenek lámpatesteket. Más cégek – például a Panasonic – úgy döntöttek, hogy késleltetik a kereskedelmi gyártásba való bekapcsolódásukat, noha folytatják a K+F munkát. Minden gyártónak megvannak a maga gyártási kihívásai és üzleti döntései, de a legnagyobb kihívásnak a költségsökkentés, a panelek konzisztenciája és megbízhatósága és a nagy méretű anyagok előállítása tűnik.

A kísérleti gyártósorok többsége hagyományos gőzfázisú leválasztási technikákat használ a szerves rétegek 370mm x 470mm körüli üveghordozókon történő kialakításához. A gyártósorok kapacitását a Philips által az aacheni gyártósorra 2015 elején nyilvánosságra hozott gyártási paraméterek felhasználásával lehet megbecsülni [161]. Gyártási ciklusidejük – amelyre gyakran a német TAKT szóval hivatkoznak – három perc, és a jó panelek kihozatala 70% körüli volt. Hordozóik mérete 400mm x 500mm. Ha feltételezzük, hogy mindegyik hordozón 12 panel készül és a gyártósor 7500 órát működik (1260 órát hagyva a tervezett leállásokra, karbantartásra és üzemzavarokra), akkor az OLEDWorks-sor évi kapacitása közel 1,3 millió darab 100mm x 100mm-es aktív



6.14 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 folyamatához.

felületű panel gyártását teszi lehetővé.

A Konica-Minolta régóta szószólója a roll-to-roll gyártás alkalmazásának rugalmas hordozókon. 2014 májusában bejelentette, hogy 10 milliárd yent (közel 100 millió USD-t) fordít egy havi 1 millió panel előállítására alkalmas roll-to-roll gyár létesítésére. A tervek szerint az építés 2014 nyarára fejeződött be, és a gyártás 2014 őszén indult [162, 163]. 2015 januárjában bejelentette, hogy a tömeggyártás elindult és hogy 15 000 db OLED-fényforrást használtak fel 5000 db tulipán alakú lámpatest előállításához, amelyet a japán Huis Ten Bosch élményparkban megtartandó – „a fény birodalma” – rendezvényhez fognak felhasználni [164]. 2016 első negyedének végével azonban még nem számoltak be kereskedelmi eladásokról.

Korlátozott mennyiségben gyárt paneleket Japánban a Kaneka és a Mitsubishi-Pioneer, valamint Kínában a Visionox. A világ teljes gyártási kapacitása 2015-ben 100 000 m² körüli, ami 10 millió 100mm x 100mm-es panel gyártásához elegendő. Panelekenként 15 USD árat feltételezve az ebből származó teljes forgalom 150 millió USD-t tenne ki. Az értékesítés azonban ennél sokkal kisebb, ezért feltételezhető, hogy a rendelkezésre álló kapacitás kihasználatlan.

Az Acuity Brands és a Neumuller inspiráló vezető szerepet tölt be az Egyesült Államokban, illetve Európában – demonstrálva az OLED-technológia hatékony világítás-technikai felhasználását. Van azonban

számos olyan kihívás, amely késlelteti az OLED-es világítástechnológia fejlesztését, gyártását és elfogadását. A LED-es világítástechnikai termékekhez képest az OLED-termékeknek teljesítőképességi deficitjeik vannak. A LED-technológia fejlődését mozgó cél mutatja az elfogadható teljesítőképességi szintek tekintetében. Nyilvánvaló, hogy az OLED-panelek gyártási problémái a bejelentett gyártási kapacitások magas szintjeiből, a magas árból és az OLED-panelek korlátozott kereskedelmi célú gyártásából következik. Az OLED-es világítási termékek a fogyasztók számára megbízhatóság, fényáram, szín és teljes teljesítőképesség tekintetében is ismeretleneknek tekinthetők. Ez a fogyasztói tévovás előfordul a LED-es világítási termékeknél is, de a LED-ek képesek voltak reprodukálni észszerűbb áron a megszokott formai kialakításokat, ami meg-

[161] U. Hoffman: „Manufacturing of High Quality OLED”, *China International OLED Summit*, Peking, 2015.

[162] 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)

[163] OLED-info: „Konica Minolta to build a flexible OLED lighting R2R fab with a monthly capacity of 1 million panels”, 2014. márc. 18. (<http://www.oled-info.com/konica-minolta-build-flexible-oledlighting-r2r-fab-monthly-capacity-1-million-panels>)

[164] Konica Minolta: „OLED Lighting Examples: Tulips”, 2015. jan. (http://www.konicaminolta.com/oled/user_case/)

győzte a fogyasztókat arról, hogy van esély az energiamegtakarításra. Az OLED-ek alapvető technológiája nem teszi lehetővé a megszokott lámpatípusok reprodukálását, ezért az OLED-iparnak nehezebb a feladata a fogyasztók tájékoztatása terén, már ami az új világítás formatényezőit és a technológia előnyeit illeti. A fogyasztók számára rendelkezésre álló termékpéldányok korlátozott száma tovább súlyosbítja ezt a problémát. A valószínű megoldások technológiai fejlesztéseket igényelnek a teljesítőképesség és a gyártás terén, a gyártók kockázatot vállalnak a technológia, a fogyasztók felvilágosítása és a termékek fejlesztése terén, ami parancsoló érték-problémákat vet fel.

6.2.1 Az ellátólánc vázlata

Noha az OLED-panelek vagy OLED-lámpatestek gyártásában résztvevő vállalkozások száma viszonylag csekély, ezek a vállalatok nagy számú anyag-, berendezés- és gyártástechnológia-szolgáltatótól függenek. A különböző szolgáltatók szerepeit a 6.21 ábra mutatja.

6.2.2 Kritikus OLED-komponensek

Az OLED-ek gyártásánál a fehér fény előállításához szükséges sok komponens vagy réteg okán számos gyártási lépésre van szükség. A következő fejezetekben a jelenlegi gyártási képességek áttekintése mellett az egyes komponenseket is meg fogjuk tárgyalni.

Az OLED-panelek vázlatos felépítését a jelen cikksorozat 1. részében, a HOLUX Hírek 2017. februári, 161. számában mutattuk be. – A Szerk.)

Hordozók kiválasztása és előkészítése

A kereskedelmi forgalomban kapható legtöbb OLED-es világítópanelhez kijelző-minőségű üveget használnak, mint amilyenek a Corning fúziós eljárásával készülő típusok. Ez 1mm-nél vékonyabb, nagy átláthatóságú, igen sima felületű lapokat eredményez – kitűnő vastagság-kontroll (kisebbsé mint 20 µm-es eltérés) és kisebb mint 1 µm-es hullámosság mellett [165]. A kis hőkitérjedési együttható következtében nagy hőmérsékleten lehet a gyártást végezni, minimális illesztési és beállítási problémák mellett. A vastagságot 100 µm alá lehet csökkenteni, rugalmas panelek gyártását és roll-to-roll gyártósorok használatát téve ezzel lehetővé. Olcsóbb üvegformákat (pl. szoda-mész-szilícium ablaküveget) is vizsgálunk, de ezek általában csak 1mm-nél vastagabb kivitelben állnak rendelkezésre. Valamennyi üveghordozó esetén ügyelni kell arra, hogy a felület sima

Anyag	Leválasztás módja	Alakhü bevonat	Költség	Részecske méret / sűrűség	Savakkal szembeni ellenállás	Réteg-sűrűség	Törés-állóság
AlOx	PVD	Nem – nézővonalas leválasztás	Magas – kis leválasztási sebesség	Mikron – nagy sűrűség	Kicsi	3,2 g/cm ³	3,3-4,8 MPa ^{0.5}
SiOx	PECVD	Igen	Alacsony – nagy leválasztási sebesség HMDSO-val	Szubmikron – nagy sűrűség	Nagy	2,2 g/cm ³	0,55-1,7 MPa ^{0.5}
SiNx	PECVD	Igen	Mérsékelt – nagy leválasztási sebesség SiH ₄ -gyel	Szubmikron – kis sűrűség	Nagy	2,7 g/cm ³	4-6 MPa ^{0.5}

6.23 ábra – Szervetlen rétegek leválasztásai a barrier(gát)filmek számára

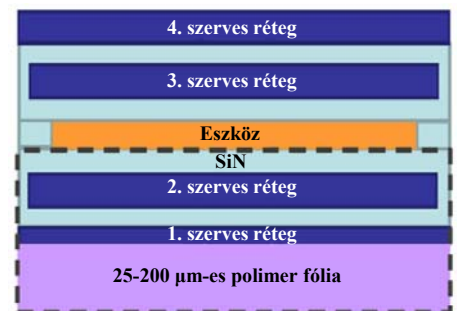
(Forrás: Neil Morrison, Applied Materials, Flex Konferencia, Monterey, Kalifornia, 2016. márc. [169])

legyen, a „hegy-völgy” egyenetlenség lehetőleg ne haladja meg a 10nm-t.

Az OLED kijelzőknél előnyben részesített műanyag hordozó a poliimid, mivel max. 350 °C-os megmunkálási hőmérséklet elviselésére képes. A hatékony nedvességszűrő réteggel ellátott átlátszó poliimid ára azonban magasabb, mint a kijelző-minőségű üvegé. Vannak olcsóbb alternatívák is, például a polietilén-tereftalát (PET) és a polietilén-naftalát (PEN). Noha ezek nem viselik el az OLED-kijelzők vékonyréteg-tranzistoros háttérpaneljeinek gyártásánál használt magas feldolgozási hőmérsékleteket, erre a világítástechnikai alkalmazásoknál nincs szükség. A nem kifejezetten ehhez az alkalmazáshoz kifejlesztett műanyagoknál a felület durvasága azonban súlyos problémát jelenthet.

A roll-to-roll gyártásnál hordozóként fémfóliák is használhatók, és ezek hatékony védelmet nyújtanak a nedvesség behatolásával szemben. Alkalmaskak magas hőmérsékleten történő feldolgozásra, és fedőanyagként könnyű, vékony alternatívát kínálnak az üveggel szemben. Azonban vagy a hordozónak, vagy a fedőanyagának átlátszónak kell lennie, ezért a fémfóliákat mindkét célra nem lehet használni. A felületi egyenetlenség ismét csak gondot okozhat, mivel a rozsdamentes acél hengerek „hegy-völgy” egyenetlensége akár 1 µm is lehet. Ezért a felületi egyenetlenséget biztosítani kell, például polirozással vagy planarizáló réteg alkalmazásával. A fémfóliák jól alkalmazhatók rugalmas panelekhez és eszközökhöz, feltéve, hogy a meghajlítás nem vezet gyűrődéshez. Mind rozsdamentes acélból, mind alumíniumból készült fóliákat sikerrel használtak OLED-prototípusok előállításához.

A hordozó megválasztásától függetlenül meg kell előzni a felület szennyeződését, és a felület tisztítása nagyon fontos. Szerecsére azonban úgy tűnik, hogy egyedi tervezésű berendezésekre nincs szükség, mivel megfelelő eszközöket már kifejleszt-



6.22 ábra – Többretegű gát-bevonat a nedvesség vagy az oxigén behatolásának megakadályozására (Forrás: Pim Groen, Holst Centre, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, Kalifornia, 2015. jan. [166])

tettek a félvezetők, lapos panelek és fényelemek gyártásával foglalkozó iparágak számára. A gyártási folyamat minden lépésénél robotokra van szükség, és a rotációs hengerrel történő feldolgozásnál a belső felületnek lehetőleg nem szabad semmilyen szerszámmal érintkezésbe lépnie.

Védő(gát)-rétegek műanyag hordozókhoz

Valamennyi műanyag hordozó igen porózus az oxigén és a vízgőz számára, amelyeket távol kell tartani az OLED-ek aktív rétegeitől. Habár a kemény szervetlen anyagok rétegei megfelelő védelmet jelentenek, a leválasztás során nehéz elkerülni a tűhegylyukak kialakulását. Hatékony védőrétegeket lehet kialakítani több sűrű szilikon- (vagy fém-) nitrid vagy oxid réteg létrehozásával, amelyek közé szerves rétegeket iktatnak. A szervetlen rétegek tipikusan plazmával aktivált kémiai rétegleválasztással (PECVD) vagy atomi rétegleválasztással (ALD) készülnek. A szerves rétegek megakadályozzák a defektnek a

[165] Corning: „Our Products”, 2015. (<http://www.corning.com/worldwide/en/products/display-glass.html>)

[166] P. Groen: „Roll-to-Roll Processing for Solution Processed OLED Devices”, DOE SSL Workshop, San Francisco, Kalifornia, 2015. jan. 28. (http://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/groen_r2oled_sanfrancisco2015.pdf)

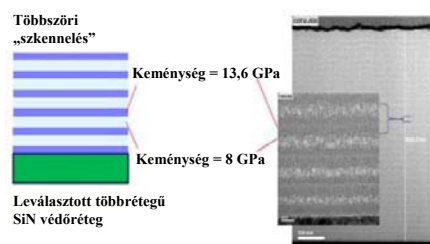
sűrű szervesetlen rétegeken való áthaladását és tartalmazhatnak aktív nedvesség-abszorbeneket és oxigénmegkötőket. A 6.22 ábra a Holst Központban kifejlesztett ilyen struktúrákat mutat be, amelyek roll-to-roll eljárással állíthatók elő.

A többszörös védőrétegek becsült ára 35-60 USD/m², ami messze meghaladja az OLED-es világítás kitűzött céljait. A Kateva nagy felületű tintasugaras nyomtató berendezésének kifejlesztése, valamint a szervesetlen rétegek tökéletesített PECVD (plazmával aktivált kémiai rétegleválasztás) vagy gyors ALD (atomi rétegleválasztás) eszközei alacsonyabb árakat ígérnek a jövőben [167, 168].

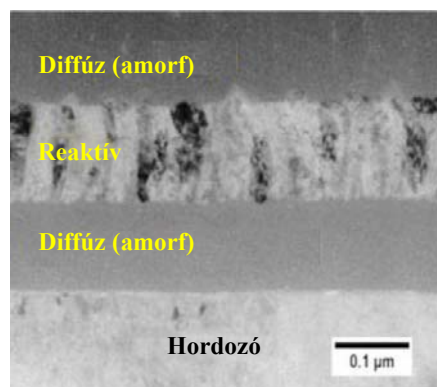
Az Applied Materials mint a PECVD eszközök világviszonylatban is vezető gyártója nemrégiben kifejlesztett egy roll-to-roll berendezést néhány alkalmazási terület rugalmas elektronikáinak gyártásához. A 6.23 ábra bemutatja, hogy az Applied Materials miért részesíti előnyben a PECVD eljárást szilikon-nitrid (SiN_x) esetén és tekinti azt a legjobb választásnak teljesítőképesség, költség és mechanikai robusztusság tekintetében a szervesetlen rétegek leválasztásánál – különösen, ha az műanyag hordozókra történik, amelyek nem viselik el a magas hőmérsékletű gyártási folyamatokat. Az Applied Materials bemutatott olyan roll-to-roll szerszámokat, amelyek egyetlen „szkenelési” folyamattal akár öt rétegre is képesek leválasztást végezni 1,5 m széles szalagokon. Nagy figyelmet fordítottak a részecske-szennyeződések minimalizálására, így a leválasztás egyenletessége: $\leq \pm 2.5\%$ [169].

Az atomi rétegleválasztás (ALD) igen kemény filmeket eredményez, de hagyományosan nagyon lassú folyamat volt. Számos gyártó kifejlesztett gyors ALD eljárásokat. A Meyer Burger például bemutatott egy olyan roll-to-roll eszközt, amely több mint 1 mm/s sebességgel képes alumínium-oxidot (Al₂O₃) PET-re (polietilén-tereftalát) leválasztani atmoszferikus nyomás mellett [170].

A gát-rétegek költségét jelentősen le lehetne csökkenteni tisztán szervesetlen rétegek alkalmazásával, amelyeket egyetlen gépen le lehetne választani. Ennek egyik módszerét a kaliforniai PlasmaSi cég fejlesztette ki, amelyet a közelmúltban az Aixtron felvásárolt. A cég OptoCap™ gát-réteget olyan kemény rétegek beiktatásával állítja elő, amelyek elég vékonyak ahhoz, hogy a kemény rétegeket összekötő lágyabb rétegekkel meghajlítsák őket és így csökkentse a réteg feszültségét, amint azt a 6.24 ábra mutatja. A struktúra a PECVD gép többszöri „szkenelési” fázisával állítható



6.24 ábra – Különböző keménységű szervesetlen rétegek váltakozó felvitelével készült többrétegű gát (Aixtron) (Forrás: Juergen Kreis, Aixtron: „Cost Efficient OLED Manufacturing”, Smithers Apex OLED World Summit, 2015. október [172])



6.25 ábra – Különböző keménységű szervesetlen rétegek váltakozó felvitelével készült többrétegű gátak (Vitriflex) (Forrás: Ravi Prasad, Vitriflex: „Transparent Barrier Films”, OLED Stakeholder meeting, Pittsburgh, 2015. szeptember [174])

elő. E módszer egyik korai változatát a Universal Display vezette be, bemutatva, hogy különböző rétegsűrűséget lehetne elérni a folyamatparaméterek és a gázkeverék módosításával a PECVD leválasztás során hexametil-disziloxán (HMDSO) és oxigén felhasználásával [171]. Egy ázsiai gyártó 2015-ben 2016. első negyedévében történő szállítással rendelt egy 200mm x 200mm-es hordozókhoz alkalmas nagyságú Aixtron szerszámot [173]. Az Applied Materials kidolgozta a lágy szervesetlen rétegek felhasználását is a többrétegű gátstruktúrák szerves puffereinek helyettesítésére. Létrehozott plazma-polimerizált HMDSO réteget HMDSO és N₂O keverékek felhasználásával, és ígéretes eredményeket kapott háromrétegű PEN-struktúráknál [169].

Hasonló megközelítést használt fel a Vitriflex is (6.25 ábra). Kétféle fémoxid-réteget választott le váltakozva. A diffúz rétegek blokkolják a H₂O és O₂ átvitelt, miközben az amorf anyag véd a tűhegylyukak terjedésével szemben. A reaktív rétegek befogják az első rétegen átjutott H₂O és O₂ részecskéket. A gát-anyag védelme érdekében hibrid polimerből készült felső tömítőréteget is alkalmaznak. A gát-struktúrákat a roll-to-roll berendezésekben reaktív porlasztással hozzák létre max. 1,4 m széles szalagokon [174].

Fénykivonás-növelő struktúrák

Amint azt a fentiekben említettük, a külső fénykivonó rétegek rendszerint a hordozón kiképzett mikrolencse-tömbökből állnak, amelyeket többféle, jól bevált technikával lehet kialakítani. A mintázatok lehetnek periodikusak vagy szabálytalanok is, de periodikus struktúrák esetén gondosan kerülni kell az emissziós szögben a színvariációkat. A hordozó gyártása során felületi modulációkat lehet kialakítani, vagy azokat a gyártás után lehet belemarati a felületbe. A legáltalánosabb eljárás egy olyan struktúrált polimerfilm laminálással vagy in situ leválasztással történő kialakítása, amelynek törésmutatója illeszkedik a hordozójához. Lamináló-filmek több beszállítótól beszerezhetők, A belső fénykivonó rétegeket rendszerint a hordozó és az első elektróda közé illesztik be laminált filmekként, vagy in situ alakítják ki. A legnagyobb kihívás annak biztosítása, hogy az elektródákat és a szerves rétegeket le lehessen választani az integrált elektrolumineszcens réteg (IEL) tetejére, ezért a felület érdessége és vegyi összetétele nagyon fontos. OLED-ekbe illeszthető mikrolencse-tömböket már bemutatott a 3M, a Panasonic és kifejlesztettek mások is, de tömeggyártásban még nem alkalmazták azokat [175, 176].

A Pixelligent és mások nagy mennyiségben gyártanak törésmutató-illesztő folya-

[167] C. Brown: „Inkjet Technology for OLED SSL Mass Production”, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, Kalifornia, 2015. jan. 28. (http://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/brownmadigan_inkjet_sanfrancisco2015.pdf)

[168] Veeco: „Fast-ALD for Flexible OLED Displays” (<http://www.veeco.com/products/alddsystems.aspx>)

[169] N. Morrison: „Packaging of Moisture Sensitive Materials Used in New Form Factor Display Products”, Flextech Alliance Flexible and Printed Electronics Conference 2016, Monterey, Kalifornia, 2016. márc.

[170] D. Veri és M. Burger: Breakthroughs in the Production of Flexible and Hybrid Electronics”, Building the Innovation Ecosystem for Flexible Electronics, Monterey, Kalifornia, 2016

[171] P. Mandlik, J. Gartside, L. Han, I.-C. Cheng, S. Wagner, J. A. Silvernail, R.-Q. Ma, M. Hack és J. J. Brown: „A single-layer permeation barrier for organic light-emitting displays”, Applied Physics Letters, vol. 92, no. 103309, 2008

[172] J. Kreis: „Cost Efficient OLED Manufacturing”, Smithers Apex OLED World Summit, Berkeley, Kalifornia, 2015. okt.

[173] LEDinside: „AIXTRON Sells Encapsulation Machine to Major Asian Display Manufacturer for OLED Barrier Film Deposition”, 2015. szept. 10. (http://www.ledinside.com/news/2015/9/aixtron_sells_encapsulation_machine_to_major_asian_display_manufacturer_foroled_barrier_film_deposition)

[174] R. Prasad: „Transparent Barrier Films”, DOE SSL Program OLED Stakeholder Meeting, Pittsburgh, Pennsylvania, 2015. szept.

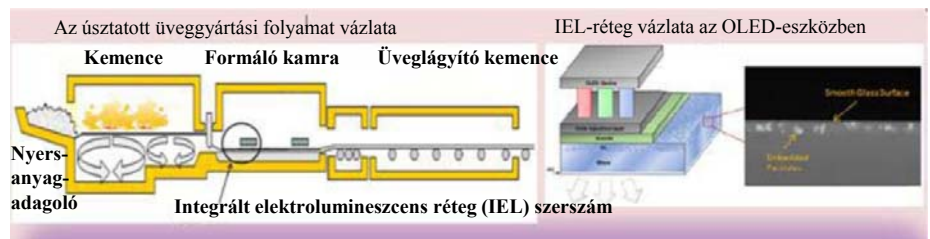
foliadékokat és fény szóró filmeket mikrorészecskének nagy törésmutatójú gazdaanyagba történő bevitelével [177, 178]. Az eljárással összefüggő gyártási problémákat az OLEDWorks vizsgálja egy a DOE által finanszírozott projekt keretében. A fény szóró filmet „széles résű szerszámmal” (slot die) választják le; ezzel akár 2,18-szorosára is képesek megnövelni a fénykivonást [132].

Elektrodastruktúrák

Noha úgy tűnik, hogy általános vélemény szerint az indium-ön-oxid (ITO) nem a legjobb átlátszó elektróda az OLED-es világítás számára, különösen rugalmas panelek esetén, és számos laboratóriumi kísérletet végeztek az optimalizálás és az alternatívák tesztelése érdekében, a kereskedelmi panelekhez még mindig ITO-t használnak. A szilárdtest-világítás legújabb eredményei igazolták azt, hogy az ezüst nanohuzalok jobbak az ITO-nál. Például a Sinovia cég szabadalmaztatott polimer gazdaanyagába a Solvay-tól származó nanohuzalokat beágyazva $3 \Omega/\square$ rétegellenállást (felületegységre eső ellenállást) és 76% átlátszóságot demonstrált [179]. Mivel azonban a 20-40 nm-es vastagság nagyobb, mint néhány szerves réteg vastagsága, még igazolni kell azt is, hogy vajon a szerves struktúrát le lehet-e választani a nanohuzal-réteg tetejére zárlat előidézése nélkül.

Egy alternatív megközelítés a fémráccsal ellátott átlátszó vezetőréteg alkalmazása. A „tömbfémek” fajlagos ellenállása igen alacsony – pl. az ezüsté $1,6 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$, a vörösrézé $1,7 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$, az alumíniumé pedig $2,8 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ –, ezért egy $1 \mu\text{m}$ magasságú ezüstrács, amely a panel területének 10%-át fedi le, mintegy $0,16 \Omega/\square$ tényleges rétegellenállással rendelkezik. A fémrácsok elkészítése azonban költséges lehet. Ha a fém „ömlesztett” formában választják le, a rácsvonalak közötti hézagokat maratással el kell távolítani, ami nehezíti a szemcsék kontrollját, és a leválasztott anyagok nagyobb része kidobandó vagy újrahasznosítandó lesz.

A fémrácsok nyomtatása a legtöbb gyártó számára ígéretesebb megoldásnak tűnik, de a nanorészecskés fémfestékek használata az elektromos ellenállás tekintetében jelentős „büntetéssel” járhat. A Holst Intézet nemrégiben készült felmérése azt mutatta, hogy a nyomtatott ezüstcsíkok tipikus ellenállása 7-10-szer akkora, mint az ömlesztett ezüsté, míg a jelenleg fejlesztés alatt álló festékek az ellenállás-deficitet az ömlesztett anyag ellenállásának 3-4-szeresére csökkenthetnék [180].



6.26 ábra – Integrált elektrolumineszcens réteg felvitele (IEL) úsztatott üvegyártási folyamat során (Forrás: C.H. Hung: „Manufacturing Process for OLED Integrated Substrate”, DOE SSL R&D Workshop, Poster szekció, Raleigh, Észak-Karolina, 2016. február [182])

A nyomtatott csíkok ellenállása jelentős mértékben függ az alkalmazott kikeményítési módszertől. Hőhatással történő kikeményítéssel hagyományos festékek alkalmazása esetén az ömlesztett anyagénál 3-4-szer nagyobb ellenállás érhető el 200°C körüli hőmérsékleten. A termikus kikeményítés azonban viszonylag lassú folyamat, ezért a figyelem a fotonikus kikeményítés felé fordult. A Novacentrix $2,8 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ ellenállást ért el a PChem által kifejlesztett nanoezüst festékkel bevont PET anyagon [181]. Ez csupán kétszer akkora, mint az ömlesztett („tömb”) ezüst ellenállása, és $1 \Omega/\square$ -nél kisebb effektív rétegellenállású rácsot lehetne készíteni belőle, a fény csupán 5%-ának blokkolása mellett. Ilyen tinták esetén a rácsvonalakat közvetlenül ki lehetne alakítani szitanyomtatással, magasnyomással vagy tintasugaras nyomtatással.

A huzalrácsok beépítése csökkenti az anódlamellákra nehezedő ellenállás-követelményeket, így egyéb tulajdonságokon – pl. az injekciós hatásokon – alapuló anyagokat lehet választani és még polimereket (pl. PEDOT-PSS-t) is lehet használni. A rácsvonalak magassága azonban lényeges (rendszerint $1 \mu\text{m}$ nagyságrendű), és planarizációs rétegekre lehet szükség a szerves rétegezés mentén kialakuló zárlatok elkerülésére.

Integrált hordozók

Mivel jelentős a kölcsönhatás a fent tárgyalt rétegek között, nagy az érdeklődés az integrált hordozók kifejlesztése körül, amelyek elegendő védelmet nyújtanak a finom szerves rétegek számára, megkönnyítik az áram eloszlását a panel mentén és lehetővé teszik a fény nagy részének kilépését. Ezt az erőfeszítést a merev kijelzőkhöz alkalmas üveget gyártó vállalatok vezették. A PPG olyan gyártási eljárásokra fókuszált, amelyek az üveg formálásának idején alkalmazhatók – azzal érvelve, hogy ez lesz a leggazdaságosabb megközelítés tömeggyártás esetén. A PPG megoldása a 6.26 ábrán látható.

Az anódstruktúra így akkor alakítható ki,

amíg az üveg még viszonylag meleg, nagyobb vezetőképességet és simább felső felületet biztosítva ezzel. A rétegellenállás kisebb mint $10 \Omega/\square$, az átlátszóság 85% és az átlagos felületi érdesség kisebb 2 nm-nél. Az anód kilépési munkája nagyobb mint 5 V, és a PPG azt közölte, hogy külön lyukinjektáló rétegre nincs szükség.

A Corning megközelítése az ultra vékony. „Willow glass” elnevezésű üvegük használata, amellyel megfelelő paneleket lehet gyártani, és alkalmas roll-to-roll eljárás-hoz is. A Corning nem hozta nyilvánosságra fénykinyerést növelő rétegei összetételét, de tény, hogy 2,1-szeres faktort sikerült elérnie egy olcsó megoldás segítségével [183].

Két másik piacvezető üvegyártó, a Nippon Electric Glass (NEG) és a Saint-Gobain egy vegyes tőkeérdekeltségű vállalatot hozott létre OLED Materials

[175] F. McCormick: „Light Extraction Films for OLED Solid State Lighting”, DOE SSL R&D Workshop, Tampa, Florida, 2014. jan. (http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/mccormick_extraction_tampa2014.pdf)

[176] T. Komoda: „Recent Progress and Future Trends of OLED Technologies for Lighting Applications”, Smithers-Apex OLED World Summit, Berkeley, Kalifornia, 2014. szept.

[177] D. Russel és A. Stabell: „White Paper: Scaling-up Pixelligent Nanocrystal Dispersions”, Pixelligent Technologies, Baltimore, Maryland, 2016

[178] G. Cooper: „Overview of Pixelligent’s OLED Lighting Program”, OLED World Summit, Berkeley, Kalifornia, 2015. ok.

[179] W. Gaynor: „Poster Presentation”, DOE SSL R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016. febr.

[180] E. Rueblich: „Stepwise Process Optimization for Printing Electronics Manufacturing”, IDTechEx Printed Electronics Europe, Berlin, Németország, 2014. ápr.

[181] M. Mastropietro: „Overview of Transparent Metal Mesh Electrode Technologies”, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, Kalifornia, 2015. jan. 29. (http://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/mastropietro_oled-mfg_sanfrancisco2015.pdf)

[182] C. Hung: „Manufacturing Process for OLED Integrated Substrate”, DOE SSL R&D Workshop Poster Session, Raleigh, Észak-Karolina, 2016. febr.

[183] Corning: „Thinness, Strength, and “Bendability” Render Visions of Wrap-around Displays”, Corning, 2016. <https://www.corning.com/worldwide/en/products/display-glass/products/corningwillow-glass.html>

Solutions néven integrált hordozók fejlesztésére, de IES struktúrájukkal kapcsolatos részleteket vagy bármilyen teljesítő-képességi adatot még nem hoztak nyilvánosságra [184]. Ez a partneri kapcsolat a Nippon Electric Glass (NEG) ultravékony üveggel és a Saint-Gobain-nek a Silverduct elnevezésű átlátszó anódjával kapcsolatos tapasztalataira támaszkodik [185].

A hosszú távú kutatás a műanyag hordozókon kialakított integrált struktúrákra fókuszál. A DOE szilárdtest-világítási projektjében a Sinovia az olcsó polietilén-tereftalát (PET) vagy polietilén-naftalát (PEN) hordozókon kialakított Vitri-flex gátakra választja le átlátszó anódstruktúráit a Vitri-flex és az Eastman Kodak roll-to-roll eljárásai felhasználásával [186]. Az ezüst nanohuzalokból készült anódokat két egyetemi projektnél is alkalmazzák hasonló célokkal. A fénykivonás növelésére a Princeton University szintelen poliamid réteg légzárvaiból kialakított fényszóró központokat használ [187]. A Los Angeles-i University of California hasonló struktúrákat tesztek, de egy polimer kötőanyagba bevitt nagy törésmutatójú fényszóró részecskékből álló fénykivonó réteg felhasználásával [188].

Záratlatsökkentő réteg

Az OLED-panelek sok korai meghibásodását a panelekbe, a durva anódfelületekbe, karcokba vagy a szerves anyagok alatti rétegekben lévő egyéb defektekbe csapdázódott részecskék okozzák. A műanyag hordozókon elvégzendő alacsony hőmérsékletű folyamatok még nehezebbé teszik a durva felületek kiküszöbölését, és az elektrodastruktúrákban használt nanohuzalok, nanocsövek vagy huzalrácsok tovább súlyosbítják a problémát.

A károsító zárlatok növekedését egy záratlatsökkentő réteg (SRL) beiktatásával lehet elnyomni, amely elég vastag ahhoz, hogy sok részecskét vagy egyéb inhomogenitást lefedjen. A réteg ellenállásának elég nagyra kell lennie ahhoz, hogy visszaszorítsa a helyi áramok növekedését, de nem növelheti meg 0,1V-nál nagyobb mértékben a panel megkívánt áramsűrűségének eléréséhez szükséges feszültséget. Az egyik megvalósult forma egy ITO (indium-ön-oxid) és ZSO ($\text{ZnS}:\text{SiO}_2$) együttes porlasztásával kialakított 100 nm-es film. Az OLEDWorks dolgozik egy olyan DOE szilárdtest-világítási projekten, amelynek célja a záratlatsökkentő rétegekhez optimális struktúrák kidolgozása [189].



6.27 ábra – Tintasugaras nyomtató a nyolcadik-generációs hordozók számára (Forrás: A Kateeva végre bemutatja Yieldjet OLED TV-jéhez készült tintasugaras nyomtatórendszerét [193])

Aktív szerves rétegek

A jó hatásfokú világítás panelek szerves rétegei kialakításának standard módja az, hogy a hordozókat kb. 20 – jelenleg kb. 500 nm szélességű – lineáris forráson viszik át. A dél-koreai kormány által támogatott egyik tanulmány kimutatta, hogy ez a technológia 1 m-nél nagyobb szélességekre is alkalmazható és hogy az anyagfelhasználás 60% fölé növelhető. Az OLEDWorks által végzett elemzés viszont azt mutatta, hogy 2 perces gyártási ciklusidő (TAKT) esetén az ilyen berendezésekkel kapcsolatos értécsökkenési leírás 200 USD/m² lenne, ami jóval meghaladja a panelgyártás teljes költségére vonatkozó célszámot [190].

Az OLEDWorks a DOE és a New York állam finanszírozásával egy olyan új lineáris forrás megépítését és tesztelését végzi, amely jelentős megtakarításhoz vezethet az anyagköltség és az értécsökkenési leírás tekintetében. A leválasztási sebességek zárlatlancú szabályozása folytán gyorsan reagál és igen hasznos a hőérzékeny anyagok esetén. A cél a ciklusidő 1 percre való csökkentése és 60% szerves anyag leválasztása a panelre [190].

Az Aixtron továbbra is jelentős beruházásokat eszközöl a szerves anyag gőzfázisú leválasztási (OVPD) technológiára, amelynél a szerves molekulákat a forrásból a hordozóra semleges gázkeverékben és nagy felületeken egyenletesen elosztva viszik fel egy szorosan csatolt „zuhanórózsza” fúvókával, amely kitűnő anyagfelhasználási hatásfokot és rövid ciklusidőket tesz lehetővé. Az Aixtron optimalizálta a saját „rövid termikus expozíciós forrás” (STExS) technológiáját, amely pontosan mért, a vonatkozó hordozómérettől és követelményektől függő anyagmennyiségek gázfázisú átvitelét teszi lehetővé gyors, hatékony anyagfelhasználású folyamattal [191]. Ez a forrás technológia lehetővé teszi a párologtatás néhány másodpercen

belüli elindítását, majd leállítását, ha a hordozó elkészült. 2250 mm x 2250 mm méretű hordozókon elvégzett tesztekkel több mint 70%-os anyagfelhasználást sikerült elérni. Leválasztás terén 5 nm/s sebességet demonstráltak. A leválasztási technológia és a közös erőfeszítések támogatására az Aixtron felszerelt egy OVPD rendszert a Lafayette Intézetben (a Georgia Institute of Technology nemzetközi kampuszának része Metzben). Rendelkezik egy nagy szerves felületek készítésére alkalmas, nyolcadikgenerációs bemutató rendszerrel is, amely készen áll a vevői tesztekre [192].

Az oldatos feldolgozás támogatóit bátorította, hogy a Kateeva-nak sikerült demonstrálnia: tintasugaras módszerrel képes 2 m-nél nagyobb méretben is nyomtatni hordozókra (6.27 ábra). Nagy gondot fordít arra, hogy megakadályozza a részecske-szennyeződést a hordozóval való kontaktus és a nitrogén-atmoszférában folyó művelet minimalizálásával.

[184] OLED-info: „Nippon Electric Glass and Saint-Gobain Establish a New Japanese company to Develop and Make OLED Lighting Glass Substrate”, 2014. jún. 12. (<http://www.oled-info.com/nippon-electric-glass-and-saint-gobain-establish-new-japanese-company-develop-and-make-oled-lighting>)

[185] M. Dirjish: „OLEDs Get Ready to Break Size Barriers”, Electronic Design, 2008. febr. 28. (<http://electronicsdesign.com/displays/oleds-get-ready-break-size-barriers>)

[186] DOE SSL Program: „Integrated Plastic Substrates for Organic Light Emitting Devices (OLED) Lighting”, 2016 DOE SSL Project Portfolio, p. 42, 2016. jan.

[187] B. Rand: „External vs. Internal OLED Out-coupling Strategies”, DOE SSL R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016. febr. (http://energy.gov/sites/prod/files/2016/02/f29/rand_oledsubstrates_raleigh2016.pdf)

[188] Q. Pei: „An Integrated OLED Substrate for Low-Cost and Enhanced Light Extraction”, DOE SSL R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016. febr. (http://energy.gov/sites/prod/files/2016/02/f29/pei_oledsubstrates_raleigh2016.pdf)

[189] DOE SSL Program: „Shorting Reduction Layer Process Development for OLED Lighting Panels (Phase I)”, 2016 DOE SSL Project Portfolio, p.37, 2016. jan.

[190] J. Hamer: „Poster Presentation”, DOE SSL R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016. febr.

[191] Aixtron: OVPD-200 Organic Vapor Phase Deposition”, 2015. dec. 15. (http://www.aixtron.com/fileadmin/documents/Technologien/AIX_Broschuere_OVPD_LOW_ES.pdf)

[192] Aixtron: „AIXTRON partners with Institut Lafayette on further advancement of organic deposition technology OVPD”, 2016. ápr. (<http://www.aixtron.com/en/press/pressreleases/detail/detail/News/aixtron-und-institut-lafayette-entwickeln-gemeinsam-organischdepositionstechnologie-ovpd-weiter/>)

[193] R. Mertens: „Kateeva finally unveil their YIELDjet OLED TV inkjet printing system”, OLED-info, 2013. (<http://www.oled-info.com/kateeva-finally-unveil-their-yieldjet-oled-tv-inkjet-printing-system>)

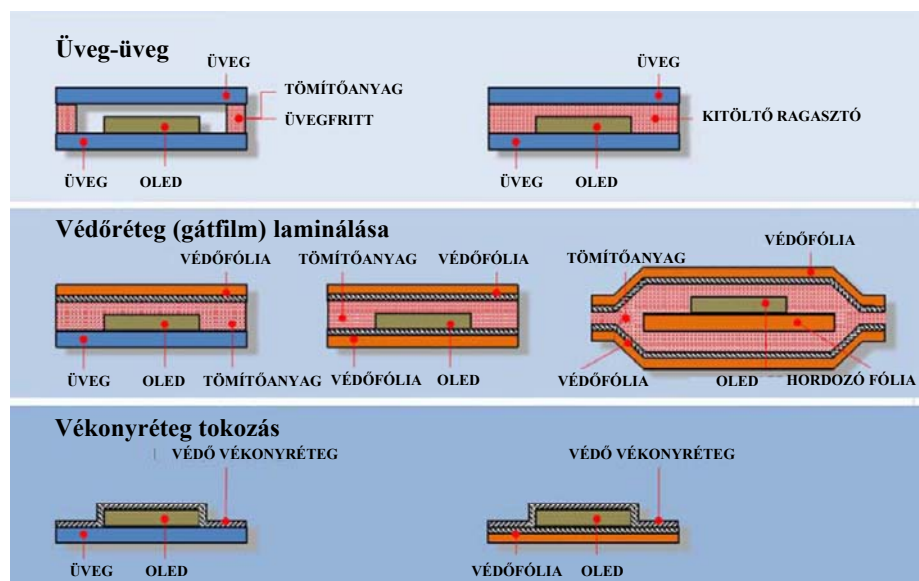
A leválasztást egy lézeralapú cseppvizsgáló berendezés vezérli, amely 50-szer gyorsabb, mint a korábban a csepp méretének és sebességének mérésére szolgáló technológia. A nyomtató szoftver automatikusan újralibrál minden lemez előtt, ha a fűvókák nem felelnek meg a specifikációknak, így minden nyomtatás megfelelő minőségű. A berendezés első eladásai szerves komponensek többrétegű gátfilmekbe történő leválasztásával volt kapcsolatos. A Kateeva a DuPonttal és a Sumitomo Chemicalal közösen dolgozott RGB emitterek egymás melletti nyomtatására egyetlen rétegen [194]. Noha ezt először OLED-kijelzőkön fogják tesztelni, a megoldás jelentősen meg fogja könnyíteni az állítható színtónusú világítási panelek gyártását.

A Sumitomo Chemical bejelentette, hogy 2016. áprilisában elkezdte szállítani poli-merből készült OLED-es világító paneljeit, amelyeknek prototípusait be is mutatta a 2016. évi frankfurti Light & Building kiállításon [195]. A nyomtatási technikák használata 80% feletti anyaghasznosítási arányokhoz vezet, ami a struktúrák egyszerűségével együtt jelentős költségelőnyöket eredményezhet, a panelárakat azonban eddig még nem közölték. Laboratóriumi példányoknál 60-80 lm/W fényhasznosítást és 20 000 órás üzemi élettartamot értek el, ezért türelmetlenül várjuk a kereskedelmi panelek teljesítőképességeinek részleteit [196].

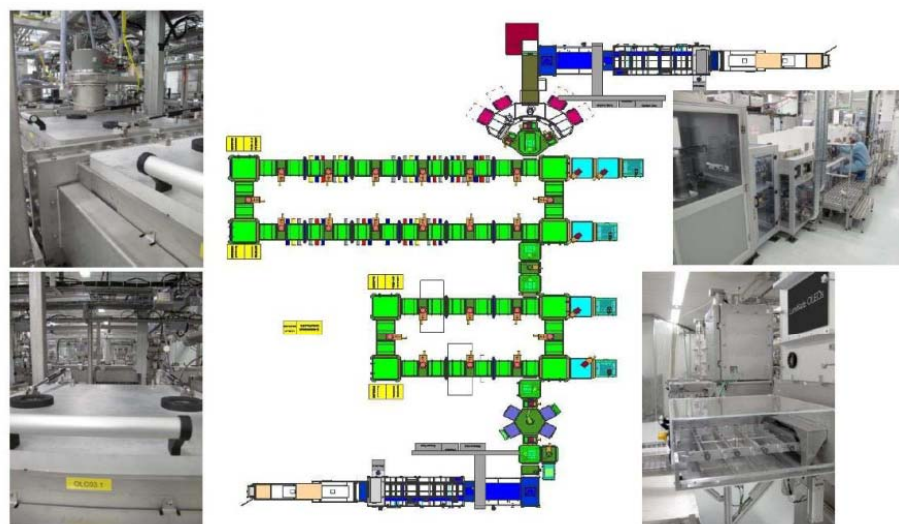
Tokozás

Több olyan tokozási módszer áll rendelkezésre, amely megőrzi a vékony profilt és a kis súlyt. Amint azt a 6.28 ábra mutatja, a felső elektróda tetejére egy többrétegű gátfilm vagy ultravékony üveggel ellátott műanyaglap laminálható. Ügyelni kell az oxigén és a nedvesség széleken keresztüli behatolásának megakadályozására. Gátló vagy abszorbeáló tulajdonsággal rendelkező ragasztóanyagokat több cég gyárt, köztük az Addison Clear Wave, a DELO, a Henkel, az LG Chem és a SAES Getters. A lefelé emittáló struktúrákhoz fedőréteggént vékony fémlehet használni, amely mechanikai stabilitást és hatékony felületi gátréteget képez. Ezt a megoldást az LG Display már alkalmazza.

A széleffektusokat vékony gátfilm in-situ leválasztásával minimalizálni lehet. A magas hőmérsékletű folyamatokat kerülni kell az alul lévő rétegek károsodásának megelőzése érdekében. A széleken az elektromos kontaktusok befedésének elkerülésére mintázat kialakítására van szükség. Ez elvégezhető a leválasztás



6.28 ábra – Az OLED-ek különféle tokozási módszerei (Forrás: Dr. Mauro Riva, SAES Getters, OLED Summit, Berkeley, Kalifornia, 2015. október [197])



6.29 ábra – OLED-panel gyártósor a németországi Aachenben (Forrás: U. Hoffman, China International OLED Summit, Peking, 2015 [161])

során is például tintasugaras nyomtatással vagy slot-die (széles résű szerszámmal készített) bevonattal.

6.2.3 Vonalas struktúrák gyártása

Az OLED-gyártást gyakran négy lépésre osztják fel. Az első az alul lévő rétegek kialakítása, amelyekre a szerves anyagokat választják le. Ez rendszerint a hordozó, ha szükséges gátrétegekkel együtt, a fénykivonást növelő rétegek és az anódstruktúra. Ezt elkészítheti a panelgyártó – mint pl. az LG –, vagy más gyártók alvállalkozásban. A feldolgozott hordozót gondosan ellenőrizni kell úgy, hogy minden defekt vagy szennyeződés kiderüljön és javítható legyen, mielőtt a vékony szerves rétegek leválasztása megkezdődne. A második lépés a szerves rétegek leválasztása, a

harmadik pedig a fém leválasztása a második (rendszerint katód) elektróda elkészítéséhez. Végül a panel tokozása és tesztelése következik.

[194] C. Madigan: „Inkjet Technology for OLED Mass Production. From TFE to RGB: The Benefits of Scale”, IDTech Printed Electronics, Santa Clara, Kalifornia, 2015. nov.

[195] Sumitomo Chemical: „Sumitomo Chemical to Exhibit Polymer OLED Lighting at Light and Building 2016”, 2016. febr. 15. (<http://www.sumitomochem.co.jp/english/newsreleases/docs/20160215e.pdf>)

[196] 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-pled/?ckattempt=2>)

[197] M. Riva: „The Encapsulation Question”, OLED World Summit, Berkeley, Kalifornia, 2015. okt.

[198] J. Kreis: „Scalable Deposition Technology for Barrier Films Yielding Unique Material Property Set”, OLEDs World Summit 2016, San Diego, Kalifornia, 2016.

„Lemezről-lemezre” (Sheet-to-Sheet) eljárás

Az OLED-es világító panelek feldolgozásának standard módja a hordozólapkák szétválasztása. A 0,3 mm-es vagy annál vastagabb üveghordozók önhordók, míg az ultra vékony üveg vagy vékony fémfóliákat és műanyag-hordozókat átmenetileg merev kerethez kell esetleg rögzíteni a gyártás során a torzulások elkerülése érdekében. Az LG-nél és a First O-Lite-nál kb. 20 leválasztókamrárt helyeztek el egy vonalban, s a hordozók azonos sebességgel haladnak át az egész rendszeren. Ehhez az egyes – eltérő vastagságú – rétegek leválasztási sebességét össze kell hangolni. Kis módosítással ezt a módszert alkalmazzák a Philips által tervezett aacheni gyárban, amelyet most az OLEDWorks üzemeltet (6.29 ábra).

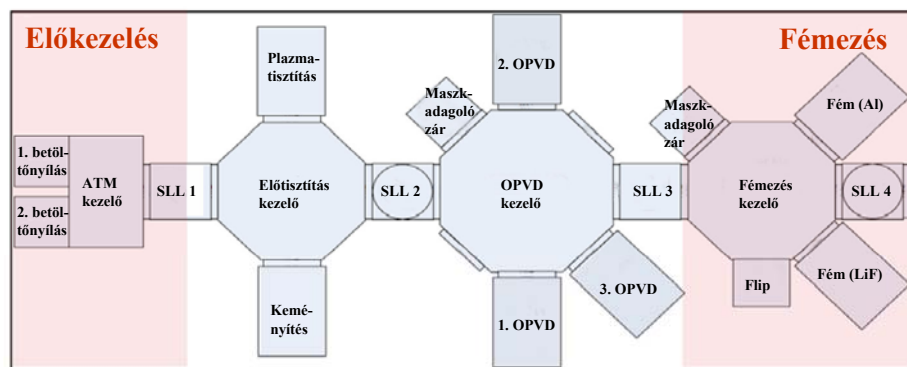
Ennek az elrendezésnek az egyik érdekessége, hogy az első és utolsó leválasztási szegmensek közel vannak egymáshoz. Ez elsősorban azért van így, hogy a hordozókeretek gyorsan visszatérhessenek, de arra is mód van, hogy a részben feldolgozott hordozókat így visszavezessék a ciklusba további rétegek felvitelére céljából.

Amint az a 6.30 ábrán látható, az Aixtron csoportos (klaszter) konfigurációkkal kísérletezik, amelyek gyakoriak az integrált áramkör iparban. Az Aixtron szerint az e megközelítés kínálta rugalmasság csökkenteni fogja mind a beruházási költséget, mind az alapterületet.

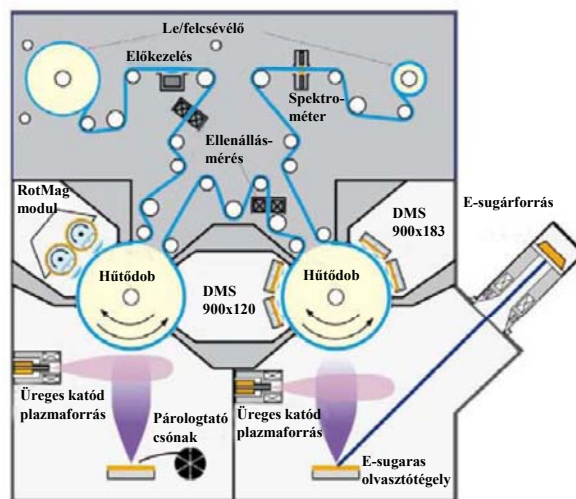
„Hengerről-hengerre” (Roll-to-Roll) eljárás

(A roll-to-roll (vagy R2R) technológia során a rugalmas hordozóra a nyomdatechnikából ismert eljárással, hengerekkel, különleges „vezető festék” segítségével viszik fel a félvezető elemeket. – A Szerk.)

A roll-to-roll eljárás vonzónak tűnik a rugalmas hordozók számára, mivel azokat a sík és helyes pozíció megtartásához ki lehet feszíteni. Egyszerű műveleteket lehet nagy sebességgel elvégezni, és sokak szerint a módszer jelentős megtakarításokat fog eredményezni. Pl. a DOE által 2015-ben szervezett OLED-tanácskozáson a Corning azt jósolta, hogy az ultravékony üveg R2R feldolgozása 30%-os költségcsökkenést fog eredményezni azáltal, hogy nem kell a törekeny anyagot merev hordozóra laminálni, majd eltávolítani onnan anélkül, hogy az OLED-struktúra sérülne. Mindegyik feldolgozási lépést szinkronizálni kell, hogy azok illeszkedjenek a szalag mozgási sebességéhez. A fel- és letekeresési folyamatok azzal a veszéllyel is járnak, hogy szennyeződések vagy séri-



6.30 ábra – „Fürtkonfiguráció” OLED-panel gyártáshoz (Forrás: Juergen Kreis, Aixtron, OLEDs World Summit, San Diego, Kalifornia, 2016 [198])



6.31 ábra – A drezdai Fraunhofer Intézetben (FEP) használt prototípus gyártósor (Forrás: Christian May, Fraunhofer FEP, Smithers Apex OLEDs World Summit, Berkeley, Kalifornia, 2015. október [199])

lések kerülnek a panelek felületére. Ezért a két megközelítés gyártási költségeinek összehasonlításakor a jó termékek kihozatalában mutatkozó különbségét is figyelembe kell venni.

A GE Kutatási Központjában folyó projekt lezárása óta az OLED-ek R2R módszerrel történő gyártásának fejlesztését az ázsiai és európai laboratóriumok vezetik amerikai berendezés- és anyagbeszállítók részvétele mellett. A Konica Minolta nem közölt részleteket a nagy volumenű gyártósoráról. Mivel még nem gyártottak paneleket kereskedelmi eladásra, még 18 hónappal a gyártósor befejezése után sincs információ a termékek minőségével vagy a gyártási költségekkel kapcsolatban.

A 6.31 ábrán bemutatjuk a drezdai Fraunhofer Intézetben (FEP) használt prototípus gyártósort, amelyen számos olyan projekt fut, amelyet az Európai Bizottság, a Német Szövetségi Kormány és a Szászországi Kormányzat támogat. Az eljárás lényegében teljes mértékben vákuumfeldolgozáson alapul, és rugalmas üveg és műanyag hordozókat is használ. Az eindhoveni Holst Központ olyan bevonási technikákra fókuszál, amelyeket teljes atmoszférikus

- rugalmas hordozók
- 600 mm leválasztási szélesség
- 0,1...600 m/p szalagsebesség
- 5 bevonóállás
- $<10^{-3}$ Pa alacsony nyomás
- párologtatás, porlasztás és PECVD kombinációja



nyomás mellett lehet alkalmazni és ezért alacsonyabb berendezésköltségeket eredményezhet. A szennyeződésekkel szembeni védelemre a Holst több tisztasobaszintet alkalmaz és néhány műveletet nitrogénatmoszférában tud elvégezni [166]. A tajvani Ipari Technológiai Kutató Intézet (ITRI) több éve fejleszt OLED prototípusokat, és 2014 júliusában megszervezte az OLED világítás kereskedelmi alapokra helyezésére létrejött szövetséget, az OLED Lighting Commercialization Alliance-t [200]. A szövetség – amely a Corninghoz és a Merckhez hasonló anyaggyártókat és a WiseChip-hez hasonló potenciális gyártócégeket tömörít – 1900K színhőmérsékletű paneleket szándékozik kínálni a kék fénynek az egészségügyi intézményekben

[198] J. Kreis: „Scalable Deposition Technology for Barrier Films Yielding Unique Material Property Set”, OLEDs World Summit 2016, San Diego, Kalifornia, 2016

[199] C. May: „Encapsulation and Integration of OLED on Flexible Substrates”, Smithers Apex World Summit, Berkeley, Kalifornia, 2015. okt.

[200] Industrial Technology Research Institute: „OLCA Aims to Lead the Next-Generation Solid-State Lighting Industrialization”, 2014. (<https://www.itri.org.tw/eng/DM/PublicationsPeriods/620414544734011541/content/activity3.html>)

	2014	2015	2017	2020	2025
Hordozó területe (m ²)	0,17	0,17	1,38	2,7	5,5
Állóeszköz-beruházás (millió USD)	75	75	200	300	400
Ciklusidő (perc)	3	2	1,5	1	1
Kapacitás (1000 m ² /év)	14	25	300	1 000	2 400
Értécsökkenés (USD/m ²)	1 050	600	125	60	35
Szerves anyagok (USD/m ²)	200	150	100	35	15
Szervetlen anyagok (USD/m ²)	200	200	120	50	30
Munkabér (USD/m ²)	150	100	20	10	5
Egyéb fix költségek (USD/m ²)	75	50	15	10	5
Összes (nem jövedelmező) (USD/m ²)	1 675	1 100	355	160	90
Jó termékek kihozatala (%)	50	60	70	80	90
Összes költség (USD/m ²)	3 350	1 850	550	200	100

6.3 táblázat – Hagyományos módszerekkel gyártott panelek becsült költsége

és a hálózobákban kifejtett hatásának a minimalizálására [201]. Az ITRI bejelentette, hogy 2017-ben elindítja rugalmas üvegből készülő paneljeinek kis sorozatú gyártásához alkalmas R2R gyártósorának felszerelését [202].

6.2.4 Az OLED kijelzőgyártás hatása

Az OLED-es világítástechnikai ipar reméli, hogy ki tudja használni a kijelzőiparban elért eredményeket. Az OLED-es kijelzők felhasználása okostelefonokhoz, TV-khez és hordozható eszközökhöz felgyorsult. 2015-ben kerekén 250 millió OLED-panelt gyártottak, ami közel 12 milliárd USD bevételt eredményezett. Ez a szám kerekén 400 000 TV-panelt tartalmaz, majdnem 1 milliárd USD értékben [203].

A gyártási kapacitásokba eszközölt óriási új beruházások hajtóereje az a várakozás, hogy az Apple az LCD-technológiáról OLED-re vált át az okostelefonoknál, és hogy az OLED-ek az évi 200 millió készüléket jelentő globális TV-piac jelentős részét fogják elfoglalni [204, 205, 206, 207]. A piacvezető Samsung Display 2015 és 2017 között közel 4 milliárd USD befektetést fog eszközölni kis kijelzőkkel kapcsolatos gyártási kapacitásának bővítésére [208]. A Dél-koreai Kijelzőipari Szövetség azt is jelentette, hogy a Samsung 3 milliárd USD-t fog beruházni a nyolcadik-generációs OLED TV-gyárba, de a vállalat még nem közölte, hogy mikorra tervezi az OLED TV-piacra való belépését [209]. Eközben az OLED TV-panelek gyártását az LG Display uralja, és azt tervezi, hogy több mint 6 milliárd USD-t fog költeni dél-koreai két telephelyén a gyártás bővítésére és építeni fog egy modulösszeszerelő gyárat is Vietnámban [210].

Az LG Display – miután átvette az LG Chem OLED-gyártási kapacitását – bejelentette, hogy beruházásokat fog eszközölni az ötödik-generációs OLED-gyártósorába, amelynek kezdeti kapacitása 15 000 db hordozó lesz évente. A tömeggyártást 2017 első félévére tervezik [211]. Több kínai cég jelentett be nagyszabású OLED-kijelzőgyár építését.

Az OLED-kijelzőgyártás két aspektusa különösen érdekes a világítástechnikai alkalmazások szempontjából. Az egyik a rugalmas és átlátszó panelek fejlesztése. Az IDTechEx előrejelzése szerint a műanyag vagy rugalmas OLED-ek forgalma 2020-ra 16 milliárd USD-re fog növekedni, az UBI Research pedig úgy véli, hogy a nagy felületű átlátszó OLED-ek piaca 2020-ra el fogja érni az 5,3 milliárd USD-t [212, 213]. A Samsung Display durván 9 millió rugalmas panelt gyárt havonta, és kapacitását 325 millió USD beruházással fogja növelni [213]. A domináns hordozó a polimid, amelyet in-situ leválasztással üveghordozóra visznek fel széles résű szerszámmal, majd lézeres „leemeléssel” eltávolítják, amint azt a 6.32 ábra mutatja. A Samsung Edge kijelzőinek hajlítási sugara már kisebb mint 1 cm. Az összehajtható OLED-panelek fejlesztése már folyik. A cél 200 000, 1 mm-es hajlítási sugárú hajlítás túlélése [214].

A másik aspektust a TV-khez és hirdetőtáblákhoz alkalmas nagy OLED-panelek jelentik. Ahhoz, hogy az OLED TV-k sikeresek lehessenek a tömegpiacon, jelentősen csökkenteni kell az OLED-kijelzők felületi egységre eső költségét. Ahhoz, hogy versenyezzenek az LCD kijelzőkkel, egy 55 hüvelykes panel költsége 250 vagy 300 USD/m² körüli kell hogy legyen. Ha ez megvalósítható, a gyártási

tapasztalatok nagy része átvehető a világítási panelek területére is. Az LG Display gyártási eljárása fehér OLED építése, majd színszűrő hozzáadása a színek al-pixelexre való szétválasztásához. A szerves anyagok leválasztásához alkalmazott módszerek a világító panelek gyártásában is alkalmazhatók. Az emitter-anyagok kiválasztása azonban eltérő lehet, mivel a kijelzőknél a színmegjelenítés magasabb prioritású, mint a fényhasznosítás.

[201] OLED-info: „Wisechip Blue-Light Free OLED Program Update”, 2015. dec. 15. (<http://www.oled-info.com/wisechip-blue-light-free-oled-program-update>)

[202] Electronics Weekly: „Taiwan’s ITRI Building OLED Lighting Line”, 2016. ápr. 16. (<http://www.electronicweekly.com/news/products/led/taiwans-itril-building-oled-lighting-line-2016-04/>)

[203] B. Young: „Will OLEDs Achieve Their Potential”, China International OLEDs Summit 2016, Shanghai, Kína, 2016. jan.

[204] OLED Association: „DisplayMate Technologies Believes Apple Should Use OLEDs in iPhone 7”, 2016. máj. 3. (http://www.oleda.org/news_details.cfm?ID=1360)

[205] OLED Association: „Truly Moves to Deploy OLED Production Resources”, 2016. máj. 17. (http://www.oled-a.org/news_details.cfm?ID=1395)

[206] OLED Association: „CSOT to invest US\$7.74b in a Gen 11 LCD Fab”, 2016. ápr. 19. (http://www.oled-a.org/news_details.cfm?ID=1335)

[207] OLED Association: „TV market Down 21% Y/Y in Q116”, 2016. máj. 3. (http://www.oleda.org/news_details.cfm?ID=1361)

[208] LEDinside: „Samsung Display to Invest in OLED Production Line”, 2015. febr. 11. (http://www.ledinside.com/news/2015/2/samsung_display_to_invest_in_oled_production_line)

[209] OLED-info: „Reports suggest SDC aims to invest \$3 billion in a new Gen-8 OLED TV fab”, 2016. febr. 18. (http://www.oled-info.com/reports-suggest-sdc-aims-invest-3-billion-new-gen-8-oled-tvfab?utm_source=feedburner&utm_medium=feed&utm_campaign=Feed%3A+oledinfo+%28OLEDInfo%3A+OLED+tech+news+and+resources%29)

[210] Bloomberg Technology: „LG Display to Spend About \$9 Billion on Factory for OLEDs”, 2015. nov. 26. (<http://www.bloomberg.com/news/articles/2015-11-26/lg-display-to-spend-more-than-10-trillion-won-on-new-panel-plant>)

[211] LG Display: „LG Display to Build World’s First 5th Generation OLED Light Panel Plant”, 2016. márc. 17. (<http://www.lgdisplay.com/eng/prcenter/newsView>)

[212] G. Chansin, K. Ghaffarzadeh és H. Zervos: „OLED Display Forecasts 2016-2026: The Rise of Plastic and Flexible Displays”, 2016. máj. (<http://www.idtechex.com/research/reports/oled-displayforecasts-2016-2026-the-rise-of-plastic-and-flexible-displays-000477.asp>)

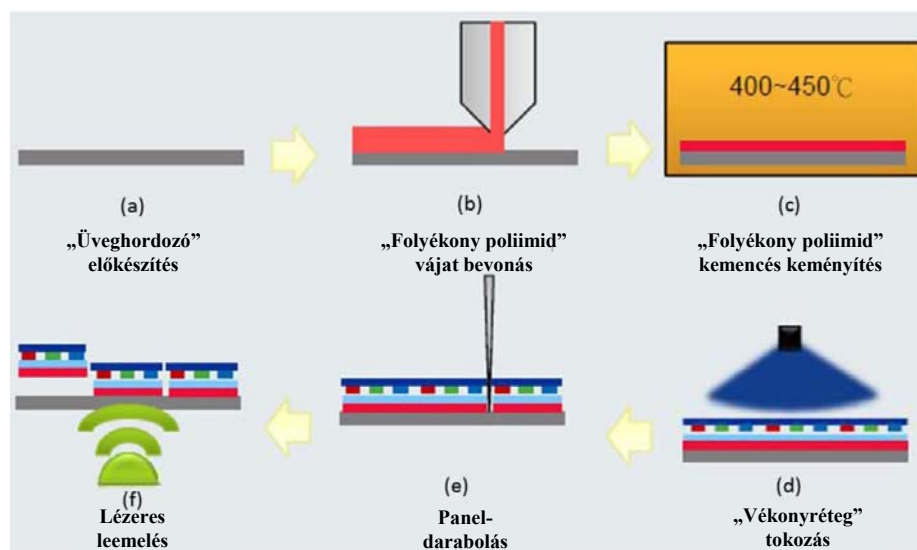
[213] OLED-info: „Samsung Display to invest \$325 million to double the capacity of its A3 flexible OLED line”, 2016. márc. 4. (<http://www.oled-info.com/samsung-display-invest-325-million-double-capacity-its-a3-flexible-oled-line>)

[214] D. Hsieh: „OLEDs from Emerging to Mainstream”, China International OLEDs Summit 2016, Shanghai, Kína, 2016. jan.

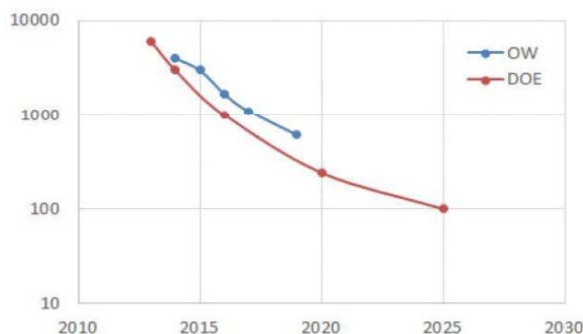
6.2.5 Költségsökkentés

A költségsökkentés egyik fontos mozgatórugója a gyártási volumen. Kevés előrelépés történt a világítástechnikai piacokon, de az OLED-kijelzők eladásai gyorsan nőttek. A mobiltelefonok OLED-paneljeinek gyártási költsége most nagyon közel áll a hagyományos LCD-panelekéhez, körülbelül 15 USD egy 5 hüvelyk (12,7 cm) átlójú kijelző esetén [214]. Ez 2250 USD/m²-nek felel meg, de magában foglalja a vékonyréteg-tranzistor (TFT) hátlap és az OLED-emitterek RGB mintázata kialakításának költségeit is, amire világítástechnikai alkalmazások esetén nincs szükség. Az UBI Research és az IHS úgy véli, hogy a szerves anyagok eladásai 465 millió USD-re fognak növekedni, amelynek kb. 40%-át a Universal Display Corporation (UDC) és az Idemitsu Kosan emitteranyagait teszik ki [215, 216, 217]. Az OLED-gyártás teljes panel-területe 2015-ben kb. 1,8 millió m² volt, a szerves anyagok költsége pedig 250 USD/m² körüli, azaz az összköltség 12%-a. Az UDC költségadatai azt sugallják, hogy a foszforeszkáló anyagok ára 2014 és 2015 között kb. 15%-kal fog csökkenni. A Philips OLED-üzletágának akvizíciója az OLEDWorks számára a világítási panelek gyártási költségének jobb alakulását eredményezi a jelenlegi módszerek alkalmazásával.

A 6.33 ábra a költségek alakulásának előrejelzéseit mutatja a következő három évre a DOE legutóbbi K+F terveiben szereplő célokkal összehasonlítva. További költségsökkenés érhető el nagykapacitású gyártósorok építésével – akár lapkás, akár R2R technikák felhasználásával, ehhez azonban bízni kell abban, hogy a piac támogatni fogja a gyártási kapacitás gyors növekedését. Alternatív megoldásként egyszerűbb struktúrákat kell bevezetni vagy olcsóbb megoldásokat találni az egyes fő komponensekhez.



6.32 ábra – Üveghordozó felhasználása műanyag-hordozókon kialakított OLED-panelek gyártásánál (Forrás: David Hsieh, CIOS, 2016 [214])



6.33 ábra – OLED-panelgyártás költségeinek várható alakulása (USD/m²) (Forrás: OLEDWorks, DOE SSL R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016. január [218])

Az egyik lehetséges forgatókönyvet, amely 2025-ig elérheti a 100 USD/m² költségcél, a 6.3 táblázat mutatja be. Az értéksökkenést 5 éves lineáris görbe alapján számoltuk ki. Feltételezzük, hogy az LG Display vagy egy másik vállalat a 2017-es évben új gyárat épít, és jelentős előrelépést jelent a ciklusidő és a hozam tekintetében a következő évben.

[215] UBI Research: „2016 OLED Emitting Material Annual Report”, 2016. ápr. 20.

(<http://www.ubiresearch.com/2016-oled-emitting/>).

[216] IHS: „Driven by TV Displays, Organic Light-Emitting Materials Used to Produce OLED Panels Grew 12 Percent in 2015, IHS Says”, 2016. febr. 18. (<http://press.ihs.com/press-release/driven-tv-displays-organic-light-emitting-materials-used-produce-oled-panels-grew-12-p>)

[217] OLEDNet: „UDC’s 2015 OLED Emitting Materials Revenue \$113 million, a 11% Decrease...Still Leading Market”, 2016. ápr. 20. (<http://www.olednet.com/en/udc-2015-materials/>)

[218] M. Boroson: „High Performance OLED Panel and Luminaire Poster”, DOE SSL R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016. jan.

[219] J. Brodrick: „R&D Program Direction”, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, Kalifornia, 2015. jan. 18. (http://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/brodrick_rd-update_sanfrancisco_2015.pdf)

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 Pécs Tel.: (06 72) 215 699 Fax: (06 72) 215 699

HOLUX Fényszaküzlet Szeged Tel.: (06 62) 426 819 Fax: (06 62) 426 702

www.holux.hu www.fenyaruhaz.hu e-mail: hoso@holux.hu

A kiadványunkban közölt információkat a legnagyobb körültekintéssel igyekeztünk összeállítani, az esetleg mégis előforduló hibákért felelősséget nem vállalunk. A közölt adatok változtatásának jogát minden külön értesítés nélkül fenntartjuk.

Minőségirányítási
rendszer



A MEE Világítástechnikai Társaság
tagja

