

Szilárdtest-világítás 2015, 1. rész

(Forrás: *www.doe*, DOE SSL Program, "R&D Plan," prepared by Bardsley Consulting, SB Consulting, SLS, Inc., LED Lighting Advisors, and Navigant Consulting, Inc., 2015. május, Fordította és szerkesztette: Surguta László)

JOGI NYILATKOZAT

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

A jelen kiadvány a forrásra való hivatkozás esetén részben vagy egészében sokszorosítható oktatási vagy non-profit célokra a szerzői jog tulajdonosának külön engedélye nélkül.

VEZETŐI ÖSSZEFOGLALÓ

A szilárdtest-világítás (SSL) forradalmi mélyreható változást jelez a tekintetben, ahogy használni fogjuk a világítást és ahogy vélekedni fogunk róla, és óriási lehetőséget nyújt jelentős energiamegtakarítás 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. Például a *Strategies Unlimited* becslése szerint 2014-ben a LED-alapú lámpák a lámpaeladásnak mindössze 5%-át tették ki és a felszerelt lámpafoglalatoknál csupán 3%-os behatolást értek el [1]. 2020-ra azonban drámai növekedést jósolnak ezen a piacon: a LED-alapú lámpák a lámpa-

eladás 42%-át fogják adni és a felszerelt lámpafoglalatok 33%-a LED-es lesz. Más előrejelzések is rendkívüli növekedésre számítanak a következő 5-10 évben. Mindenesetre ezek drámai növekedési előrejelzések, és jelentős kihívásokat jelentenek az ipar számára. További fényhasznosítás-növelést, árcsökkenést, gyártási darabszám-növelést és olyan új értékek és tulajdonságok beépítését értve ez alatt, amelyek felgyorsíthatják elfogadásukat és további energiamegtakarítást eredményeznek. E kihívásoknak való megfelelés lehetőséget kínál az Egyesült Államok számára, hogy biztosítsa domináns szerepét a termékek technológiája és gyártása terén.

Az Egyesült Államokban az előrejelzések szerint a LED-es világítás fogja a felszerelt világítási rendszerek többségét adni 2030-ra, az általános világítás által generált „lumenórát” mintegy 88%-át reprezentálva ezzel [2]. A szilárdtest-világítási fényforrások nagy fényhasznosítása döntő tényező a nagyobb mértékű elfogadás tekintetében. A LED-es világításnak már most legalább olyan nagy a fényhasznosítása, ha nem nagyobb, mint a legelterjedtebb technológiáké, de még bőven van lehetőség a fejlődésre. A teljesítőképesség javulásával kapcsolatos meglehetősen konzervatív előrejelzéseket felhasználva az Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériuma (DOE) megállapította, hogy 2030-ra a LED-technológia potenciálisan 261 TWh megtakarítást fog elérni évente, 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 agresszívebb 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. $4,5 \times 10^{15}$ BTU primer energiaforrásnak felel meg, ami közel kétszerese a 2030-ra szélenergiával és hűszorosa a 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 az ehhez feltételezett teljesítőképességszinteket elérjük, jelentős javulásra van szükség a fényhasznosítás és az ár terén. Páratlan energiafogyasztás-csökkentési lehetőségei okán ez kiemeli a szilárdtest-világítás és K+F tevékenységének fontosságát minden energiapolitikával kapcsola-

tos vita esetén, hiszen ezáltal növelhető az ország energiabiztonsága és csökkenthető az üvegházhatást okozó gázok kibocsátása. Az USA Energiaügyi Minisztériuma lefektetett néhány kemény célkitűzést és úgy alakította programját, hogy lebontsa a technológiai gátakat és felgyorsítsa az elfogadást. A Minisztérium támogatása fontos a tekintetben, hogy 2020-ra el lehessen érni a 200 lm/W lámpatest-fényhasznosítási célt, csökkenteni lehessen a szilárdtest-világítás gyártási költségeit és óriási energiamegtakarításokat lehessen elérni. Ehhez és az alapul szolgáló LED-ek és OLED-ek eszaktechnológiai fejlődésének fenntartása érdekében a Minisztérium szorgalmazza a K+F tevékenység folyamatos előtérbe állítását. Az már most nyilvánvaló, hogy a LED-ek fényhasznosításának növelését egyre nehezebb lesz elérni és K+F tevékenységre van szükség az alapvető technológiai korlátok – például az áramhatásfok-esés – leküzdésére, valamint hogy új, nagy hatásfokú, szűk vonalszélességű, lefelé konvertáló anyagok kifejlesztésére van szükség. A szilárdtest-világítás azonban sokkal több mint csupán nagyobb fényhasznosítás. Óriási lehetőséget kínál a világítás teljesítőképességének és árának javulása tekintetében a jobb vezérelhetőségnek, az új funkcióknak és az új lámpatest-konstrukcióknak köszönhetően. A szilárdtest-világítási fényforrások fénye eredendően szabályozható; 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.

A világítási rendszeren belüli új funkciók hozzáadott értéket hozhatnak létre azáltal, hogy optimális világítást teremtenek a benntartózkodók és az elvégzendő feladatok számára valósidős szabályozással, programozott, érzékelőkkel megvalósuló reakciókkal vagy tanítható algoritmusokkal. A félvezetős fényforrások nagy sebességű modulációs képessége új lehetősé-

[1] P. Smallwood, Strategies in Light Conference, Las Vegas, 2015. február.

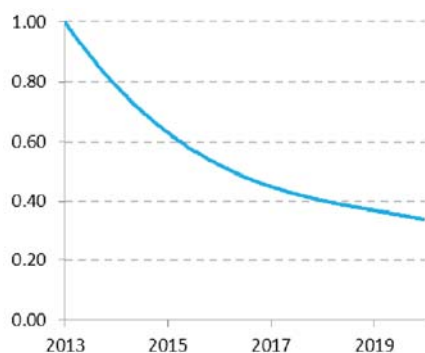
[2] DOE SSL Program: „Energy Savings Forecast of Solid-State Lighting in General Illumination Applications”, 2014. augusztus (<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/energysavingsforecast14.pdf>)

geket teremtett a látható fénykommunikáció (pl. a Li-Fi) és a beltéri pozicionálási képességek terén. A szilárdtest-világítás a fényspektrum mentén teljes színszabályozás lehetőségével kecsegtet és pontos szabályozást tesz lehetővé azáltal, hogy csökkenti a kápráztatást, a szórt fényt és optimalizálja a hasznos fénykomponenst. A fényspektrum egészen történő szabályozás új lehetőségeket teremt sokféle különböző területen, például a kertészetben vagy az egészségügyben.

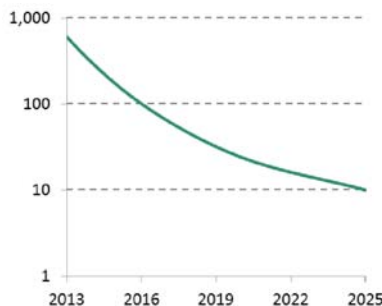
A legtöbb LED-es világítástechnológiát eddig érthető módon úgy tervezték, hogy a rövid távú piaci lehetőségeket célozzák meg retrofit cserelámpák és lámpatestek formájában. A világ 40 milliárd lámpafoglalata mellett ezek a formák nyilvánvalóan óriási piacot és energiamegtakarítást reprezentálnak, de 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-ek, mind az OLED-ek technológiájában. A LED-ek ára 1 USD/klm-re, az OLED-eké 200 USD/klm-re csökkent. A 60W-os, A19 (Ø60mm) burájú hagyományos izzólámpák lecserélésére alkalmas szabályozható retrofit LED-lámpák ára 10 USD (11 USD/klm) alá csökkent, ami azonban még mindig magasabb a hagyományos izzólámpák és kompakt fénycsövek áránál, de a visszatérítések és az ösztönzők tovább csökkenthetik az árat 5 USD alá. A piaci tényezők jelentősen befolyásolhatják az árat. A legversenyképesebb termékszektor az A19-es burájú retrofitlámpa marad, míg a többi termék kevésbé drámai árcsökkenést mutatott. Várható, hogy bizonyos ideig a szilárdtest-

800 lm/A19 retrofit LED-lámpa relatív ára



OLED-panel költség, USD/klm



világítási termékek beszerzési ára magasabb marad a hagyományos világítási termékekénél, de a nagyobb működési hatékonyság és a hosszabb üzemi élettartam (alacsonyabb karbantartási és cserekölség) okán a LED-es világítás már most erősen versenyképes a teljes tulajdonlási költség (TCO) tekintetében, ami bizonyos gyakori alkalmazási területeken egy évnél rövidebb megtérülési időszakokat eredményezhet. Ezenkívül az új értéket teremtő funkciókkal az árparitás már nem olyan szigorú követelmény.

A DOE szilárdtest-világítási programja kidolgozott egy átfogó K+F stratégiát a szilárdtest-világítási 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 San Franciscóban 2015 januárjában a DOE által megrendezett SSL R&D Workshop kerekasztal-beszélgetéseiből származó munkaanyagok alapján. A terv tükrözi az iparág konszenzusos nézeteit arról, hogy melyek a legfontosabb akadályok, technológiai kihívások és hogy hol szükséges K+F a LED- és OLED-technológiák terén – az alapvető technológiai kutatástól és termékfejlesztéstől a gyártás kutatás-fejlesztéséig.

Amint a technológia éretté válik és a korlátok fokozatosan elhárulnak, az alapvető technológiai kutatás, a termékfejlesztés és a gyártási K+F közötti hangsúlyok eltolódnak, ezért e tényezők között az egyensúlyt rendszeresen át kell értékelní. A technológiafejlesztés korai szakaszaiban a hangsúlyt általában az alaptchnológia kutatására helyezik, ami aztán eltolódik a termékfejlesztés felé, amint a technológia beér és a gyakorlati termékek megvalósíthatóakká válnak. Ezután a technológiatranszfer fázisa következik, azaz az átmenet a teljes körű gyártásba, amit

gyakran kísérleti gyártási fázis előz meg. K+F-re továbbra is szükség van a technológiai fejlesztés minden szakaszában, az alapkutatástól a gyártásig, de a viszonylagos sürgősség változni fog. Ezenkívül azonosítani kell a „kereskedelmi termék státusban” folyó kutatást és ki kell zárni a félresikerült termékeket.

Az elmúlt öt évben a LED-ekkel kapcsolatos gyártási tevékenység beérett, ezért a K+F tevékenység hangsúlya elkezdett eltolódni visszafelé, a technológiai korlátok lebontásának irányába, ami javulást eredményezhet a költségek és a teljesítőképességek terén. Ezek a korlátok alapvető technológiai fejlesztést igényelnek, azaz vissza kell térni az alapkutatás és a termékfejlesztés területére.

Az OLED-ek esetén az egyensúly e fázisok között még egyenletesebben oszlik meg. Az egyik legkritikusabb kérdés a technológia tömeggyártási körülményekre történő adaptálásának optimalizálásával kapcsolatos, ezért a hangsúly egy része a gyártásra vonatkozó kutatás-fejlesztésnél marad. A hangsúly másik része viszont olyan technológiákra esik továbbra is, amelyeket még nem sikerült teljesen kifejleszteni, ugyanakkor nagyon fontosak a teljesítőképességgel és költséggel kapcsolatos végső célok eléréséhez. Ezért e kritikus technológiák fejlesztése és optimalizálása párhuzamosan folyik a hatékony és eredményes gyártási kapacitás kiépítésével.

Az említett kerekasztal és workshop megbeszélések során talált legfontosabb kihívások a következők:

LED-alapú világítás K+F prioritásai

- Emittor-anyagok: áramsűrűség és termikus esés, a zöld és a vörös emisszió hatásfoka és a vörös emisszió termikus stabilitása kérdéseinek megoldása
- Lefelé konvertáló anyagok: hatékony, stabil és szűk vonalszélességű anyagok kifejlesztése
- Tokozó anyagok: nagy törésmutató és megnövelt termikus stabilitás megcélzása
- Új emittor-felépítések: modern eszköz-architektúrák kifejlesztése a jobb teljesítőképesség érdekében
- Magasabb integrációs szintek: az elem, a meghajtó és az optika rugalmas összeépítésének vizsgálata
- Új lámpatestek: lámpatest-koncepció kidolgozása a jobb fényeloszlás, az épületekbe való jobb beépíthetőség, az intuitív vezérlés és a tökéletesített világítási tulajdonságok elérése érdekében.

OLED-alapú világítás K+F prioritásai

- Anyagkutatás: nagy hatásfokú, hosszú

élettartamú emitter-rendszerek kifejlesztése, különösen a kék tartományhoz

- Fénykivonás: költséghatékony és gyártható fénykivonó megoldások kifejlesztése
- Lámpatest-fejlesztés: az OLED-technológia kulcsfontosságú jellemzőinek javítása a termék-megkülönböztetés elérése és a piacra kerülés idejének lecsökkentése érdekében
- Tökéletesített gyártási technológiák: a kihozatalra és a megbízhatóságra összpontosítva
- Gyártás rugalmas hordozókra: rugalmas hordozókra történő gyártás anyagainak és eljárásainak kifejlesztése

Az említett kerekasztal és workshop megbeszélések során olyan további K+F kezdeményezések is prioritást kaptak, amelyek nem illenek bele a tipikus K+F támogatási lehetőségek (FOA) közé. Ezek hosszabb távú K+F tevékenységet, kormányzat által vezetett ipari csoport kooperációját vagy a FOA-n kívüli támogatási szinteket igényelhetnek.

További K+F prioritások

- Intelligens vezérlők és érzékelők
 - A világításvezérlés, a kommunikáció és az érzékelés platformjai „átjárhatóságának” megvizsgálása
 - Rendszerek kifejlesztése a valós idejű energiamonitorozás és –visszacsatolás számára
- A hálózati tápellátás megbízhatósága és teljesítőképességének mérése
- LED- és OLED-rendszerek megbízhatósága
- Az emberi szervezet fiziológiai válasza a világításra – ideértve a teljesítőképességi előnyöket is
- A fényminőség kutatása és jellemzése

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

A jelen K+F terv a DOE által a korábbi években publikált és aktualizált többéves MYPP program (*DOE SSL Multi-Year Program Plan*) és a korábbi ütemterv (*DOE SSL Manufacturing R&D Roadmap*) egységesítése. (*Korábbi dokumentumok: <http://energy.gov/eere/ssl/technology-roadmaps.cimen>.)* A jelen 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 tervet évente aktualizálni fogják, hogy tükrözze 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 kapcsolatos információ: www.ssl.energy.gov/about.html és www.ssl.energy.gov/partnerships.html.

2.0 A szilárdtest-világítás előnye

A LED- és OLED-eszközökkel kapcsolatos kezdeti hajtóerő a nagy fényhasznosítás és az alacsony ár lehetőségeinek ígérete volt. Ez utóbbi a LED-eknél a félvezetőipar tömeggyártási technológiájának átvétele, OLED-eknél pedig a „roll-to-roll” gyártástechnológiák alkalmazása esetén.

Bár még mindig sok a fejleszteni való, a szilárdtest-világítás már beváltotta ezt az ígéretet, hiszen folyamatosan demonstrálja a hagyományos fényforrásokét meghaladó, állandóan javuló fényhasznosításával és az áraival, amelyek ésszerű idő alatti megtérülést tesznek lehetővé. Ezek a tulajdonságok hozzájárultak a szilárdtest-világítási fényforrások növekvő elfogadásához, ami máris jelentős energiamegtakarításokat eredményez. A nagyobb fényhasznosítás mellett a szilárdtest-világítási fényforrások hatékonyabbak abban a tekintetben is, hogy akkor és ott szolgáltatnak fényt, amikor és ahol arra szükség van, ami további energiamegtakarítási szinteket jelent. A szilárdtest-világítási technológia fejlődésével világossá vált, hogy hatása sokkal több, mint csupán az energiamegtakarítás.

A szilárdtest-világítás óriási lehetőséget kínál a világítás teljesítőképességének és értékének javítása, valamint új paradigmák találása tekintetében. Az a képesség, hogy befolyásolni lehet egy szilárdtest-világítási fényforrás spektrális kimenetét statikailag és dinamikailag is, olyan új világítási sajátságokat, funkciókat és előnyöket jelent, amelyekre a korábbi világítási technológiáknál nem volt lehetőség. A LED-es és OLED-es világítást úgy lehet kialakítani, hogy olyan specifikus spektrális teljesítményeloszlása legyen, amely adott alkalmazásokhoz illeszkedik, ideértve az aktív módon vezérelhető spektrális teljesítményeloszlást is, amely lehetővé teszi, hogy a kisugárzott fény spektrumát dinamikusan vezéreljük. 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]. A LED-ek gyorsan modulálhatóak is (az emberi észlelést meghaladó módon), ami alkalmassá teheti a világítás kommunikációs eszközként való felhasználását. A látható fény-kommunikáció (VLC) egy olyan modulált fénycsatornát tartalmaz,

[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.

amelyben a világítási célra előállított fény világítási rendszerek és más elektronikus eszközök – például okostelefonok – közötti kommunikációra használható. A világításnak ezek az új funkciói (új, vezeték nélküli kommunikációs protollokkal összekapcsolva), a mindenütt jelenlévő okostelefonok, az otthon-automatizálás megjelenése, a „tárgyak Internetje” és a nagymérvű adatgyűjtés és -elemzés rengeteg olyan új szolgáltatást tesz majd lehetővé, amelyek beépíthetők a szilárdtest-világítási termékekbe és szélesítik a világítási alkalmazások területét. Noha a szilárdtest-világítás energiamegtakarítást és sok más ígéretet hordoz, folyamatos K+F tevékenységre van szükség a kapcsolódó előnyök realizálásához. A következő fejezetekben a szilárdtest-világítás e kulcsfontosságú előnyeit vitatjuk meg.

2.1 Fényforrás-fényhasznosítás

A LED-es lámpatestek már most nagyobb fényhasznosításúak, mint a hagyományos izzólámpák, halogénlámpák, kompakt fénycsövek és a legtöbb lineáris fénycsöves lámpatest, míg a korai OLED-es lámpatestek fényhasznosítása megközelíti a kompakt fénycsövekéit. A 2.1 táblázat összehasonlítja a 2014 végén rendelkezésre álló tipikus szilárdtest-világítási termékek és a hagyományos világítási technológiák 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 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-ek esetében a 250 lm/W elérhető teljesítőképességi cél, és laboratóriumi szinten már kitűnő eredmények születtek e cél elérésében. A 2.1 ábra azt mutatja, hogy a LED-es lámpatestek az elterjedt technológiáknál elérhető legjobb fényhasznosításnál max. 100 lm/W-tal nagyobb értéket fognak kínálni. Az is látható, hogy a jelenlegi legjobb LED-termékeknek már jó a fényhasznosítása, de a *LED Lighting Facts* adatbázisban sok olyan termék is van, amely az elterjedt technológiáknál alig nagyobb fényhasznosítást kínál. Az OLED-technológia még mindig gyermekcipőben jár, de a nagy fényhasznosítás és az alacsony ár tekintetében hasonlóan ígéretes. A 6.1 fejezet elemzi, hogy az OLED-technológia hogyan tudna elérni 190 lm/W-ot és kínálni ugyanakkor kisebb fényűrűségű és kisebb kápráztatású fényforrást.

2.1. táblázat – Tipikus 2014-es árak és paraméterek a szilárdtest-világítás és a többi világítástechnológia esetén

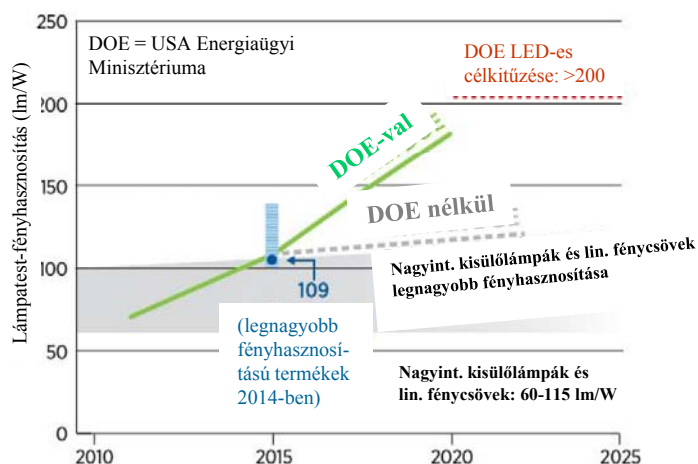
Terméktípus	Fényhasznosítás (lm/W)	CCT (K)	L ₇₀ (óra)	Ár (USD/klm)
60mm átmérőjű LED-lámpa (szabályozható, melegfehér) ¹	78	2700	25 000	11 USD
PAR38-as LED-lámpa (melegfehér) ¹	67	3000	28 000	23 USD
T8 LED-cső (semleges fehér) ¹	108	4100	45 000	16 USD
15cm átmérőjű mélysugárzó (melegfehér) ¹	60	3500	36 000	30 USD
60cm x 120 cm-es LED-es mennyezeti lámpatest (melegfehér) ¹	93	3500	56 000	31 USD
Csarnokvilágító magas/alacsony mennyezetekhez (melegfehér) ¹	90	4000	75 000	38 USD
LED-es útvilágító lámpatest ¹	93	5000	55 000	50 USD
OLED-es lámpatest ²	46	3000	40 000	870 USD
Nagy int., nagy telj. kisülőlámpás rendszer ³	115	3100	15 000	
Lineáris fénycsöves rendszer ³	108	4100	25 000	4 USD
Nagy int., kis telj. kisülőlámpás rendszer ³	104	3000	15 000	
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	0,6 USD

Megjegyzések: 1. 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 többen a mediánnak megfelelő vagy az alatti áron vásároltak lámpát. A felmérésből az is kitűnik, hogy a középérték és a medián bizonyítan mērőszám, amely a vásárlási eloszlás „farkát” reprezentálja, és hogy a LED-lámpák esetén a karakterisztikus ár a webről származó adataik 1. kvartilise [4]. Ezen értékelés alapján a LED-ek esetén az 1. kvartilist használtuk a tipikus beszerzési ár jellemzésére és az ehhez az árhoz illeszkedő termékek átlagos fényhasznosítását, korrelált színhőmérsékletét és élettartamát tüntettük fel.

2. Az Acuity Brands Luminaires cég „Chalina 5-Panel Brushed Nickel OLED Pendant” elnevezésű függesztékére vonatkozik, amely a Home Depot-ban kapható 2015-ben [5].

3. Tartalmazza az előtét veszteségét is.

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



2.2 A fényhasznosítás

A lámpa és a lámpatest hatásfoka az energiahatékonyság fontos mutatója, de nem mondja el a teljes történetet. Egy lámpatest valódi hatásfokát 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 fényhasznosítás össze-

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

[5] Acuity Brands: „Chalina OLED Pendant Product Specifications”, 2014. dec. 15. (http://www.acuitybrands.com/products/detail/316294/acuitybrands/chalina_pendant/oled-decorative-pendant-for-consumers/-/media/products/acuity_brands/316294/document/chalina_pm_pdf)

hasonlításában adott alkalmazás esetén: az alkalmazási hatékonyság és a felhasználási hatékonyság.

Az alkalmazási hatásfok azt mutatja meg, hogy mekkora teljesítményt kell felvenni ahhoz, hogy a célterületen el lehessen érni a specifikált megvilágítást [6]. A felhasználási hatásfok a munkafelületet elérő nettó fénysűrűség és a rendszerben lévő lámpák által kibocsátott teljes fénysűrűség hányadosa [7]. Az olyan világítási megoldás, amely a megkívánt megvilágítási szintek eléréséhez kevesebb fényt használ fel, jobb felhasználási hatásfokot 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 fényhasznosításhoz és így nagyobb energiamegtakarításhoz vezethetnek. Például a LED-ek kis mérete jobb optikai kontrollt és irányíthatóságot tehet lehetővé, az OLED-eket viszont nagy méretű, kis fénysűrűségű 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 hatásfokot, valamint az optikai, elektromos és termikus hatásfokot is.

Az új kültéri LED-es térvilágítók demonstrálták, hogy lényegesen alacsonyabb teljes fénysűrűség 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 egyenletességét és kevesebb olyan veszteségi fényt produkál, amely a célfelületen kívülre esik. A 2.2 és 2.3 ábra mutat példákat jobb fényhasznosítású kültéri LED-es térvilágítási projektekre. A 2.2 ábra Los Angeles látképét mutatja 2008-ban és 2012-ben, egy az egész városra kiterjedő, négyéves LED-es közvilágítási rekonstrukciós program után. Több mint 150 000 LED-es útvilágítási lámpatestet szereltek fel, ami 63%-kal csökkentette az energiafelhasználást és évi 8 millió USD energiaköltséget takarít meg [8, 9]. A képek azt mutatják, hogy a LED-es útvilágítás jelentősen csökkentette a fényszennyezést a szokásos nagyintenzitású kisülőlámpákkal szerelt lámpatestekhez képest.

A 2.3 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 fényhasznosításnak és a kisebb teljes fénysűrűségnek köszönhetően. Ráadásul lényegesen nagyobb a megvilágított parkolóterület, ami nagy előny a gépkocsivezetők és a gyalogosok biztonsága tekintetében is. A nagy fényhasznosítás különösen fontos az OLED-ek értékelése szempontjából; az OLED fényforrások kis fénysűrűsége és szórt fénye következtében a célfelülethez igen közel lehet alkalmazni őket, túl nagy kápráztatás nélkül, azaz kevesebb fényvel lehet megfelelő megvilágítást elérni. Az Acuity Brands cég a 2.4 ábrán látható lámpatesttel demonstrálta, hogy hogyan lehet a környezet és a helyi világítás kombinációjával 400 lx megvilágítást elérni a munkasíkon, s ugyanakkor vonzó módon megvilágítani a benttartózkodókat, a bútort és a falakat.

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 fel-



2.2 ábra – Los Angeles egész városra kiterjedő közvilágítási rekonstrukciója (2008-2012) (Forrás: John Edmond, Cree Inc., SSL R&D Workshop, San Francisco, CA, 2015. jan. [9])



2.3 ábra – A Cree „Edge Area Square” térvilágító lámpatestei az Edgewater-i piacon (Forrás: John Edmond, Cree Inc., SSL R&D Workshop, San Francisco, CA, 2015. jan. [9])

adat veszélyeztetése nélkül. A LED-ek és OLED-ek természetüknél fogva szabályozhatók (azaz fényszerűségük változtatható és ki/bekapcsolhatók), így a világításszabályozás teljes palettájával kompatibilisek. A szabályozókat a 2.5 fejezetben fogjuk tárgyalni (l. a HOLUX Hírek következő számában – A Szerk.).



2.4 ábra – A környezeti és a helyi világítás kombinációja a hatékony irodavilágításhoz (Forrás: Acuity Brands)

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

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

[8] City of Los Angeles Department of Public Works Bureau of Street Lighting: „LED Energy Efficiency Program: Total Savings By Council District”, 2015. jan. 12. (http://bsl.lacity.org/downloads/led/LED_Energy_Savings_010215.pdf)

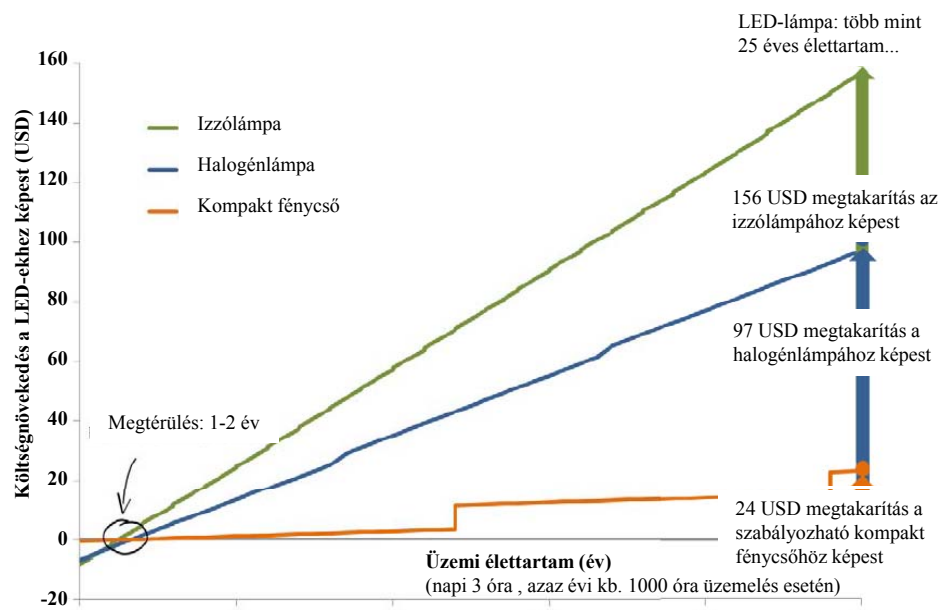
[9] J. Edmond: „Reinventing Lighting”, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, CA, 2015. jan. 27. (http://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/edmond_reinventing_sanfrancisco2015.pdf)

2.3 Tulajdonlási költség

Sokak számára a LED-es retrofit-termékek megvásárlásánál a legfontosabb visszatartó tényező a magasabb beszerzési ár. A LED-termékek ára a LED-lámpa és -lámpatest megbízhatóságának mértékétől, fényszínének minőségétől, a fényhasznosításától, színkonzisztenciájától, az anyagaitól, az esztétikai megjelenésétől és fénysűrűségétől függően eltérő. A nagyobb fényhasznosítás és a hosszabb 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 felmerült 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. Amint az a 2.5 ábrából látható, LED használata esetén a megtérüléshez – a működtetés adott feltételeitől függően – egy évnél rövidebb idő is elegendő.

A világítási termékek árát tipikusan USD/klm-ben adjuk meg. Az eltelt néhány év alatt a LED-alapú cserelámpák ára jelentősen csökkent, de még mindig magasabb, mint a hagyományos fényforrásoké. A 2.1 táblázat és a 2.5 ábra adatai a 60mm átmérőjű izzólámpák helyettesítésére szánt szabályozható izzólámpák, halogénlámpák és kompakt fénycsövek költségnövekedését hasonlítják össze egy ugyanilyen célú, szabályozható LED-lámpának a LED 25 évnyi élettartama alatt felmerülő költségével – évi 1000 órás (megközelítőleg napi 3 órás) működtetést véve alapul [10]. A vásárlás idején magasabb beszerzési árú folyótán a LED-ek vesztésre állnak a többi technológiához képest. Amikor azonban a költségnövekmény eléri a 0 USD-t, a LED-lámpa ára megtérül, és ettől a ponttól kezdve a fogyasztó már pénzt fog megtakarítani a LED-lámpa használatával. Ezenkívül – mivel az izzólámpáknak, a halogénlámpáknak és a kompakt fénycsöveknek rövidebb az élettartama a LED-lámpákénál, többször cserélni kell őket a LED-lámpa 25 éves meghaladó élettartama során. E csere költségek is hozzájárulnak a költségnövekményhez, amit a 2.5 ábra kis lépcsőkkel mutat be (azaz egy új lámpa adott időben történő megvásárlásakor felmerülő pillanatnyi kiadással).

A halogénlámpák és a hagyományos izzólámpák esetén – amelyek olcsóbbak és



2.5 ábra – A szabályozható LED költségmegtakarítása a 60mm átmérőjű, versenyképes technológiákkal összehasonlítva

gyengébb fényhasznosításúak – a lámpacsere minimális jelentőségű a felhasznált energia költségéhez képest – annak ellenére, hogy a cserére gyakrabban van szükség. Az ezeknél a lámpáknál adódó nagyobb teljesítményfogyasztás miatt a befektetés alig több mint 1 év alatt megtérül. Másrészt a kompakt fénycsöveknek meglehetősen jó a fényhasznosítása, ezért a lámpacsere költsége és gyakorisága nagyobb hatással bír. Mivel a szabályozható kompakt fénycsövek beszerzési ára közel azonos a szabályozható LED-lámpákéval, s ugyanakkor kevésbé jó a fényhasznosításuk, a megtérülés valamivel hosszabb, mint 2 év. Ezenkívül a LED-ek további előnyöket is kínálnak a kompakt fénycsövekhez képest a fényszín minősége, a szabályozás kompatibilitása, a környezetvédelmi szempontok, a fényeloszlás és a plusz funkciók tekintetében, amelyeket a 2.5 és 2.6 fejezetekben fogunk tárgyalni. Mindent összevetve, a 60mm átmérőjű izzólámpák cseréjére alkalmas retrofit LED-lámpa 25 éves élettartama alatt max. 156 USD megtakarítást képes realizálni, és valamennyi hagyományos versenytársához képest is kínál megtakarítást, amint azt a 2.5 ábra mutatja.

2.4 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 40 milliárd lámpafoglalat van felszerelve, ezért ezek a konstrukciók óriási piacot és energiamegtakarítási lehetősé-

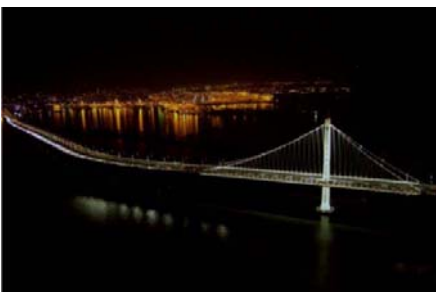
get reprezentálnak. A lámpa- és a retrofit formák segítik a gyors fogyasztói elfogadást azáltal, hogy megszokott formájú terméket és a meglévő termékekhez hasonló használhatóságot kínálnak. Ugyanakkor a tipikus lámpaformák bonyolulttá teszik a LED-eknek a világítási termékekbe történő beépítését. A legtöbb lámpakonstrukciónál a LED 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 beépítési rugalmasságot tesznek lehetővé, mivel tipikusan nagyobb térrel rendelkeznek a beépítéshez. Így optimálisabban és költség-hatékonyabban lehet a LED-es világítási termékeket beépíteni. De a retrofit lámpatesteknél a világítás elrendezését és a megkívánt fényeloszlást gyakran a lecserélni szándékozott örökölt technológia szabja meg, nem pedig az, amelyet optimálisan el lehetne érni, ha a teljes világítási rendszert újragondolnánk. Azt is az örökölt világítási

[10] U.S. Energy Information Administration; „Electric Power Monthly”, 2015. ápr. 27. (http://www.eia.gov/electricity/monthly/epm_table_grapher.cfm?t=epmt_5_6_a.)

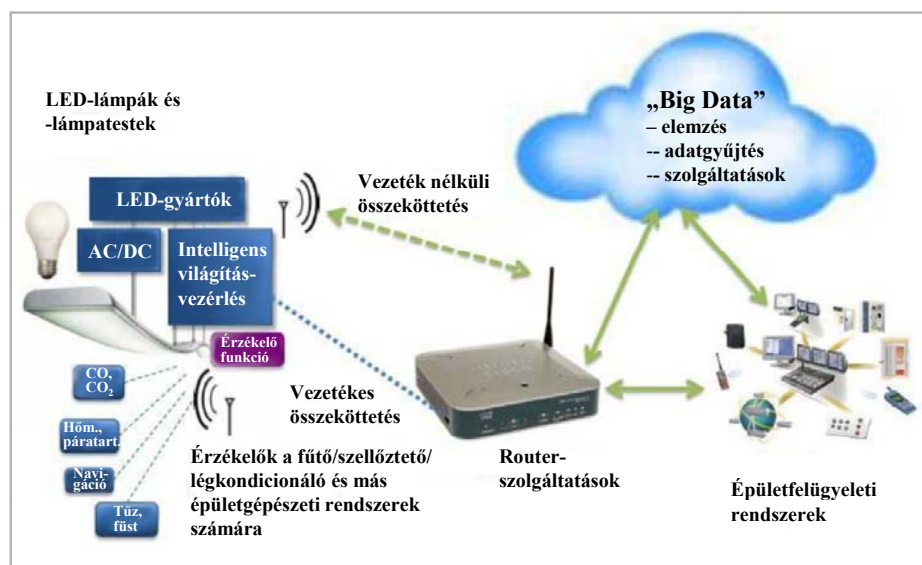
technológiák szabják meg, hogy hogyan lehet a retrofit lámpatestet illeszteni és csatlakoztatni az adott épülethez. Az integrált, süllyesztve szerelt világítás esetén a LED-es termékekhez kisebb mélységek és térfogatok kellene, ezért kompaktabb épületarchitektúrákhoz is használhatók. A lámpatestek elektromos csatlakozása az épületben lévő egyenáramú hálózatok felhasználásával is javítható, így ugyanis nem kell minden egyes LED-lámpánál vagy -lámpatestnél átalakítani a váltakozóáramot egyenárammá.

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 fejlesztését, amelyek ki tudják használni e technológia egyedi sajátosságait (pl. a nagy felületet, a kis fénysűrűséget, a karcsú kivitelt és a síktól eltérő felületeket). Végső soron a nagy felületű, kis fénysűrűségű OLED és az irányított fényű LED fényforrások bizonyos kombinációjával lehetne olyan megoldást készíteni, amely maximalizálná a két világítási technológia sajátosságait és optimalizálná a világítástervezést.



2.6 ábra – A minimális fényszennyezésű, egyedi lámpatestekkel felszerelt Bay Bridge látképe (Forrás: Saeed Shahmirzai, Zoon Engineering Presentation, 2015 DOE SSL Workshop Presentation [11])

A LED-es világítási technológia tervezési rugalmasságának és a fény hatékony alkalmazásának jó példája a San Franciscót Oakland-del összekötő Bay Bridge LED-es világítási rendszere, amelyet a 2.6 ábra mutat be [11]. A LED-lámpákat az úttest egyik oldalára szerelték fel úgy, hogy fénycsóróluk gondosan minimális kápráztatásra tervezték, hogy a szórt fény ne zavarja a szembejövő forgalmat és minimalizálja a fényszennyezést a víztükrön és az égbolton. A hosszú élettartamú LED fényforrások jól alkalmazhatók a hidakhoz és más olyan helyekhez, ahol a karbantartás nehézkes.



2.7 ábra – Világítás mint az Integrated Control System (integrált vezérlőrendszer) része (Forrás: Tom Griffiths, Integrating the Internet of Awareness into our smart SSL systems, LEDs Magazine, 2015. február [12])

2.5 Új funkcióképesség a világításban

„Okos világítás”, „csatlakoztatott világítás”, „intelligens világítás” és „adaptív világítás” – néhány olyan meghatározás, amely a világítástechnikai ipar legújabb innovációira utal, amelyeket a szilárdtest-világítás megjelenése tett lehetővé. A szilárdtest-világítás eredményesen szabályozható, fénye azonnal ki-bekapcsolható és fényszíne spektrálisan állíthatóra is tervezhető – a szabályozás új szintjeit hozva így létre. Számos technológia konvergenciája a szilárdtest-világítással új lehetőségeket teremt a világítással való kapcsolatra. Gyorsan haladunk egy olyan jövő felé, ahol valamennyi épületi rendszer – ideértve a világítást, a fűtő/szellőztető/légkondicionáló és biztonsági rendszereket – Interneten keresztül engedélyezhető komponensek segítségével hálózatba lesz kötve. Ez meg fogja változtatni azt a módot, ahogy a világítást ma értékeljük. Az olcsó és kompakt érzékelők, a vezeték nélküli hálózati technológia, az okostelefonok és a kifinomult elemzések új lehetőségeket teremtenek az épületek energiavezérlési rendszerei számára és teljesen új üzleti modellekhez vezethetnek – a világítást szolgáltatásként kínálva fel. A 2.7 ábra bemutatja, hogy ezek a rendszerek hogyan tudnának együtt dolgozni. A hálózatba szervezett épületenergetikai rendszer egyszerű hozzáférést biztosíthat valamennyi energetikai rendszer vonatkozó információjához és az energiafogyasztásról valósidejű jelentést tud készíteni. Ez az információ lehetővé teszi az épület irányítói számára a rendszerben lévő valamennyi eszköz energiafogyasztásának monitorozását, és képessé teszi

őket arra, hogy reagáljanak az adott energiafogyasztási helyzetekre (pl. lekapcsolva azokat az eszközöket, amelyek energiát fogyasztanak, de nincsenek használatban, vagy lekapcsolva a világítást azokon a helyeken, ahol nem tartózkodik senki). Ugyanakkor egy teljesen hálózatba szervezett rendszer megvalósításának megvan a maga kihívásai, például az eltérő rendszerek beépítése és vezérlése különböző (nyílt forráskódú és védett) kommunikációs protollokkal – anélkül, hogy a megbízhatóságot és a biztonságot veszélyeztetnénk.

2.5.1 Világításszabályozók

A világításszabályozók azáltal takarítanak meg energiát, hogy automatikusan lecsökkentik vagy lekapcsolják a fényt, ahol nincs rá szükség. A benttartózkodás érzékelésén, a napfény kihasználásán alapulhatnak, de úgy is tervezhetők, hogy személyi vezérlésszervezőkre reagáljanak. Az ilyen rendszerek különösen jól alkalmasak a szilárdtest-világításhoz és további 20-60% energiamegtakarítást jelenthetnek az alkalmazási terület és a felhasználás függvényében [13].

[11] S. Shahmirzai: „Bay Bridge Lights”, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, CA, 2015. jan. 27. (http://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/sahmirzai_baybridge_sanfrancisco2015.pdf)

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

[13] 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)

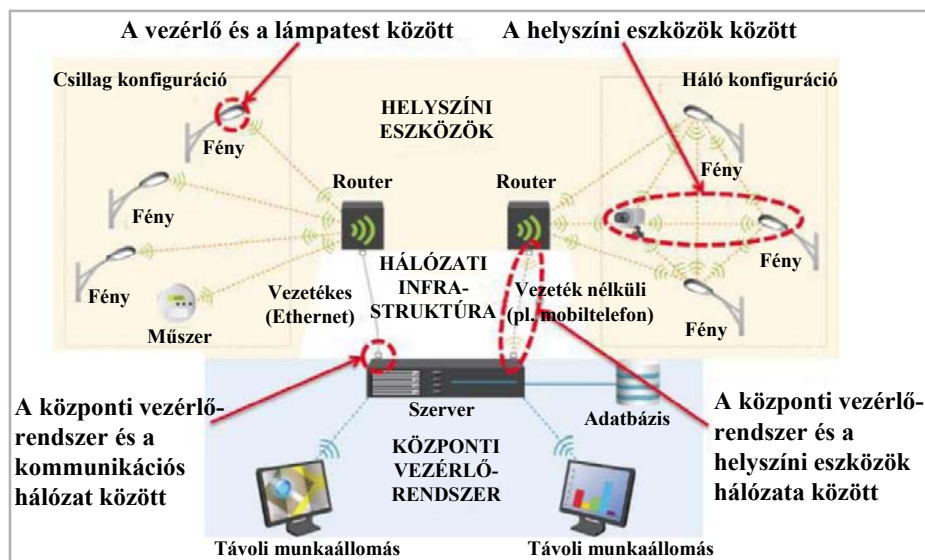
A világításszabályozók nagy energiamegtakarítási lehetőségei okán Kalifornia a fejlett fényszabályozók használatának megkövetelését majdnem minden olyan alkalmazásra kiterjesztette, amely a legfrissebb „Title 24” épületenergetikai törvényükben szerepel (<http://www.dgs.ca.gov/dsa/Programs/progCodes/title24.aspx>.)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

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 világításszabályzást 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 a lámpatesteknek a plug-and-play megoldáshoz hasonló beüzemelését teszi lehetővé anélkül, hogy Cree-gyártmányú távvezérlőt kellene használni. A Philips SpaceWise világításszabályzó technológiája hasonló megoldást kínál beépített érzékelőkkel és vezeték nélküli szabályzókkal, amelyek plug-and-play hálózat kiépítését teszik lehetővé a lámpatestek könnyű csoportosíthatóságával, automatizált kalibrálással és a napfény kihasználásával.

2.5.2 Kommunikációk és interoperabilitás

Kommunikációk

A legtöbb nagy világítástechnikai cég olyan előnyös szabályozórendszer-architektúrát valósított meg, amely a világításnak az érzékelőkhöz, kapcsolókhoz és fényszabályozókhoz, illetve a lámpatesteknek egy központi vezérlőhöz való csatlakoztatásához vezeték vagy vezeték



2.8 ábra – Lámpatestek, érzékelők, műszerek, routerek és vezérlőrendszerek – együttműködésben
(Forrás: Michael Poplawski, DOE SSL Market Development Workshop, Detroit, MI, 2014. november [14])

nélküli megoldásokat használ. Annak ellenére, hogy nem általánosan elfogadott architektúrák, sok meglévő kommunikációs protokollt használnak a világításvezérlő rendszereknél – például a DALI-t (digitálisan címezhető világítási interfészt) és épületautomatikát vezérlő protokollokat, mint amilyen a BACnet, LonWorks és a Konnex.

Az elmúlt évtizedben elterjedtek a vezeték nélküli kommunikációs hálózatok. 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 nem csupán jó példája ennek a trendnek, hanem elindított egyfajta változást is a tekintetben, ahogy a szabályozóeszközökről vélekedünk. A világítástechnikai termékek is élvezik a vezeték nélküli csatlakoztatott rendszerek irányába történő eltolódás előnyeit. Könnyebb lesz használni a világításvezérlőket és az energiafelhasználás csökkentésén túl lehetőség nyílik új értékteremtő funkciók megvalósítására is. Például a felhasználó a meglévő vezérlőrendszerével egy az okostelefonra letölthető szoftver-applikáció segítségével új funkciókat képes definiálni. Az integrálás megkönnyítése eredményezte a The Connected Lighting Alliance (www.theconnectedlightingalliance.org/home/) szervezet megalapítását a nyitott forráskódú vezeték nélküli összeköttetések (pl. ZigBee (IEEE 802.15.4), Z-Wave, Bluetooth és Wi-Fi) protokolljainak támogatására. Vannak erőfeszítések a Power over Ethernet vezérlőrendszerek és a világítás hálózati vezetéken keresztüli vezérlésének támogatására is.

Interoperabilitás

Az eltérő rendszerek integrálása és kommunikációra készítése egymással már régóta komoly probléma a világításvezérlők terén és képezi a legnagyobb akadályát annak, hogy az épületek energiagazdálkodási rendszerei valódi lehetőségeit kiaknázzuk. A hálózatba szervezett vezérlőrendszerek számos réteget tartalmaznak; vannak fizikai és adatösszekötő rétegek (ahol az adatok létrejönnek), majd továbbító és hálózati rétegek (ahol az adatok irányítása történik), s végül alkalmazási rétegek (ahol az adatok kezelése és értelmezése folyik [14]). A különböző rétegeknél számos kérdés felmerül, ilyen például a lámpatestek és az érzékelők, a lámpatestek és a vezérlőeszközök, valamint a központi vezérlőrendszer és az eszközhálózat közötti együttműködés. Ezeket a kérdéseket foglalja össze a 2.8 ábra.

A legtöbb jelenlegi világításvezérlő 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 feltehetőleg 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

[14] M. Poplawski: "Control System Interoperability: Can We Talk?," DOE SSL Market Introduction Workshop, Detroit, MI, 2014. nov. 13. (http://energy.gov/sites/prod/files/2014/11/f19/poplawski_interoperability_detroit2014.pdf)

a felhasználó azzal a döntéssel szembesül, hogy kezdje teljesen újjal, vagy éljen együtt a meglévő, egyre alkalmatlanabb rendszerrel.

Számos olyan világításvezérlő eszköz van forgalomban, amely kielégít egy vagy több szabványt. Az azonban, hogy ezek a szabványok mennyire biztosítják a szilárdtest-világítási termékek közötti megfelelést, már nem mindig világos. Például, ha két, különböző gyártótól származó lámpatestet ugyanazzal a fényszabályozó jellel működtetünk, lehet, hogy az egyiknek kisebb lesz a fényerőssége, míg a másik teljesen lekapcsol. Hasonlóképpen, a DALI-szabvány történetileg nem igényelt megfelelési tesztelést, ami azt eredményezte, hogy a különböző gyártók különböző DALI-termékeket fejlesztettek ki, amelyek gyakran nem képesek az együttműködésre.

A javított definíciójű, nyitott forráskódú standardok segíthetnek a kompatibilitás, az időtálló technológia biztosításában, és egyszerűbb integrálást kínálnak. Az ilyen standardok gyártótól való függetlenséget eredményezhetnek, ami minimalizálja a vásárló kockázatát és előnyös az ökoszisztéma valamennyi résztvevője számára. Már folynak erőfeszítések a világításvezérlési piac nagyobb kompatibilitása érdekében a ZigBee Alliance, a LonMark International, a TALQ Consortium, a Connected Lighting Alliance és mások berkeiben. Amíg a kompatibilitást kevésbé fontosnak tűnhet a viszonylag kicsi, önálló világítási rendszereknél (például amelyek egyetlen konferenciatermet vagy épület-szintet szolgálnak ki), a kihívások idővel növekedni fognak, amint egyre több rendszert kapcsolunk össze olyan kezdeményezések támogatásának hatására mint a „net-zero building” (nulla energiafelhasználású épület), a „smart-city” (intelligens város), a „smart-grid” (intelligens hálózat) és az „intelligent transportation” (intelligens szállítás).

A kompatibilitás az otthoni energiagazdálkodási rendszereknél továbbra is nagy akadályt jelent – a rendszerek költségével együtt. Integrálásuk ökoszisztémák segítségével – mint amilyen pl. a Wink vagy a Belkin WeMo rendszere – egy egyszerű interfésszel lehetővé teszi a legtöbb otthoni eszköz vezérlését. A Wink Hub intelligens termékek különböző csoportjai részére teszi lehetővé, hogy azonos, vezeték nélküli nyelvet beszéljenek, ezért egyszerűen vezérelhetők egyetlen Wink szoftver-applikáció felhasználásával. A Wink-applikációval a felhasználó monitorozni és vezérelni tudja az otthonában lévő eszközök energiafelhasználását. A manapság



2.9 ábra – Intelligens lakásvilágítási termékek: a Cree „Connected” és a GE „Link” lámpája a Wink cég Hub & App. vezérlőjével (Forrás: Wink [15])

kapható csatlakoztatott világítási termékek többségének az intelligens fényforrásokkal (pl. a Philips „Hue”, a GE „Link”, a TCP „Connected”, az OSRAM „Lightify” elnevezésű lámpáival), való kommunikációhoz egy áthidalóra vagy hub-ra (ismétlő elosztóra) van szüksége, de van néhány olyan fényforrás is, amelybe be van építve az interfész; ilyen pl. a Cree „Connected” vagy a LIFX lámpája. A 2.9 ábra bemutat néhány olyan kapható terméket, amely a lakások energiagazdálkodási platformjaihoz használható. Az otthoni automata-rendszerek között kompatibilitás leegyszerűsíthetné a modern világításvezérlő eszközök és otthoni energiagazdálkodási rendszerek használatát és elősegíthetné elfogadásukat. (A fent említett termékekről bővebb információ a következő weboldalakon 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/> – TCP Connected: <http://go.tcpi.com/GetConnected> – 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> – LIFX: <http://www.lifx.com/>)

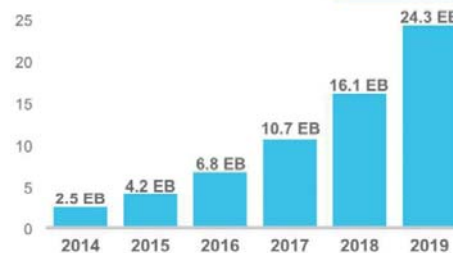
Biztonság

Amint egyre több eszköz válik a csatlakoztatott világ részévé, a sok előnyhöz egyre több biztonsági kockázat is társul, amint azt néhány publikált eset is bizonyítja, ahol a tűzfalakat világítási termékek meghekkelésével törték fel [16]. Az Internethez csatlakoztatott világítási rendszer a hekkerek számára belépési pontokul szolgál minden olyan dologhoz, amely a tűzfal mögött van, például személyi számítógéphez, kiskereskedelmi fizetési terminálhoz vagy egy kormányhivatal érzékeny adatbázisához.

Rendkívül fontos, hogy a gyártók biztonságot építsenek be a termék- és szoftver-fejlesztésük 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

Exabyte (EB)
(10¹⁸ byte) / hó

2014 és 2019 között 57% átlagos éves növekedési ütem (CAGR)



2.10 ábra – A Cisco előrejelzése szerint 2019-re 24,3 exabyte/hó lesz a mobiltelefonok adatforgalma

(Forrás: Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2014–2019 White Paper, February 2015 [17])

[16]. 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. A gyártóknak fel kell vállalniuk annak felelősségét, hogy biztonságos eszközökkel látják el vásárlóikat, és meg kell könnyíteniük azt, hogy a vásárlók megőrizhessék eszközeik biztonságát az idő múlásával is.

2.5.3 Kommunikálás látható fényvel

A látható fényvel történő kommunikáció (VLC) olyan technológia, amelynél az információt „hozzá lehet csomagolni” a fényhez, s ezzel különböző szolgáltatásokat lehet nyújtani, pl. beltéri helymeghatározást vagy a vezeték nélküli eszközök csatlakoztatásával történő kommunikációt. A VLC az adatokat kapcsolás vagy moduláció – a LED-ek ki-bekapcsolása – segítségével olyan gyorsasággal képes továbbítani, amit szemmel nem is lehet követni. Az a lehetőség, hogy Li-Fi kommunikációk felhasználásával új sávzélesség-források jönnek létre, fontos lehet a jövőben, hogy meg lehessen birkózni a mobiltelefonok globális adatforgalmának folyamatos növekedésével (2014-ben 69%-os volt a növekedés!) A Cisco cég előrejelzése szerint a mobiltelefonok globális adatforgalma 2014 és 2019 között közel megkétszereződik, azaz 57%-os éves átlagos növekedést fog mutatni, amint az a 2.10 ábrán látható [17]. A mobil- hálózati

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

[16] P. Jauregui, „Exploring and Addressing Security Risk in Smart Lighting Systems”, in Strategies in Light, Las Vegas, NV, 2015. február

[17] Cisco: „Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2014–2019” 2015. febr. 3. (http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-indexvni/white_paper_c11-520862.pdf)



2.11 ábra Látható fénnel történő kommunikáció (VLC) + kis energiájú Bluetooth (BLE) kapcsolja a lámpatesteket a beltéri jeladókhöz (Forrás: Dan Ryan, ByteLight, SSL R&D Workshop, San Francisco, CA, 2015. január [18])

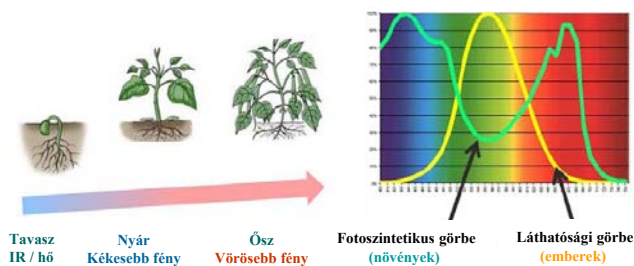
tokkal világszerte elérhető vezeték nélküli eszközök növekvő száma a globális mobilforgalom növekedésének egyik legfontosabb eleme.

A látható fénnel történő kommunikáció (VLC) területén a K+F tevékenység a kommunikációs sávzélesség javítására irányul, habár ilyen tulajdonságokkal rendelkező termékek jelenleg még nem kaphatók. Ugyanakkor a LED-es lámpatestekbe beépített VLC-technológiát már sikerrel alkalmazzák beltéri helymeghatározási szolgáltatásokhoz. Ez az új alkalmazás értéket teremthet a kiskereskedők számára, lehetővé teszi ui. azon vásárlók pontos elhelyezkedésének a nyomkövetését, akik okostelefonjuk segítségével a szolgáltatás igénybe vétele mellett döntöttek, amint azt a 2.11 ábra vázlatosan bemutatja. A vásárló előnyös módon célzott információkat vagy terméktámogatásokat kap, a kiskereskedő pedig nyomon követheti a vevő útvonalát és azt, hogy mely termékek felől érdeklődik. Az, hogy e tulajdonságból folyamatos bevételi forrás keletkezhet, módosítja a kiskereskedőknek a LED-ek elfogadásával kapcsolatos vélekedését a beruházás megtérülésének felgyorsításával.

2.5.4 Spektrális szabályozás és beállítás

A LED-es világítási termékek úgy is alakíthatók, hogy a látható fény lényegében teljes spektrumát emittálják. A legújabb kereskedelmi termékek – például a Philips „Hue” – és olyan specialitások mint a Telumen „Light Replicatore” (<http://telumen.com/products.html>) elnevezésű terméke aktív módon képesek a kibocsátott spektrum szabályozására a spektrális felbontás különböző fokával. Meg kell jegyezni azonban, hogy amíg a LED-termékeknek igényre szabott spektruma lehet, a legtöbb LED-es világítási termék még nem képes a kibocsátott spektrum aktív szabályozására. A LED-ek vagy OLED-ek kibocsátott spektrumának dinamikus beállítására való képesség egy sereg

2.12 ábra – A fény hatása a növények fejlődésére (Forrás: Robert Spivock, GE, SSL R&D Workshop, San Francisco, CA, 2015. január [19])

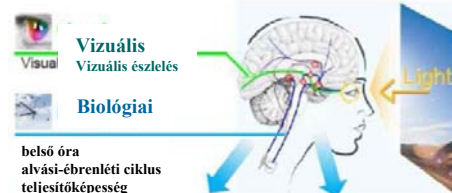


hozzáadott érték előtt nyitja meg a kapukat a szilárdtest-világítás energiamegtakarításán túlmenően. A LED-ek színárnyalatának beállíthatóságával számos új alkalmazásra nyílik lehetőség. Ilyenek a kertészetek, az emberi egészséget és termelékenységet támogató világítás, a színházak és a szórakoztató ipar dinamikus világítása, valamint a spektrumok leutánzása.

Kertészetek világítása

A kertészetek világítása egyre növekvő fontosságú alkalmazási területet képvisel, amely a szilárdtest-világítási fényforrások spektrumának igényre szabásán és állíthatóságán alapul. A fény spektrumában bekövetkező változások a növénytermesztés különböző aspektusait befolyásolja, például a növény méretét, a csírázási folyamatot, a virágzást és a vegetációt. A fotoszintézis szempontjából a kék és a vörös tartomány a legfontosabb, amint az a 2.12 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 kertészetekhez használt igényre szabott hullámhosszúságú világítás energiahatékony beltéri gazdaságok kialakítását teszi lehetővé, és a spektrum dinamikus szabályozása javíthatja a hozamot. A Kelet-Japánban kialakított ilyen gazdaságok látványos eredményeket produkáltak a beltéri salátatermelésben a fukushimai katasztrófától megóvott kültéri ültetvények földjének szennyeződése után. A LED-es világítás megcélzott hullámhosszúságának felhasználása a következő példamutató eredményeket hozta, amint azt a GE a 2015. évi workshopon bemutatta [19]:

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



2.13 ábra – Hogyan befolyásolja a fény a biológiai rendszereket? (Forrás: Andreas Wojtysiak, OSRAM, SSL R&D Workshop, San Francisco, CA, 2015. január [21])

Emberi egészség

Az emberek jelentős mennyiségű mesterséges fénynek vannak kitéve, amelynek minden része van valamilyen hatással fiziológiánkra – a fényforrás típusától függetlenül. A legfrissebb kutatások jelentősen elősegítették annak megértését, hogy a fény nem csupán a látást teszi lehetővé, hanem igen fontos jelzés biológiai rendszereink számára, befolyásolják a cirkadián ritmust, a pupillareflexiót, az éberséget és még sok minden mást, amint azt a 2.13 ábra mutatja [20]. Azt is kimutatták, hogy a fény hatásos kezelést jelent sokféle egészségi állapotnál, pl. a szezonális affektív zavar (SAD) és a demencia esetén [21]. Fontos, hogy szemünkben a nem kép-képző fotoreceptor rendszer különbözik a látási rendszertől. Noha osztozik ugyanazon fotoreceptorok némelyikével, van a saját spektrális és időbeli válasza a fényre. A nem kép-képző fotoreceptor a kék fényre reagál a legérzékenyebben és a melatoninintermelést szabályozza.

[18] D. Ryan: „Creating Values Through Controls”, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, CA, 2015. január (http://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/ryan_controls_sanfrancisco2015.pdf)

[19] R. Spivock: „Horticultural Lighting: DOE Emerging Trends”, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, CA, 2015. jan. 27. (http://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/spivock_horticultural_lighting_sanfrancisco2015.pdf)

[20] 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.

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

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 szinkronizálja 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 2.14 ábra mutatja. Este csökkenteni kell a spektrum kék tartalmának nagyságát, mivel az elnyomja a melatonin-termelést, és így nehezebb lenne elaludni.

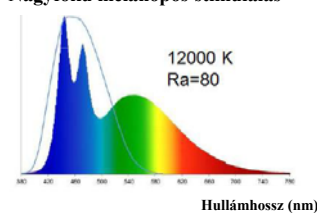
A spektrális „finomhangolás” alkalmazásával kapcsolatos tanulmányok a következő eredményeket hozták [21]:

- Javul az osztályteremben a diákok ébersége
 - Jelentősen javul a napközbeni aktivitás, éberség és jobban alszanak éjszaka az idősebbek (ápolási otthonok)
 - Javulás érhető el a krónikus fájdalom gyógyításában a nap strukturálásával és az alvási/ébredési ciklusok stabilizálásával
 - Jobb esti és éjszakai pihenés és reggeli aktivitás az utasok számára a repülőgépek utasterében
 - Az unipoláris depresszió enyhítésére szolgáló terápia időtartamának csökkenése
- A fent leírt élettani hatásokat fel lehetne használni a munkaerő termelékenységének fokozására. A munkafeladatnak megfelelően beállított spektrum és a világítás személyre szabott szabályozása is javíthatja a munkateljesítményt. 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 színspektrum napközbeni változtatásának megvalósításához szükséges plusz költségeket. A világítás és a hatékonyabb világítási rendszerek élettani hatásának jobb megértése is növelheti a termelékenységet az oktatási intézményekben. A LED-technológia alkalmas lehet arra, hogy a fényáram, a spektrum és a fényeloszlás megkívánt szabályozását megvalósítsuk ilyen rendszerekben.

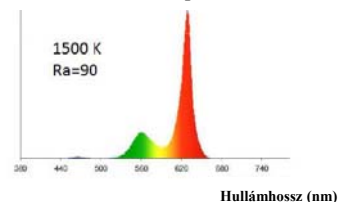
2.5.5 Végkövetkeztetés

Noha a LED-es világítás bevezetésénél az elsődleges motiváció az energiamegtakarítás volt, az új tulajdonságok beépítése megváltoztathatja a világítás felhasznál-

Nagyfokú melanopos stimulálás



Kis mértékű melanopos stimulálás



2.14 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, CA, 2015. január [21])

lásának módját, ami viszont segítheti a LED-ek elfogadásának felgyorsítását. A spektrum igényre szabásának a képessége segít jobban megérteni azt, hogy milyen a legmegfelelőbb fény különböző speciális feladatokhoz, a növénytermesztés optimalizálásához, az ember élettani funkcióinak pozitív befolyásolásához és új alkalmazások kifejlesztéséhez. A kibocsátott spektrum dinamikus szabályozása lehetővé teszi a spektrum időbeli megváltoztatását a változó világítási igényeknek megfelelően. A LED-ek félvezető természete lehetővé teszi a bennünket körülvevő fény segítségével történő kommunikációt az emberi szem által láthatatlan módon. Ezek az új tulajdonságok értéket teremthetnek az egyszerű energiamegtakarításon túl is – például a gyógyítás, a termelékenység-növelés, a jobb mezőgazdasági terméseredmények, az épületek egyszerűsített energiagazdálkodási rendszereinek beépítése és a világítás, a lakásautomatizálás és a felhasználók közötti jobb kontroll és kommunikáció tekintetében. Mindez csak néhány a szilárdtest-világítás által lehetővé váló új alkalmazások és előnyök közül. A tulajdonságok jelen fejezetben javasolt optimalizálásának teljes realizálásához a szilárdtest-világítási építőelemek további folyamatos fejlesztésére van szükség. Például a zöld és borostyánsárga LED-ek fényhasznosításával kapcsolatos fejlesztések tovább fogják javítani az állítható színes rendszerek teljesítményét, az alapul szolgáló kék LED-ek és a fényporok fejlesztései pedig csökkenteni fogják a költségeket és javítani fogják a fényhasznosítást ezeknél a rendszereknél. E koncepciók teljes megvalósításához ezenkívül a világításvezérlés és az otthoni automatarendszerek kompa-

tibilitásával kapcsolatosan is szükség van kutatás-fejlesztési tevékenységre.

Míg a világításnak a növénytermesztésre, a fiziológiai reakciókra és a termelékenységre kifejtett hatását egyre jobban ismerjük, fontos tudni, hogy e hatások támogató kutatásának többsége még korai fázisban van és hogy jelentős további kutatásra van szükség a biológiai válaszok teljes megértéséhez. A LED-technológia fontos szerepet fog játszani új, nagy felbontású eszközök kínálva a világítás valamennyi biológiai hatásának kutatásához és megértéséhez. Különösen a fénynek az emberi szervezetre kifejtett pozitív és negatív fiziológiai hatásait kell jól megérteni és kontrollálni a világítás előnyeinek maximalizálásához, ezért a világítástechnikai gyártóknak körültekintően, csak kellően alátámasztott, megértett és igazolható fiziológiai előnyöket szabad állítaniuk termékeikről.

2.6 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 költségcsökkenésen 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. A szilárdtest-világítási technológia további környezetvédelmi előnyöket is kínál, például a mérgező, a ritka, a kritikus vagy energiaigényes anyagok kisebb mennyiségben való felhasználását [22]. Ezenkívül a kibocsátott fény spektrumának és optikai eloszlásának szabályozása minimalizálhatja a fénynek az ökoszisztémára gyakorolt hatását. Az USA Energiaügyi Minisztériuma által támogatott életcikluselemzés (LCA) azt mutatja, hogy a LED-termékeknek csökken az energiafelhasználása a teljes életciklus – a termékek gyártása, szállítása és használata – során. A LED-ek fényhasznosításának és élettartamának növelése következtében az életciklus alatti energiafelhasználás ma kb. a fele a 4 évvel ezelőtti LED-ekének, amint azt a 2.15 ábra mutatja [22].

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

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 használna fel. (A LED-ek drámai módon képesek csökkenteni a világítás ritkaföldfém-anyag felhasználását – a Minisztérium kritikus anyagok stratégiájával összhangban (http://energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf))

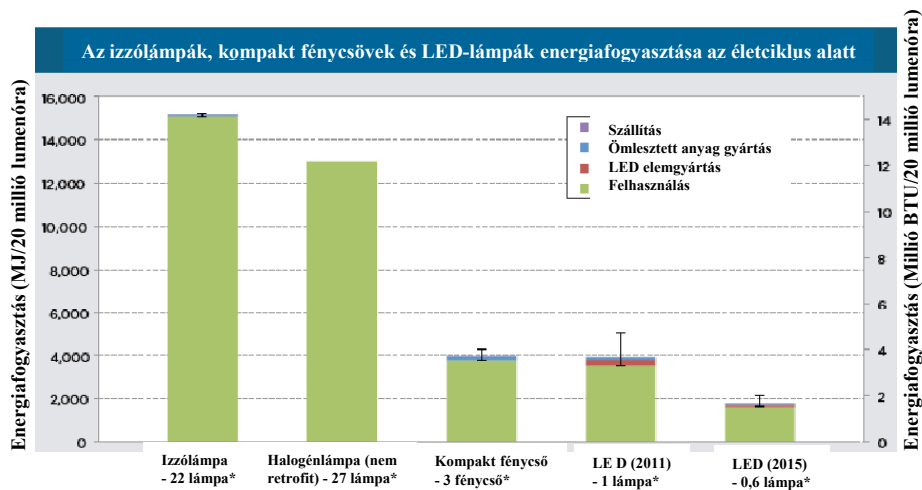
A fénycsöves világítástechnológiától eltérően a LED-ekhez és az OLED-ekhez nincs szükség higanyra vagy ólomra, ezért sokkal hatékonyabbá teszik a ritkaföldfém-anyagok felhasználását. Az LCA-tanulmány azt is mutatja, hogy a levegő, a természeti erőforrások, a víz és a talaj tekintetében a LED-alapú szilárdtest-világításnak jóval kisebb a negatív hatása, mint az izzólámpás világításnak, és mivel a LED-technológia továbbra is tökéletesedik, a kompakt fénycsövekénél 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 [22].

Noha a LED-alapú szilárdtest-világítási termékek máris kivételes fenntarthatóságot igazolnak, a környezeti hatások további csökkentéséhez még több erőfeszítésre lenne szükség. A következőkben néhány olyan kezdeményezést mutatunk be, amelyek már megvalósítás fázisában vannak a LED-es világítástechnikai iparon belül:

- A fény ökológiai hatásainak csökkentése éjszaka, például olyan kültéri világítás, amely csak minimálisan zavarja a tengeri teknősök keltetését (<http://www.myfwc.com/wildlifehabitats/managed/sea-turtles/lighting/>)
- Az útvilágítás fényszennyezésének minimalizálása. Az International Dark-Sky Association útmutatásai javaslatokat fogalmaznak meg az éjszaka felfelé kibocsátott



2.16 ábra – Alumínium hűtőbordák nélküli lámpák: (a) Philips SlimStyle; (b) Cree 4-flow (Forrás: (a) Philips honlap, 2015. május [23]; (b) Cree honlap, 2015. május [24])



2.15 ábra – Az energiafogyasztások összehasonlítása (Forrás: DOE SSL Program, "Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Product", 2013. április [22].)

*Az összehasonlíthatóság érdekében bevezették a „20 millió lumenóra” funkcionális egységet, amely egy 60W-os izzólámpát helyettesítő retrofit LED-lámpa által az élettartama alatt nyújtott világítási szolgáltatást reprezentálta 2011-ben. Mivel a többi lámpatechnológia élettartama jóval rövidebb, ezért ugyanakkora szolgáltatás eléréséhez több lámpa szükséges. A halogénlámpáknak ugyan hosszabb az élettartama a normál izzólámpáknál, de itt feltehetőleg a jóval kisebb fényáramú halogén betétlámpákat vizsgálták, innen a nagyobb darabszám. – A Szerkesztő.

„haszontalan” fénykomponens csökkentésére (<http://www.darksky.org/>). A javított optikai eloszlású LED-es világítási termékek jelentősen képesek csökkenteni a környezetbe felfelé irányuló fényszennyezés mértékét.

- „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 2.16 ábrán), amelyeknek nincs alumínium hűtőbordája.
- A termék élethciklusának megértése, hogy a termék élettartamának végén újra fel lehessen használni, vissza lehessen forgatni vagy újra lehessen hasznosítani a lámpatesteket vagy a komponenseket.
- A gyártás hatékonyságának javítása a kizozatalok növelésével, az anyagfelhasználás csökkentésével és a berendezések energiafelhasználásának mérséklésével.

3.0 Az elfogadás akadályai

A szilárdtest-világítási technológia fejlesztései igen jelentős energia, gazdasági, teljesítőképességbeli és alkalmazási előnyökkel szolgálnak. A szilárdtest-világítással elérhető sok előny és járulékos funkció ellenére azonban még számos akadály van a szilárdtest-világítási termékek elfogadásának. Ide tartozik a beszerzési ár, a megbízhatóság és a kompatibilitás, amelyek korlátozhatják ezeknek az energia-takarékos fényforrásoknak az elfogadását. A következő fejezetek áttekintést adnak ezekről a szempontokról, a megbízhatóságról részletesebb információ pedig az 5.2.4 pontban található.

3.1 Önköltség

A szilárdtest-világítási termékek elfogadásának első akadálya a LED és OLED világítási terméke magasabb önköltsége. A szilárdtest-világítási termékek önköltsége az elmúlt néhány év során gyorsan esett, miközben a kapható termékek és formai kialakítások száma szaporodott. A szilárdtest-világítási termékek a nagy költségcsökkentés dacára az önköltség alapján drágábbak maradtak a többi bevezetett fényforrásnál, és még mindig a teljes tulajdonlási költség (TCO) alapján értékesítik őket, amint azt a 2.3 fejezetben ismertettük. A LED-alapú termékek elfogadása számos kereskedelmi és ipari alkalmazásnál felgyorsult, mivel a megtérülési idő elérte az egy-két éves szintet, de fogyasztói szinten az eladások egyre kevésbé a teljes tulajdonlási költségtől, hanem egyre inkább az önköltségtől függenek. Ennek részben az az oka, hogy az átlagos lakossági fogyasztó a világítást rövidebb időtartamokra használja, és nincs figyelembe véve karbantartási költség a világítás felszerelésénél vagy a lámpacserénél. Így tehát, noha a csökkenő árak segíthették a LED-ek elfogadását, az önköltség még mindig jelentős akadály.

A retrofit LED-lámpák ára továbbra is csökkenni fog a LED-csomagok árának csökkenésével és a gyártók innovációjának folytatódásával. Végül is a szilárdtest-világítás költsége nem feltétlen kerül azonos szintre a bevezetett többi fényforrással, miután számos további előnyt is kínálunk:

[23] Philips: „Philips SlimStyle LED Dimmable A-Shape”, 2015. (<http://www.usa.lighting.philips.com/lightcommunity/trends/led/slimstyle-dimmable-led.wpd>)

[24] Cree: „The New 60 Watt Replacement”, 2015. (<http://creebulb.com/products/standard-a-type/the-new-60-watt-replacement-soft-white-ledbulb>)

nagyobb fényhasznosítást, hosszabb élettartamot és olyan értéknövelő tulajdonságokat mint az igényre szabott spektrumok és a csatlakoztathatóság (a világítás új funkcióképességeiről részletesebben a 2.5 fejezetben szoltunk).

A folytonosan eső ár egyik kockázata, hogy ennek a minőség láthatja kárát. Amint a hőelvezető anyagok – pl. az alumínium hűtőbordák – költségkímélési okokból egyre kisebbé válnak vagy el is tűnnek, ez a LED-lámpák fényhasznosítására, élettartamára és színeltolódására is kihathat. Amint kevesebb LED-et használnak és ezért mindegyiket nagyobb mértékben hajtják meg, a színeltolódás, az élettartam és a fényhasznosítás ismét csak kérdésessé válhat. Az alacsonyabb költségű összeszerelési technikák kompromisszumra vezethetnek a minőség és a magasabb korai kiesés tekintetében. Fontos tehát, hogy az alacsonyabb önköltség irányába tett lépések ne okozzanak problémát a teljesítőképesség és az élettartam tekintetében, különben csökkenni fog a fogyasztóknak a LED-technológiába vetett bizalma, csökken az elfogadás és a teljes megtakarított energia.

3.2 Megbízhatóság

A nagy energiahatékonyság mellett a LED-ek igen hosszú élettartamot ígérnek, amely jóval meghaladhatja az 50 000 üzemórát, azaz 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. Mivel a LED-termékek általában drágábbak, mint hagyományos elődeik, az a képesség, hogy a beszerzési költség megtérül a termék élettartama alatt, fontos a fogyasztók számára. A LED-lámpák 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 fényáram-megtartásnak (L70) nevezik. Korábban azt hitték, 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 meghibásodását jóval megelőzően is előfordulhat az optika degradációja, a tápegység meghibásodása és a forrasztások leválása is normál működés közben. A szerelési és anyaghibák miatt rövid távon véletlenszerű katasztrofális hibák is felléphetnek. Az eddig lefolytatott vizsgálatok azt mutatják, hogy számos lámpatest-meghibásodásért a tápegység komponens- és gyártási hibái a felelősek. A rossz lámpatest-konstrukció okozta túlmelegedés drámai módon lecsökkentheti a LED-csomagok élettartamát, és a nedvesség behatolása is fontos hibamechanizmus lehet és meghatározhatja a kültéri lámpatestek élettartamát.

A különböző mechanizmusok megértéséhez és új megbízhatósági modellek kidolgozásához további munkára van szükség a rendszer-megbízhatóság jó megértése és kommunikálása érdekében. Az USA Energiaügyi Minisztériuma szilárdtest-világítási programja finanszírozott speciális K+F tevékenységeket ezen a területen és támogatott egy ipari konzorcium létrehozását is a tevékenységek koordinálására és a jobb megértés elősegítésére. 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.

3.3 Színstabilitás

A LED-csomagok élettartama körüli vitákat a fényáram-megtartás dominálja, de a színeltolódás is fontos teljesítőképességi szempont, ami a LED-lámpák vagy LED-es lámpatestek alkalmazásainak meghiúsulását okozhatja és gátolhatja felhasználásukat. A LED-lámpák és a LED-es lámpatestek színstabilitása más és más a különböző termékeknél és potenciálisan ugyanazon termék különböző alkalmazásai esetén is. A színstabilitást nem szabad összekeverni a szinkonzisztenciával. A színstabilitás egy termék azon képességét jelenti, hogy mennyire tud állandó színpontot megőrizni az élettartama során, míg a szinkonzisztencia azonos lámpa- vagy lámpatest-típuson belül az egyedekek színvariációira utal.

A színstabilitás fontossága az alkalmazástól függ. Például egy múzeumban vagy áruházban fontos a fényforrások nagyfokú színstabilitása, míg az útvilágításnál kevésbé lényeges. A színstabilitás ott is fontos, ahol több lámpát vagy lámpatestet használnak

nak falmosáshoz, vagy ahol a tárgyakat a szín alapján ítélik meg, például kórházakban vagy gyárakban.

A LED-lámpák és LED-es lámpatestek színstabilitását több tényező befolyásolja. A környező levegő hőmérséklete, a meghajtó áram és a lámpa vagy lámpatest hőelvezető rendszerének kialakítása mind-mind befolyásolhatja a LED pn-átmenetnek hőmérsékletét, ami viszont hatással van a kimeneti jellemzőkre. Nagyobb gondot okoz a hosszú távú színstabilitás szempontjából az a hatás, amit a magas működési hőmérséklet fejthet ki bizonyos anyagokon. A LED-csomag konstrukciójától függően a fényporrétegek besűrűsödhetnek, felkunkorodhatnak, rétegeződhetnek 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 teszteljárásoknak – is súlyosbíthatják a degradációs mechanizmust bizonyos LED-termékeknél.

A LED-csomagok fényáram-állandóságától eltérően jelenleg nem áll rendelkezésre szabványos módszer a jövőbeni színstabilitás megjóslására szabványos teszteljárások felhasználásával. Nincsenek meghonosodott módszerek a gyorsított vizsgálatokra sem, ráhagyva így az egyes gyártókra, hogy kidolgozzák saját tesztelési eljárásaikat és „jóslási” modelljeiket. A színeltolódás megjóslására 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.

3.4 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 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. A kompatibilitási problémák 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 120 (vagy 230) V-os 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.

4.0 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. Az ENSZ környezetvédelmi programja (UNEP) az

Forrás	Hatály	2014	2016	2018	2020	2022
IHS [28]	Lámpák	31%	42%	52%	61%	67%
Strategies Unlimited [26]	Lámpák	41%	56%	68%	76%	80%
Strategies Unlimited [26]	Lámpatestek	33%	44%	53%	61%	69%
LED Inside [27]	Lámpák és lámpatestek	26%	34%	54%	-	-

4.1 táblázat – A LED világítás globális piaci részesedése a teljes világítástechnikai bevétel százalékában

en.lighten kezdeményezésben (<http://www.enlighten-initiative.org/>) úgy becsüli, hogy 2010-re a világításra fordított energiafelhasználás 2815 TWh-ra emelkedett, ami a teljes globális villamosáram-felhasználás 15%-ának felel meg [25]. Az UNEP előrejelzése szerint további intézkedések nélkül a fogyasztás 2030-ra 3575 TWh-ra növekedne, ezért arra ösztönzi a kormányokat, hogy dolgozzanak ki minimális energiahatékonysági normákat az energiatakarékos világítási termékek fényhasznosításának és minőségének biztosítására és az idejétmúlt technológiák piacról történő kivonására. Úgy vélik, hogy az új szabályozók lassú megvalósításával a világítás energiaigénye 2030-ra 2743 TWh-ra fog nőni, míg az ENSZ főtitkára *Sustainable Energy for All* (fenntartható energiát mindkinek) programjában javasolt felgyorsított világítási programok megvalósítása esetén az igény 2366 TWh-ra csökkenne [25].

A világ legtöbb régiójában – még ott is, ahol van kormányzati támogatás e tekintetben – a meglévő világítási eszközök kevesebb mint 10%-a használ szilárdtest-világítási termékeket, ami azt mutatja, hogy az elfogadás felgyorsításához további K+F tevékenységre van szükség. Jelenleg a globális szilárdtest-világítási piacot a LED-alapú világítási termékek uralják, míg az OLED-es világítás a dekorációs és vevőigény szerint konstruált lámpatestekre korlátozódik. Várhatóan az OLED-es világítás is hozzá fog járulni az energiamegtakarításhoz, de a fejlesztésnek ebben a korai szakaszában nehéz számszerűsíteni teljes piaci lehetőségeit. Ezért a fejezet további részében a LED-alapú világítás piaci hatására fókuszálunk.

4.1 Globális világítástechnikai piaci jelenlegi helyzet és lehetőségek

Amikor a LED-ek felhasználási arányait összevetjük, fontos különbséget tenni a termékadás, az árbevétel és a felszerelt lámpafoglalatok között. Mivel a LED-ek 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 mértékben követni fogja a piaci

részesedés növekedését a LED-ek eladásának és a meglévő világítások helyettesítésére történő felhasználásának növekedésével.

A Strategies Unlimited becslése szerint 2014-ben a LED-lámpák az eladott darabszámok 5%-át, a teljes világítástechnikai árbevétel 41%-át tették ki és felszerelt foglaltok 3%-ában használták azokat [26]. 2020-ra a darabszám 42%-ra, az árbevétel 76%-ra történő növekedését várják, és megítélésük szerint a felszerelt lámpafoglalatok egyharmadában LED lesz. A nagy gyártók (Acuity, Osram, Philips, Zumtobel) jelentései szerint a LED-termékek (lámpák és lámpatestek) a teljes árbevételnek több mint 40%-át teszik ki. E sikerek ellenére a LED Inside becslése szerint a globális ipar egészére nézve a LED-ek árbevétele a teljes világítástechnikai árbevételnek csak 26%-át tette ki 2014-ben [27]. A 4.1 táblázat a LED-ek globális világítástechnikai árbevételből való részesedésének előrejelzéseit mutatja több intézet adatai alapján. Az eltérések ellenére valamennyi piackutató cég jelentős növekedést jósol a LED-ek részesedése kapcsán. A LED-ek globális elfogadottsága (4.1 ábra) csak most kezdődik. A Strategies Unlimited előrejelzése szerint a szilárdtest-világítás behatolása a világ-szerte felszerelt lámpafoglalatok területére a 2014-es 5%-ról 2020-ig gyorsan 30%-ra fog növekedni [26].

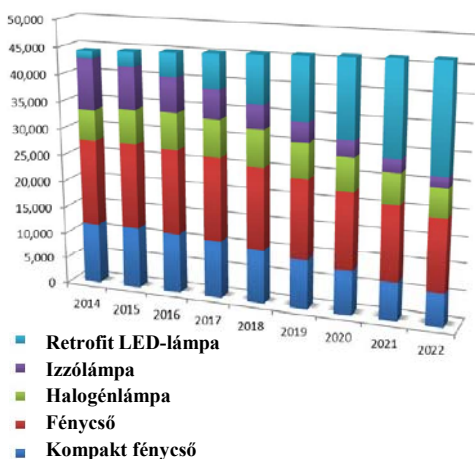
4.1.1 Egyesült Államok

A LED-ek felhasználására vonatkozó előrejelzések az Egyesült Államok tekintetében hasonlóak a globális előrejelzésekhez, miszerint a LED-ek a világítástechnikai piac kicsiny, de növekvő részét teszik ki.

[25] United Nations Environment Programme, "Green Paper: Policy Options to Accelerate the Global Transition to Advanced Lighting," 2014. november (http://www.enlighteninitiative.org/Portals/0/documents/global-forum/Green_Paper_FINAL%20reduced.pdf).

[26] P. Smallwood, in Strategies in Light Conference, Las Vegas, NV, 2015. február

[27] R. Chu, "Asian Manufacturers Spur Low Priced Lighting Era," DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, CA, 2015. jan. 28. (http://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/chu_global-trends_sanfrancisco2015.pdf)



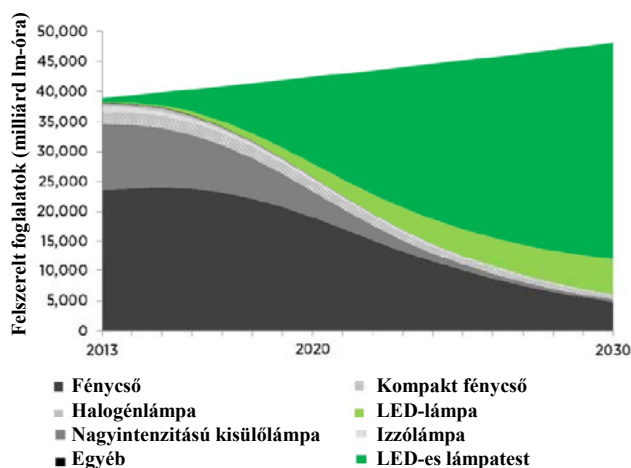
4.1 ábra – A világoszerke fészertelt lámpafoglatok alakulása világítástechnológiáknaként (Forrás: Philip Smallwood, *Strategies in Light Conference, Las Vegas, NV, 2015. február* [26])

Az USA Energiaügyi Minisztériumának „A szilárdtest-világítás energiamegtakarítási előrejelzése az általános világítási alkalmazások területén” című tanulmánya (a következőkben: „a Minisztérium szilárdtest-világítási előrejelzése”) szerint a szilárdtest-világítás 2020-ra az USA összes világítástechnikai szállításának közel a felét fogják adni (a fényleőállítási kapacitást lumenórában mérve) és a fészertelt lámpafoglatok kb. 40%-a szilárdtest-világítási technológiájú lesz [2].

Elfogadás

Az USA világítási rendszereinél használt technológiák eltolódását a 4.2 ábra mutatja. 2014-ben a fészertelt lámpafoglatoknak csak 4%-nál kisebb részében volt LED (lumenórában mérve). Manapság az USA-ban fészertelt lámpafoglatokat a lineáris fénycsövek és a nagyintenzitású kisülőlámpák uralják. Mindkét technológiát hosszú üzemi élettartam, nagy lámpánkénti fénysűrűség és nagyszámú fészertelt rendszer jellemzi. Az árak csökkenésével és a fényszennyezés növekedésével azonban a LED-es világítás az előrejelzések szerint teljesen kiszorítja a nagyintenzitású kisülőlámpákat (az általános világítás területén – A Szerk.), és a jelenlegi részarány egyharmadára fogja lecsökkenteni a lineáris fénycsövekkel fészertelt lámpafoglatok számát. 2030-ra a LED-es világítás az előrejelzések szerint a fészertelt rendszerek többségét – az általános világítás számára előállított összes lumenórában mintegy 88%-át – adja majd [2].

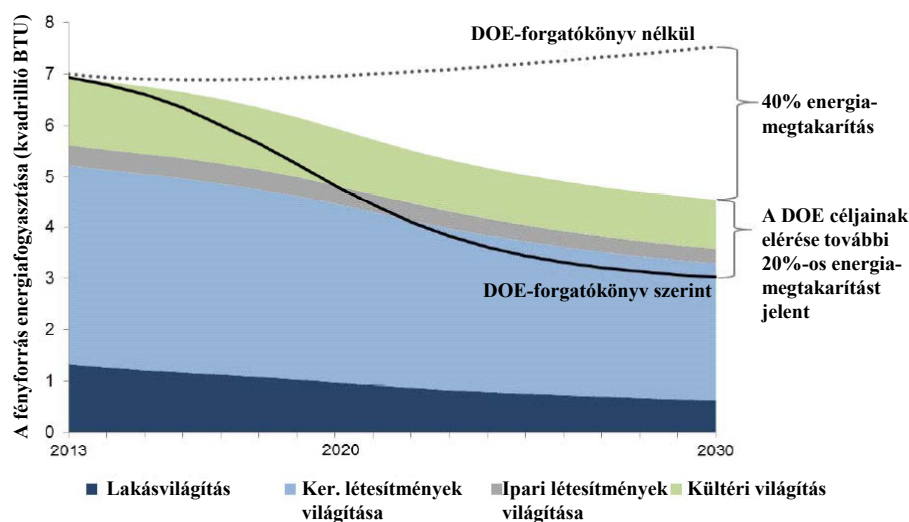
A 4.2 táblázat a LED-es világítás 2014-re, 2020-ra és 2030-ra előrejelzett piaci részesedését mutatja lumenórában 9 általános világítási alkalmazás esetére.



4.2 ábra – A U.S. Lighting Service előrejelzése a 2013 és 2030 közötti évekre (Forrás: DOE SSL Program, *Energy Savings Forecast of Solid-State Lighting in General Illumination Applications*, 2014. augusztus [2])

Alkalmazás ¹	2014	2020	2030
Általános világítás	4%	55%	>99%
Irányított fény	6%	26%	74%
Dekor. világítás	1%	31%	94%
Lineáris lámpatest	4%	44%	83%
Carnokvilágító	3%	36%	73%
Teljes beltér	3%	42%	81%
Utca/útvilágítás	21%	83%	99%
Parkoló	12%	74%	99%
Garázs	8%	67%	>99%
Épületkülső	11%	71%	99%
Teljes kültér	14%	75%	99%
Mindösszesen	6%	48%	84%

4.2 táblázat – A LED-ek piaci részesedése a világítástechnikai szállításokból az USA-ban (lumenórában) [2]
(1. A szilárdtest-világítási alkalmazások és az egyes kategóriákban belüli termékek definícióit l. a 8.1 függelékben.)



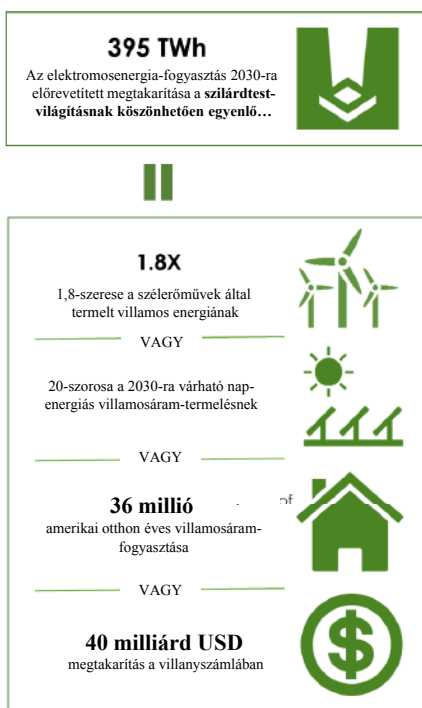
4.3 ábra – Energiamegtakarítási előrejelzés az USA-ban, ha sikerül realizálni a DOE szilárdtest-világítási célkitűzéseit (Forrás: DOE SSL Program, *“Energy Savings Forecast of Solid-State Lighting in General Illumination Applications”*, 2014. augusztus [2])

Az adatokból az alábbi következtetéseket lehet levonni:

- Eddig a LED-eknek sokkal nagyobb a piaci behatolása a kültéri világítási szektorban, mint a beltérben, habár a különbség idővel csökken.
- A LED-es világítás legnagyobb piaci

behatolása 2014-ben az út- és utcavilágítás területén volt (21%). A LED-es világítás az előrejelzések szerint 2020-ra eléri ebben az alszektorban a piaci részesedés 83, 2030-ra pedig 100%-át.

- A parkológarázsok 8%-a a legkisebb piaci részesedést jelenti a kültéri világítás



4.4 ábra – Az USA szilárdtest-világításból adódó elektromosenergia-megtakarítási előrejelzése 2030-ra a szélenergia, a napenergiával megtakarítható elektromos energiával és az amerikai háztartások éves elektromosenergia-megtakarításával összevetve

területén, de még ez is nagyobb, mint a legsikeresebb beltéri alszektore.

- A beltéri piaci szegmensek közül a maga 6%-ával az irányított fényű világítás piaci részesedése, ami részben a kis méretű, irányított fényű MR16 lámpákat helyettesítő típusok korai sikerének köszönhető.
- Az előrejelzések azt mutatják, hogy a LED-es világítás 2020-ra a világítástechnikai szállítások közel felét, 2030-ra pedig 84%-át fogja kitenni.

Energiamegtakarítások

A Minisztérium szilárdtest-világítási előrejelzése több olyan forgatókönyvet tárgyal, amelyek több tényezőnek a világítástechnikai piac jövőjére és az eredményül kapott energiamegtakarításokra kifejtett hatását veszi figyelembe. Az előrejelzési modell egy publikusan elérhető interaktív online eszköz, ahol a felhasználók saját maguk vizsgálhatják meg a különböző kulcsfontosságú bemeneti paraméterek változtatásának hatását (<http://energy.gov/eere/ssl/led-lighting-forecast>).

A jelentésben van két olyan forgatókönyv, amely különösen érdekes a Minisztérium szilárdtest-világítási K+F programja szempontjából. Az egyik a szilárdtest-technológia számára egy konzervatív ár-teljesítő-képesség pályán alapul, a másik pedig egy agresszívabb ár-teljesítmény előrejelzésen,

amely a Minisztérium szilárdtest-világítási céljaiból 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 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 3,0 kvadrillio BTU elsődleges energiaforrás megtakarításnak felel meg. Ha az Energiaügyi Minisztérium céljai megvalósulnak, az éves teljes energiamegtakarítás 2030-ra 60%-kal nőne, ami 130 TWh további háztartási elektromos energiát, azaz 1.5 kvadrillio BTU elsődleges energiaforrást elehetne megtakarítani [2].

A 4.3 ábra mutatja az egyes forgatókönyvekhez tartozó energiamegtakarításokat és a szilárdtest-világítási program K+F prioritásainak és mérföldköveinek (részletesen l. a 7.2 fejezetben) fontosságát, amelyek az agresszív ár- és teljesítő-képességjavulásokat segítik,

A háztartások 2030-ra becsült 395 TWh elektromosenergia-fogyasztása kb. 4,5 kvadrillio BTU elsődleges energiaforrásnak felel meg, amely közel kétszerese a szélenergia és 20-szorosa a napenergia által 2030-ban előállított elektromos energiának (4.4 ábra). A villamos áram átlagos kiskereskedelmi ára a végfelhasználók számára végfelhasználói szektoronként és átlamonként 2014-től 2015. februárján át napjainkig” c. tanulmány 5.6B táblázatát alapján (http://www.eia.gov/electricity/monthly/pm_table_grapher.cfm?t=empt_5_06_b) ez 0,10 USD/kWh tarifával számolva kb. 20 milliárd USD éves megtakarításnak felel meg [2]. Ez jól mutatja, hogy a szilárdtest-világítás páratlan lehetőséget kínál az elektromos áram fogyasztása terén, ezáltal javítva a hazai energiabiztonságot és csökkentve az üvegházhatást okozó gázok kibocsátását.

4.1.2 Ázsia

Az UNEP becslése szerint új irányelvek hiányában a világítás energiaigényének 57%-a 2030-ban Ázsiából fog származni [25]. Ezért az ázsiai fejlesztések kulcsfontosságúak lesznek a globális energiaigény csökkentésében.

Japán élenjár a LED-es világítás korai elfogadása terén, amit a villamos áram magas tarifája, a nukleáris erőművekből származó villamos áram lecsökkent mennyiség-

ge és a japán LED-gyártók gyors technológiai fejlődése ösztönzött. 2013-ban a LED-lámpák a nem irányított fényű fényforrások több mint 30%-át tették ki, a kompakt fénycsövek 24%-os részesedése mellett. A lámpákból és lámpatestekből származó értékesítési bevételek 2014-ben 72%-ot jelentettek; a szám 2015-re várhatóan 79%-ra fog emelkedni [29]. A Panasonic bejelentette, hogy 2015-ben minden háztartási világítástechnikai terméke LED-alapú lesz [29]. 2015 márciusában a Japan Lighting Manufacturers Association megjelentette „A világítástechnikai üzletág 2020-as kilátásai” című tanulmányát, amely azt jósolja, hogy a szállítások 100%-a, a 950 millió felszerelt lámpafogalat 50%-a LED-alapú lesz 2020-ra [30]. Kína most a szilárdtest-világítás legnagyobb piacának számít. 2014-ben a LED-lámpák és LED-es lámpatestek eladása elérte a 750 millió darabot, ami az összes eladott világítástechnikai termék 16,5%-nak felel meg, és a China Solid-State Lighting Alliance várakozásai szerint az eladott darabszám 2015-re 31%-ra fog növekedni [31]. A közel 10 milliárd felszerelt lámpafogalat viszonylatában a LED-ek behatolása a 2013-as 2,4%-ról 2014-ben 10%-ra emelkedett. Az ország 2020-as célja az, hogy a szilárdtest-világítás behatolása 70%-ra növekedjen, s ezáltal 340 TWh energiát lehessen megtakarítani, ami az UNEP globális 420 TWh energiamegtakarítási célszámának 80%-át jelenti [32]. 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 is. A Kínában gyártott szilárdtest-világítási termékek több mint 50%-át exportálják, és az európai és észak-amerikai piacokra helyezett hangsúlyt hathatós támogatás mellett kiszélesítik Délkelet-Ázsiára,

[28] W. Rhodes: „Illuminating Your IQ, Smart Lighting Market Market Today and Future”, in Smart Lighting, Berlin, Germany, 2015.

[29] Digitimes: „Digitimes Research: Japan LED lighting penetration in 2015 to reach 78.6%”, 2015. ápr. 15. (http://www.digitimes.com/news/a_20150415_PD211.html)

[30] Japan Lighting Manufacturers Association: „Growth Strategy 2020 of”, 2015. március (http://download.taiwantradeshow.com.tw/2015/TILS/seminar_ppt/20150325-1.pdf)

[31] China-LED.org: „2014 China LED general lighting industry market research report released”, 2015. febr. 12. (<http://www.china-led.org/article/20150212/12974.shtml>)

[32] W. Ling: „China SSL 2014 industry development status and trends”, ISA BRICS Workshop, Guangzhou, 2014. nov. 8.

Brazília, India, Oroszországra és Dél-Afrika [33].

Noha India népessége hasonló Kínához, a felszerelt lámpafoglatok száma csak 2 milliárd. A szám valószínűleg jelentősen növekedni fog a következő tizenöt év során, és a kormány törekszik arra, hogy ki-
elégítse az energiahatékony lámpák iránti igényt. Az elmúlt években a hangsúlyt a kompakt fénycsövek támogatására helyezték, amelyeknek gyártása 2003 és 2013 között évi 36 millióról 450 millió darabra emelkedett. A hangsúly azonban eltolódott a LED-termékek – elsődlegesen a cserére szánt retrofitlámpák, a mélysugárzók és az útvilágítás – irányába. A LED-eladások bevételeinek 2015-ös célszáma 1,25 milliárd USD, amely a teljes világítástechnikai eladások több mint 80%-át jelenti [34].

4.1.3 Európa

A világításra fordított energia egy főre jutó fogyasztása Európában az észak-amerikaiaké kevesebb mint a fele, de még mindig jelentős megtakarítások érhetők el a szilárdtest-világítás bevezetésével [35]. Az UNEP azt jelentette, hogy az EU-ban a világításra fordított energiaszolgáltatás 2010-ben 480 TWh volt [36]. A Philips úgy véli, hogy ha az összes felszerelt lámpafoglatba szilárdtest-világítási termékek kerülnek, 280 TWh energiát lehetne megtakarítani [37].

Az európai piacon belül a volfrámszálas izzólámpák részesedése a 2009-es 59%-ról 2013-ra 12%-ra esett (eladott darabban mérve). A lámpákat azonban főként halogénlámpákra cserélték, ezért az izzólámpák teljes piaci részesedése alig változott, 80%-ról 79%-ra. Habár a LED-lámpák eladása 2009 és 2013 között 0,6%-ról 4,8%-ra növekedett, ezt többnyire a kompakt fénycsövek lecserélése jelentette, amelyeknek piaci részesedése így 18%-ról 15%-ra csökkent. Ennek eredményeként az eladott háztartási lámpák átlagos fényhasznosítása csak mérsékelten – 16 lm/W-ról 18,3 lm/W-ra – növekedett [38]. Ezek az értékek elmaradnak a világ vezetőire jellemző értékektől, például Dél-Koreától (44 lm/W) és Ausztráliától (27,5 lm/W) [39].

Ez a helyzet intenzív vitához vezetett az Európai Bizottság 244/2009-es rendelete 6. fázisának bevezetésével kapcsolatban, amely a legtöbb világos burájú, nem irányított fényű lámpa fényhasznosítására minimális értéket ír elő – „csúszó skálát” alkalmazva a 400 lm/W-fényáramú lámpákra érvényes 17,9 lm/W-tól a 800 lm/W-fényáramúakra vonatkozó 20,8 lm/W-ig. Ez a fázis 2016 szeptemberében lépett volna

hatályba, de az európai világítástechnikai ipar nyomására e határértékek bevezetését 2018-ra elhalasztották [40].

A kereskedelmi és ipari szektorok számára a CLASP energiahatékonysági szervezet megbecsülte a fénycsövek és a nagyintenzitású kisülőlámpák LED-ekkel történő helyettesítésének hatását az USA Energiaügyi Minisztériumának a fényhasznosítási javulásra és az elfogadási sebességekre vonatkozó modelljei alapján. Arra a következtetésre jutottak, hogy a villamosáram-fogyasztás a 2010-es 219 TWh-ról 2020-ra 199 TWh-ra, 2030-ra pedig 148 TWh-ra lenne csökkenthető – még akkor is, ha a fénykibocsátás várhatóan 35%-kal növekedne ebben az időszakban. A LED-es világítás által előállított lumenórák részesedése az előrejelzés szerint 2020-ra 12%, 2030-ra pedig 67% lesz [41].

Ugyanúgy, mint az USA-ban, a villanyszámlák és a karbantartási költségek csökkentésének igénye a helyi hatóságokat ösztönzi arra, hogy a nagynyomású higany- és nátriumlámpákat LED-esekre cseréljék le. Ezt megkönnyítette az energiahatékonysági szerződések ösztönzése és a Smart City (intelligens város) mozgalom [42]. Az „európai innovációs partnerség” (European Innovation Partnership) például 2017-re a 60 millió meglévő útvilágítási lámpából 10 millió korszerűsítését célozta meg [43].

4.1.4 Off-grid (hálózathoz nem csatlakozó) 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. A világ többi részén a szilárdtest-világítás fő hatása az lesz, hogy kiváló minőségű világítást juttat el azokba a közösségekbe, ahol korábban nem volt kielégítő világítás. A hálózathoz nem csatlakozó közösségek számára a szilárdtest-világítási fényforrások és a nap-
elemes technológia fejlesztése messze megfizethetőbb megoldást kínál az elektromos fényforrások számára, mint a villamos áramot szállító hálózatok fejlesztése. A fejlődő világban kb. 1,3 milliárd emberhez nem jut el a villamos hálózat, ehelyett több mint 30 milliárd USD-t költenek évente világítást adó üzemanyagra, például petróleumra. Ha ezeket a fényforrásokat nap-
elemes lámpákra cserélnék, ezt a költséget tizedére, évi 2,7 milliárd USD-re lehetne csökkenteni [44].

A financiai megtakarításokon kívül a nap-
elemes világítás jelentős környezeti és egészségügyi előnyöket is kínál. A petróleumlámpák égése feketezenetet állít elő,

ami a globális felmelegedés második legnagyobb okozója, a jelenlegi felhasználás mellett évente 240 millió tonna CO₂-el-
állításnak felel meg. E fényforrások használata mellett tűzveszélyes is, a petróleum pedig toxikus, nagy mennyiségben tartalmaz nehéz részecskéket [45].

A nap-
elemes lámpák piacának gyors, a 2013-as 200 millió USD-ről 2014-re 500 millió USD-re történő növekedése lehetetlen lenne LED-es fényforrások nélkül. A megnövekedett fényhasznosítás jelentősen csökkentette a nap-
elemes panelek és a tároló akkumulátorok költségét, messze felülmúlva a LED-ek többletköltségét. Ezenkívül a LED-ek kis mérete hatéko-

[33] CSA Research: „CSA Research: Our LED products exports hit a new high”, China-LED.org, 2015. febr. 13. (<http://www.china-led.org/article/20150213/12991.shtml>)

[34] S. Sujan: „From CFL to LED”, ISA BRICS Workshop, Guangzhou, 2014. nov. 8.

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

[36] United Nations Environment Programme: „Country Lighting Assessment: European Union”, 2010 (http://app.olea.net/infomap/files/cla/CLA_EUU.pdf)

[37] Philips: „The LED Lighting Revolution”, 2012. május (http://www.lighting.philips.com/pwc_li/main/connect/Assets/tools-literature/LED-lightingrevolution-booklet.pdf)

[38] Dansih Energy Agency, Energy Piano, CLASP European Programme: „European Market Evolution and Policy Impacts”, 2015. márc. 16.

(http://clasponline.org/~media/Files/SLDocuments/2015/DEA%20-%20CLASP%20Report%20on%20European%20LED%20Market_final.ashx)

[39] 4E Mapping and Benchmarking: „Updated Benchmarking Report Impact of ‘Phase-Out’ Regulations on Lighting Markets”, 2015. március (http://mappingandbenchmarking.iea-4e.org/shared_files/676/download)

[40] European Commission: „Explanatory Memorandum Accompanying Commission Regulation (EU) No 244/2009 and No 1194/2012”, 2015. márc. 19. (http://www.eupnetwork.de/fileadmin/user_upload/Explanatory_Memorandum_RC_stage_6_review_lighting.pdf)

[41] CLASP: „Estimating Potential Additional Energy Savings from Upcoming Revisions to Existing Regulations Under the Ecodesign and Energy Labelling Directives”, 2013. febr. 18. (<http://www.eceec-report/estimating-potential>)

[42] C. Egger: „Energy Performance Contracting for Street Lighting”, 2014. június (http://www.fedarene.org/wp-content/uploads/2014/06/07_OO-ESV_Chritiane-Egger_Streetlight-EPC.pdf)

[43] B. Speed: „An EU scheme could use ‘smart streetlights’ to cut energy bills and create Wi-Fi hotspots”, CityMetric, 2015. jan. 22. (<http://www.citymetric.com/horizons/eu-scheme-could-use-smart-street-lights-cut-energy-bills-and-create-wi-fi-hotspots-670>)

[44] AT Kearney: „Investment and Finance Study for Off-Grid Lighting”, 2014. június (<http://global-off-grid-lighting-association.org/wp-content/uploads/2013/09/A-T-Kearney-GOGLA.pdf>)

[45] E. Mills: „Health & Safety Benefits of Modern Off-grid Lighting”, Lawrence Berkeley National Laboratory (https://www.lightingglobal.org/wp-content/uploads/bks-pdfmanager/104_mills-health-lighting.pdf)

nyabb optikájú, masszív eszközök tervezését teszi lehetővé igen sokféle formai kialakításban [46].

Közösségi szinten az igen nagy fényhasznosítású fényforrások – amelyeket könnyen lehet kis feszültségű egyenáramról táplálni – megfizethető napelemes útvilágításokat eredményezhetnek és lehetővé teszik az esti oktatást az iskolákban, az egészségügyi intézmények meghosszabbított működését és egyéb szociális tevékenységeket azokban a vidéki közösségekben, amelyeknél ez korábban megoldhatatlan volt.

A szilárdtest-világítás lehetővé teszi sok ország számára a jobb világítást minimális járulékos energiaigény mellett. Mindenesetre a fejlődő világban a jó világítással kapcsolatos látens igény olyan nagy, hogy a megnövekedett energiafogyasztás ki-egyenlítheti a nagyobb fényhasznosítással elért energiamegtakarítást. A világítás iránti igény a következő évtizedben valószínűleg növekedni fog – különösen Afrikában és Ázsia bizonyos részein e gazdaságok növekedésével együtt. Ez a forgatókönyv még nagyobb motivációt jelent a nagyobb fényhasznosítású szilárdtest-világítási fényforrások kifejlesztése, a fény hatékonyabb felhasználása és a szükségtelen fényelőállítás minimalizáló szabályozók elterjedésének növelésében.

4.2 Gazdasági hatás

A világítás világgazdaságra gyakorolt hatását az International Solid State Lighting Alliance (ISA) becslése alapján a 4.5 ábra mutatja [35].



4.5 ábra – A világítás hatása a világgazdaságra 2014-ben (Forrás: ISA, Global Solid State Lighting Industry Status Report and Market Trends 2014, 2014 [35])

Az ábrából az látszik, hogy az energiára fordított kiadások messze meghaladják a világítási rendszerek beszerzésének és felszerelésének költségeit. Az energiatakarékos fényforrások bevezetése nélkül a világ mesterséges világítás iránti igényének növekedése és a villamos áram növekvő ára 2030-ra 1 billió USD irányába növelheti a villanyszámlát [35]. De a fényhasznosítás növekedésével és a világításszabályozás előző fejezetekben ismertetett széleskörű bevezetésével a villanyszámlák a jövőben jelentősen csökkenhetnek. A világítástechnikai ipar számára talán a legnagyobb lehetőség a termelékenység növelésének realizálásában rejlik. Ez származhat közvetlenül a munkahelyek világításának javításából (amint azt a 2.5.4 pontban ismertettük), vagy indirekt módon például azáltal, hogy a fejlődő országokban lehetővé válik a tanulás és az orvosi ellátás az esti órákban.

Afrika és Ázsia vidéki közösségeiben a napenergiával működtetett szilárdtest-fényforrások bevezetésének szélesebb gazdasági hatása van, lehetővé téve az olcsóbb elektromos energiához való hozzáférés első lépcsőfokát. A korábban petróleum vagy gyertya vásárlására felhasznált forrásokat gyakran nagyobb naperőmű rendszerek beszerzésére fordítják lehetőséget teremtve ezzel kis vállalkozások beindítására vagy a családi élet javítására.

A világítási iparra gyakorolt hatás

A szilárdtest-világítás beköszönte már átforgalmazta a világítástechnikai ipart. A nagy, vertikálisan integrált vállalatok (GE, Osram, Panasonic és Philips) hagyományos globális dominanciáját számos új vállalkozás nagy kihívás elé állítja. Ezeknek az új cégeknek némelyike (Nichia, Seoul Semiconductor, Epistar és Sanan Optoelectronics) csak LED-chipeket és LED-csomagokat gyárt, míg mások – például a Cree – kiterjesztik erősségük kezdeti területeit komplett világítási rendszerek szolgáltatására. Közben az Osram és a Philips tevékenységeit több részre választják szét, hogy növeljék a rugalmasságot az új piacokhoz alkalmazkodva. A GE és a Panasonic LED-jeinek többségét más vállalatoktól vásárolja meg és építi be lámpaiba és lámpatestjeibe.

Az ázsiai vállalatok és kormányok hajlandósága arra, hogy nagy beruházásokat eszközöljenek gyártóberendezésekbe és a helyi ellátó struktúra kifejlesztésébe, az ipar szélesebb földrajzi megoszlásához vezetett. Például az amerikai LED-gyártócégek elvégezhetik a LED-ek lapkánövesztését és feldolgozását az USA-ban, majd elküldik a LED-chipeket Kínába tokozásra, amelyek azután visszakerülnek az USA-ba útvilágítási lámpákba építés céljából. A LED-chipek és a LED-csomagok kis mérete és súlya gazdaságossá teszi az interkontinentális szállításokat, ugyanakkor a nagy LED-es lámpatestek és OLED-panelek gyártását érdemesebb a fogyasztóhoz közel végezni. A gyártók többféle módon reagálnak a változó piaci dinamikára. Kínában a legtöbb cég agresszív módon bővíti kapacitását a maximális piaci részesedés elérése érdekében, amíg az igény nagy és az árak viszonylag magasak. Az európai és az amerikai vállalkozások diverzifikálnak, a hangsúlyt a szilárdtest-világítás hozzáadott értékére és azokra a lehetőségekre helyezve, amelyek a világítást szolgáltatásként kínálják.

A szilárdtest-világítás tervezése, gyártása és felszerelése sok új ismeret igényel. A különböző egyesületek, például az Illumination Engineering Society távoktatást biztosít, míg az egyetemek – például a Rensselaer Polytechnic Institute és a University of California Davis-ben – speciális programokat dolgozott ki a graduális és posztgraduális kurzusok és a szilárdtest-világítás kutatásának támogatásához. Számos közmű is folytat oktatási tevékenységet a szilárdtest-világítás és az Energiaügyi Minisztérium szilárdtest-világítási programja megértésének és hatékony alkalmazásának támogatására.

[46] K. Peters: „Industry Trends”, 3rd Off-grid Energy Access Investor Conference, New York, 2015. márc. 18. (http://global-off-grid-lighting-association.org/wpcontent/uploads/2015/03/presentations_public.compressed.pdf)

5.0 A LED-technológia helyzete

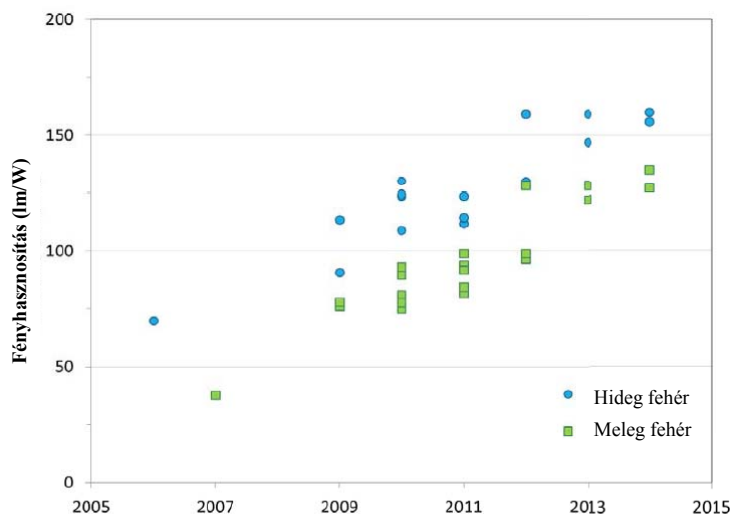
A LED-es világítástechnológia drámai módon fejlődött az elmúlt 10 év alatt, ennek eredményeként megszületett a rendelkezésre álló egyik legnagyobb fényhasznosítású fényforrás. Noha számos sikert lehet elkönyvelni, ahhoz, hogy az USA számára megkívánt jelentős energiamegtakarításokhoz szükséges elfogadási/alkalmazási árnyokat el lehessen érni, még több munkára van szükség. Különböző technológiák járulnak hozzá a nagy teljesítőképességű LED-csomagok* és LED-es lámpatestek fejlesztéséhez és későbbi gyártásához. A LED-csomagok és LED-es lámpatestek teljesítőképességét befolyásoló tényezők és a jelenlegi megoldások gyakorlati határainak megismerése fontos az olyan áttörések megvalósításához, amelyek meg tudják haladni a LED-es világítást ma még jellemző néhány teljesítőképesség-ár paradigmát. A következőkben megvizsgáljuk a technológia fejlődésének lehetőségeit és hatásukat a jövőbeli teljesítőképességekre. A termékek gyakorlati megvalósítása végző soron a kiváló minőségű, olcsó gyártástechnológiák kifejlesztésétől és a hatékony gyártói ellátólánc kiépítésétől függ. Ezért tárgyalni fogjuk a gyártási technológiák és költségek jelenlegi helyzetét is.

5.1 A technológia helyzete

5.1.1 A LED-csomagok fényhasznosítása

Amióta az USA Energiaügyi Minisztériumának szilárdtest-világítási programja megkezdődött, jelentős fejlődés tapasztalható a LED-csomagok fényhasznosításában. Jelenleg a kereskedelemben kapható LED-csomagok 200 lm/W fényhasznosításra képesek. Azonban ilyen nagy értéket gyakorlati alkalmazási körülmények között még nem lehet elérni, mivel a LED-eket igen kis meghajtóáramokkal kell működtetni, ami a LED-elemben kis teljes fényáramot eredményez. A növekvő meghajtóáram, a melegebb CCT korrelált színhőmérséklet és a növekvő CRI színvisszaadási index is fényhasznosítási szankciókkal jár a tipikus fényporos konverzióval. A LED-csomagok fényhasznosításának az idők során bekövetkezett növekedését 35 A/cm²-es tipikus áramsűrűség mellett az 5.1 ábra mutatja. Ekkora áramsűrűség esetén a mért kereskedelmi termékek hideg fehér színárnyalatban 160 lm/W, meleg fehérben 130 lm/W fényhasznosítást értek el. A 200 lm/W és e fölötti értékek eléréséhez nagy áram-

*A tokozással ellátott LED-chipre (l. a 18. oldal 8.1 ábráját) ez idáig még nem született elfogadható magyar elnevezés, ezért jobb híján mi is a jelenleg elterjedt „LED-csomag” megnevezést használjuk. – A Szerk.)



5.1 ábra – Kereskedelmi LED-csomagok fényhasznosítása 25 °C és 35 A/cm² áramsűrűség mellett mérve

sűrűségek és alacsony költségek mellett még további K+F tevékenységre van szükség. A következőkben megvitatjuk a különböző fényforrás-felépítéseket, valamint azok teljesítőképességi potenciálját és fényminőségi szintjeit.

Egy szilárdtest-világítási termék elméleti maximális fényhasznosítását az elektromos áram fénné történő tökéletes átalakítása adja. Ezt a sugárzás fényhasznosításával (LER) lehet megadni, amely egy adott spektrumból optikai wattontként nyert fény mennyisége. A Yoshi Ohno és Wendy Davis által a Nemzeti Szabvány és Technológiai Intézetben (NIST) elvégzett szimulációs munka kimutatta, hogy egy LED emissziós spektrumával jó színminőség és LER-értékek mellett 350...450 lm/W_{optikai} értéket lehet elérni [47, 48, 49]. Ha LER_{max} egy fényforrás elméleti legjobb és LER a gyakorlatilag elért értékét jelöli, akkor LER/LER_{max} az adott fényforrás spektrális hatásfoka. A fényhasznosítások becsléséhez számos CCT/CRI-kombináció esetén az Intézet 7.5 verziószámú szimulációs modelljét használták mind a keskenysávú monokróm (színkeveréses), mind a fényporkonverziós LED-ekhez. Az utóbbiakat szélesávú LED-ek és egy keskenysávú pumpa kombinációjával szimulálták. Ezzel a modellel fogják meghatározni a LED-csomagok fényhasznosításának gyakorlati korlátait.

A fehér fényű LED-csomagok teljesítőképessége az alap LED-architektúrától függ, de függ a LED-csomag korrelált színhőmérsékletétől, a színvisszaadás tárgyától és a spektrális teljesítménysűrűségtől is. A fényhasznosítási előrejelzéseket és a programcélokat fő kategóriákba sorolták: az egyik hidegebb (5700K) színhőmér-

sékletre és 70-es színvisszaadási indexre, a másik melegebb (3000K) színhőmérsékletre és 80-as színvisszaadási indexre vonatkozott.

A fehér LED-csomagok potenciális fényhasznosításának elemzéséhez meghatározták az elméleti határokat, és külön elemezték a fényhasznosítás-veszteségek különböző forrásait a LED-csomagok legfontosabb típusaira. Három kategóriát vizsgáltak: (i) színkeveréses (color-mixed) LED-ek (cm-LED-ek); (ii) fényporkonverziós (phosphor-converted) LED-ek (pc-LED-ek) és (iii) hibrid LED-ek. A hibrid LED-ek egy vagy több monokróm fényporkonverziós LED-ből állnak.

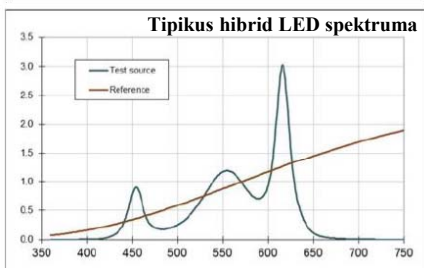
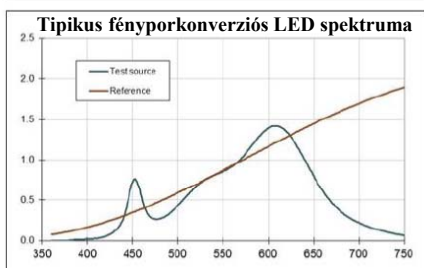
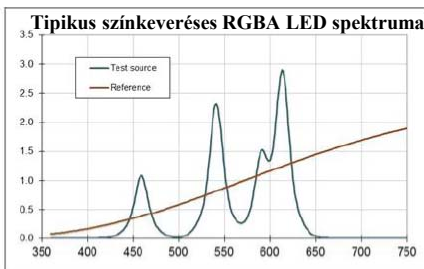
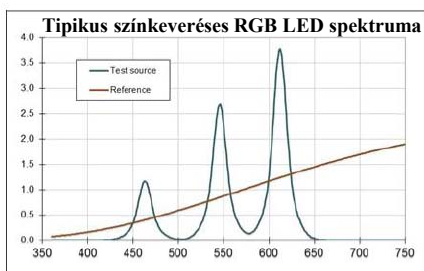
Az 5.2 ábra egy meleg fehér színkeveréses (vörös-zöld-kék [RGB] és vörös-zöld-kékes-borostyánsárga [RGBA]), egy fényporkonverziós és egy hibrid (fényporkonverziós+monokróm vörös) LED tipikus szimulált optikai spektrumát mutatja. Összehasonlításként feltüntetettük a hagyományos izzószálas feketettett fényforrás spektrumát is. Az egyes spektrumok esetén a csúcs hullámhosszak, a spektrális szélességeket és az intenzitásokat optimalizálni lehet a LER_{max} meghatározásához bármilyen adott CCT és CRI érték esetén.

A következő elemzésnél a meleg fehér LED-csomaghoz 80-as CRI-t (R₉ > 0), a hideg fehérhez pedig 70-es CRI-t (R₉ > 0, ahol lehetséges) céloztunk meg. A CRI a

[47] Y. Ohno: „Color Rendering and Luminous Efficacy of White LED Spectra”, Proc. SPIE 5530, 4th Int. Conf. on Solid State Lighting, Denver, CO, 2004

[48] Y. Ohno: „Spectral Design Considerations for White LED Color Rendering”, Optical Engineering, vol. 44, no. 11, 2005. nov. 30.

[49] Y. Ohno and W. Davis: „Toward an Improved Color Rendering Metric”, Proc. SPIE 5941, 5th Int. Conf. on Solid State Lighting, San Diego, CA, 2005



5.2 ábra – Az egyes megoldások tipikus szimulált optikai spektruma a feketetest görbéjével összehasonlítva (3000K, CRI 85, R9>0)

fényforrásnak azt a képességét jelöli, hogy milyen pontosan adja vissza az R1...R8 nyolc standard színminta színeit (CIE 1995), de nem tükrözi a telített színek megjelenítési képességét, különösen a vörösét, amelyet az R9-es színminta reprezentál. Ezért a CRI értéket gyakran kiegészítik az R9-re vonatkozó értékkel, hogy mennyiségileg minősíteni lehessen a fényforrásnak a vörös színek megjelenítésére vonatkozó képességét. A *Energy Star* minősítés (http://www.energystar.gov/sites/default/files/ENERGY%20STAR%20Lamp%20V1%201_Specification.pdf) például előírja, hogy az $R9 \geq 0$ kell, hogy legyen, de bizonyos testületek már fontolgatnak nagyobb értékeket is a Kaliforniai Energia Bizottság önkéntes specifikációjában (http://www.energy.ca.gov/appliances/led_lamp_spec/documents/2014-12-10_Resolution_Voluntary_California_Quality_LED

LED-forrás	Hullámhossz (nm)	2015		2020	
		Teljesítmény-átalakítási hatásfok (%)	Vonalszélesség/ FWHM (nm)	Teljesítmény-átalakítási hatásfok (%)	Vonalszélesség/ FWHM (nm)
Kék	440-460	60	20	80	20
Zöld	520-540	22	20	35	20
Borostyánsárga	580-595	8	20	20	20
Vörös	610-620	44	20	55	20

Fénypor-forrás	Hullámhossz (nm)	2015		2020	
		Kvantumhatásfok (%)	Vonalszélesség/ FWHM (nm)	Kvantumhatásfok Yield (%)	Vonalszélesség/ FWHM (nm)
Zöld	530-560	95	100	99	70
Vörös	620-650	90	100	95	30

* Full width at half maximum (FWHM) = Teljes szélesség a maximum felénél

5.1 táblázat – A LED-ek (felső táblázat) és a fényporok (alsó táblázat) 2015-ös és 2020-as elemzéséhez felhasznált kulcsfontosságú paraméterek

Felépítés	Melegfehér				Hidegfehér			
	2015		2020		2015		2020	
	LER (lm/W)	Fényhasznosítás (lm/W)	LER (lm/W)	Fényhasznosítás (lm/W)	LER (lm/W)	Fényhasznosítás (lm/W)	LER (lm/W)	Fényhasznosítás (lm/W)
RGB cm-LED	397	134	397	189	367	124	367	180
RGBA cm-LED	388	81	388	146	-	-	-	-
PC-LED	331	143	387	242	331	158	352	236
Hibrid LED	368	171	392	244	-	-	-	-

* Luminous efficacy of radiation (LER) = sugárzás fényhasznosítása

5.2 táblázat – Különböző LED-struktúrák sugárzási fényhasznosítása és eszköz-fényhasznosítása 2015-ben és 2020-ban (cm-LED = színkeveréses LED, pc-LED = fényporkonverziós LED)

Lamp_Specification_Resolution_No_14-1210-09_TN-74289.pdf), amely $R9 \geq 50$ -es értéket ír elő. A CRI vagy az R9 kritériumok enyhítése nagyobb LER_{max} értéket eredményezne, de ez veszélyeztetné a fényminőséget. Az elemzés 35 A/cm²-es áramsűrűség és 25 °C hőmérséklet feltételezésével készült. A későbbiekben tárgyalandó teljesítőképességi adatokat ugyanolyan színhőmérséklet-színviassaadási index kombinációk mellett, azonos működési feltételek között kaptuk.

A LED-ek elméleti maximális fényhasznosítása az optimális spektrum és a megfelelő LER-érték meghatározása után számolható ki. Monokromatikus fényforrások esetén a fényhasznosítás úgy adódik, hogy a spektrum egyes csúcsaihoz tartozó LER-érték „adaleköt” megszorzozzuk az illető fényforrás teljesítmény-átalakítási hatásfokával (PCE). A fényporkonverziós fényforrásoknál integrálni kell a fénypor spektrum pontjainak burkológörbét és ezt meg kell szorozni a lefelé konvertálás hatásfokával és a Stokes-vesztességgel. (A Stokes-féle veszteség a fénypor anyagának elnyelt és emittált fotonjai között energiakülönbség.) Az elemzés leegyszerűsítése érdekében azonban a fényport egyszerű Gauss-eloszlású emissziós spektrummal reprezentáljuk, amely egyetlen meghatározó konverziós hatékonysággal és egyetlen, az emissziós spektrum csúcsához tartozó Stokes-vesztességgel jellemezhető. Ez ugyan meglehetősen pontatlan feltételezés,

mivel a tényleges emisszió meglehetősen széles és aszimmetrikus, különösen a zöld fényporok esetén, de ésszerű becslési értéket ad. A hibrid LED-ek esetén a fényhasznosítás meghatározásához a két módszert kombináltuk. Az 5.1 táblázat összegzi az elemzésnél használt paraméter-értékeket.

A különböző LED-architektúrák (színkeveréses RGB, színkeveréses RGBA, fényporkonverziós és hibrid LED-ek) eredményeit az 5.2 táblázat foglalja össze (részletesebben: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_myp2014_web.pdf) [50]. Megjegyzés: A színkeveréses felépítésekre vonatkozó előrejelzések nem tartalmazzák a színkeverés járulékos veszteségeit.

A legnagyobb LER-értékeket a színkeveréses struktúráknál lehetett elérni, a gyakorlati hatásfokot azonban korlátozza a borostyánsárga és kisebb mértékben a zöld LED-ek teljesítmény-átalakítási hatásfoka (PCE). Ha a PCE értéket mindkettőnél 55%-kal sikerülne megnövelni – elérve a vörös LED-ekre jellemző célszámot –, akkor a két struktúra fényhasznosítása 230 lm/W körüli értékre növekedne. Annak

[50] DOE SSL Program: „Solid-State Lighting Research and Development Multi-Year Program Plan”, Bardsley Consulting, SB Consulting, SSLs, Inc., Navigant Consulting, Inc., Radcliffe Advisors, Inc., 2014. ápr. (http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_myp2014_web.pdf)

érdekében, hogy a 250 lm/W-hoz közeli célszámot elérjük, 60-60%-kal növelni kellene a vörös, zöld és borostyánsárga LED-ek PCE értékét.

A következő legmagasabb LER-értéket adó konfiguráció a hibrid LED, amely egy keskeny sávú vörös LED-fényforrást egy fényporkonverziós kékkel házasít össze. Ez a konfiguráció a zöld fényporok és a jelenlegi kék és vörös LED-ek nagy fényhasznosításának előnyeit ötvözi a legnagyobb fényhasznosítás elérése érdekében. A fényhasznosítás várhatóan 250 lm/W körüli értékre fog növekedni, amint ezek a komponensek tovább tökéletesednek. Az így adódó nyilvánvaló előnyöket csökkenti a hagyományos indium-gallium-foszfid (AlInGaP) alapú vörös LED-ek szegényesebb hőstabilitása. A gallium-nitrid (GaN) alapú kék LED-ekétől jelentősen eltérő termikus viselkedésük okán szabályozó rendszerre van szükség a konzisztens színpont megőrzéséhez, ami bonyolultabbá és költségesebbé teszi a rendszert.

A fényporkonverziós megoldás hasonló LER-értékeket kínál a jelenlegi nagy vonalszélességű fényporokat használó meleg és a hideg fehér LED-ek esetében. Amint a fényporok vonalszélessége csökken és megközelíti a vörös LED-ekét, a meleg fehér fényporkonverziós LED-ek teljesítőképessége meg fogja közelíteni a hibrid LED-ekét. A hideg fehér LED-ek helyzete egy kicsit más, mivel a spektrumban jóval kisebb a vörös fénykomponens. A 70-es színvisszaadási index eléréséhez és egy ésszerű R9-érték fenntartáshoz az LER tekintetében kompromisszumra van szükség, de a hideg és meleg fehér fényporkonverziós LED-fényforrások fényhasznosítása végső soron kis mértékben el fog térni.

A meleg fehér LED-ekre vonatkozó fenti elemzést 3000K és 80-as CRI mellett végezték el, bizonyos piaci szektorok azonban egyre magasabb színminőséget igényelnek, ezért érdemes megvizsgálni a CRI színvisszaadási index fényhasznosításra kifejtett hatását. Az egyszerű modell felhasználásával úgy becsüljük, hogy a CRI 80-ról 90-re történő meg növelése kb. 10%-os fényhasznosítás-csökkenést eredményez, de a gyakorlati adatok ennél lényegesen nagyobb – 15-20%-os – esésre utalnak. Ezért a nagyobb CRI-re való törekvésnek jelentős lesz a hatása a fényhasznosításra.

A fényporkonverziós és színkeveréses LED-ek különböző veszteségeinek részletes elemzése az 5.3 és 5.4 táblázatban található a 2020-as célszámokkal együttl.

Paraméter		2015. évi állapot	2020. évi cél
LER (lm/W)		331	387
Kék LED	Belső kvantumhatásfok	89%	95%
	Kivonási hatásfok	85%	90%
	Elektromos hatásfok	93%	95%
	Elem hatásfoka	85%	99%
	Teljesítmény-átalakítási hatásfok	60%	80%
Zöld fénypor	Kvantumhatásfok	95%	99%
	Stokes hatásfok	84%	
	Átalakítási hatásfok	80%	83%
Vörös fénypor	Kvantumhatásfok	90%	95%
	Stokes hatásfok	74%	
	Átalakítási hatásfok	67%	71%
Fényforrás teljes hatásfoka		43%	63%
Fényporkonverziós LED fényhasznosítása (lm/W)		143	242

5.3 táblázat – A meleg fehér fényporkonverziós LED-ek fényhasznosítási és hatásfok-adatai (2015-ös állapot és 2020-as cél)

Paraméter		2015. évi állapot	2020. évi cél
LER (lm/W)		397	
Kék LED	Fénypor-átalakítási hatásfok ¹	60%	80%
Zöld LED	Fénypor-átalakítási hatásfok	22%	35%
Vörös LED	Fénypor-átalakítási hatásfok	44%	55%
Súlyozott teljesítmény-átalakítási hatásfok ²		34%	48%
Színkeveréses LED fényhasznosítása (lm/W)		134	189

5.4 táblázat – A meleg fehér színkeveréses RGB-LED-ek fényhasznosítási és hatásfok-adatai (2015-ös állapot és 2020-as cél) Megjegyzések: 1 A hatásfokok részletes adatait l. az 5.3 táblázatban 2 A súlyozott teljesítmény-átalakítási hatásfok az egyedi források teljesítmény-átalakítási hatásfokát mutatja az egyes forrásoknak a végső spektrumban adódó részarányával súlyozva

Végkövetkeztetések

A színkeveréses, a fényporkonverziós és a hibrid megoldásokat összehasonlítva a következő fontos következtetéseket lehet levonni:

- Rövid távon a hibrid megoldás kínálja a legnagyobb fényhasznosítást a keskeny sávú vörös LED-fényforrások könnyű hozzáférhetősége okán, de a vörös LED-ek nagyfokú hőérzékenysége bonyolítja a helyzetet.
 - A fényporkonverziós megoldás összemérhető lehet a hibrid megoldással feltéve, hogy jó hatásfokú, keskeny sávú vörös és zöld fényporokat lehet kifejleszteni.
 - A színkeveréses megoldás csak akkor fogja realizálni fényhasznosítási előnyét a fényporkonverziós vagy a hibrid alternatívákkal szemben, ha a zöld és borostyánsárga LED-ek teljesítmény-átalakítási hatásfoka a 60%-os tartományba kerül.
 - A hibrid megoldás nem nyújt jelentős előnyt a fényporkonverzióhoz képest a hideg fehér LED-ek esetében.
 - A LED-ek maximális várható fényhasznosítása 35 A/cm² és 25°C mellett 250 lm/W körüli.
 - A CRI színvisszaadási index 80-ról 90-re növelése 3000K esetén jelentősen, 15-25%-kal csökkenti a fényporkonverziós LED-ek fényhasznosítását.
- A gyakorlatban az áramsűrűség és az üzemi hőmérséklet nagy valószínűséggel

el fog térni a fenti elemzéshez használt értékektől, s ezért befolyásolni fogja a fényhasznosítást. Az üzemi áram csökkentése az áramhatásfok-esés minimalizálására 15-20%-kal képes növelni a fényhasznosítást. A működési hőmérséklet növekedése – ami tipikusan tapasztalható a lámpák vagy lámpatestek esetén – csökkenteni fogja a fényáramot és ennek megfelelően a fényhasznosítást is. Számos LED-et most rutinszerűen 85 °C-os átmenet-hőmérsékleten mérnek, hogy közelebb kerüljenek az eszköz tényleges üzemi hőmérsékletéhez. Ez tipikusan 10-13%-kal kisebb fényhasznosítást eredményez a 25 °C-os átmenet-hőmérsékleten adódó értéknél. A belső kvantumhatásfok (IQE) áramsűrűséggel (azaz az áramesséssel) és hőmérséklettel (azaz a termikus eséssel) kapcsolatos érzékenysége csökkenése továbbra is jelentős lehetőséget kínál a fényhasznosítás növelésére és a költségcsökkentésre. A következő részben ezeket és egyéb más veszteségeket fogunk részletesen megvitatni.

5.1.2 Jövőbeni lehetőségek

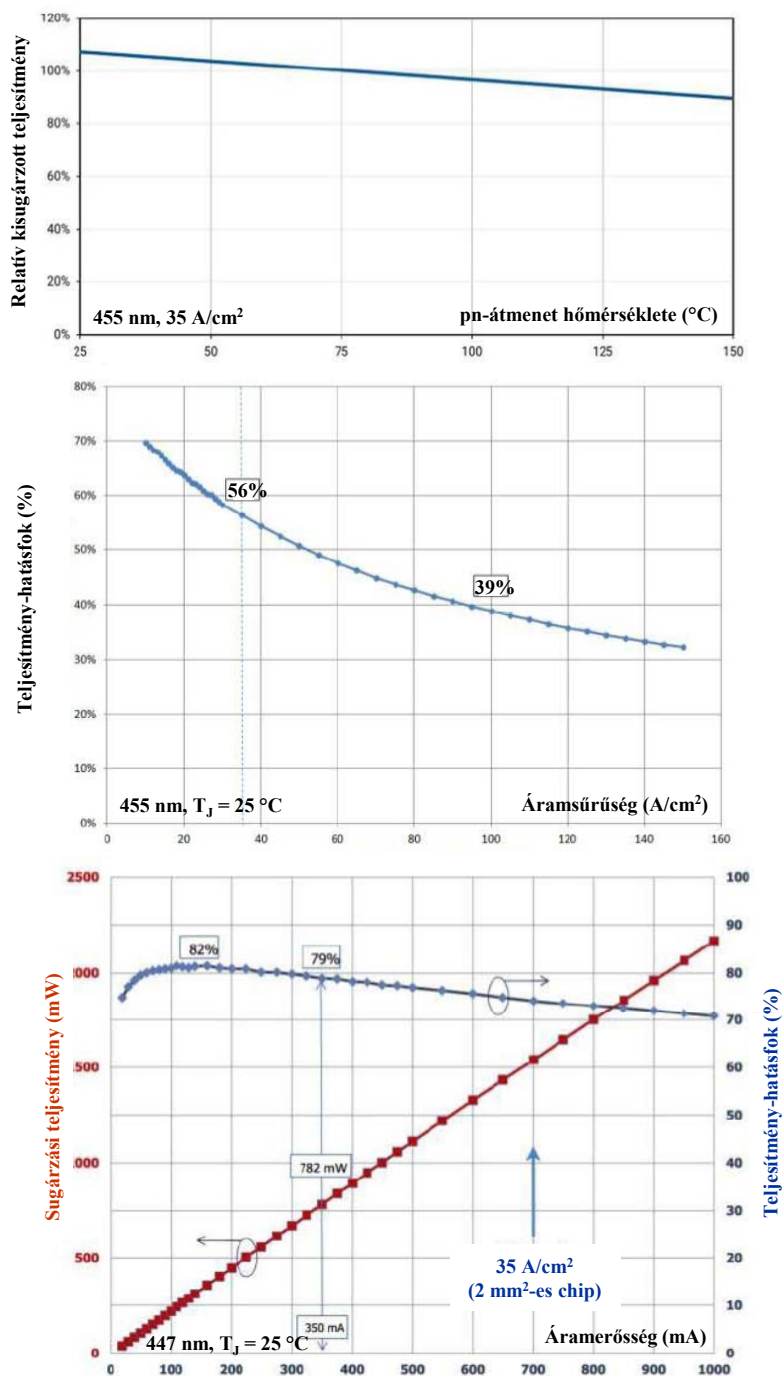
Fényporkonverziós LED-ek

A szilárdtest-alkalmazásoknál jelenleg használt fehér LED-ek túlnyomó többsége fényporkonverziós. Az ilyen eszközök teljesítőképességét a szivattyú LED-forrás fényhasznosítása és a fénypor anyagának

átalakítási hatásfoka szabályozza.

A jelenlegi kék LED-eknek már igen nagy a fényhasznosítása. A maximális belső kvantumhatásfok kis áramsűrűségeknél már 95% lehet. A tipikus 35 A/cm^2 -es üzemi áramsűrűségnél a kvantumhatásfok 89% körüli értékre esik le, és a PCE teljesítmény-átalakítási hatásfok (beleértve a fénykivonási hatásfokot és az elektromos hatásfokot is) kb. 60% lesz. A belső kvantumhatásfoknak az üzemi áram csökkenésével fellépő csökkenését áramhatásfok-esésnek nevezzük, és tipikus működési feltételek esetén ez a teljesítőképességet korlátozó hatások egyike. A termikus esésnek nevezett hasonló jelenség a fényáramnak az üzemi hőmérséklet növekedésével bekövetkező csökkenésére utal. Az 5.3 ábra példákat mutat be ezekre a csökkenési jelenségekre.

Az áramsűrűség-esés okait továbbra is vitatják. Az általános konszenzus szerint a fő felelős az Auger-rekombináció a piezoelektromos terek jelenlétével és az aszimmetrikus elektron-lyuk injekcióval összefüggő hordozótranszport-problémákkal együtt [52]. Ahhoz, hogy realizálni lehessen a belső kvantumhatásfok 2020-ra megcélzott 95%-os és a teljesítmény-átalakítás 80%-os értékét (35 A/cm^2 mellett), jelentősen csökkenteni kell az áramsűrűség-esést. Napjainkban a kereskedelemben kapható tipikus kék LED-ek teljesítmény-átalakítási értékei 35 A/cm^2 mellett a 60%-os tartományba esnek, de a legújabb laboratóriumi eredmények (l. az 5.3c ábrán) már 75%-os teljesítmény-átalakítást is demonstráltak 35 A/cm^2 (700 mA) esetén, ami azt sugallja, hogy ez a cél elérhető [9]. A fényporkonverziós LED-ek másik kritikus eleme a fényporos lefelé konvertáló, amelynek nagy kvantumhozamot kell mutatnia nagy mértékben telített optikai fluxussal, kiváló termikus stabilitással és keskeny emissziós vonalszélességgel együtt. A jelenlegi fényporok nagy, 90%-ot meghaladó kvantumhozammal rendelkeznek, de viszonylag széles emissziós spektrumokat mutatnak (100 nm-es teljes szélességet a maximum felénél [FWHM]), és nagy optikai fluxussűrűségek és magas hőmérsékletek mellett telítési effektusoktól szenvednek. Ezért olyan új lefelé konvertáló anyagok kifejlesztésére van szükség, amelyek megőrzik a nagy kvantumhatásfokot, s közben javulnak a vonalszélesség terén is, különösen a vörös spektrumtartományban, ahol a cél 30 nm-es FWHM, a telítettségi célkitűzés pedig 5%-nál kisebb kvantumhozam-csökkenés 1 W/mm^2 -nél a csúcserősséghez képest.



5.3 ábra – Példák a termikus és áramhatásfok-esésre – (a) Tipikus termikus esés (Cree XT-E) – (b) Tipikus áramhatásfok-esés (Cree XT-E) – (c) Korszerű áramhatásfok-esés (Forrás: (a)(b) Cree XLamp XT-E adatlapja [51]; (c) John Edmond, 2015 DOE SSL R&D Workshop [9])

Színkeveréses LED-ek

A több monokromatikus fényforrást magukban foglaló LED-ek elméletileg a legnagyobb fényhasznosításokat kínálnák, amint azt az 5.1.1 pontban megvitattuk. Ezeknek az előnyöknek a bemutatására tett kísérleteket a zöld és a borostyánsárga LED-fényforrások kis fényhasznosítása és a vörös és borostyánsárga AlInGaP alapú LED-ek termikus stabilitása beárnyokolta. Az AlInGaP alapú vörös és borostyánsárga LED-ek teljesítőképességének javítása

nagy kihívást jelent. Ezek az anyagrendszerek jól ismertek, és az epitaxiális növesztési technológia kiforrott. A vörös LED-ek a 650 és 660 nm-es tartományban

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

[52] S. DenBaars: „Ongoing LED R&D Challenges (LED droop still challenge)”, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, CA, 2015. jan. 27-29. (http://energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/denbaars_led-challenges_2015.pdf)

igen nagy fényhasznosításúak lehetnek, de a hullámhossznak a szilárdtest-világítási alkalmazásokhoz optimalizált tartományba történő lecsökkentésével (kb. 620 nm-re) a fényhasznosítás gyorsan csökken. Ennek a fényhasznosítás-esésnek az az oka, hogy egyre kevesebb töltéshordozó keletkezik az aktív és a potenciálgát tartományának anyagai közötti energiakülönbség csökkenése miatt. Sajnos, keveset lehet tenni a potenciálgát energiájának növelésére az AlInGaP aktív tartománya anyagösszetételének módosításával, a tiltott sáv kb. 2,23 eV energiájánál (555 nm-en) bekövetkező indirekt félvezetőbe való átváltás miatt. Az indirekt energiagát lényegében független az anyagösszetételtől és megszabja az emissziós hullámhossz alsó határát, lényegében kizárva ezzel használatát a zöld LED-ekhez. A potenciálgát anyagának maximális energiájátja hasonlóképpen definiált, ami alacsonyabb energiagátat és egyre kevesebb „töltéshordozó-termelést” eredményez, amint a hullámhossz eltolódik a vöröstől a borostyánsárga felé. Az alacsonyabb energiagát miatt kisebb lesz a kvantumhatásfok és igen nagy lesz az üzemi hőmérséklettel szembeni érzékenység a töltéshordozók termikus aktiváltság „szökése” miatt.

E korlátok ellenére a vörös AlInGaP LED-eket egy zöldes-fehér fényporkonverziós LED-del kombinálva (a fehér LED eltolja a fekete test görbét a zöld felé) igen sikeresen alkalmazták igen nagy fényhasznosítású LED-fényforrásokhoz – például a Cree cég TrueWhite® technológiájánál. Az ilyen rendszerek nagy fényhasznosítást és kitűnő színminőséget kínálnak. Alkalmazásuk fő hátránya, hogy kezelni kell a fehér fényporkonverziós LED-hez használt InGaP és a vörös AlInGaP LED közötti nagyfokú termikus stabilitáscsökkenést. A fehér hibrid fényforrás tipikusan tartalmaz egy szabályozó rendszert a konzisztens színpont fenntartásához az üzemi hőmérséklet változása esetén, de ez plusz költséget és nagyobb bonyolultságot jelent.

A nagy fényhasznosítású zöld LED megvalósítása továbbra is az egyedüli technikai kihívás marad. A zöld emissziós hullámhosszakhoz közeledve mind a rövid, mind a hosszú hullámhosszak oldaláról, a fényhasznosítás gyorsan csökken, ami az ún. „zöld rés” jelenséget okozza. Amíg az InGaP-alapú kék és lila LED-ek teljesítőképessége gyorsan javult az elmúlt néhány évtized során a belső kvantumhatásfokok 90%-ot meghaladó értékeivel, az indium összetevő növelése ahhoz, hogy emisszió jöjjön létre a spektrum zöld tartományá-

Szín	Módszer	$\lambda_{\text{csúcs}}/\lambda_{\text{közpon}} \text{ (nm)}$	$\lambda_{\text{domináns}} \text{ (nm)}$	Fényhasznosítás (lm/W)	Átalakítási hatásfok (%)	Forrás
Zöld	Közvetlen	530	-	147	25	OSRAM [56]
Zöld	Fényporos átalakítás	540	-	209	32	OSRAM [56]
Lime-zöld	Fényporos átalakítás	543	568	192	29	Lumileds [57]
Borostyánsárga	Közvetlen	-	590	60	12	Lumileds [57]
Borostyánsárga	Fényporos átalakítás	592	591	105	20	Lumileds [57]

5.5 táblázat – A direkt és a fényporkonverziós LED-ek összehasonlítása

Megjegyzések: 1. Az eszközöket 350 mA és 25°C mellett mérték 1 mm²-es elemméret esetén – 2. Az átalakítási hatásfokot a fénykibocsátás elméleti maximális hatásfokának figyelembe vételével számították ki

ban, gyors fényhasznosítás-csökkenést eredményez. Például, ha a hullámhosszat 450 nm-ről (kék) 500 nm-re (cián) toljuk el, a PCE teljesítmény-átalakítási hatásfok megfeleződik, s ha tovább növeljük a hullámhosszat 525 nm-re, a PCE újból a felére fog csökkenni. Számos olyan fizikai jelenség van, amely alapjául szolgál a fényhasznosítás hosszabb hullámhosszaknál bekövetkező csökkenésének az InGaP-alapú anyagok esetén, de a megoldások megbízhatatlannak bizonyultak. A megoldandó problémák között van a jó minőségű, egyre nagyobb indium-tartalmú és egyre nagyobb rács-illesztetlenségi feszültséggel rendelkező InGaP növesztése. Ennek következtében az InGaP kvantumkutatás aktív tartományokon alapuló, 530 nm-es zöld LED teljesítmény-átalakítási hatásfoka kb. 25%-kal korlátozódik. Az InGaP anyagrendszereken alapuló borostyánsárga és vörös LED-ek még nagyobb indium-szinteket igényelnek és még nagyobb rács-illesztetlenségi feszültségtől szenvednek. Ezért esetükben a zöld InGaP LED-ekkel kapcsolatos anyagproblémák még tovább bonyolódnak. A zöld LED-ek fényhasznosításának növelésére irányuló munka sugalmazhat megoldásokat arra vonatkozóan, hogy hogyan lehet az InGaP LED-ek hasznos működési tartományát kibővíteni ezekre a hosszabb hullámhosszakra. Az újabb kísérletek azt sugallják, hogy a teljesítőképesség hagyományos planár eszközeometriák felhasználásával tovább javítható, és ki lehet terjeszteni az ilyen eszközök működését a spektrum borostyánsárga és vörös részeire is [53, 54].

A nanostruktúrák felhasználása – nanomintázott hordozókra való növesztés vagy nanohuzalok és nanorudak növesztése – kínálhat megoldást igen jó minőségű, a borostyánsárga és vörös emisszióhoz szükséges nagyobb indium-tartalmú InGaP rétegek növesztésére. Egy másik kutatási irány az olyan rácsparaméterekkel rendelkező hordozók tervezése lehetne, amelyek jobban illeszkednek az aktív tartományú

anyaghoz a növesztés során kialakuló rács-illesztetlenségi feszültség és a diszlokációs sűrűség csökkentése érdekében. Ilyen hordozó például a SCAM (ScAlMgO₄), amelynek ugyanolyan rácsállandója van, mint az In_{0.17}Ga_{0.83}N-nak, s emissziós hullámhossza 505 nm körüli [55].

A monokromatikus vörös, borostyánsárga és zöld LED-ek előállításának másik alternatívája a fényporkonverziós megoldás felhasználása, amely élvezi a kék InGaP LED-ek igen nagy teljesítmény-átalakítási hatásfokának előnyeit a kék fényt teljes egészében a megkívánt színre alakítva át. Ez olyan teljes átalakítási hatásfokot eredményezhet, amely lényegesen meghaladja a közvetlen félvezető emitterjét, lényegében hatástalanítva a Stokes-vesztés hátrányait. A zöld és borostyánsárga LED-ek összehasonlítását az 5.5 táblázat mutatja.

A fényporkonverziós megközelítés különösen a zöld és borostyánsárga LED-ekhez tűnik alkalmasnak, ahol az alapvető félvezető anyag problémás, jelentősen korlátozza a közvetlen emitterek hatásfokát. E fényforrások viszonylag széles emissziós spektrumai negatívan befolyásolják a sugárzás fényhasznosítását (LER), de a CRI színvisszaadási indexre pozitív hatással vannak. A fehér fényporkonverziós LED-ek teljesítőképességének javításához a jó hatásfokú, keskeny sávú, lefelé konvertáló anyagok jövőbeli kifejlesztése ezért javíthatná a különálló keskenysávú vörös, borostyánsárga és zöld fényporkonverziós LED-ek kilátásait is. A különálló, keskenysávú fényporkonverziós vörös, boros-

[53] Osram: „Osram Achieves Record Figures with Green LEDs”, 2014. jún. 11. (http://www.osram.com/osram_com/press/press-releases/_trade_press/2014/osram-achievesrecord-figures-with-green-leds/index.jsp)

[54] S. Saito, R. Hashimoto, J. Hwang and S. Nunoue: „InGaP Light-Emitting Diodes on c-Face Sapphire Substrates in Green Gap Spectral Range”, Applied Physics Express, vol. 6, no. 11, 2013.

[55] T. Ozaki, Y. Takagi, J. Nishinaka, M. Funato and Y. Kawakami: „Metalorganic vapor phase epitaxy of GaN and lattice-matched InGaP on ScAlMgO₄(0001) substrates”, Applied Physics Express, vol. 7, no. 9, 2014.

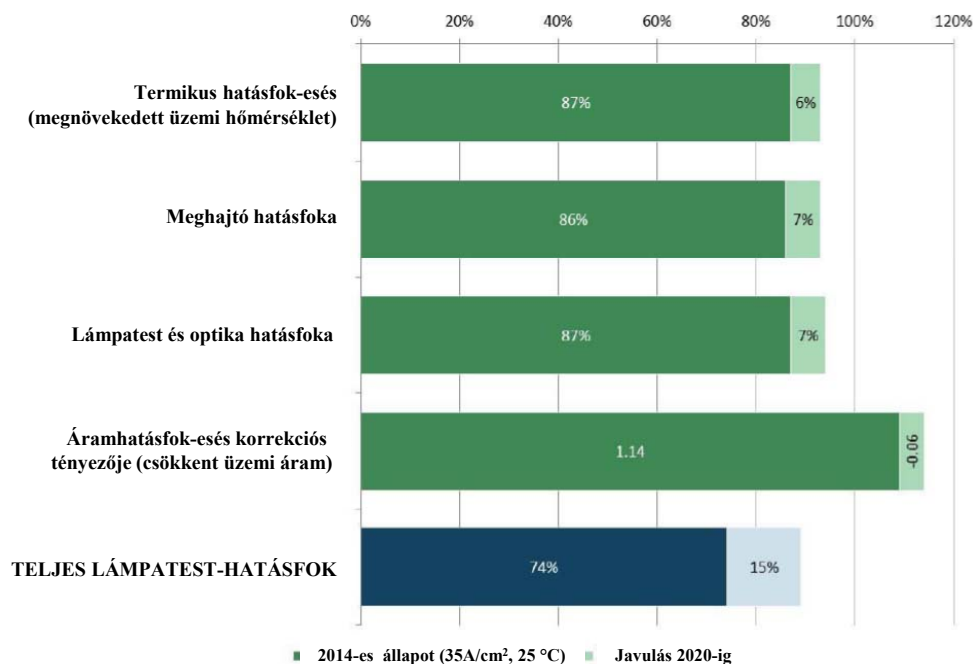
tyánsárga és zöld LED-ek egy kék LED-del kiegészítve jó fényhasznosítású, nagyobb színpont-stabilitású és kontrollálhatóbb RGBA fehér fényforrást eredményezhetnek.

5.1.3 A LED-es lámpatestek hatásfoka

A LED-es lámpatestek hatásfokát jelentős mértékben a LED-modul hatásfoka határozza meg. A LED-modul beépítése a lámpatestbe járulékos hatásfok-vesztést eredményez, mivel a tápegység hatásfoka, az optika hatásfoka és a termikus veszteségek mind beleértendők a teljes lámpatest-hatásfokba. Ezért a LED-modul fényhasznosítása adott üzemi áram és hőmérséklet mellett reprezentálja a szilárdtest-világítási lámpatestek hatásfokának felső határát.

A valóságban a lámpatest hatásfoka attól függ, hogy ezeket a különböző elemeket tartalmazó teljes lámpatest-rendszert hogyan optimalizálták az adott alkalmazáshoz. A költség és a teljesítmény közötti optimális kompromisszum kialakításához sok különböző rendszertervezési opciót kell figyelembe venni. Az 5.4 ábra és az 5.6 táblázat bemutatja, hogy ezek a különböző komponensek hogyan befolyásolják a rendszer hatásfokát. Gyakorlatilag a teljes rendszer érzékeny lehet a hőelvezetési problémákra. A szilárdtest-világítási fényforrások nem sugároznak ki hőt, ezért azt magának a lámpatestnek kell elvezetnie – szemben a hagyományos lámpa-lámpatest kombinációkkal. Az optika hatásfoka a lámpatest optikai rendszerétől függ. Lencsék, reflektorok, optikai keverőkamrák, távolban felvitt fényporok és diffúzorok lehetnek a lámpatestekben a világítási feladattól, a megkívánt fényeloszlástól és a világítási termék formai kialakításától függetlenül. Az adott alkalmazáshoz jól megkonstruált lámpatesteknek 10%-nál kisebbek lehetnek az optikai veszteségei, és az új megoldások ezt még tovább csökkenthetik. Például bizonyos útvilágítási lámpatestek LED-moduljainak elsődleges optikájába/tokozatába beépíthetnek speciális lencse-funkciót, ezáltal nincs szükség másodlagos optikára és kiküszöbölhetők a járulékos interfészekenél adódó optikai veszteségek.

A LED-modul tényleges üzemi hőmérsékletét a lámpatest-hűtés kialakítása, a LED-modul üzemi árama és a környezeti hőmérséklet fogja meghatározni. Az 5.6 táblázatban a termikus hatásfok-esés a LED fényhasznosítás-csökkenését reprezentálja megemelt hőmérsékleten történő üzemeltetés esetén. A jobb hűtés és/vagy a lecsökkentett üzemi áram a LED alacsonyabb üzemi hőmérsékletét, viszont nagyobb



5.4 ábra – A LED-es lámpatestek hatásfokának összetevői

*Az áramhatásfok korrekciós tényezője azt az előnyt mutatja, amikor a LED-csomagot kisebb áramsűrűséggel hajtjuk meg az áramhatásfok-esés minimalizálása érdekében

Hatékonyság	2014	2015	2020	Cél
Elemhatékonysági előrejelzés ² (lm/W)	146	162	220	250
Termikus hatékonyság esése (megnövelt felső szint)	87%	88%	93%	95%
Meghajtó hatásfoka	86%	87%	93%	96%
Lámpatest/optika hatásfoka	87%	89%	94%	96%
Áramhatásfok-esés korrekciós tényezője (csökkentett hurok)	1.14	1.13	1.09	1.05
Teljes lámpatest-hatásfok	74%	77%	89%	92%
Lámpatest-fényhasznosítás ³ (lm/W)	108	125	196	230

5.6 táblázat – A meleg fehér LED-es lámpatestek hatásfok-előrejelzéseinek bontása

Megjegyzések:

1. A meleg fehér LED-csomagok és LED-es lámpatestek színhőmérséklete 3000K, színvisszaadási indexe 80
2. A fényporkonverziós LED-ek fényhasznosítás-előrejelzései az 5.8 táblázatban találhatók
3. A lámpatest hatásfoka a LED-csomag fényhasznosításának és a teljes lámpatest-hatásfoknak a szorzata

fényhasznosítását eredményezi. A lámpatest-tervezők azt találták, hogy a lámpatest hőelvezetési útvonalából eltávolítva a termikus határfelületeket, javítható a lámpatest hűtése és a LED fényhasznosítása. Ahelyett, hogy a LED-csomagokat először áramköri panelra szerelnék, majd azt a erősítenék hűtőbordára, a LED-csomagokat – ahol csak lehet – közvetlenül a hűtőbordákra szerelik, kiküszöbölve így a termikus illesztéseket (és költséget takarítva meg).

A LED-es lámpatestek meghajtójának hatásfoka megadja, hogy az eszköz milyen hatékonysággal alakítja át a váltakozófeszültségű hálózatot a LED-panel(ek) működtetéséhez szükséges elektromos bemenetűre. Ha a lámpatest fényerőssége szabályozható, a tápegységnek a szabályozott bemenőjelet megfelelően szabályozott

LED-kimenőjellé kell átalakítania. A tápegység hatásfoka a fényszabályozás alatt általában nem állandó.

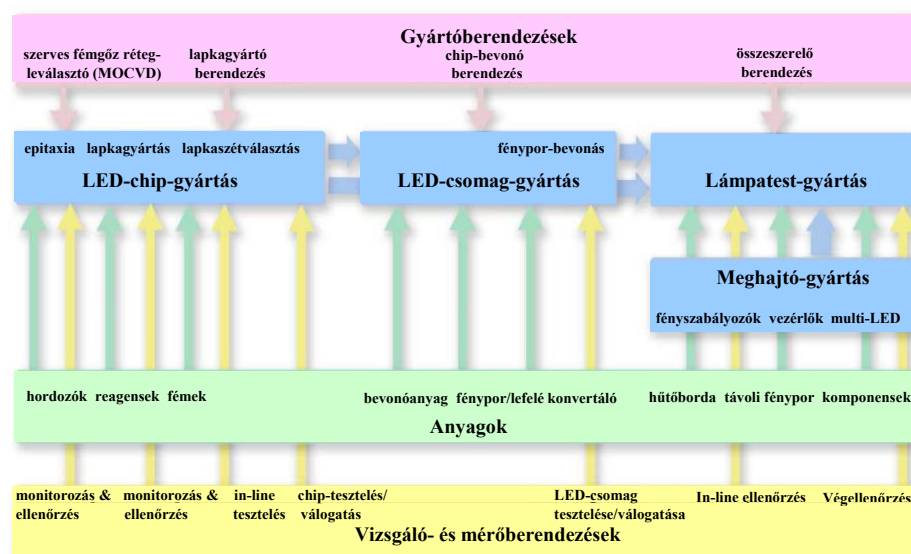
A különböző világítási alkalmazásokhoz és termékekhez igen sokféle fényáramra van szükség, amihez különböző áramköri elrendezésekbe épített különböző számú LED-panelre van szükség. A lámpatesteket nehéz úgy kialakítani, hogy szabványos tápellátási struktúrákhoz vagy modulokhoz legyenek alkalmasak. Az új LED-modu-

[56] Osram Opto Semiconductors: „Osram Achieves Record Figures with Green LEDs”, 2014. jún.11. (http://www.osram-os.com/osram_os/en/press/press-releases/led-for-automotive,-consumer,-industry/2014/osram-achieves-record-figures-with-greenleds/index.jsp)

[57] Lumileds: „Luxeon Rebel & Luxeon Rebel ES Colors Product Datasheet”, 2015. ápr. 10. (<http://www.lumileds.com/uploads/265/DS68-pdf>)

lokba bizonyos tápellátási funkciókat eleve beépítenek. A váltakozóáramú LED-modulok közvetlenül üzemeltethetők a váltakozóáramú hálózatról. A nagyfeszültségű LED-ek több, sorba kapcsolt pn-átmenetet tartalmaznak, hogy a modul üzemi feszültségét a hálózati feszültség közelébe lehessen emelni és így ki lehessen küszöbölni a meghajtó bizonyos mértékű hatásfok-vesztését. A lámpatest-tervezőknek előnyök is ilyen termékek, mivel így csökkenteni lehet a költségeket és növelni lehet a tápegység hatásfokát a lámpatesten belül. Az áramhatásfok-esés korrekciós tényezője azt az előnyt tükrözi, amely akkor nyerhető, ha a LED-csomagot az áramhatásfok-esés minimalizálása érdekében alacsonyabb áramsűrűséggel működtetjük. Az üzemi áramnak a szokásos 35 A/cm² alá csökkentése max. 1,14-os tényezővel képes javítani a hatásfokot, de ez a tényező egyre kisebb lesz, amint az áramhatásfok-esés fokozatosan javul. Az üzemi áram csökkentése alacsonyabb üzemi hőmérsékletet is lehetővé tesz, ami csökkentheti a termikus esést és javíthatja a lámpatest hatásfokát, habár az általában szükséges nagyobb számú LED-csomag költségnövelő tényező. A különböző kompromisszumok rendszerszintű optimalizálása nagyobb hatásfokokat eredményezhet, mint amilyeneket az 5.6 táblázat mutat.

Számos olyan gyakorlati példája van a jelenleg fejlesztés alatt álló lámpáknak és lámpatesteknek, amely jól tükrözi a gondos rendszer-optimalizálással elérhető teljesítőképesség-javulást. A Philips 2013-ban bejelentette, hogy kifejlesztette az első 200 lm/W-os TLED prototípus lámpáját [58]. A lámpa a fénycsöves világítás leváltására készült. Hibrid (fehér+vörös) LED-architektúrát használ fel a nagy fényhasznosítás elérésére a 3000-4500K színhőmérséklet-tartományban, 80-nál nagyobb CRI színviszszaadási index és 20-nál nagyobb R9 érték mellett. 2014 januárjában a Cree megjelent egy 3200 lm fényáramú lámpatesttel, amely 80-as CRI mellett 200 lm/W-nál nagyobb fényhasznosítást ér el termikus egyensúlyi állapotban, miközben az ANSI 3000K-ra vonatkozó szín-specifikációin belül marad [59]. 2014 márciusában az Osram kifejlesztett egy olyan 3900 lm-es LED-cső prototípust, amely a Philipséhez hasonló, de 215 lm/W a fényhasznosítása (vagy 205 lm/W, ha szabályozóegységgel kombinálják) 3000K színhőmérséklet és 90-es CRI esetén [60]. Ezek a fejlesztési termékek minden esetben kielégítik az 5.6 táblázatban látható 2020-as célkitűzéseket és jól demonstrálják azt, hogy ugyanolyan LED-ekkel



5.5 ábra – A LED-alapú szilárdtest-világítás gyártásának ellátólánca

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

lényegesen jobb teljesítőképesség érhető el gondos rendszeroptimalizálással. Egyébként mind a három prototípus hibrid formában valósít meg egy olyan fehér fényforrást, amely jelenleg a legjobb teljesítőképességet mutatja (l. az 5.1.1 fejezetet). 2015-ben e prototípusok alapján a tervek szerint kereskedelmi termékek is készülnek már.

5.2 A gyártás helyzete

5.2.1 Az ellátólánc felépítése

A gyártás ellátóláncának ismerete és megnevezése döntő fontosságú a 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 5.5 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 számosat vállalatán belül végez el, de a gyáripar fejlődésével az ellátólánc általában egyre jobban széttagozódik az optimális gyártási hatásfok 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-lapák szerves fémgőz rétegleválasztással (MOCVD) történő növesztése, a LED-lapák feldolgozása (többnyire hagyományos félvezetős gyártási lépésekkel) és a LED-lapák 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. Végezetül a LED-csomagokat összeépítik egy meghajtóval, hűtőbordával, optikai komponensekkel és mechanikai elemekkel a végső 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. Végső soron egy adott termék optimális gyártási folyamata a részletes, rendszerszintű optimalizálástól fog függeni.

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

[59] 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>)

[60] 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/osramconstructs-the-worlds-most-efficient-led-lamp/index.jsp)

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

Gyártási módszerek

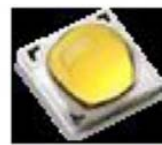
A LED-chipek gyártási folyamatának lépései a következők: az aktív eszközelemek hordozóra történő epitaxiális növesztése, a félvezető lapka feldolgozása az egyedi eszközök definiálásához, a lapka széttörése egyedi chipkékké és az így kapott chippek „becsomagolása, tokozása”, ami a termikus és elektromos kontaktus mellett mechanikai védelmet is biztosít.

A LED-alapú lámpatesten belül többé már nem a LED-csomag a meghatározó költség tényező; a retrofit-lámpák költségének csak mintegy 25%-át képviseli, a LED-es beltéri és kültéri lámpatestek esetén pedig ez az arány még kisebb. Ahhoz, hogy a költségeket csökkenteni lehessen a teljesítményképeség 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, az optimalizált lapkafeldolgozó berendezésekre és a nagyobb hatékonyságú tokozómódszerekre, anyagokra és berendezésekre fognak koncentrálni.

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

A LED-csomagok sokszínűsége

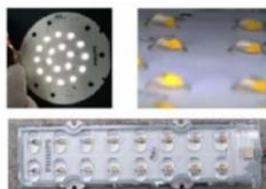
Az elmúlt években igen sokféle, általános világításra szánt LED-csomag jelent meg a piacon az 1W-osoktól az igen sokféle formájú, fényáramú, feszültségű, sugárzási szögű és fizikai méretű változatokig. Egy LED-gyártónak akár 50 különböző LED-



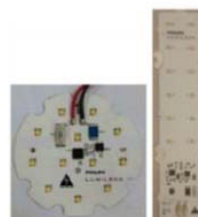
1. szint: Chip + optika



2. szint: LED-panel + meghajtó-panel



2+ szint: integrált LED-ek + optika



2+ szint: integrált LED-ek + meghajtó



2+ szint: integrált LED-ek hűtőbordán, kerámia vagy kompozit anyagok, aktív hűtés + optika

5.6 ábra – A LED-komponensek beépítési útvonala

(Forrás: Ian Black, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, CA, 2015. január [61])



a) Nagyteljesítményű LED-ek: kerámia hordozó, öntött lencse

b) Közepes teljesítményű LED-ek: ólom keret, polimer

c) Chip on board (hordozón kialakított chip): MC-, ill. kerámia NYÁK

5.7 ábra – Nagyteljesítményű, közepes teljesítményű és közvetlenül hordozón kialakított (chip-on-board) LED-csomag

családja is lehet, és az egyes családokon belül számos olyan változat, amelyek fényáramban, nyitófeszültségben, színhőmérsékletben, színvisszaadási indexben és szintűrésben 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 három fő típusa jelent meg (l. az 5.7 ábrát):

- Nagyteljesítményű (1-5W-os) LED-csomagok, tipikusan a kis optikai fényforrásméretet igénylő 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 rizzólámpaburába szerelt lámpákhoz) használnak.

- Közvetlenül a hordozón kialakított (chip-on-board) LED-csomagok, amelyeket szokásosan olyan termékekhez alkalmaznak, amelyek kis optikai fényforrásból nagy fényáramot igényelnek, vagy nagy fényűrűsége van szükség (pl. csarnokvilágítók esetén).

A nagyteljesítményű LED-eknek nagy a fényhasznosítása, nagy a fényárama és jó a megbízhatósága, ami jó hűtésüknek és jó optikai konstrukciójuknak köszönhető. Tipikusan egy nagyméretű, 1mm²-es chipet tartalmaznak (vagy több ilyen nagy tömböt), 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-konstruk-

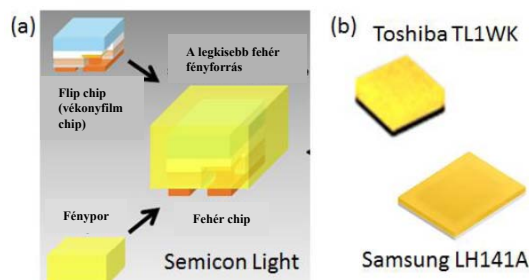
[61] I. Black: „LED Forward Integration, LED Engines”, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, CA, 2015. január (http://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/black_mfgconcepts_sanfrancisco2015_0.pdf)

ció a nagy chipen kívül több kis, sorba kötött chipet is tartalmaz a nagyfeszültségű konstrukció létrehozásához, amely – megfelelően csoportosítva egy meghajtóval – növelheti a rendszer fényhasznosítását.

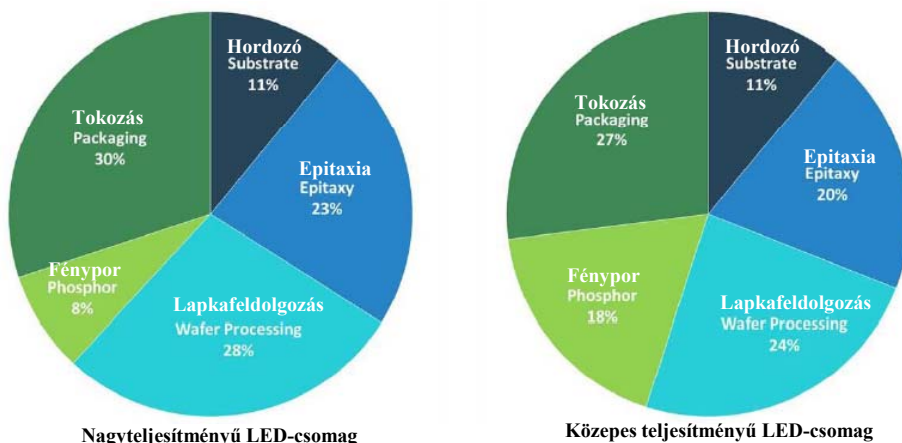
A közepes teljesítményű LED-eket eredetileg kiemelő és háttérvilágításra használták, de 2012-ben megtalálták az utat az általános világítás felé is, amint a chippek teljesítőképességének javulása az általános világítási alkalmazásokhoz megfelelő fényáram-szinteket ért el. A közepes teljesítményű LED-ek olcsó, fröccsöntött műanyagból és vezető vázból állnak, amely tipikusan 1-3 kis LED-chipet tartalmaz. A chippek 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 áramkört panelre (MCPCB) vagy kerámia hordozóra szerelt kis chipeket tartalmazó nagy tömbökből állnak. A LED-ek fényporral kevert szilikon tokozóanyaggal vannak lefedve – tükrötöjásra emlékeztetnek. Kis optikai fényforrás-felületükről nagy (akár 14 000 lm-es) fényáramot szolgáltatnak, tipikusan magas vagy alacsony belvilágú csarnokok világítására használatosak. Jó hővezető hordozó esetén ugyanolyan jó szín- és fényáram-stabilitásuk lehet, mint a nagyteljesítményű LED-eknek, ha az üzemi hőmérsékletet az előírt értéken belül tartjuk. Könnyű felhasználásuk a lámpatest-gyártáshoz sok olyan kisebb gyártónak előnyös, akiknek nincs a diszkrét LED-csomagok fém magú nyomtatott áramkört panelre való szereléséhez alkalmas berendezésük.

Újabban a közepes teljesítményű LED-ek olcsó, kompakt alternatívájaként figyelmet kapott a chip-méretű csomag (CSP), amelyet „tokmentes LED”-nek vagy „fehér chip”-nek is neveznek. A félvezetőiparban a CSP-t egy olyan, közvetlenül felületre szerelhető elemként definiálják, amely a chipnél 1,2-szer nem nagyobb „tokozó területen” egyetlen chipet tartalmaz [62]. Az integrált áramkörökhöz alkalmas chip-méretű elemek fejlesztését a miniaturizálás iránti igény, a jobb hőelvezetés, a nagyobb megbízhatóság és a 2. szintű csomagokba történő könnyű beépítés serkentette. Legújabb példái, a Samsung LH141A és a Toshiba TL1WK típusa az 5.8 ábrán látható.



5.8 ábra – (a) A CSP chip-méretű LED-csomag gyártási módszer vázlatos rajza; (b) Jelenlegi példák a CSP módszerre (Forrás: (a) Eun-Hyun Park, *Strategies in Light* 2015 [63], (b) Toshiba [64] & Samsung [65] sajtóközlemények)



5.9 ábra – A nagy és közepes teljesítményű LED-csomagok tipikus költségmegoszlása (Forrás: A DOE szilárdtest-világítási kerekasztal-beszélgetéseinek és workshopjainak anyaga)

A jelenlegi chip-méretű LED-termékek többsége alapként ún. „flip-chipet” használ, amelyre aztán ráviszik a fényport és a tokozóanyagot. A chip-méretű LED-ek öt oldalról és nagyobb szögben bocsátanak ki fényt, kiküszöbölik a huzalkötést és a vezetővázakat vagy hordozókat, ami még kisebb méreteket is alacsonyabb költségeket jelent. A chip-méretű LED-gyártás legújabb trendje egy szögtartó fényporbevonat alkalmazása közvetlenül a kék LED flip-chipre, amint azt az 5.8(b) ábra mutatja. A Samsung és a Toshiba is ennek az új technológiának a felhasználásával fejlesztette ki legújabb termékeit [65, 64].

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

- Az elfordulás és elhajlás következtében a sokkal kisebb chip-méretű LED-ek beigazításához pontosabb gyártásra van szükség.
- A sugárnyaláb beállítása korlátozhatja a

chippek sűrűségét és befolyásolhatja a szekunder optika konstrukcióját.

- A chip-méretű LED és a nyomtatott áramkört panel közötti nyíróerő befolyásolja a mechanikai kötés megbízhatóságát.
- A LED-csomagok kezelését optimalizálni kell a fényporréteg sérülésének elkerülése érdekében, mivel a fényporréteg közvetlen kezelése elkerülhetetlen.
- Fokozni kell az elektrosztatikus kisülés elleni védelmet, mivel a a chip-méretű eszközök nem tartalmaznak elektrosztatikus kisülés ellen védő Zener-diódát.

A LED-csomagok költsége

A nagy és közepes teljesítményű LED-csomagok tipikus költségmegoszlását az 5.9 ábra mutatja. A nagyteljesítményű

[62] IPC: „J-STD-012: Join Industry Standard, Implementation of Flip Chip and Chip Scale Technology”, 1996. január (<http://www.ipc.org/toc/j-std-012.pdf>)

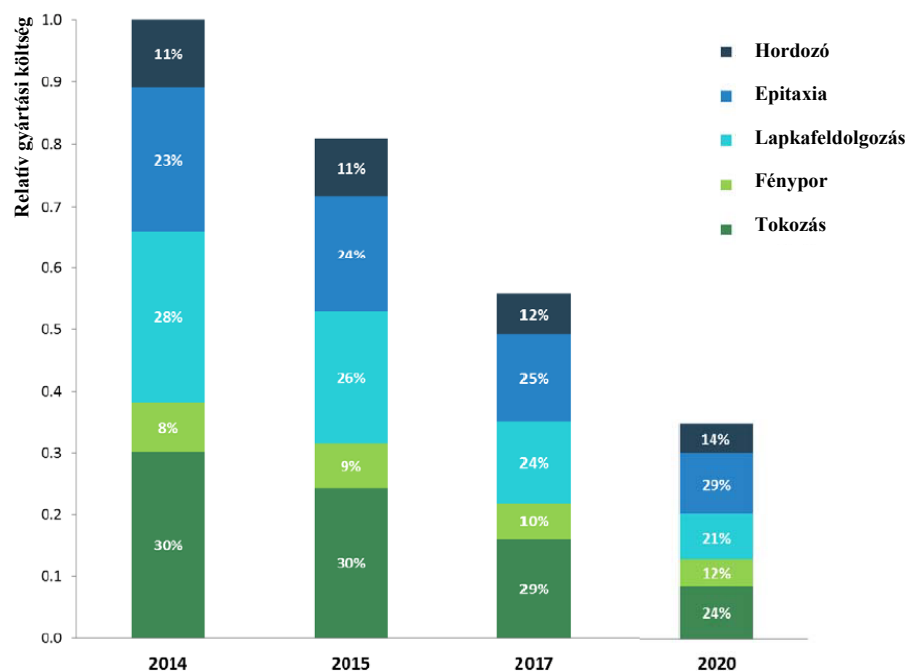
[63] E.-H. Park: „Innovative Ag-free Flip-chip and CSP Technology for NEW LED Lighting Era”, *Strategies in Light*, Las Vegas, NV, 2015

[64] Toshiba: „Toshiba Launches Ultra-small Chip Scale Package White LEDs for Lighting Applications”, 2014. márc. 27. (http://toshiba.semicon-storage.com/apen/company/news-topics/2014/03/topics_140327_e_1.html)

[65] Samsung: „Samsung Introduces Versatile New Flip Chip LED Packages and Modules”, 2014. márc. 27. (<http://www.samsung.com/global/business/led/support/newsevents/news-detail?contentsId=403>)

LED-ekre vonatkozó adatok esetén tömeggyártást tételezzünk fel, amelynek során 100 mm átmérőjű zafirhordozóra 1 mm²-es elemeket visznek fel és a chipeket kerámiatokkokba zárva állítanak elő meleg fehér, fényporkonverziós LED-fényforrásokat. A közepes teljesítményű, meleg fehér, fényporkonverziós LED-ek adatai hasonló méretű vezetívázás műanyag hordozóra szerelt, 0,1 mm²-es chipekre vonatkoznak. Az elemzés mindkét esetben modulrendszerű LEDCOM költségmodellt használt fel [66]. A költségek megoszlása a nagyteljesítményű LED-ek esetén a 2013-as adatokhoz képest lényegében változatlan, noha van egy kb. 20%-os összköltségcsökkenés, ami főként a nyersanyagok árának csökkenésével és a kihozatal növekedésével van összefüggésben. Az elemgyártás és a tokozás költsége sokkal alacsonyabb a közepes teljesítményű LED-ek esetén, míg a fényport hasonló területre alkalmazzák, ezért az összköltség vonatkozásában növekszik a viszonylagos fontossága. A közepes teljesítményű LED-ek költsége 5-10-szer alacsonyabb lesz a chip területének függvényében, és ez hasonló árkülönbséget is jelent.

Az 5.9 ábra azt mutatja, hogy nincs olyan költségelem, amely domináns lenne a nagy és közepes teljesítményű LED-eknél. A tokozás marad a legnagyobb költségtényező, de a lapkafeldolgozás költségei is hasonlóak, és az epitaxianövesztés költségei sem maradnak le sokkal mögöttük. A hordozó és a fénypor költsége a nagyteljesítményű eszközöknél az összköltség kisebb hányadát adja, míg a közepes teljesítményű eszközöknél a fénypor-költség jelentős marad. Ezek a megoszlások azt sugallják, hogy sokkal átfogóbb megközelítésre van szükség a költségsökkentéshez. Az 5.10 ábra azt mutatja, hogy a nagyteljesítményű LED-ek költsége idővel változhat, amint a volumenek tovább növekednek, s 2020-ra a 2014-es érték kb. 35%-ára csökkenhet le. Várható, hogy a hordozó, az epitaxia és a fénypor viszonylagos részaránya növekedni fog ebben az időszakban, a lapkagyártás és a tokozás viszont csökken. Az ebben az időszakban várható összköltségcsökkenés konzisztens marad az USA Energiaügyi Minisztériuma többéves szilárdtest-világítási MYPP programjával – feltéve, hogy az anyagköltségekben általános csökkenés áll be, elmozdulás mutatkozik a chip-méretű tokozás irányába és folyamatosan csökkennek az árak [50]. Bőven van lehetőség az innovációra ezen a területen és a Minisztérium számos különböző megközelítést fontolgat a költségsökkentésre, a következők szerint:



5.10 ábra – A nagyteljesítményű LED-ek várható költségszűkülése (Forrás: A DOE szilárdtest-világítási kerekasztal-beszélgetéseinek és workshopjainak anyaga)

- 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

5.2.3 A LED-es lámpatestek gyártása

Gyártási módszerek

A LED-es lámpatestek gyártása a LED-ek mechanikai és hűtőelemekkel (pl. hűtőbordákkal), a fény eloszlását megszabó optikai komponensekkel és a LED meghajtó elektronikájával történő összeépítését foglalja magában. A LED-modulok valamilyen LED-alapú lámpatest kritikus komponensei, ezért a lámpatestgyártás a LED-fényforrásnak a lámpatest többi komponensével való összeépítése körül forog a megkívánt formatervezés és a költség, teljesítőképesség, termékconszisztencia és megbízhatóság közötti optimális egyensúly elérése érdekében.

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 világítási termékek gyártásában csak kevés a hasonló, mivel a hagyományos világítási technológiák a lámpatest + lámpa paradigmán

alapulnak, amelyeknek gyártása teljesen különvált, sokszor más-más cég állítja elő azokat. A LED-alapú világítási termékek integrált természete – ahol a lámpatest, a LED-modul és a meghajtó elektronika tipikusan egyetlen egységbe van ötvözve – jelentősen bonyolítja a gyártási folyamatot. A lámpatestgyártók sikeresen megoldották a kihívást azzal, hogy a fogyasztói elektronikai iparban általánosabb gyártási technológiákat vezettek be, egyszerűsítették az anyagokat és a gyártási folyamatokat, rendszerszintű tervezési optimalizálási módszereket vezettek be (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 5.11 ábra összehasonlítja egy kültéri térvilágító lámpa, egy beltéri lakásvilágítási mélysugárzó és egy 60 mm átmérőjű cserelámpa költségeinek megoszlását (az adatokat revidáltuk a közösségektől érkezett észrevételek alapján). Látható, hogy a különböző formatervezőjű fényforrások viszonylagos költségei jelentősen eltérhetnek, különösen a LED-csomagok esetén. A rezsiköltségek valódi költségelemet reprezentálnak, különösen a 60 mm átmérőjű lámpák esetén, ezért feltüntetjük a költséggrafikonban az anyagköltségekkel együtt.

[66] DOE SSL Program: „Simple Modular LED Cost Model”, 2012. szept. 5. (<http://energy.gov/eere/ssl/simple-modular-led-cost-model>)

A rezsiköltségek a költségdiagrammban a gyártástechnológiára, a termékfejlesztésre, a dokumentációra, a tokozásra, az in-line és a megfelelőségi ellenőrzésre, a kiszállításra és az elosztásra vonatkoznak. A kis-kereskedelmi ár egy további 30%-os elosztási árrést tartalmaz.

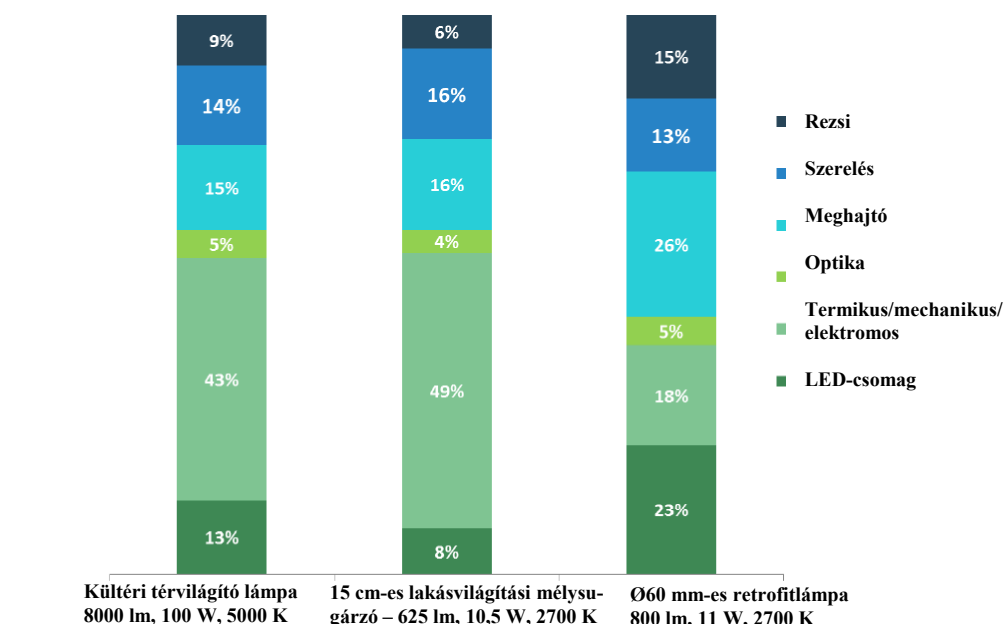
Adott termék esetén hasznos figyelembe venni, hogy a költségmegoszlás hogyan változhat az idővel. Az 5.12 ábra azt mutatja, hogy egy 60 mm átmérőjű, 60W-os izzólámpának megfelelő cserélő lámpa viszonylagos gyártási költsége hogyan változik várhatóan 2014 és 2020 között. A költségmegoszlásban a fő változás a LED-csomagnál várható, amely a lámpaköltség 2014-es 23%-áról 2020-ra 11% körülire fog várhatóan lecsökkenni. Amint azt a fentiekben említettük és az 5.11 ábráról is látható, a viszonylagos költségek igen különböző módon változnak az egyes lámpatestek és lámpatípusok esetén, ezért a lámpatestekre nem lehet megadni előrejelzést az általános költségmegoszlásra. Mindenesetre a legtöbb típus esetén a kétháromszoros csökkenés a viszonylagos költségben egyáltalán nem irreális várakozás.

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 termék esetén nincs egyetlen domináns költségelem, ezért a költségcsökkentést az egész rendszer, nem pedig az egyes költségelemek optimalizálására koncentrálni lehet elérni. A LED-ellátólánc egyes fontos elemeinek kiemelt költség-tényezőit az 5.7 táblázat foglalja össze.

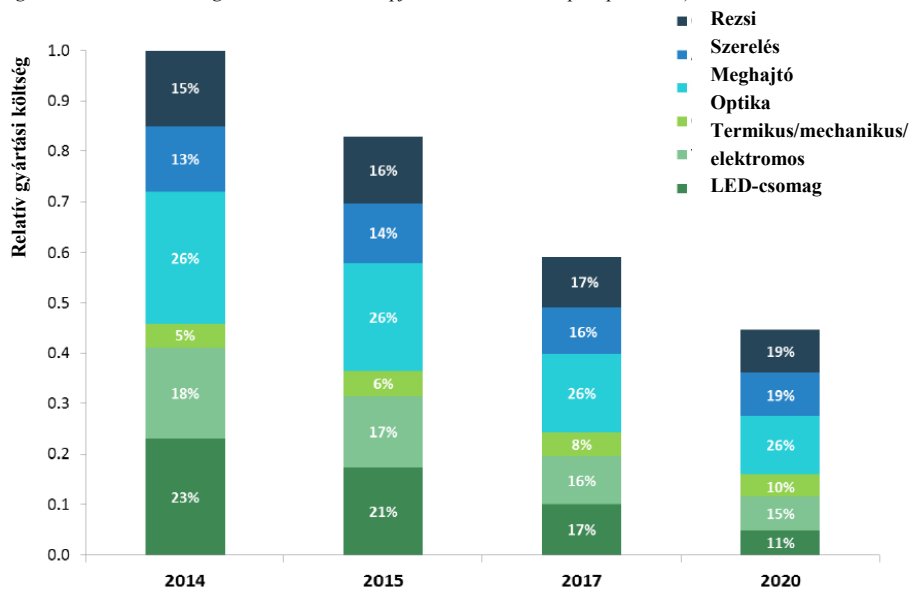
5.2.4 Megbízhatóság és színeltolódás

Fényáram-tartás

A LED-ek ritkán mutatnak katasztrófális 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 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



5.11 ábra – Különböző világítási alkalmazások költségeinek összehasonlítása (Forrás: A DOE szilárdtest-világítási kerekasztal-beszélgetéseinek és workshopjainak résztvevői és ipari partnerek)



5.12 ábra – A tipikus 60 mm átmérőjű cserélő lámpa költségeinek alakulása (Forrás: A DOE szilárdtest-világítási kerekasztal-beszélgetéseinek és workshopjainak résztvevői)

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 [67]. 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 megőrzésére, amikor a termék eléri az L70-et. és az IES dokumentált is egy előrejelzési eljárást, az IES TM-21-et [68]. Ez a műszaki dokumentum kimondja, hogy az előrejelzések nem haladhatják meg az LM-80 tesztadatai tényleges órái-

nak megállapított többszörösét, ami segít elkerülni a gyártóknak a termékkel kapcsolatos túlzott állításait. Meg kell jegyezni, hogy az LM-80 mérések olyan szabályozott hőmérsékletű környezetben, folytonosan működtetett LED-ekre vonatkoznak, ahol a forrasztási pont és a környezet hőmérséklete egyensúlyban van. Ez nem utal szükségképpen valóságos működési feltételekre, ezért a laboratóriumi mérési eredmények alapján végzett előrejelzések és a lámpákkal és lámpatestekkel a helyszínen

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

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

Ellátólánc		Költségtényező		
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 zsugorfóliák
	Fénypor	• Minőség/hatásfok • Konzisztencia	• Stabilitás (termikus és optikai áramlás)	• Megbízhatóság
	Tokozóanyagok	• 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

5.7 táblázat – A LED-ellátólánc fő költségtényezői

nyert gyakorlati tapasztalatok között nem feltétlen van tökéletes egyezés. Mindenestre a fénnyáram-tartás előrejelzései segíthetnek a „féllett” felhasználóknak a termékek összehasonlításában, amennyiben azok korlátai pontosan ismertek.

A LED-csomagok tervezésének és konstrukciós anyagainak hatását a teljesítőképességre, színminőségre, fénnyáram-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-ek meghibásodási módjaitak meghatározása és egy olyan szoftver kifejlesztése volt, amely megkísérli szimulálni a hibarányokat, 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. Több mint 100 különböző LED-terméktől származó LM-80 adatot elemeztek e módszer segítségével és egészítették ki új kísérleti adatokkal. Az elemzés részletes képet ad a fénnyáram-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 5.2. fejezetben) a konstrukciós anyagoktól és a gyártási eljárásoktól függően különböző sajátos, „veleszületett” jellemzőik vannak. A közepes teljesítményű LED-eknek általában gyorsabb a fénnyáram-degradációja, mint a nagyteljesítményűeké. A fénnyáram 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). Magas hőmérsékleten és hosszú üzemelés után a tokozóanyagok elszíneződhetnek, megrepedezhetnek vagy rétegződhetnek, ami fénnyáram-csökkenéshez és színeltolódáshoz vezet.

A különböző minőségű műgyantáknak különböző a fénnyáram-degradációs viselkedése, amint azt az 5.14 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, és magasabb üzemi hőmérsékletekhez alkalmasak. Az 5.14 ábra összehasonlítja a PPA és EMC műgyantát használó közepes teljesítményű LED-ek fénnyáram-degradációját a kerámia hordozóra épülő nagyteljesítményű LED-ekével. Egy újabb tokozóanyag, a szilikon öntő kompozit (SMC) még jobb hőstabil-

tást mutat, mint az EMC. Az SMC-t használó LED-termékek száma ma még korlátozott, de a következő néhány évben számuk várhatóan növekedni fog.

Színeltolódás

Noha a fénnyáram-tartás fontos, a LED-ek másfajta paraméterhibáit sem szabad figyelmen kívül hagyni. A színeltolódás például bizonyos alkalmazásoknál károsabb lehet, mint a fénnyáram-csökkenés, azonban nehezebb megjósolni. Ezért kevesebb figyelmet kapott, mint a fénnyáram-degradáció. 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.

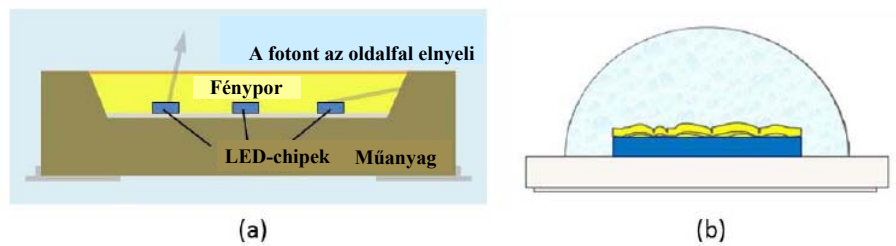
Az a pont, ahol a színeltolódás már észrevehetővé válik, az alkalmazástól függ. Ha a színváltozás lassan, igen hosszú idő alatt (pl. 25 000 óra alatt) következik be, az nem kifogásolható feltéve, ha valamennyi fényforrás azonos mértékű és azonos irányú színeltolódást szenved. Sajnos, jelenleg nem áll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

A LED-ek színpont-stabilitását befolyásoló tényezők közé tartoznak a fénypor, az emitter és a tokozás anyagainak öregedés okozta változásai. Az emitterek sugár-

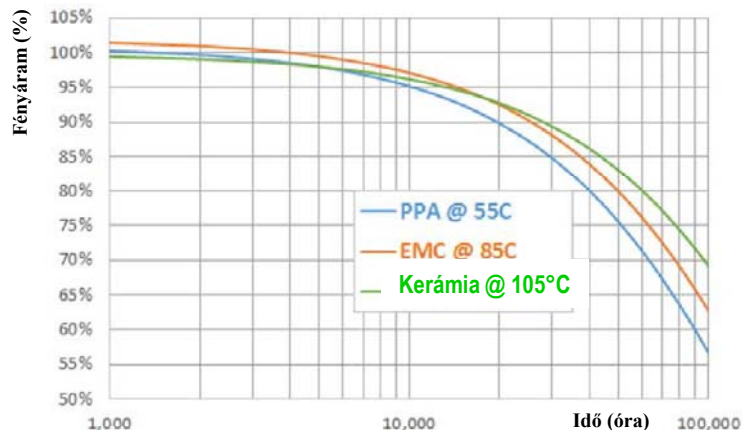
árama idővel csökkenést mutathat; a fényporoknál a kvantumhatásfok csökkenhet vagy eltolódások léphetnek fel az emissziós spektrumban az oxidáció következtében, a tokozóanyagok pedig megrepedezhetnek, oxidálódhatnak és elszárgulhatnak vagy megváltozhat a törésmutatójuk. A magasabb hőmérsékletek felgyorsítják ezeket a degradációs mechanizmusokat, amint az az 5.15 ábrán látható, de a színeltolódás nagysága a hőmérséklet függvényében változni fog a tokozóanyagok és a gyártási folyamatok változtatásával.

A színeltolódás iránya a tokozóanyagban bekövetkező domináns degradációs mechanizmusoktól függ. A fénypor berepedezhet és rétegeződhet, amint az az 5.13b ábrán látható, és ha ez elég nagy mértékű, eltolódás jöhet létre a spektrum sárga színe felé a fényporon áthaladó kék fotonok által megtett út megnövekedése miatt. A közepes teljesítményű LED-ek műgyantájának elszíneződése (5.13a ábra) nemcsak a fénypor csökkenését okozza a tok oldalfalai által elnyelt fény miatt, hanem színeltolódáshoz is vezet. A tok oldalfalának 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 komponensből adó fotonok egyre nagyobb mértékben abszorbeálódnak, ami a kék szín irányába történő eltolódást eredményez, amint a rövidebb utat megtevő (hidegebb fehér) fotonok dominánssá válnak.

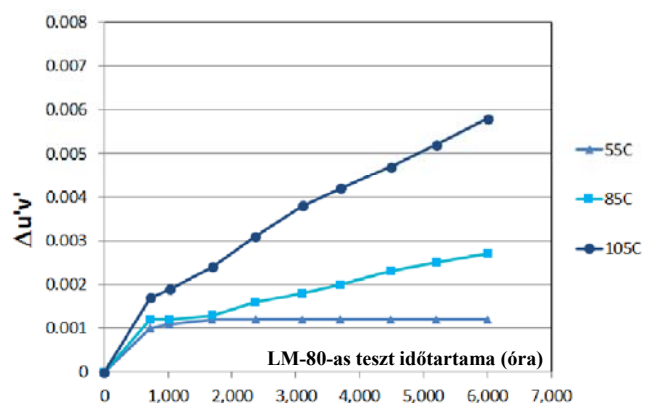
Az RTI International által végzett gyorsított élettartam-vizsgálatokat (ALT) felhasználó kísérleti tanulmányok betekintést nyújtottak a LED-ek tokozóanyagának a színpont-stabilitásra kifejtett hatásába. Magas hőmérsékletű, nedves üzemi élettartam-vizsgálatot (WHTOL) végeztek nagy teljesítményű LED-eken 85 °C-os hőmérséklet és 85% páratartalom beállításával. A meleg fehér LED-eknél 4000 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 610 nm-ről kb. 580 nm-re tolódott el. 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-



5.13 ábra – LED-ek (a) oldalsó elszíneződését, (b) fénypor-rétegeződését mutató ábrák (Forrás: Monica Hansen, *Strategies in Light* 2015 [69])



5.14 ábra – Fényáram-degradáció PPA és EMC műgyantás közepes teljesítményű és kerámia hordozós nagy teljesítményű LED-ek esetén (Forrás: Monica Hansen, *Strategies in Light* 2015 [69])



5.15 ábra – LED-ek színeltolódása a hőmérséklet függvényében (Forrás: Monica Hansen, *Strategies in Light* 2015 [69])

emisszió a zöld spektrális tartomány irányába tolódott el.

A lámpatestek megbízhatósága

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 bekövetkezik, mielőtt a LED-ek fényáram-csökkenése meghibásodást okozna.

Az USA Energiaügyi Minisztériuma által támogatott LED-rendszerek Megbízható-

sági Konzorciuma (LSRC) és a Következő Generációs Világítástechnikai Ipari Szövetség (NGLIA) egy ipari szereplőkből, akademikusokból és kormányzati képviselőkből álló csoport, amelynek az a célja, hogy fejlessze a LED-rendszereket (pl. LED-es lámpatestek, LED-lámpák és LED-modulok) meghibásodásával és élettartamával kapcsolatos ismereteinket. 2014-ben a konzorcium megjelentette a „LED-es lámpatestek élettartama: Ajánlások a teszteléshez és riportokhoz (harmadik kiadás)” című kiadványukat, amelyben áttekintették a potenciális hibamechanizmusok meghatározásával kapcsolatos ta-

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

nulmányokat és további magyarázatokat adtak a termék-élettartammal kapcsolatosan [70].

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 információk némelyike egy olyan, erősen felgyorsított tesztorozatból származik, amelyet az RTI International korlátozott számú termék-mintán végzett el. Származnak 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 LCRC tagjaitól is, amelyek segítettek a fontos hibamechanizmusokkal kapcsolatos diskussziókban. Az LSRC tagjai által leggyakrabban megfigyelt hibamódokat az 5.16 ábra foglalja össze.

Habár nem tekintették a legnagyobb megbízhatósági problémának ebben a felmérésben, a színeltolódás igazi kihívás marad, mivel egyedülálló a LED-es világítástechnikai ipar számára, ugyanis nincs másik olyan iparág, amelyből 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 hangsúlyt kell fektetni a színeltolódás okainak megértésére és annak a módszernek a megtalálására, amellyel meg lehetne jósolni a teljesítőképességre kifejtett hatását.

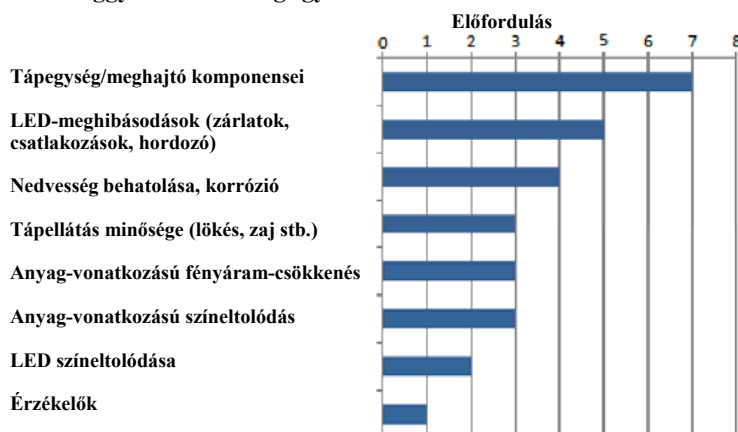
5.2.5 Kereskedelmi megfontolások

A LED-csomagok ára

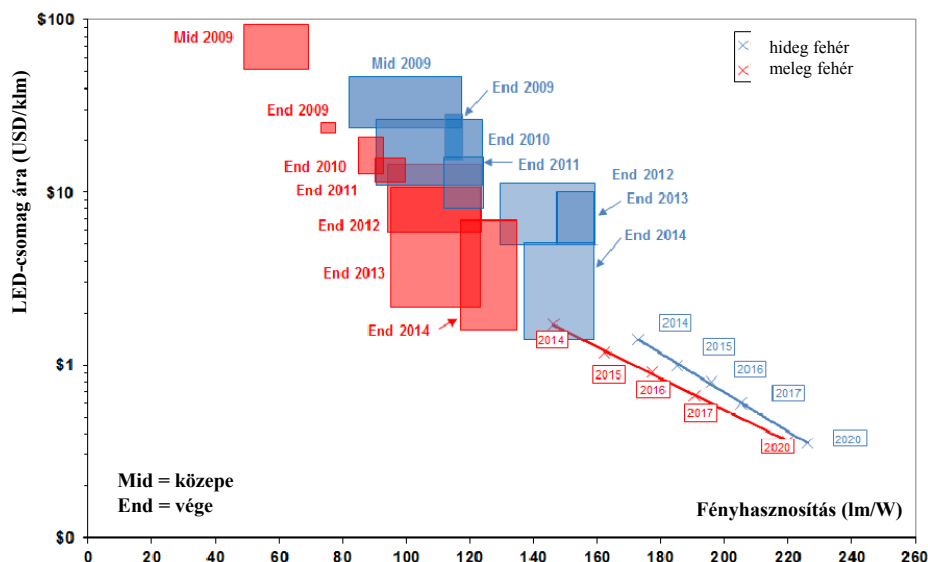
A múltban a LED-csomagok ára dominálni látszott a LED-alapú lámpák vagy lámpatestek költségeit, de az elmúlt néhány évben gyors árcsökkenés következett be a műanyag csomagolóanyagok és a chip-méretű csomagolási módszerek bevezetésével.

Az árbecslések ebben a részben nagy kereskedelmi forgalmazóktól (Digi-Key, AVNET, Newport és Future Electronics) 1000 darabos mennyiségben vásárolt LED-csomagok tipikus kiskereskedelmi árait reprezentálják. Valamennyi LED-gyártó sokféle színhőmérsékletben, fényáramban

A leggyakrabban megfigyelhető LED rendszerhibák



5.16 ábra – A leggyakrabban megfigyelhető hibák (Forrás: Next Generation Lighting Industry Alliance LED Systems Reliability Consortium, 2014 [70] – Megjegyzés: Az „előfordulás” azoknak a válaszadóknak a számát jelöli, akik az illető hibafajtát említették.)



5.17 ábra – A LED-csomagok ár-fényhasznosítás kompromisszumai 1 W/mm^2 (kb. 35 A/cm^2) és 25°C esetén. Megjegyzések: 3. Hideg fehér LED-eknél CCT=5700K és CRI=70; meleg fehér LED-eknél CCT=3000K és CR=80). 4. A téglalapok a maximális fényhasznosítás és a legalacsonyabb ár által leképzett tartományt reprezentálják az egyes időszakokban.

és kivételben állítja elő termékeit.

A kiválasztott adatok a rendelkezésre álló adatlapokra támaszkodnak és a válogatás szerinti legnagyobb fényáramú csoportba tartozó eszközöket reprezentálják, ahol ezt közölték (a válogatási csoport átlagértékét véve alapul), vagy a teljes rendelkezésre álló elosztás tipikus fényáram-értékére vonatkoznak. A kiválasztott eszközök specifikált CCT és CRI tartományokba esnek. Az árat minden esetben USD/klm-ben fejezzük ki, a fényhasznosítást pedig 35 A/cm^2 áramsűrűség és 25°C -os átmenet-hőmérséklet mellett adjuk meg, hacsak másképp nem jelöljük. Az új LED-csomagokat általában 85°C -on mértük és a gyártók által szolgáltatott adatok felhasználásával 25°C -os hőmérsékletre normalizáltuk. A LED-csomagok fényhasznosításának és árának fejlődését az 5.17 ábra mutatja.

Az egyes időszakokat olyan téglalapokkal jellemeztük, amelyeknek a területét a legnagyobb fényhasznosítású és legalacsonyabb árú termékek adják. 2014 során 159 lm/W (hideg fehér) és 135 lm/W (meleg fehér) fényhasznosításokról számoltak be, az árak pedig $1,4 \text{ USD/klm}$ (hideg fehér), illetve $1,6 \text{ USD/klm}$ szerint alakultak. Az árak gyors esését a közepes teljesítményű LED-csomagok bevezetése és a normalizációs eljárásra történt áttérés okozta, amely lehetővé tette az ilyen LED-ek nyomán követését. Az 5.17 ábra összehasonlításul az ár-fényhasznosítás előrejelzéseket is mutatja; összegzésük l. az 5.8 táblázatban.

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

Az ár-előrejelzéseket úgy igazítottuk ki, hogy azok számításba vegyék a közepes teljesítményű LED-ekkel kapcsolatos alacsonyabb árakat is. Hasonlóképpen, a fényhasznosítás-előrejelzéseket úgy korrigáltuk, hogy a megjósolt fejlődésnél lassabb ütemet tükrözzenek, különösen a hideg fehér termékek esetén.

Mint már említettük, változtatások történtek a normalizálási folyamat érdekében. A LED-csomagok most 1 W/mm²-es teljesítmény-sűrűsége vannak normalizálva a 35 A/cm²-es áramsűrűség helyett. Tipikus nagyteljesítményű LED-ek esetén ez a két érték lényegében azonos, ezért a történelmi adatokat meg lehet őrizni. A kis és közepes teljesítményű LED-ek teljesítőképességének nyomon követéséhez egy második, 0,3 W/mm²-es kritériumot is terveznek bevezetni, hogy ezeket a LED-eket optimális működési körülményeikhez közelebb lehessen mérni. A teljesítmény-sűrűség normalizálásával könnyen lehet különböző LED-csomag konfigurációt vizsgálni, mivel csak a bemeneti áramot, a bemeneti feszültséget és a fényáramot kell megmérni a fényhasznosítás és az USD/klm ár kiszámításához, ha a teljes belső chip-terület ismert. A legtöbb nagy gyártó jelezte, hogy kész a chip-területtel kapcsolatos információt megosztani a Minisztériummal ebből a célból. Az adatokat továbbra is 25 °C-ra közlik – és 85 °C-ra is, ha ez a specifikált vizsgálati hőmérséklet a LED-ek számára. Csak olyan LED-csomagokat választanak, amelyek megfelelnek a CCT/CRI = 5700K/70, 3000K/80 és 3000K/90 kombinációnak.

LED-lámpák és LED-es lámpatestek ára

A LED-lámpák és LED-es lámpatestek ára széles tartományban változik az alkalmazástól függően (l. pl. a 2.1 táblázatban). A LED-alapú világítás árcsökkenésében tapasztalható előrelépés igazolására a csere-lámpák összehasonlítása praktikus és megfelelő. A legagresszívabb áresés a lakásvilágítási lámpákkal kapcsolatos, ezért az elemzés az elterjedt, 60 mm átmérőjű, 60W-os (800 lm fényáramú) szabályozható izzólámpák helyettesítésére szolgáló lámpákra koncentrál. Az 5.18 ábra mutatja, hogyan csökkent ezeknek a retrofit-lámpáknak az ára az elmúlt öt évben (a támogatásokat és a kiadásokat nem tekintve), és összehasonlítja az árcsökkenést a 13W-os tipikus, hagyományos kompakt fénycsövek áresésével. A kiskereskedelmi ár most 10 USD alatt van, ami a 11-12 USD/klm tartományba eső normalizált árnak felel meg – jó egyezésben a Minisztérium előrejelzésével (l. az ábrán).

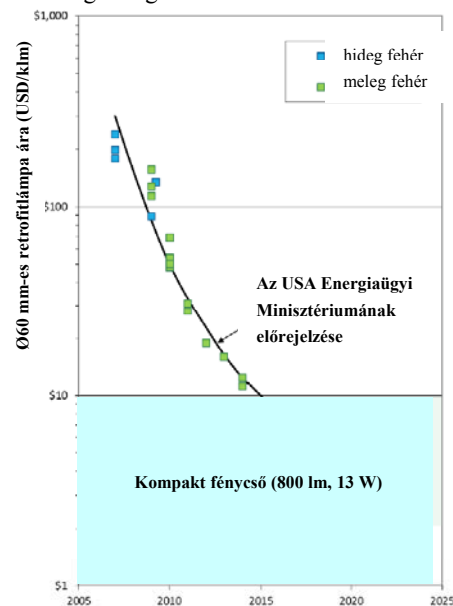
Mért adat	2014	2015	2017	2020	Cél
Hideg fehér LED-ek fényhasznosítása	173	185	205	226	250
Hideg fehér LED-ek ára (USD/klm)	1,4	1,0	0,6	0,35	0,3
Meleg fehér LED-ek fényhasznosítása	146	162	190	220	250
Meleg fehér LED-ek ára (USD/klm)	1,7	1,2	0,7	0,36	0,3

5.8 táblázat – LED-csomagok árának és teljesítőképességének előrejelzése (1 W/mm² és 25°C esetén)

Az árak csökkenése töretlenül folytatódott 2015 elején, a kiskereskedelmi ár 8 USD alá csökkenésével, ami a normalizált 10 USD/klm küszöb alá történő csökkenésnek felel meg.

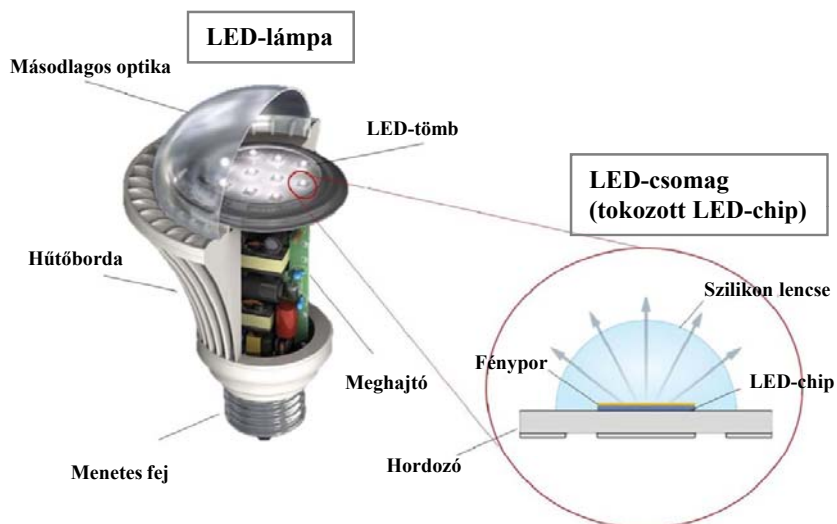
A LED-es csere-lámpák kiskereskedelmi árai (amelyek a Lighting Facts adatbázisban láthatók) az elmúlt évben tovább csökkentek – a legtöbb lámpatípus esetén 20-30%-kal. Például a 60mm átmérőjű, 60W-os izzólámpák csere-lámpái 16-ról 11 USD/klm-re, a PAR38 lámpáké 37-ről 23 USD/klm-re és a 15cm-es mélysugárzóké 43-ról 30 USD/klm-re. Kivétel az MR16-os lámpa, amelynek ára alig csökkent, összhangban azzal a nagyobb hangsúllyal, ami a jobb színvisszaadási indexre irányul. A meglévő termékek esetén egyre nehezebb lesz elérni további árcsökkenést, ezért folyamatosan jelennek meg új konstrukciók az alacsonyabb árak realizálására úgy, hogy minimalizálják a teljesítőképességgel kapcsolatos kompromisszumot. A LED-alapú lámpáknál a gyártástechnológia beérésével, a gyártási volumen növekedésével és a verseny erősödésével további gyors árcsökkenések várhatók.

Az árcsökkenések továbbra is ösztönözni fogják az energiahatékony világítási termékek elfogadását és hozzá fognak járulni az energiamegtakarításhoz.



5.18 ábra – A 60mm átmérőjű, szabályozható normállámpák LED-es csere-lámpái árának előrejelzése. – Megjegyzés: A világoskék terület a tipikus kompaktfénycsőves változat ártartományát mutatja (13W, beépített előtét – az alsó értékek a nem szabályozható, a felső értékek a szabályozható kivételre vonatkoznak)

A tanulmányban szereplő kifejezések értelmezése



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

6.0 Az OLED-technológia* helyzete

Az OLED-es világítástechnológia olyan fokozatot ért el, ahol már megvalósítható a termékek sikeres kereskedelmi forgalmazása. A teljesítőképesség a fényhasznosítás, az élettartam és a szín tekintetében már versenyképes más energiahatékony világítástechnológiákkal, például a fénycsővel és a LED-es lámpatestekkel. A meglévő új formatényezőjű lámpatestek a koncepció síkjáról a piac felé haladnak. Az OLED-világítás elfogadásának fő akadálya a költség maradt, noha a múlt évben jelentős javulásról számoltak be. Lehetséges, hogy az OLED-es világítási termékek rövid távon tapasztalható elfogadása elegendő érdeklődést és jövedelmet fog generálni ahhoz, hogy a további költségsökkentések lehetővé tételéhez támogatni lehessen a gyártástechnológia fejlesztését.

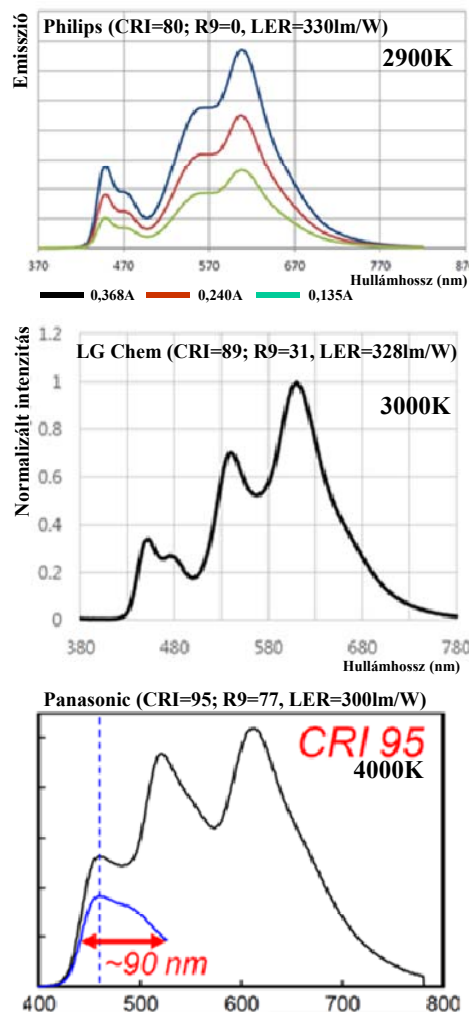
Ebben a fejezetben az OLED-panelek és az OLED-es lámpatestek teljesítőképességét tárgyaljuk a fényhasznosítás, az élettartam és a színminőség tekintetében. Ismertetjük az egyes teljesítőképességi kritériumok csoportosítását és a legfontosabb technikái kihívásokat és célokat is. A teljesítőképességi célokat összehasonlítjuk a jelenlegi adatokkal, amelyek illusztrálják a megkívánt élettartam, színminőség és egyedi formatényező megvalósítása érdekében tett fényhasznosítási kompromisszumokat.

Az OLED-es világításnál a panel beépítése a lámpatestbe általában nem változtatja meg lényegesen a teljesítőképességi specifikációkat, de várható némi módosulás a költségek és a teljesítőképesség vonalán, amit szintén tárgyalni fogunk. Azok a tulajdonságok, amelyek az OLED-eket megkülönböztetik a többi energiahatékony fényforrástól, fejlesztés alatt állnak és folyamatosan szélesítik az OLED-termékinvenciókat. A következő fejezetben közlünk egy pillanatfelvételt a rendelkezésre álló termékekről és megadjuk a várhatóan megjelenő lámpatestek trendjeit is.

6.1 A technológia helyzete

6.1.1 Az OLED-panelek fényhasznosítása

A fehér fényű OLED-panelek laboratóriumi körülmények között mért fényhasznosítása folyamatosan növekszik. Legutóbb a Konica Minolta bemutatott egy olyan 15 cm²-es panelt, amelynek fényhasznosítása



6.1 ábra – Kereskedelmi és laboratóriumi OLED-panelek spektrumai (Forrás: Philips Brite FL300 adatlap [73]; LG Chem OLED Light User Guide [74]; C.T. Komoda "Overview of White OLED Technologies for Lighting Application", Printed Electronics USA, 2014. nov. [75])

1000 cd/m² esetén 139 lm/W, 3000 cd/m²-nél pedig 126 lm/W [71]. Ez a 2013-as panel-fényhasznosításhoz képest 8 lm/W-nyi javulást reprezentál. A Konica Minolta paneljeinek L50-es fényáram-tartása 1000 cd/m²-en működtetve őket 55 000 óra körüli. A Panasonic egy nagyobb, 100 cm²-es panelnél 133 lm/W-ot és 100 000 órás L50-es fényáram-tartást ért el 1000 cd/m² mellett. Noha ez hatásos szám, 3000 cd/m²-es fényssűrűségnél csak 10 000 órás L70-es élettartamnak felel meg.

Habár 2014-ben számos cég nagy lépéseket tett a fényhasznosítás terén, nincs olyan kereskedelmi panel, amely túlszárnyalná az LG Chem 2013-ban produkált 60 lm/W-os fényhasznosítását. Ennek részben az a késlekedés az oka, amely a belső fénykivonás bevezetésében és a maximális fényhasznosítás és más fontos jellemző

*A szerves félvezetők működésének – s így a tanulmányban szereplő szakkifejezések (szinglet, triplett, Bragg-szórás, felületi plazmon, exciton, polaron stb. – megértéséhez alaposabb kvantumfizikai, optikai ismeretek szükségesek. Magyarozatukra érthető okokból itt nem térhetünk ki. Az OLED-panelek vázlatos felépítését viszont a 12. oldal 8.2 ábráján bemutatjuk. – A Szerk.)

(színminőség, élettartam és formatényező) közötti összhangra helyezett nagyobb hangsúly miatt mutatkozik meg. A múlt évben például az LG Chem a 3000 cd/m²-en adódó L70-es adatot 20 000-ről 40 000 órára növelte a 60 lm/W fényhasznosítási érték megőrzése esetén. E paraméterek jobb kontrollálása mellett a figyelem ismét a fényhasznosítás felé fordult, és az LG Chem 2015-re olyan panelek kereskedelmi forgalomba hozatalát tűzte ki célul, amelyek 100 lm/W-ot képesek elérni és az L70-es fényáram-megtartásuk 40 000 óra [72].

A jelen fejezet áttekintést nyújt az OLED-ek fényhasznosításáról és megadja a valószínűsíthető gyakorlati határértékeket az OLED-panelekre.

Spektrális hatások

Az OLED-ek fehér fényét két vagy három különböző szint kibocsátó emitter állítja elő. Az emitterek relatív fényssűrűségét úgy kell megválasztani, hogy jó színminőség és nagy fényhasznosítás adódjék. Az elmúlt két év során a fejlesztési munkák java része a színminőség javítására összpontosult. A 6.1 ábra a Philips és az LG Chem két kereskedelmi forgalomba került paneljére és a Panasonic egyik laboratóriumi példányára vonatkozik. Az összehasonlítás azt mutatja, hogy az élénk vörös (nagy R9 érték) elérésével biztosított kitűnő színnek 10%-os LER-csökkenés (LER = sugárzás fényhasznosítása) volt a büntetése. A szerves emittáló anyagok viszonylag széles spektrumai mellett az ideális LER 360 lm/W-nak vehető, azaz a 6.1 ábrán látható példányok spektrális hatásfoka 85 és 92% közé tehető.

Az OLED-ek viszonylag nagy vonalzélességű vörös emissziója megnehezíti a

[71] 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>)

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

[73] Philips: „Lumiblade OLED Panel Brite FL300 WW Data Sheet”, 2014 (<http://www.lumibladeexperience.com/assets/journalists/OLEDs/2014%20Philips%20Lumiblade%20OLED%20Panel%20BRITE%20FL300ww%20DATASHEET.pdf>)

[74] LG Chem: „OLED Light Panel: User Guide v1.0”, (http://www.lgoledlight.com/resources/LG_CHEM_OLED_Lighting_User_Manual.pdf)

[75] C. Komoda: „Overview of White OLED Technologies for Lighting Application”, Printed Electronics USA, 2014. november

jó színminőség és a nagy fényhasznosítás egyszerre történő elérését. Ezért e példánál a LER értéke hasonló a fényporkonverziós LED-ekéihez, amelyek ugyancsak széles spektrumú emittereket tartalmaznak. A Panasonic 6.1 ábrán bemutatott paneljének 460 nm-es csúcsú kék emittere van és az emissziós spektrum teljes szélessége a maximum felénél [FWHM] 90 nm.

A keskenyebb sávzélességű vörös emitterek segíthetnének csökkenteni a fényhasznosítási problémát a jobb színminőségű eszközök esetén. Az anyagok fejlesztésével foglalkozók fontolgatják a kék emissziós spektrumok „hozzászabását” is az eszközök fényhasznosításának növelése érdekében. Amíg a kiemelő fényt adó alkalmazásokhoz „mélykék” emitterekre van szükség, ezek az emitterek 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.

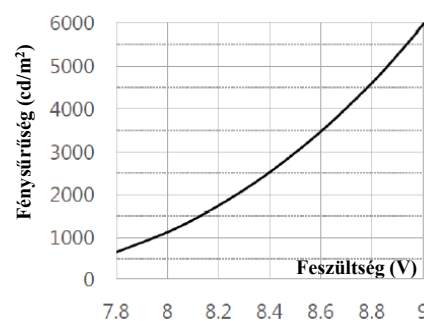
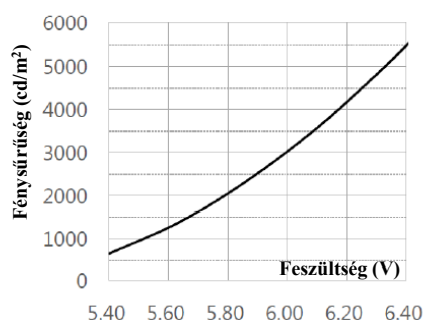
Elektromos hatások

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

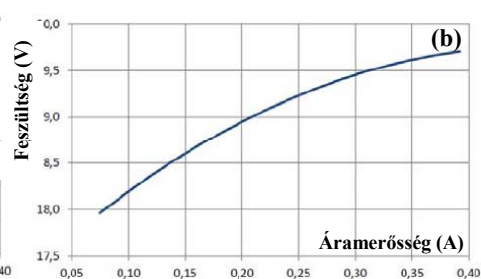
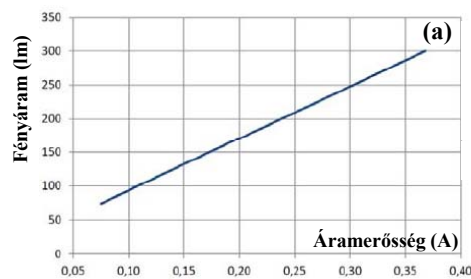
- injekciós és ohmos veszteségek, amelyek az áramnak az elektródáktól a fotonokat létrehozó rekombinációs tartományba történő haladásakor lépnek fel;
- ohmos veszteségek, amelyek az áramnak a panel felületén, az anód- és katódstruktúrák mentén történő eloszlásakor keletkeznek;
- Stokes-veszteségek.

A fotonok átlagos energiája enyhe 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 az egymásra épített, „rakatolt (stacked)” felépítésű eszköz esetén néhány mA/cm².

Az egymásra épített eszközöknél nagy, 80% körüli elektromos hatásfok figyelhető



6.2 ábra – Az LG Chem kétlépcsős paneljének (baloldalon) és háromlépcsős paneljének (jobbaldalon) fény-sűrűsége a feszültség függvényében (Forrás: LG Chem OLED Light User Guide [74])



6.3 ábra – A fényáram és a meghajtófeszültség áramfüggése (Forrás: Philips FL300 adatlap, 2014 [73])

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 vezetőképeségét be lehet állítani úgy, hogy a feszültségesés az alacsonyabb energiájú emissziós réteg(ek)en kisebb legyen, mint a kéken, ami minimalizálja a Stokes-veszteségeket. A további interfészek azonban ohmos veszteségeket okoznak az eszközben. Ezért gondos tervezésre és anyagválasztásra van szükség a tökéletesítések realizálásához. A 6.2 ábra az LG Chem két paneljének fény-sűrűségét hasonlítja össze a feszültség függvényében, bemutatva, hogy a veszteségek hogyan csökkennek a nagyobb feszültséggel és kisebb árammal működtetett tandem eszköz esetén. A baloldali diagram egy 4000K színhőmérsékletű, kétlépcsős tandem eszközre, a jobboldali pedig egy 3000K színhőmérsékletű 3-lépcsős panelre vonatkozik. Megjegyzendő, hogy a harmadik foton előállításához szükséges extra feszültség mindössze 2,5V körüli. 3000 cd/m²-es fény-sűrűség mellett az elektromos hatásfok közel 80%. A Philips hatlépcsős struktúrájú, 105 cm²-es emissziós felületű FL300-as paneljére vonatkozó adatok további betekintést nyújtanak a fény-sűrűség áram- és feszültségfüggésébe. A 6.3(a) ábra azt mutatja, hogy a fényáram lineárisan változik az árammal, de van egy kis küszöbérték, amely után a fényhasznosítás az áram növekedésével csökkenni fog. A 10 klm/m² fény-sűrűséget 0,12A alatti áramnál lehet elérni. A 6.3 (b) ábrán pedig az látható, hogy ez az áram

elérheti a 18,2V-os – lépcsőnként 3V-os – meghajtófeszültséget, ami 74%-os elektromos hatásfokot eredményez.

A Philips FL300-as paneljét nagy fényerősségre tervezték: 0,368A-es áram esetén 300lm fényáramot állít elő [73]. A 100lm-ről 300lm-re történő növekedés 12%-os hatásfok-csökkenéshez vezet, a megkívánt meghajtófeszültség pedig 18,2V-ról 19,7V-ra növekszik, ami 8%-os hatásfok-csökkenésért felel. Így az áramnak fényre történő átalakítása ezeknél a fluoreszkáló kék emittereket használó paneleknél csak 4%-kal csökken.

Belső kvantumhatások

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

A fluoreszkáló emitterekben a triplett állapotból történő emisszió hiánya rendszerint 25% körülire korlátozza a belső kvantumhatásfokot a szinglet/triplett állapotok viszonya miatt, habár a triplett-triplett megsemmisülés további szinglet-emissziót okozhat, ezért 40%-os belső kvantumhatásfokot is megfigyeltek már [76]. Viszont a foszforeszkáló molekulák közel 100%-os belső kvantumhatásfokot

mutattak. A fő probléma a foszforeszkáló molekulák kihasználásánál az, hogy a gerjesztési energiájuk sokkal hosszabb ideig fennmarad, mint a fluoreszkáló rendszerekénél (jellemzően mikroszekundumok helyett). Ez az energia átírányítható más folyamatokhoz, ami csökkenti a belső kvantumhatásfokot és károsíthatja a rendszert. Ezért a foszforeszkáló rendszerek általában gyorsabb fényáram-degradációt mutatnak, ha nagy fény-sűrűség-szinten működtetjük őket.

15 évnyi kutatómunka eredményeként a vörös és zöld foszforeszkáló emitterek élettartama olyan szintekre emelkedett, amely már elegendő a legtöbb alkalmazáshoz. A 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 legfrissebb laboratóriumi kísérletek azt mutatták, hogy ez kb. 75%-os belső kvantumhatásfokot eredményez. Gyakorlati példaként, ha a Philips FL300-as paneljét teljes fényerővel működtetjük, akkor a vörös és zöld emitterek belső kvantumhatásfoka 80%-ra becsülhető, míg a kéké mindössze 25%-ra, ami 62%-os teljes belső kvantumhatásfokot eredményez.

Az alacsony szinglet-triplett szétválasztású fluoreszkáló emitterekben a természetesen aktivált triplett-szinglet átmenet késleltetett fluoreszcenciát okozhat, ami nagyobb belső kvantumhatásfokot eredményez, de túl korai még azt állítani, hogy ez a jelenség valóban felhasználható a rendszerek fényhasznosításának és élettartamának növelésére.

Fénykivonási hatások

A (fény)kivonási hatások a panel által emittált látható fotonok és az emissziós tartományban keletkezett fotonok hányadosa. A fotonok elnyelése és csapdázódása az elektródákban, az átlátszó hordozóban és a belső rétegekben a fénykivonási hatásfokának csökkenéséhez vezet és az OLED-panelek legnagyobb hatásfok-vesztésének számít. Az egyszerű OLED-eknél a fénykivonási hatásfok tipikusan 20-25%. Ennek oka a szerves anyagok, az anód, a hordozó, a tokozó rétegek (hajlékony hordozók esetén) és a levegő fénytörése közötti eltérés, ami korlátozza azt a beesési kúpot, ahol a fényt ki lehet vonni. A fénykivonási hatásfokának növelésére azonban különböző stratégiák alkalmazhatók. Íme néhány módszer a kivont fény mennyiségének növelésére:

Módszer	Eljárás	Példák	Nettó fénykivonás	Gyártási valószínűség
Nincs módosítás	-	-	17-20%	-
Hordozó módosítása	Külső	Felületet texturáló műanyag fólia vagy üveg	30-40%	Nagy
Mikrolencsék	Külső	10µm-es polidimetilsziloxán (PDMS) lencsék	30-40%	Közepes
Megnövelt szórás	Belső	Mikrogömbök, cirkónium részecskék, nagy reflexiós tényezőjű hordozók	-	Közepes
Mikroüreg	Belső	SiO ₂ /Si ₃ N ₄ /fém	30-40%	Kicsi
Fotonikus kristályok	Belső	300nm-es időszakos asztalok az indium-ón-oxidban (ITO)	30-48%	Kicsi
Felületi plazmonok	Belső	Hullámosított vékonyfémrétegek	40%	Kicsi
Nanostruktúrájú interfészek	Belső	Arany nanorészecskék a szerves rétegekben	50%	Kicsi

6.1 táblázat – A fénykivonási technikák táblázata (Forrás: Corning, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, 2015. jan. [77])

Paraméter	LG Chem NGA30 ¹	Philips FL300 ²	Panasonic ³	CDT/Sumitomo ⁴
LER (sugárzás fényhasznosítása)	328	330	300	335
Elektromos hatásfok	80%	64%	83%	70%
Belső kvantum-hatásfok	65%	62%	87%	72%
Fénykivonási hatásfok	35%	32%	61%	39%
Panel hatásfoka	18%	13%	44%	20%
Panel fényhasznosítása (lm/W)	60	42	133	66

6.2 táblázat – Az OLED-panelek fényhasznosításának összetevői – Megjegyzés: Valamennyi közölt adat a vonatkozó vállalattal folytatott kommunikáción alapul: 1. Hármasszörös rétegezést felhasználó kereskedelmi panel fluoreszkáló kék emitterekkel és foszforeszkáló vörössel és zölddel; 2. Hármasszörös rétegezést felhasználó kereskedelmi panel fluoreszkáló kék emitterekkel és foszforeszkáló vörössel és zölddel; 3. Kettős rétegezésű laboratóriumi panel foszforeszkáló emitterekkel; 4. Egyetlen rétegezésű tesztpanel polimer/oligomer emitterekkel

- „Hajlítuk” a fényt a merőleges felé mikrolencse-tömbök beépítésével vagy mintázott összekötő rétegek kialakításával a különböző törésmutatójú rétegek között.
- Hozzuk létre szórési központokat vagy durva összekötő rétegeket, amelyek a fényt arra készítik, hogy sokszor próbálkozzon – mindig más és más szögben – kilépni.
- Csökkentsük a felület plazmon állapotaiiba történő kicsatolásának csökkentésével (pl. az emitter és a fém elektróda, a vízszintesen orientál dipólusok közötti távolság növelésével), fémmentes eszközöket készítve vagy a felület plazmon polarizációs üzemmódjainak látható fénné történő Bragg-szórásos átalakításával az átmenet texturálásának segítségével.
- Csökkentsük a Fresnel-visszaverődéseket fokozatos törésmutatójú szerkezetek felhasználásával.
- Használjunk irányított emittereket úgy rendezve el az emittáló molekulákat, hogy a kibocsátott fény ennek megfelelően orientálódjon.

Az ezeken a területeken végzett kutatómunka a laboratóriumi eszközöknél jelentős javulást eredményezett az elmúlt két évben, de úgy tűnik, hogy a javasolt megoldások a nagy panelek olcsó gyártására nem alkalmasak.

A Pixeligent által (az USA Energiaügyi Minisztériumának anyagi támogatásával) kifejlesztett egyik ígéretes módszer az akril nanokompozitba ágyazott fényeszközök alkalmazása. Ezzel a belső kivonó réteggel kétszer akkora fénykivonást lehetett elérni, és dolgoznak a technológia optimalizálásán fokozatos törésmutatójú réteg előállítását célozva meg úgy, hogy nanorészecskéket ágyazzanak egy kétrétegű, „széles résű szerszámmal” (slot die)

[76] Y. Kondakov, T. D. Pawlik, T. K. Hatwar and 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

[77] D. Chowdhury and M. Taylor: „Integrated OLED Substrates”, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, CA, 2015. jan. 28. (http://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/chowdhurytaylor_substrates_sanfrancisco2015_0.pdf)

kialakított filmbe. A PPG is dolgozik egy olcsó módszeren a fénykivonás javításához: fényszóró részecskéket ágyaznak be az üveghordozóba az üveggyártás során alkalmazott online eljárással. Az előzetes eredmények biztatóak, noha még nem hatékonyabbak a tipikus külső fénykivonó réteges módszernél, amely 1,3-1,5-szeres fénykivonás-növekedést eredményez.

A 6.1 táblázat a szokásos fénykivonási technikákat hasonlítja össze. Meg kell jegyezni, hogy a több módszert magukban foglaló megközelítések (pl. a belső és külső fénykivonási rendszerek) nem mindig működnek együtt azonos hatékonysággal.

A hatásfokok felosztása és a velük kapcsolatos célok

A 6.2 táblázat négy OLED-eszköz hatásfokainak becsléseit foglalja össze a kereskedelmi és a laboratóriumi panelek összehasonlításával. Az első két oszlop az LG Chem és a Philips 3000 cd/m² fényssűrűséggel működtetett kereskedelmi paneljeire, a harmadik pedig a Panasonic 1000 cd/m² fényssűrűséggel működtetett egyik laboratóriumi példányára vonatkozik. Mindhárom tandem felépítésű eszköz. A negyedik oszlop a CDT egyik kis teszt-paneljére vonatkozik, amely polimer emitteres feldolgozást használ fel egyetlen rétegezéssel („egyrakatos”) struktúrában.

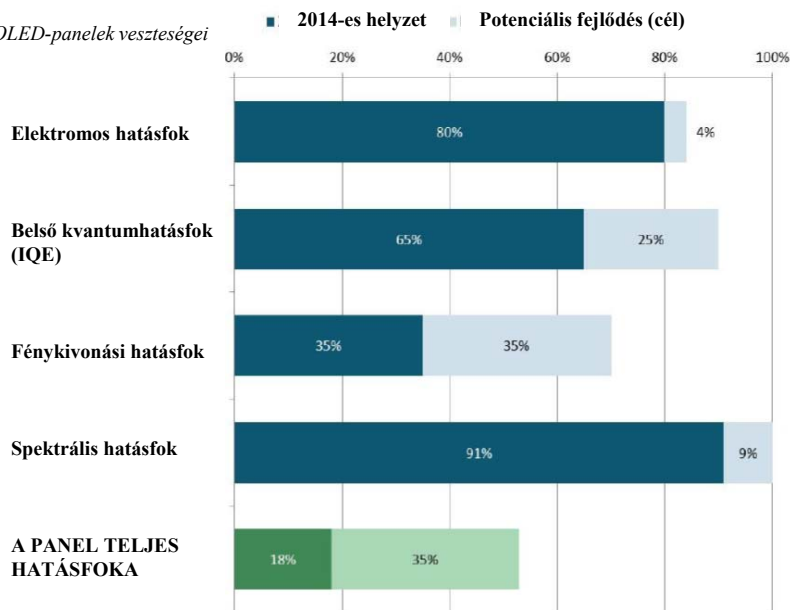
A táblázat két fontos dologra mutat rá. Az egyik, hogy a kereskedelmi panelek hatásfoka kevesebb, mint a fele a laboratóriumi eredményeknek, azaz további erőfeszítésre van szükség ahhoz, hogy a K+F eredményekből gyártható termékek legyenek. A másik pedig az, hogy az oldatos bevonási eljárással kompatibilis polimer emittereket használó panelek laboratóriumban nyert hatásfoka közel akkora, mint a kapható kereskedelmi paneloké, de jóval elmarad a legjobb laboratóriumi eredményektől, amelyeket gőz formában leválasztott kis molekulák felhasználásával kaptak.

A 6.4 ábra az OLED-veszteségek felosztását mutatja, összehasonlítva a legutóbbi adatokat a programban kitűzött célokkal és jelzi, hogy mekkora javulásokra van lehetőség. Az LG Chem hármass rétegezéssel NGSA30-as paneljére vonatkozó 2014-es értékek 60 lm/W-os fényhasznosítást mutatnak 150 mA-es áram mellett, ha a 81 cm²-es fényt adó felületű panelt 8,5 V feszültséggel hajtjuk meg. A cél 360 lm/W sugárzási fényhasznosítás és 190 lm/W panel-fényhasznosítás.

6.1.2 A panelek élettartama

A fényhasznosítás mellett az OLED-ek másik kulcsfontosságú paramétere az élet-

6.4 ábra – Az OLED-panelek veszteségei és hatásfokai



tartam. Az OLED-ek élettartamát szokásosan az Lp fényáram-megtartással adják meg, amely azt az időt jelenti órában kifejezve, amely alatt egy fényforrás kezdeti fényáramának p-százalékát képes megőrizni. Itt is a LED-csomagok élettartamához hasonló élettartamok lennének kívánatosak, amelyeknél az L70 nagyobb mint 50 000 óra. Habár a fényáram-megtartás az élettartam analógiájának tekinthető, fontos megjegyezni, hogy az üzemelési 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. Az OLED fényforrások „névleges élettartamát” általában nem közlik, mivel ez az adat tipikusan statisztikailag szignifikáns mintamennyiséget igényel, míg a fényáram-megtartás „tartóssági” adat, amelynél nincs mintaméret-megkötés. Az OLED-ek „tárolási élettartama” egy másik fontos adat, amely azt az időtartamot adja meg, ameddig az OLED az alkalmazáshoz szükséges teljesítőképesség károsodása nélkül raktározható. A megfelelő környezeti feltételek (hőmérséklet, páratartalom) mellett a várható tárolási élettartam 10 év.

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. tönkretesznek a kötéseket és meghibásodásokat okozhatnak a helyi energiadisszipáció folytán. Ez a hatás súlyosbodik, amint az áramsűrűség nő a nagyobb fényssűrűség-szintek elérésére.

Az élettartam növelésére a következő módszerek vannak vizsgálat alatt:

- Olyan új anyagok kifejlesztése, amelyek nagyobb stabilitással kecsegtetnek (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.
- Hosszabb hullámhosszú kék emitterek vizsgálata a kijelzőkben 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 ki-csatolás fő előnye az, hogy a megkívánt fény mennyiség kisebb áramsűrűség mellett elérhető, ezáltal lassítva a meghibásodások kialakulásának és a fényáram-csökkenésnek a sebességét. Például a tandem architektúra magyarázza részben az LG Chem és a Philips által közölt nagy (40 000, ill. 50 000 órás) L70-es értékeket (3000 cd/m²-es kezdeti fényssűrűség mellett). A fénykivonási technikáknak az eszközön áthaladó áram lecsökkentésére irányuló alkalmazása is hatásos lehet és közreműködhet a tandem eszközökkel együtt az élettartam meghosszabbításában. Ezek a

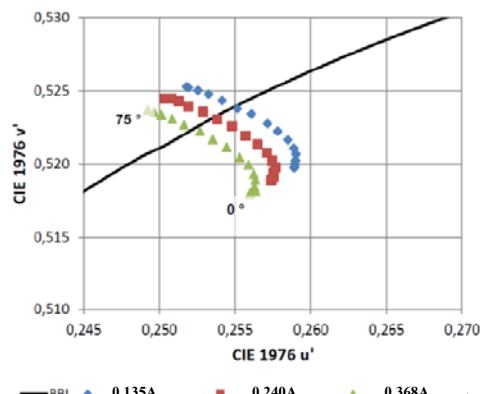
megközelítések különösen fontosak, mivel a panel- és lámpatestgyártók egyre nagyobb üzemi fényerősség elérését tűzik ki célul. Például az Acuity Brands OLED-világítási ütemtervének célkitűzései max. 4000 cd/m² fénysűrűség kibocsátásával számolnak 2018-ra [72]. Ezek az előnyök azonban nagyobb komplexitást igényelnek, ami alacsonyabb kihozatalokat és magasabb gyártási költségeket eredményez.

A Philips közzétett adatokat az FL300-as paneljére az L70-nek az áramsűrűségtől való függőségével kapcsolatosan. Az 50 000 órás névleges érték 0,135A-es áramra érvényes 25°C-os környezeti hőmérséklet mellett. Ilyen körülmények között a szerves anyagok hőmérséklete 35°C-ra becsülhető. Ha az áramot a 8300 cd/m² fénysűrűség elérése érdekében 0,368A-re növeljük, a szerves anyagok hőmérséklete 52°C-ra nő, az L70 pedig 10 000 órára csökken [73].

6.1.3 Az OLED-panelek színminősége

Tavaly a piacot 60 lm/W-os termék-fényhasznosításával vezető LG Chem a panelek élettartamának nagy léptekkel történő növelése mellett a színminőség javításán dolgozott. Most 89 vagy még nagyobb színvisszaadási indexet kínál 3000K korrelált színhőmérséklet, 40 000 órás L70 és 3000 cd/m² kezdeti fénysűrűség mellett. 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 az általános és dekorációs világítás terén. Az OLED-panelgyártók azzal reagáltak erre, hogy a kereskedelmi igényeknek jobban megfelelő, legalább 80-as CRI színvisszaadási indexű paneleket fejlesztettek ki (pl az Osram és a Philips), és néhány gyártó (pl. a Lumiotec és az LG Chem) még nagyobb, 90-es CRI-t célzott meg. 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}.

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 kompozíció és az egyforma vastagság a nagy felületek mentén döntő



6.5 ábra – A színpont elhelyezkedése a CIE 1976 (u',v') színkoordináta-rendszerében a meghajtóáram és az emissziós szög függvényében (BBL = fekete test elhelyezkedése) – Forrás: Philips FL300 adatlap [73]

fontosságú a jó minőségű eszközök esetén. A Philips FL300-as paneljénél a panel mentén rendszerint igen kicsi a színeltérés, az u'-v' színkoordináta két színpontja közötti Δu'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. 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 (6.5 ábra). Az emisszió szöge még nagyobb színeltolódást okozhat, amely szintén a 6.5 ábrán látható. Az ilyen eltérések különösen érzékenyek a mikroüreg hatások vagy a fénykivonás növelésére használt periodikus struktúrák jelenlétére. Ezenkívül 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 olcsóbb legyen a gyártás és javuljon a formatényező is rugalmas vagy hajlékony hordozók (pl. fémfólia, polimer, ultra vékony üveg) felhasználásával. A gyártási költségeket várhatóan azzal lehet csökkenteni, ha a költséges vákuumleválasztási eljárásokat roll-to-roll* gyártással váltják fel – oldatos feldolgozással együtt. Ehhez azonban új, nagyobb fényhasznosítású és élettartamú anyagokat kell kifejleszteni. Az utóbbi években a Sumitomo/CDT, DuPont és a Merck jelentős erőfeszítései dacára még

mindig jelentős az eltérés az oldatos és a vákuumos leválasztási eszközök teljesítőképessége között. A fényhasznosítás kisebb, s noha a vörös és zöld emitterek élettartama impozáns szintet ért el, a foszforreszkáló kék emittereké még mindig rövid. Ezt a teljesítőképességbeli deficitet az OLED-ek rugalmas hordozókon való kialakítása és a roll-to-roll gyártási módszerek bevezetése fenntartani látszik. A rugalmas/hajlítható hordozók bevezetésének másik akadálya a víznek és az oxigénnek a szerves hordozókon és a burkolatokon való bejutását megakadályozó megbízható „gátak” kifejlesztése. Ultra vékony üvegből jó, áthatolhatatlan hordozó hozható létre, de a költségek és – ami még fontosabb – a kezelés problémákat okoz. A rugalmasság megőrzéséhez egy vékonyréteges tokozóanyagot lehet használni ultra vékony üveghordozókkal együtt. Az alternatív megközelítés igen vékony üveget használ mind hordozó-, mind gát-anyagként, jóllehet ehhez a megoldáshoz javítani kell a költséghatékonyaságot és ki kell fejleszteni nagy teljesítőképességű lezáró mechanizmusokat. 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.

Igen könnyű rugalmas panelek prototípusai már több évvel ezelőtt megjelentek. Például a 2014. évi frankfurti Light & Building kiállításon a Konica Minolta bemutatott olyan kettős paneleket, amelyek madárszárnyakként voltak kiképezve, meg olyanokat is, amelyek lebegtek a légáramlatban (6.6 ábra).

Még fontosabb, hogy az LG Chem már kereskedelmi forgalomban kínál igen vékony üvegből készült hajlítható paneleket. A felület tetején homlokzati lezárást használnak, amely mögött fémről készült fólia található, s az egész vastagsága mindössze 1 mm körüli. Megjelentek az „igazi”, műanyag hordozókon kialakított rugalmas panelek mintapéldányai is, habár a gát-technológia még fejlesztésre szorul.

A rugalmas vagy hajlítható hordozókat azért szeretik, mert kevesebb tervezési megszorítást jelentenek. A tervezők az ilyen OLED-eket háromdimenziós világítási szerkezetekké formálhatják, különösen nem sík felületű és szűk architektúrais terekben, például járműveknél, függőleges felületeknél és alkalmazás-specifikus világítások esetén. A 6-7 ábra dekorációs falilámpák felhasználásával kialakított háromdimenziós panelkonstrukciót mutat be.



6.6 ábra – „Habataki” – könnyű, rugalmas OLED-fényforrások – Forrás: Konica Minolta [78]



6.7 ábra – Az Acuity Brands Nomi elnevezésű íves fali lámpatestei, bennük LG Chem-gyártmányú hajlítható OLED-panelekkel – Forrás: 2015. évi Next Generation Luminaires lámpatest-tervezési verseny, 2015. május [79]

6.1.5 OLED-es lámpatestek

Hatásfok

A jelenleg kereskedelmi forgalomban kapható lámpatesteknél a hatásfokot az OLED-paneleknek a lámpatestbe történő beépítése befolyásolja. Számos prototípus lámpatestet úgy alakítottak ki, hogy a járulékos hatásfok-veszteség csupán a meghajtóban keletkezzen, ami 15% körüli csökkenéshez vezet. Nem alkalmaznak optikákat, így a fényszórás közeli 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 66%-át adja, vagy ennél alacsonyabb hatásfokú. A lámpatestek és a meghajtók konstrukciójának tökéletesítése segíthet csökkenteni a veszteségeket. A 6.3 táblázat előrejelzései azt feltételezik, hogy az OLED-meghajtók hatásfoka a LED-meghajtókéhoz hasonlóan fog javulni, de csak mintegy két éves késéssel, amire az OLED-specifikus meghajtóknak szükségük van az optimális üzemeltetéshez.

Az OLED-ek által kibocsátott fény széles eloszlása többféle módon jól kihasználható. A mennyezetre szerelt lámpatestektől

Metric	2014	2017	2020	Cél
Panel fényhasznosítása ¹ (lm/W)	60	125	160	190
Lámpatest optikai hatásfoka	100%	100%	90%	90%
Meghajtó hatásfoka	85%	85%	90%	95%
Teljes (eszköz-lámpatest) hatásfok	85%	85%	81%	86%
Lámpatest eredményül kapott fényhasznosítása ¹ (lm/W)	51	106	130	162

6.3 táblázat – Az OLED-es lámpatestek hatásfokának előrejelzése – Megjegyzés: 1. A fényhasznosítás előrejelzése CRI >80 színvisszaadási index és 3000K korrelált színhőmérséklet mellett értendő.

vagy a függesztékektől származó fény jó egyensúlyt teremt a függőleges és vízszintes felületek megvilágítása között, ami fontos az arcok és a fali dekorációk szemlélésénél. Ha a fényhasznosítást 100 lm/W-ra vagy a fölé lehetne növelni, az OLED jó eséllyel 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 panelek belső 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 költség-növelő tényezőket.

A lámpatestek hatásfokának várható fejlődését a 6.3 táblázat mutatja. Az optikai veszteség függ az alkalmazástól, ezért a táblázatban átlagértékek szerepelnek.

Lámpatest-konstrukció

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 rugalmasság és az átlátszóság. Az OLED-ek a szín állíthatóságát, nagy fényhasznosítást, könnyű, karcsú 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. Úgy vélhető, hogy a meghajtó-technológia fejlődése a panelek beszerelésé-



6.8 ábra – A felhasználó igényeire szabható világítás (a) LG Chem mágneses csatlakozósínével, (b) Winona Modelo lámpatestekkel Forrás: LG Chem OLED Light c. füzet [80]; Acuity Brands, 2013 [81]

sének megkönnyítése érdekében fel fogja gyorsítani az OLED-eknek a világítási rendszerekbe történő betervezését. A 6.8(a) ábra bemutatja az LG Chem által kifejlesztett új csatlakozási rendszert, amely mágnesesen csatlakoztatja a paneleket az eszközt árammal ellátó sínhez. Minden panelbe be van építve egy-egy DC-DC meghajtó. Az AC-DC meghajtó az áramvezető sint látja el egyenárammal. A 6.8(b) ábrán pedig az látható, hogy hogyan lehet a Winona Modelo segítségével modulrendszerű „fénycsempéket” kialakítani. A lámpatestgyártók számára meg fogja növelni a tervezési lehetőségeket, amint az állítható fehér színárnyalatú és az átlátszó panelek kereskedelmi forgalomba kerülnek. A szín állíthatóságát több, saját meghajtóárammal rendelkező emitter egymás

[78] 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)

[79] Next Generation Luminaires: „OLED Families - Nomi® and Trilia®” by Acuity Brands® - Winona® Lighting”, Next Generation Luminaires, 2015. május (http://www.ngldc.org/14/indoor/winners/emerging_OLED_Families.stm)

[80] LG Chem: „LG Chem OLED Light Brochure: You Create. We Light.”, (http://www.lgoledlight.com/resources/LG_Chem_OLED_light_Brochure.pdf)

[81] Acuity Brands: „Acuity Brands Introduces State-of-the-Art OLED Lighting Design Concepts at Lightfair”, 2013. ápr. 25. (<http://news.acuitybrands.com/US/acuity-brandsintroduces-state-of-the-art-oled-lighting-design-concepts-at-lightfair/s/889f4559-70d6-4fa7-9cad-0148a0083c6e>)

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 (COMEDD) és állítható színű prototípus panelek is megjelentek a Verbatim és a Konica Minolta jóvoltából [82, 83, 78, 84]. A Konica Minolta ezeket a paneleket 2015-ben rol-to-roll gépsorán nagy szériában szándékozik gyártani.

Az átlátszó elektródákat katódnak és anódnak is lehet használni, ami olyan eszközöket eredményez, amelyek kikapcsolt állapotban átlátszóvá válnak. 2015-ben az európai Topaz-projekt keretei között az Osram több mint 57%-os átlátszóságú rugalmas paneleket mutatott be, az UDC pedig 70%-osnál nagyobb átlátszóságról számolt be [85, 86]. Az átlátszóság követelménye azonban korlátozza azokat a módszereket, amelyeket a fénykivonás növelésére lehet használni, ezért az átlátszó OLED-ek fényhasznosítása korlátozódhat. Ha egy átlátszó panelhez erősen tükröző hátlatot illesztünk, az eszköz kikapcsolt állapotban tükröként viselkedik, amint azt a Philips be is mutatta (Living Shapes Interactive Mirror: <http://www.lumibladeexperience.com/livingshapes%3Fslide=1.html>). Hasonló hatás érhető el, ha egy nagyon sima felületű, erősen tükröző elektródát használunk a tükröződés növelésére.

6.1.6 Az OLED-termékek elérhetősége

Noha sok támogatója van az OLED-ek nagy, fényes felületekként – például OLED-es tapétákként vagy függönyökként – történő felhasználásának, az OLED-panelek jelenleg nem elég nagyok az ilyen konstrukciókhoz. Az OLED-eket jelenleg főként modulrendszerben, vagy kicsiny, 100 cm²-es vagy még kisebb panelekből álló tömbökként használják. Ezek a panelek két- vagy háromdimenziós formában rendezhetők el – fényszobrokat, az architektúrális világítás új formáját kínálva ezzel. Ezeket a fényszobrokat kifinomult csillárak és művészi helyiségvilágítás kialakításához lehet felhasználni. A 6.9 ábra az OLED-es lámpatestek két példáját mutatja be: az Acuity Brands Trilia és First-O-Lite lámpatesteit. Tovább folyik a munka a nagyobb panelméretek elérésére, az LG Chem például már 1000 cm²-es panelt is kínál. Végül is a világítástervezők nagy méretű, méretben, alakban igényre szabható „fénylapokat” szeretnének OLED-formában látni.

Jelenleg az OLED-ek korlátozott fény-



6.9 ábra – Az Acuity Brands Trilia (balra) és First-O-Lite (jobbra) lámpatestei – Forrás: Acuity Brands [87], First-O-Lite



6.10 ábra – A Szöuli Nemzeti Egyetem (SNU) könyvtárába az asztali lámpákba 110 db OLED-panelt szereltek – Forrás: LG Chem [89]

áramuk és magas árak miatt nem tekintethetők praktikus opciónak ahhoz, hogy elsődleges fényforrásnak használjuk őket egy helyiségben. Ma már a támogatók sokasága 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 [88]. Az ilyen konstrukciók megnövelik a fényáramot és csökkentik a lumenenkénti költséget, ugyanakkor megőrzik a kiváló fényminőséget és az OLED-es lámpatest-konstrukciók esztétikus megjelenését.

A kis fényerősségű OLED-eket szorosan a célfelület közelébe lehet felszerelni anélkül javítva ezzel a fényfelhasználást, hogy az kényelmetlenséget okozna a felhasználó számára. Nagyobb távolságból a hatékony fényfelhasználáshoz szükség lehet az OLED-fényeloszlás formálására alkalmas módszerekre.

Az egyik legnagyobb OLED-es világítási rendszer Dél-Koreában, Szöulban készült (6.10 ábra), ahol az LG Chem 1100 db olvasólámpát szerelt fel a Szöuli Nemzeti Egyetem könyvtárába a nagyobb energiahatékonyság és az UV-mentesség okán egészségesebb (a szem kifáradását és károsodását megelőző) világítás megteremtése érdekében [89].

Bár számos egyedi világítási megoldás áll rendelkezésre, az otthonvilágításra alkalmas első termékek még csak most kerültek a polcokra. Az Acuity Brands 2014 novemberében hozta ki a függesztve, ill. falra szerelhető Chalina és Aedan lámpatesteit (6.11 ábra), amelyek a Home Depot-ban kaphatók 200-300 USD áron, ami a „világítás árára” lefordítva az 1000 USD/klm tartományába esik [90].



6.11 ábra – Az Acuity Brands Home Depot-ban kapható OLED-termékei (Forrás: Home Depot website, 2015. március [90])

Fent: Chalina™ függesztve vagy falra szerelhető lámpatest (5 db 100mm x 100mm-es LGC LED-panel, 345lm, 3000K színhőmérséklet, 40 000 óra várható élettartam, 0-10V-os jellel szabályozható, 46,9lm/W fényhasznosítás)

Alul: Aedan™ függesztve vagy falra szerelhető lámpatest (2 db 50mm x 200mm-es LGC LED-panel, 136lm, 3000K színhőmérséklet, 40 000 óra várható élettartam, 0-10V-os jellel szabályozható, 31lm/W fényhasznosítás)

Az általános világítási piacot nem közvetlenül érintő területeken, a speciális világítási szegmensekben is megjelentek az első OLED-ek. Az amerikai OLEDWorks

[82] Fraunhofer Institute: „Transparent Color Tunable OLED”, 2015. febr. 5. (http://www.fep.fraunhofer.de/content/dam/fep/de/documents/Presse_Medien_JB/2015/Press_emitteilung_01_2015_EN.pdf)

[83] Verbatim: „Verbatim launches world's first commercially available, color tunable OLED lighting”, 2011. máj. 17. (<http://www.verbatimlighting.com/news/cat/verbatimnews/verbatim-launches-worlds-first-commercially-available-color-tunable-oled-lighting/>)

[84] Universal Display Corporation: „Universal Display Corporation Presents OLED Display and Lighting Technology Advances”, 2014. jún. 5. (<http://ir.udcoled.com/releasedetail.cfm?ReleaseID=852825>)

[85] OSRAM: „The 'Rollercoaster' luminaire demonstrates rapid development with organic light emitting diodes”, 2012. dec. 13. (http://www.osram.com/osram_com/press/press-releases/_trade_press/2012/rollercoasterluminaire/index.jsp)

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

[87] Acuity Brands: „Trilia”, (<http://www.acuitybrands.com/products/detail/258181/winona-lighting/trilia/>)

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

[89] LG Chem: „LG Chem Leads World's Biggest Building Installation of OLED Lighting at SNU”, 2015. febr. 9. (<http://www.lgoledlight.com/press-release/lg-chem-leads-worlds-biggest-building-installation-of-oled-lighting-at-snu.do>)

[90] Home Depot: „Pendant Lights: OLED”, (<http://www.homedepot.com/b/Lighting-Ceiling-Fans-Chandeliers-Pendants-Pendant-Lights/OLED/N-5yc1vZc7nuZ1z0qn3d>)



6.12 ábra – Az Acuity Brands Marker elnevezésű lámpatestje OLEDWorks-gyártmányú borostyánsárga OLED-panelekkel – Forrás: DOE SSL R&D Program, 2014 OLED Stakeholder Meeting Report [91]; Acuity Brands website: „Inspiration Through Concepts” [92]

OLED-gyártó kórházvilágítási helyzetjelzésre alkalmas paneleket fejlesztett ki, amelyeket a 6.12(a) ábrán látható OLEDWorks-konstrukciókban és az Acuity Brands 6.12(b) ábrán bemutatott lámpatestjeiben használnak fel. A fényt a kórházi környezethez illeszkedő módon borostyánsárga OLED-panelekkel állítják elő, ahol a kék fényt lehetőleg ki kell szűrni, nehogy megzavarja azoknak a cirkadián ritmusát, akik egész éjjel e fények hatásának vannak kitéve.

Egy másik piaci rés az OLED-ek számára a gépjárművilágítás. Az Osram várakozásai szerint 2016-ra megjelennek az OLED-termékek az autókban, míg a BMW-vel és a japán autógyárakkal közösen dolgozó LG Chem azt reméli, hogy 2017-re a piac 20%-át fogják uralni. Az OLED-eket az autók hátsó helyzetjelzőiben, belsőtéri világításánál, jelzőfényeinél és kiemelő világításához lehet felhasználni. Néhány éve már az Audi is dolgozik OLED-ekkel. 2012-ben bemutattak egy olyan világítási rendszert, amely háromdimenziós fénytömbökből állt, amelyeknek a kimenetét folyamatosan lehet változtatni (6.13(a) ábra), és ismertették a „raj” koncepciót is, amely a gépkocsi hátsó helyzetjelző fényét adja a gépjármű mozgását utánzó kis fénypontok százaival (például, hogy úgy tűnjön, mintha a fénypontok jobbra „nyűzsögnének”, amikor a gépjármű jobbra kanyarodik, vagy „előre rohannának”, ha az autó lassít). 2013-ban a Philipsszel, a Merckkel és a Kölni Egyetemmel kiegészülve elkészítették az első nagy felületű 3D-s hátsó helyzetjelző paneleket, amelyeket az Audi TT autójába szereltek be [93]. A BMW is az OLED-technológiához fordult, amikor a hátsó helyzet- és irányjelző lámpáit tervezte az M4-es autóihoz (6.13(b) ábra).



6.13 ábra – OLED-es fők- és hátsó helyzetjelző lámpák (a) Audi, (b) BMW Concept Car – Forrás: EuroCar News 2012 [94]; BMW 2015 [95]

Az OLED-panelek és -lámpatestek ára

Noha OLED-panelminták már 2009 óta rendelkezésre állnak, legtöbbjük kísérleti gépsoron készült, ezért USD/klm árak igen magas. Kimondottan tömeggyártásra tervezett gyártósorokat az LG Chem és a First-O-Lite épített, és az Osram és Philips is korszerűsítette kísérleti gépsorait a kereskedelmi termékek gyárthatósága érdekében. A Konica Minolta épített egy olyan roll-to-roll gyártósort, amely 2015-ben már tömeggyártásra is alkalmas lesz.

2014 tavaszán az LG Chem bejelentette, hogy nagy tömegben gyártott paneljei eladási árszintjét 600-ról 200 USD/klm-re csökkenti [96]. Ez azt jelentené, hogy a 75 lm fényáramot adó 100mm x 100mm-es paneljeik ára 15 USD körül kellene hogy legyen. A cég kis mennyiségben történő vásárlásra vonatkozó jelenlegi ajánlatai azonban sokkal drágábbak, mint ami ebből az árszintből adódna. Például az 1200 lm maximális fényáramú, 320mm x 320mm-es merev panel ára 680 USD. A 75 lm fényáramot adó, rugalmas műanyag hordozón kialakított műszaki mintákat 250 USD-ért kínálják, noha ez az ár várhatóan jelentősen csökkenni fog a tömeggyártás 2015 későbbi szakaszában történő beindulásával.

Az Acuity Brands kiválasztott vevőknek személyesen kialakított áron kínál lámpatesteket, bennük az LG Chem 100mm x 100mm-es paneljaival, de két függesztéke már a nagyközönség számára is rendelkezésre áll a Home Depot-ban. Az 5-paneles

„Chalina” 299 USD-be kerül és 343 lm a fényárama (azaz 870 USD/klm). A két-paneles „Aedan” olcsóbb, csak 199 USD, de fényárama csak 138 lm (1440 USD/klm) [5]. Ezek az árak megerősítik azt az ökolétszabályt, miszerint amíg az értékesítési volumenek nem növekednek meg jelentősen, addig a lámpatestek kiskereskedelmi ára legalább a panelek árának négyszerese lesz. Noha az árak USD/klm-ben kifejezve láthatóan magasak, a Home Depot-ban kapható hasonló stílusú LED-es lámpatestek árával összevetve az OLED-termékek árban versenyképeseknek látszanak.

A Philips a max. 8300 cd/m² fénysűrűséggel üzemelő FL300 kifejlesztésével alacsonyabb USD/klm-árat célzott meg. A 300 lm fényáramú panelek szerény mennyiségek vásárlása esetén 60 USD áron kaphatók, ami 200 USD/klm-nek felel meg. Nagy volumenű rendelések esetén azonban további kedvezményekre lehet számítani.

[91] D. S. Program: „2014 OLED Stakeholder Meeting Report”, 2014. dec. 8. (<http://energy.gov/sites/prod/files/2014/12/f19/OLED%20Stakeholder%20Meeting%20Report.pdf>)

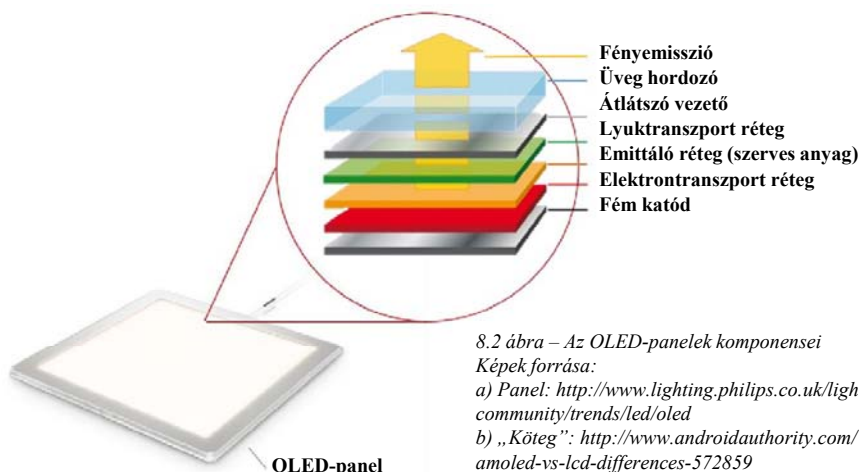
[92] Acuity Brands: „Inspiration Through Concepts”, (<http://www.acuitybrands.com/oled/inspiration-through-concepts>)

[93] OLED-Info: „Philips, Merck and Audi developed 3D OLED prototypes for the Audi TT”, 2013. júl. 11. (<http://www.oled-info.com/philips-merck-and-audi-developed-3doled-prototypes-audi-tt>)

[94] Audi AG: „Audi Visions OLED Technology”, EuroCar News, 2012. márc. 2. (<http://www.eurocarnews.com/57/0/1871/0/audi-visions-oled-technology.html>)

[95] Horatiu Boeriu: „World Premiere: BMW M4 Concept Iconic Lights”, BMW, 2015. jan. 6. (<http://www.bmwblog.com/2015/01/06/world-premiere-bmw-m4-concepticonic-lights/>)

[96] LG Chem: „LG Chem announces aggressive price target to stimulate the OLED light market”, 2014. máj. 28. (<http://www.lgoledlight.com/press-release/lg-chem-announcesaggressive-price-target-to-stimulate-the-oled-light-market.do>)



8.2 ábra – Az OLED-panelek komponensei
Képek forrása:

a) Panel: <http://www.lighting.philips.co.uk/lightcommunity/trends/led/oled>

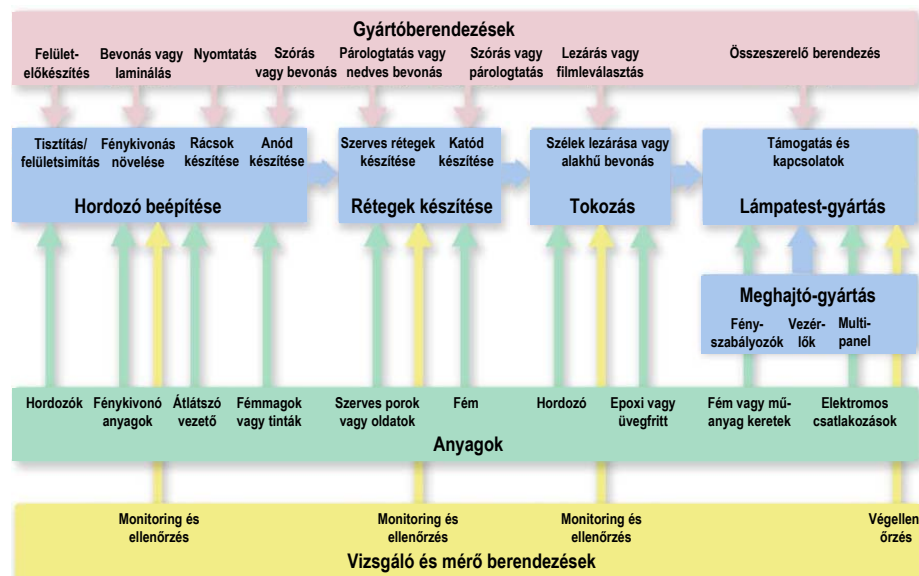
b) „Köteg”: <http://www.androidauthority.com/amoled-vs-lcd-differences-572859>

6.2 Az OLED-gyártás helyzete

A következő rész a legújabb fejlesztésekre és azokra a fontos kihívásokra koncentrálna, 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 (SSL Manufacturing Roadmap – 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 gyártósorokra adott megbízást a 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 és a japán Lumiotech-hez, 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 K+F munkájukat. Minden gyártónak megvannak a maga problémái, de a legnagyobb kihívásnak a költségsökkentés, a panelek konzisztenciája és megbízhatósága és a nagy méretű anyagok előállítása tűnik.

E kísérleti gyártósorok többsége hagyományos gőzfázisú leválasztási technikákat használ a szerves rétegek 370mm x 470mm körüli üveghordozókon történő kialakításához. A gyártósorok kapacitását a Philips által a közelmúltban nyilvánosságra hozott gyártási paraméterek felhasználásával lehet megbecsülni. Ciklusidejük – amelyre gyakran a német TAKT szóval hivatkoznak – jelenleg három perc körüli, és a jó panelek kihozatala 70% körül van. A hordozó mérete 400mm x 500mm. Ha feltételezzük, hogy a hordozó kihasználása 80% (20%-ot hagyva a széleken kialakított lezárási zóna és a panelek közötti rések számára) és hogy a gyártósor 7500 órát működik (1260 órát hagyva a tervezett leállásokra, karbantartásra és üzemzava-



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 vizsgálati és mérő berendezésekre vannak felosztva. Ezek a támogató elemek a megfelelő nyilakkal jelölt módon csatlakoznak a fő gyártási folyamathoz.)

rokra), akkor a Philips-sor évi kapacitása 17 000 m², ami 1,7 millió darab 100mm x 100mm-es panel gyártását teszi lehetővé.

A Konica-Minolta régóta szószólója a roll-to-roll gyártás alkalmazásának rugalmas hordozókon. 2014 májusában bejelentette, hogy 10 milliárd yent fordít egy havi 1 millió panel előállítására alkalmas roll-to-roll gyár létesítésére [97]. A tervek szerint az építés 2014 nyarára fejeződött be, és a gyártás 2014 őszén indult. 2015 januárjában bejelentették, 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 megrendezendő „a fény birodalma” rendezvényhez fognak felhasználni [98]. S noha ezek a lámpatestek inkább dekorációul, mintsem világításra szolgálnak, új innovációs korszakot tudták megnyitni a lámpatestek területén.

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.

Az egyik tényező, ami az OLED-es világítás tömeges alkalmazását késlelteti, az a nagy lámpatestgyártók tétovázása az OLED-panelek standard kínálatukba való beépítése tekintetében. Az Acuity Brands és a WAC Lighting inspiráló módon élen jár, de az Egyesült Államokon kívül az

elfogadást inkább a világítástervezők, vállalkozók és innovatív vásárlók jelentik, s nem a nagy lámpatestgyártók.

6.2.1 Az ellátólánc vázlata

Noha az OLED-panelek vagy OLED-es lámpatestek gyártásában résztvevő vállalkozások száma viszonylag csekély, ezek a vállalatok nagy számú anyag-, berendezés- és gyártástechnológia-szolgáltatótól függenek. A különböző szolgáltatók szerepeit a 6.14 ábra mutatja.

6.2.2 Az OLED-panelek gyártása

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 10. oldal 8.2 ábráján mutatjuk be. – A Szerk.)

[97] 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)

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

Merev panelek előállítás

A merev hordozókon kialakított OLED-panelek korai gyártósorai kazettás elrendezésben épültek fel, amelyben a szerszámok csoportokban voltak elhelyezve. Mind-egyikük több gyártási kamrából állt, amelyeket egy közös hordozó-kezelő táplált. Ez maximális rugalmasságot tett lehetővé, az egyes lépéseknek különböző volt a feldolgozási ideje, és volt lehetőség modulok hozzáadására vagy eltávolítására is.

A legtöbb jelenlegi gyártósor in-line gyártási formát használ fel, amelyben a hordozó folyamatosan mozog – egyik gyártási kamrából a másikba, ami lecsökkenti a kezelési időt, de a feldolgozási időket szinkronizálni kell.

A Philips Aachenben működő gyártósora (6.15 ábra) hat szerves rétegsorral rendelkező panelek gyártására alkalmas. Ezekhez a bonyolult szerkezetekhez 60 rétegre van szükség, amelyeknek teljes vastagsága mindössze 400 nm. A panelek gyártási kihozatala a közlések szerint 70%, ami azt mutatja, hogy jelentős előrelépés történt az ultra vékony szerves rétegek leválasztásának kontrollja terén.

A gyártósor négy részből áll:

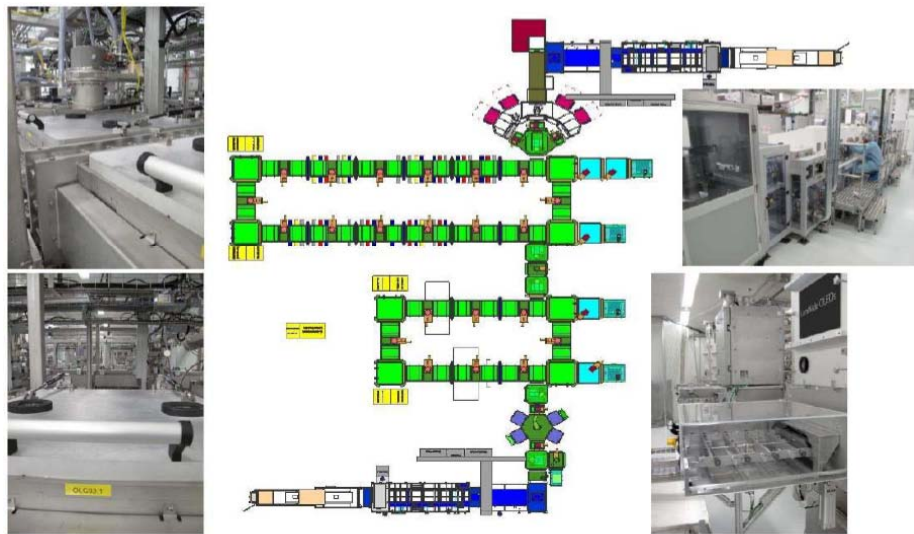
- hordozó-előkészítés;
- szervesanyag-leválasztás;
- fém-leválasztás;
- tokozás és csatlakozások elkészítése.

E megoldás egyik érdekes tulajdonsága az, hogy a leválasztási szegmensek kezdete és vége szorosan egymás mellett helyezkedik el. Ez elsősorban azt jelenti, hogy a hordozókat továbbító szerkezetek gyorsan vissza tudnak térni, de arra is mód van, hogy a részben feldolgozott hordozókat visszairányítsák a ciklus során további rétegek felvitelére érdekében.

Rugalmas panelek gyártása

Az LG Chem jelenleg gyárt ultra vékony üvegre felvitt, alakítható OLED-es világítópaneleket, és megjelentek az első műanyag hordozókon kialakított példányok is – a 75 lm/fényáramú panelek 250 USD bevezető áron. Ezek a műanyag-alapú panelek megőrizték az üveg-alapú panelek 60 lm/W fényhasznosítását és CRI>85-ös fényvisszaadási indexét. A rugalmas/alakítható panelek gyártása hagyományos gyártósorokon történhet, akár ultra vékony üveg vagy az üvegre átmenetileg felvitt poliamid-hordozók felhasználásával. Az ehhez szükséges „leemelési” eljárásokat a kijelzőipar fejlesztette ki.

Alternatív megközelítés a roll-to-roll feldolgozás felhasználása, de ennek is megvannak a maga problémái. Ha műanyag hordozókat használunk, a rotá-



6.15 ábra – OLED-panelek gyártósora a németországi Aachenben (Forrás: U. Hoffman, China International OLED Summit, Peking, 2015 [99])

ciós henger feszítését nagyon pontosan ellenőrizni kell a beállítási pontosság eléréséhez, és a hőmérsékletnövekedést a határértékek között kell tartani a műanyag lapok magas hőtágulási együtthatói miatt. Ha igen vékony üveghordozókat használunk, a kezelés fontos tényező a törések elkerülése végett.

A roll-to-roll eljárás előnye, hogy le lehet csökkenteni a hordozó egyik szerszámtól a másikig való mozgathatósághoz szükséges időt, ami rövidebb ciklusidőket eredményezhet. Azonban minden lépést szinkronizálni kell, ezért a ciklusidőt a leglassabb folyamat fogja megszabni. Gyakran elhangzik, hogy a roll-to-roll technikák alacsonyabb költségeket fognak eredményezni a tömeggyártásban, de az ilyen kijelentéseket még be kell igazolni az OLED-gyártásban.

A 6.16 ábra mutatja a drezdai Fraunhofer Intézet (COMEDD) roll-to-roll kísérleti gyártósorának elrendezését. Meg kell jegyezni, hogy ez a gyártósor gőzfázisú leválasztást alkalmaz az OLED-anyagok előállításához, ezért vákuum alatt működik. Ezt az egységet egy hordozó-tisztító rendszer, egy nyomtató és lamináló egység és egy ellenőrző állomás egészíti ki.

A Konica-Minolta kereskedelmi tömeggyártásra alkalmas roll-to-roll gépsorának részleteit még nem hozták nyilvánosságra, és a legtöbb kísérlet kísérleti gyártósorokról származó prototípus-gyártás. Roll-to-roll hengereket az eindhoveni Holst Központban használtak fel szerves anyagok nyomtatásához és gát-bevonatok készítéséhez műanyag és fólia hordozókon egyaránt [101]. Több amerikai vállalat élvezte a Központtal való együttműködés előnyeit. Például az nTact slot-die (széles

résű szerszámmal működő) bevonóit használták a szerves anyagoknak a DuPont Teijintől származó polietilén-naftalát (PEN) lapokra való leválasztásához, és áramszóró hálórácsokat készítettek a Novacentrix PulseForge-től származó fotonikus kikeményítő eszközök és a DuPont és PChem ezüst tintáinak a felhasználásával. A 6.17 ábra mutatja, hogy rendkívül fontos a nedvesség és a porszemek szigorú kontrollálása – még akkor is, ha a folyamatot oldatban végzik.

Hordozók kiválasztása és előkészítése

A kereskedelmi forgalomban kapható legtöbb OLED-es világítópanelhez kijelzőminőségű üveget használnak, mint amilyenek a Corning fúziós eljárásával készülő típusok (<http://www.corning.com/displaytechnologies/en/index.aspx>). Ez 1mm-nél vékonyabb, nagy átláthatóságú, igen sima felületű lapokat eredményez – kitűnő vastagság-kontroll (kisebb mint 20 µm-es eltérés) és kisebb mint 1 µm-es hullámosság mellett. A kis hőkiterjedési 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 gyártó-

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

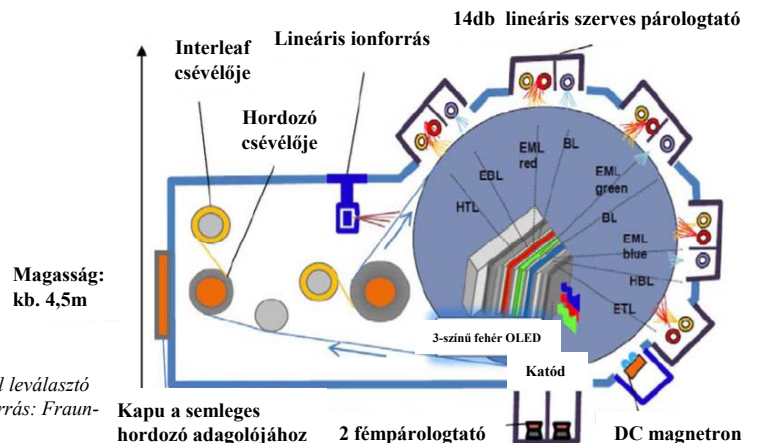
[100] Fraunhofer COMEDD: „Roll-To-Roll Line for Organic LED and Solar Cells”, (<http://www.comedd.fraunhofer.de/content/dam/comedd/common/products/COMEDD/r2re.pdf>)

[101] P. Groen: „Roll-to-Roll Processing for Solution Processed OLED Devices”, DOE SSL Workshop, San Francisco, CA, 2015. jan. 28. (http://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/groen_r2r-oled_sanfrancisco2015.pdf)

sorok használatát téve ezzel lehetővé. Olcsóbb üvegformákat (pl. szoda-mész-szilikium ablaküveget) is vizsgálnak, de ezek általában csak 1mm-nél vastagabb kivitelben állnak rendelkezésre. Valamennyi üveghordozó esetén ügyelni kell arra, hogy a felület sima legyen, a „hegy-völgy” egyenetlenség lehetőleg ne haladja meg a 10nm-t.

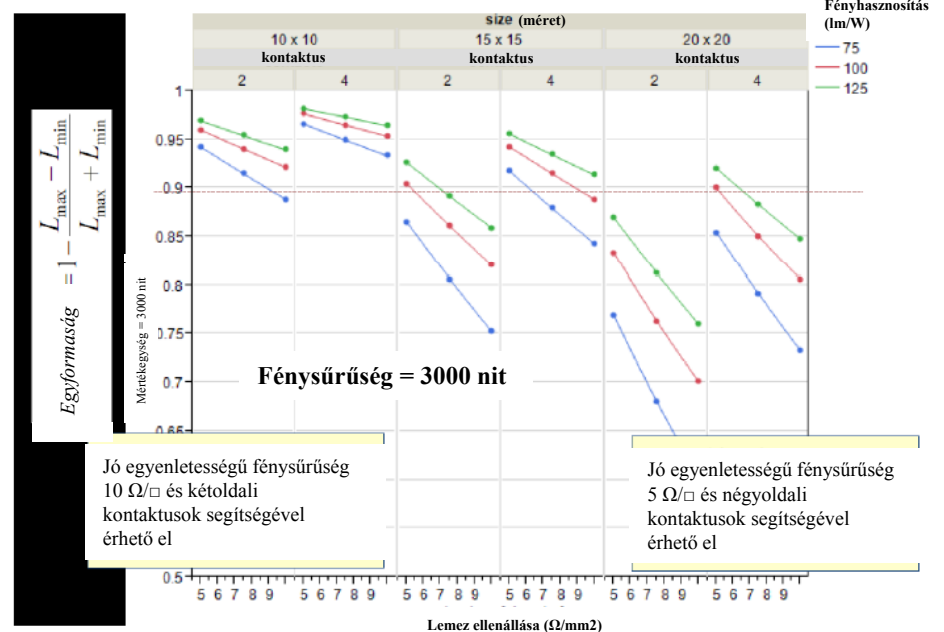
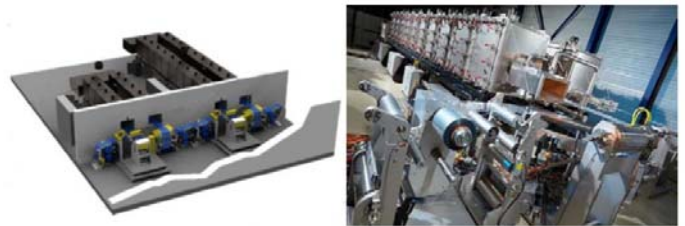
Az OLED kijelzőknél előnyben részesített műanyag hordozó a poliimid, mivel max. 350 °C-os megmunkálási hőmérséklet elviselésére képes. Ez a nagy hőállóság igen értékes a nagy teljesítmőképességű vékonyréteg-tranzisztorok gyártásánál, az OLED-es világítópanelekhez azonban nem szükséges. A hatékony nedvességgátló réteggel ellátott átlátszó poliimid ára azonban megközelíti a kijelző-minőségű üveggel (ha nem magasabb annál). Vannak olcsóbb alternatívák is, például a polietilén-tereftalát (PET) és a polietilén-naftalát (PEN). Noha ezek nem viselik el az OLED-kijelzők vékonyréteg-tranzisztoros hátpaneljeinek gyártásánál használt magas feldolgozási hőmérsékletekkel, 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. Alkalmassak magas hőmérsékleten történő feldolgozásra, és burkolóanyagként könnyű, vékony alternatívát kínálnak az üveggel szemben. Azonban mind a hordozónak, mind a burkolóanyagnak átlátszónak kell lennie, ezért a fémfóliákat egyik célra sem lehet használni. A felületi egyenetlenség ismét csak gondot okozhat, mivel a rozsdamentes acél hengerek „hegy-völgy” egyenetlensége akár 1µm is lehet. Ezért a felületi egyenetlenséget kontrollálni kell, például polírozással vagy planarizáló réteg alkalmazásával. A fémfóliák jól alkalmazhatók rugalmas panelekhez és eszközökhöz, feltéve, hogy a meghajtás nem vezet gyűrődéshez. Mind rozsdamentes acélból, mind alumíniumból készült fóliákat sikerrel használták OLED-prototípusok előállításához. A hordozó megválasztásától függetlenül meg kell előzni a felület szennyeződését, és a felület tisztítása nagyon fontos. Szerencsére azonban úgy tűnik, hogy egyedi tervezésű berendezésekre nincs szükség, mivel megfelelő eszközöket már kifejlesztettek a félvezetők, lapos panelek és fénylelemek gyártásával foglalkozó iparok számára. A gyártási folyamat minden lépésénél robotokra van szükség, és a rotá-



6.16 ábra – Roll-to-roll leválasztó gépsor Drezdában (Forrás: Fraunhofer COMEDD [100])

6.17 ábra – Kísérleti szerves elektronikai roll-to-roll gyártósor az eindhoveni Holst Központban (Forrás: Pim Groen, DOE SSL Workshop, 2015 [101])



6.18 ábra – Fénysűrűség egyenletessége az anódlemez ellenállásának függvényében (Forrás: Cambrios, OLED World Summit, Berkeley, Kalifornia, 2014. szeptember [102])

ciós hengerrel történő feldolgozásnál a belső felületnek lehetőleg nem szabad semmilyen szerszámmal érintkezésbe lépnie.

Elektroda-struktúrák

Az anód- és katódstruktúráknak biztosítaniuk kell az áram egyenletes eloszlását a panel mentén és lehetővé kell tenniük az elektronok és lyukak hatékony injektálását a szerves rétegekbe. A struktúrák legalább egyikének optikailag átlátszónak kell lennie. Szokásos módon az anódot készítik átlátszónak, a katód pedig félig átlátszó

vagy erősen tükröző. Ebben az esetben az áramnak a katód mentén történő egyenletes eloszlása nem túl nehéz, de ugyanezt elérni az anódnál komoly kihívás, különösen nagy panelek esetén.

Egy jól működő anódstruktúrához gondos kompromisszumra van szükség a rétegellenállás és a fényelnyelés között. Ez a kompromisszum különösen nehéz, ha a meghajtó feszültség kicsi és az áram-

[102] R. Gupta: „Silver Nanowires: Enabling the Trends and Benefits of OLEDs”, OLED World Summit, Berkeley, CA, 2014. szeptember

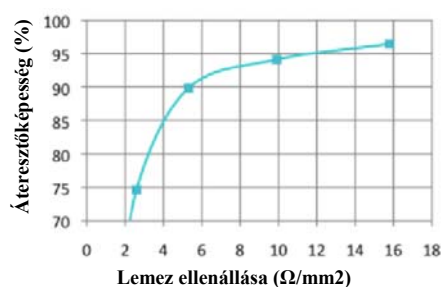
sűrűség viszonylag nagy. Az anódok tervezése és gyártása egyszerűbb, ha több szerves „rétegezést” használnak. Például egy három rétegezésű OLED esetén a meghajtó feszültség kb. 2,5-szeresére nő, a szükséges áramsűrűség pedig kétharmadára csökken az egy-rétegezésű változatokkal összehasonlítva.

Amint az a 6.18 ábrán látható, a fényemisszió egyenletessége a panel mentén növelhető a panel hatásfokának növelésével és a mind a négy oldalról történő meghajtással. Ezeket az eredményeket egy két-rétegezésű OLED esetén kapták.

Ezek az adatok azt mutatják, hogy 85%-nál nagyobb egyenletesség érhető el $5 \Omega/\square$ körüli rétegelLENállással a jelenleg rendelkezésre álló mérettartományba eső panelek esetén, feltéve, hogy elegendő oldalsó kontaktust használnak. Sajnos ilyen alacsony rétegelLENállást nehéz elérni indium-ön-oxid (ITO) esetén, ha a feldolgozás alacsony hőmérsékleten történik, illetve a jelenleg fejlesztés alatt álló alternatív átlátszó vezetők többségénél is. Rolithnak és Cambriosnak azonban sikerült $5 \text{ Ohm/egységnyi felület } (\Omega/\square)$ nagyságú rétegelLENállást elérnie ezüst nanohuzalból készített, 90% optikai átlátszóságú bevonatok esetén, amint az a 6.19 ábrán látható [103, 104].

Egy alternatív megközelítés – amelyet először az Osram alkalmazott Orbeos paneljeinél – 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 „ömlasztott” formában választjuk le, a rácsvonalak közötti hézagokat maratással kell eltávolítani, ami nehezíti a szemcsék kontrollját, és a leválasztott anyagok nagyobb része kidobandó vagy újra kell hasznosítani.

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 ömlasztott ezüsthé, míg a jelenleg fejlesztés alatt álló festékek az ellenállás-deficitet az ömlasztott anyag ellenállásának 3-4-szeresére csökkenthetnék. A nyomtatott csíkok ellenállása jelentős mértékben függ



6.19 ábra – Optikai áteresztőképesség a lemezenállásnak függvényében ezüst nanohuzal-bevonatok esetén (Forrás: Rahul Gupta, Cambrios, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, 2015. január [104])

az alkalmazott kikeményítési módszertől. Hőhatással történő kikeményítéssel hagyományos festékek alkalmazása esetén az ömlasztott anyagénál 3-4-szer nagyobb ellenállás érhető el magas (pl. 200°C -os) hőmérsékleten. A termikus kikeményítés azonban viszonylag lassú folyamat, ezért a figyelem a fotonikus keményítés felé fordult. A Novacentrix $2.8 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ ellenállást ért el a PChem által kifejlesztett nano-ezüst festékkel bevont PET anyagon [105]. Ez csupán kétszer akkor, mint az ömlasztott („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 anódlamra nehezedő ellenállás-követelményeket, így egyéb tulajdonságokon – pl. az injekciós hatásfokon – 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.

A katód oldalon a korai OLED-ek báriumot vagy kadmiumot használtak igen kis kilépési munkájuk okán, ami lehetővé tette az elektroninjekciót. Jelenleg azonban mérsékelt kilépési munkájú anyagokat használnak – alumíniumot vagy ezüstöt – elektroninjekciós réteggel kiegészítve, amely gyakran kis kilépési munkájú elemeket – például lítiumot vagy céziumot – tartalmaznak. A katód félig áteresztő lehet, ha az anyagréteg igen vékony, de standard áttetsző eszközöknél, amelyek az anódon keresztül emittálnak, a fémréteg vastagabb és tükrözőbb. A katód-leválasztás sebességhatároló lépés lehet az in-line rendszereknél. Az előnyben részesített módszer a termikus párologtatás,

de ez viszonylag lassú. A porlasztás gyorsabb, de az alul lévő szerves rétegek megsérülhetnek.

Aktív szerves rétegek

Egy ideális OLED-eszközben egyetlen szervesanyag-réteg kiegyenlített elektron- és lyukáramlást tudna létrehozni vörös, zöld és kék fotonok előállításához a rekombinálandó elektron-lyuk párokból, és az elektromos energia fénné történő átalakítása olyan hatékony lenne, hogy nem maradna energia a szerves molekulák károsítására és az eszköz élettartamának lerövidítésére. Az ilyen egyszerű struktúrák ideálisak lennének a megoldási folyamat számára, de a versengő technológiák által a fényhasznosítás, a fényminőség és a megbízhatóság tekintetében diktált magas követelmények az OLED-világítás legtöbb fejlesztőjét arra ösztönözték, hogy olyan bonyolultabb struktúrák felé mozduljanak el, amelyek az OLED kijelzőknél alkalmazott gőzfázisú leválasztással nagyobb hatásfokkal alakíthatók ki. A vörös, zöld és kék fényhez gyakran különálló emittáló rétegeket vezettek be. Az emittáló tartományok és az elektródák közé az injekciót, a transzportot és a lyukak és elektronok blokkolását optimalizáló speciális rétegeket helyeztek el. Az emitter rétegek több sorozatát egymásra építették úgy, hogy közéjük töltésgeneráló rétegeket helyeztek el, így több foton keletkezhet ugyanolyan áramsűrűség esetén. E rétegek többsége több komponenst tartalmazhat olyan kialakítással, amely csökkenti a károsítási és interfész-problémákat.

Az ilyen komplex struktúrák előállításához használt gőzfázisú leválasztási folyamatok kihozatala állandóan növekszik. Legújabbban 50%-ot meghaladó kihozatalról számoltak be, az ár és megbízhatósági célok eléréséhez azonban több mint 95%-ra van szükség. Az eszközök konzisztenciája még mindig probléma maradt, különösen a színvezérlés vonatkozásában.

A több rétegből álló együttesek kialakítása nehezebbnek bizonyult oldatos feldolgozási eljárásokkal, különösen azért, mivel

[103] Rolith: „NanoWeb: Sub-Micron Transparent Mesh Conductors”, (<http://www.rolith.com/applications/transparent-conductive-electrodes>)

[104] R. Gupta: „Silver Nanowire Electrodes: Enabling Flexible, Transparent, and Cost Effective OLED Lighting”, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, CA, 2015. jan. 27. (http://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/gupta_oled-integration-SanFrancisco2015.pdf)

[105] M. Mastropietro: „Overview of Transparent Metal Mesh Electrode Technologies”, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, CA, 2015. jan. 29. (http://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/mastropietro_oledmfg_sanfrancisco2015.pdf)

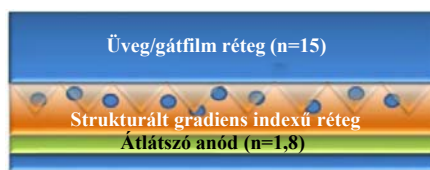
az egyik rétegnél használt oldatok károsítják az alatta lévő anyagokat, és a hagyományos kikeményítési és szárítási lépések időigényesek. Az oldatos feldolgozás legtöbb szószólója az egyszerűbb struktúrákat szereti, amelyeknél az egyes rétegekben további funkciók érhetők el. Ennek megvalósítása azonban ez idáig nehéznek bizonyult és járulékos teljesítőképességmentéssel járt mind az oldattal feldolgozott kis molekulák, mind a polimer anyagok vonatkozásában.

Javított gyártási módszerek számos kritikus teljesítőképességi problémát megoldhatnak. A 2015. évi szilárdtest-világítási K+F workshopon az a javaslat merült fel, hogy a kék foszforezenciás emittálórétegek degradációs problémáját az emissziós réteg adalékanyag-koncentrációjának fokozatos kialakításával mérsékeljék a rekombinációs tartomány kiszélesítése és az exciton felhalmozódás csökkentése érdekében. A jobb szinkronizáció szorosabb kontrollt igényel az adalék- és gazdayanyag viszonylagos sűrűsége tekintetében. E kihívások kezelésére az érzékelők és a folyamatvezérlők további fejlesztésére lehet szükség.

Vastagabb töltésinjektáló vagy töltéstranszportáló rétegek használata segíthetne az elektródák érdességéből származó zárlatok elkerülésében és a felületi plazmonok gerjesztéséből adódó veszteségek csökkentésében. De ehhez esetleg nagyobb vezetőképességű anyagokra lehet szükség, hogy ne növekedjen meg a transzportréteg effektív ellenállása.

Fénykivonás-növelő struktúrák

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 belemarítani a felületbe. A legáltalánosabb eljárás egy olyan struktúrált polimerfilm laminálással vagy in situ leválasztással történő kialakítása, amelynek törésmutatója illeszkedik a hordozójához. Laminálófilmek 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,



6.20 ábra – Fokozatos törésmutatójú hibrid fénykivonó réteg (Forrás: Gene Chen, Pixelligent, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, CA, 2015. január [106])



6.21 ábra – Többrétegű gát-bevonat a nedvesség- és az oxigénrészecskék behatolásának megakadályozására (Forrás: Pim Groen, Holst Centre, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, CA, 2015. jan. [101])

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. A mikrorészecskéknél nagy törésmutatójú gazdayanyagba történő beillesztésével létrehozott fényszóró filmek is nehezebben megvalósíthatónak bizonyultak. A kétféle megoldás előnyeinek ötvözéséhez és a Fresnel-féle visszaszórás csökkentéséhez ambiciózus vázlatot mutat be a 6.20 ábra. Az ezzel a megoldással összefüggő gyártási problémákat jelenleg egy az USA Energiaügyi Minisztériuma által támogatott projektben vizsgálják.

Tokozás

Az új tokozási eljárások alkalmazásában jelentős előrehaladás mutatkozik globális szinten is. Az LG Chem egy ún. „homlokzat-tömítő eljárást” (Face Sealing Process-t) használ, amely nyomásra érzékeny ragasztóanyagból, akrilos polimerből, epoxigyantából és kationos fotopolimerizációs iniciátorból hoz létre egy fényre kikeményedő réteget (Bővebben: <http://www.lgchem.com/global/display/oledencapsulation>). A kompozitréteg tartalmazhat nedvességelnyelő komponenst is, amely felhasználható a hagyományos szárítóanyag és légrés helyettesítésére – kitöltve az OLED-struktúrák és a fedlap közötti teljes tartományt. Úgy tűnik, hogy ezt az eljárást használták vékony üveg, fém és poliamid burkolatok esetén is.

A Philips és az Osram is megjelent olyan termékekkel, amelyek vékony multiréteges

gát-bevonatokat használtak, ezzel 1 mm alá csökkentve a panel vastagságát. Eljárásaik részleteit még nem hozták nyilvánosságra, de jelentős kutatómunkát fektettek ebbe a megközelítésbe az eindhoveni Holst Központban, és a felhasznált anyagokkal kapcsolatosan utalások találhatók szabadalmi bejelentésekben. Az alapvető megközelítés – amelyben a Vitec és a 3M jár élen – úgy tűnik, hogy sűrű szilikon- (vagy fém-) nitridekből vagy oxidokból álló többszörös rétegekre történő leválasztáson alapul – jellemzően plazmával aktivált kémiai rétegleválasztás (PECVD) vagy atomi rétegleválasztás (ALD) felhasználásával, szerves rétegek közbeiktatása mellett. A szerves rétegek megakadályozzák a rács-hibáknak a nagysűrűségű szerves rétegeken keresztüli terjedését, és tartalmazhatnak aktív nedvesség-abszorbenseket és oxigénlekkötőket. A 6.21 ábra a Holst Központban kifejlesztett hasonló struktúrát mutat be, amely roll-to-roll eljárással gyártható.

Az elmúlt 12 hónap másik jelentős fejlődése a többrétegű gát-filmek és nyomásra érzékeny ragasztóanyagok kereskedelmi forgalomba kerülése volt a 3M jóvoltából [107]. Bár az értékesítések hajtóerejét a kvantumpon alkalmazások adják, amelyekhez a gát-tulajdonságok kevésbé fontosak, nyilvánvaló, hogy két ilyen réteg laminálása alkalmas az OLED-es fényforrások és kijelzők védelméhez.

A többrétegű gát-filmek előállítási költsége még mindig ugyanolyan nagyságrendbe esik, mint a kijelző-minőségű üvegé, és eddig még nem elégítette ki az OLED-es világítás távlati célkitűzéseit. A szerves rétegek nagyfelületű tintasugaras nyomtató berendezésének fejlesztésében a Kateeva által elért legújabb eredmények és a Veeco sikerei a szerves anyagokhoz alkalmas atomi rétegleválasztó (ALD) berendezés fejlesztésében azonban az alacsonyabb árak ígéretével kecsegtet a jövőben [108, 109].

[106] G. Cooper and G. Chen: „Light Extraction for OLEDs”, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, CA, 2015. jan. 28. (http://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/cooper_oledintegration_sanfrancisco2015.pdf)

[107] F. McCormick: DOE SSL R&D Workshop, Tampa, FL, 2014. jan. 29. (http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/mccormick_barrier_s_tampa2014.pdf)

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

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

Termék-konzisztencia és termék-megbízhatóság

A tökéletesített színekonzisztencia és a panelek működése alatti korai kiesések kiküszöbölése két olyan gyártási kérdés volt, amely reflektorfénybe került az USA Energiaügyi Minisztériuma által rendezett ideai szilárdtest-világítási workshopon.

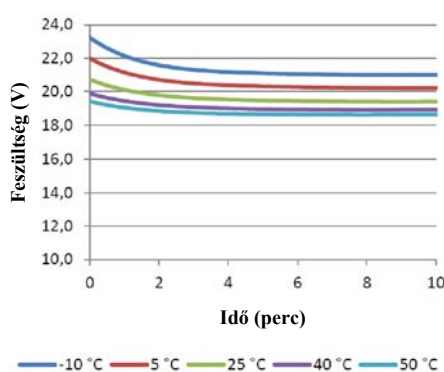
A színváltozatokat elsősorban az emittáló molekulák számának eltérése okozza. A színekonzisztencia ezért a rétegvastagságok és az egyes rétegekben lévő adalékanyag-sűrűségek pontos kontrollját igényli. Miután a párologtató források érzékenyek a hőmérséklet és más működési paraméterek változásaira, in situ diagnosztikára és visszacsatolt vezérlésekre van szükség.

A pontos folyamatmodellek kialakítása – amelyek mérésekkel ellenőrizhetők a leválasztási rendszer felszerelése során – azt jelenti, hogy nincs szükség a leválasztás egyforma voltának helyszíni ellenőrzésére. A párologtató kamrából kikerülő gőz sűrűségét azonban valós időben mérni kell, rendszerint kvarckristályos mikromérlegek (QCM) segítségével [110]. A kvarckristályos mikromérlegek reagálása változik a leválasztott anyag vastagságának növekedésével, ezért azokat a helyszínen tisztítani vagy rendszeresen cserélni kell. A korai kieséseket rendszerint az észrevétlen hibák növekedése okozza. Ezeket szemcsék vagy az elektróda struktúrák egyenetlenségeiből származó zárlatok okozhatják. A tokozóanyagban lévő miniatur tűhegylyukak vagy repedések is okozhatnak gyors paraméterromlást.

Nyilván szükség van a szemcsék kialakulásának gondosabb ellenőrzésére, és a rács hibák érzékenyebb detektálása is segíthet. A legtöbb gyártó szükségesnek tartja valamennyi panel égetését a korai kiesések kiderítése érdekében, de ez időigényes és költséges. Gyorsabb módszerek ennek kiderítésére nagyon értékesek lennének.

6.2.3 Az OLED-es lámpatestek gyártása

A jelenlegi gyakorlat szerint az OLED-es lámpatestek gyártásához gondoskodni kell a panelek rögzítéséhez szükséges mechanikai keretről és a tápforráshoz történő elektromos csatlakozásról. Gyakran részesítenek előnyben könnyű, karcsú anyagokat, amelyek hozzáillenek magához a karcsú panelhez. Ez idáig hagyományos gyártási módszereket használtak, de megvan a lehetőség háromdimenziós nyomtatás alkalmazására is egyedi lámpatestek gyors előállításához. Miután a tömeggyártásban készülő paneleket igen sokféle lámpatestbe kell beszerezni, hasznos lenne a csatlakozók szabványosítása.



6.22 ábra – Az OLED-ek meghajtófeszültségének változása a környezeti hőmérséklet függvényében a bemelegedési fázis alatt (Forrás: Philips, Design-in Guide: Philips Lumiblade OLED Panel Brite Family [111])

A jövőbeni K+F tevékenység egyik lehetséges területe olyan meghajtók kifejlesztése, amelyek kifejezetten alkalmasak az OLED-ek elektromos jellemzőihez és így hatékony fényszabályozást tesznek lehetővé. A kereskedők jelenleg egy vagy több kimenetű meghajtókat kínálnak a meghajtandó panelek számától függően. A Philips például az FL300-as paneljéhez egy 24V egyenfeszültségű meghajtót kínál, amely kompatibilis DMX, DALI, analóg vagy TouchDim protokollokhoz – 35 eurós áron. Alternatívaként van nekik egy 8 kimenetű, több panel táplálására alkalmas meghajtójuk is 108 euróért [111]. A meghajtónak – amellet, hogy fényszabályozókkal és más vezérlőkkel kompatibilis – a panelek különböző áram-feszültség karakterisztikáihoz is alkalmasnak kell lennie. A 6.22 ábra bemutatja, hogy a Philips hat-rétegezésű FL300-as paneljének megkívánt áramsztíjéhez szükséges feszültség hogyan változik a működtetési feltételektől és a kezdeti felmelegedési fázisban.

6.2.4 Az OLED-ek költség-előrejelzései

A komponenseknél (pl. hordozó, tokozóanyag, elektróda és szerves rétegek) a panel és a lámpatest szintjén az OLED-gyártás költsége erősen függ a gyártási volumenektől és a kihozattaltól. S noha valószínűnek látszik, hogy a panelek fényműködésére a 2010-es többéves szilárdtest-világítási MYPP programban lefektetett 100 lm/W-os cél teljesülni fog a kereskedelmi forgalomba kerülő ideai paneleknél, a gyártási költségek jelenleg legalább tízszer akkorák, mint a 90 USD/m²-es célszám (http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_mypp2010_web.pdf).

Az USA Energiaügyi Minisztériumának költség-céljait mindig az általános

világítással kapcsolatos piaci elvárások szabták meg. Egyes piaci rések számára az OLED-es lámpatestek már versenyképesek a hasonló LED-es lámpatestekkel. De ahhoz, hogy az OLED-ek jelentősen hozzájárulhassanak a szilárdtest-világítás elfogadásához és az energiamegtakarításhoz, fontos, hogy a költségszökkenés folytatódjon.

A költségeket lehet USD/m² vagy USD/klm alapon is értékelni. A fejlődés jelenlegi szakaszában a költségek az anyagok és a feldolgozás tekintetében is jobban kötődnek a panel területéhez, mint a fényáramhoz. Ezért nagyobb a nyomás a felületegységre eső fénykibocsátás (fényesség) növelésére az eszközstruktúrák bonyolultságának növelésével, mint arra, hogy nagyobb eszközök szülessenek. Az OLED-panelek költségeinek alakulásában az egyik kritikus tényező a fényességgel kapcsolatos korlát, azaz hogy a fényforrás maradjon a szemnek kellemes és ne kelljen elrejtetni azt a tekinteteket elől. Egy másik tényező, amely jelentős vitához vezetett, a költség és az eszköz összetettsége közötti kompromisszum. Egyesek azzal érvelnek, hogy a kevesebb rétegből álló, egyszerűbb eszközök alkalmasak a roll-to-roll feldolgozásra és költséghatékonyabbnak fognak bizonyulni, míg mások a mikroelektronikai ipar tapasztalataira hivatkozva arra mondják, hogy az eszközök bonyolultságának növelése és méretük csökkentése vezet a leggyorsabb költségszökkenéshez.

Anyagköltségek

A kereskedelmi sikerhez fontos a nyersanyagok árának csökkenése. Bár a vállalatok hajlandóak lehetnek lemondani a berendezések értékcsökkenésének megtérüléséről és más fix költségről a fejlesztési fázis során, nagyon valószínűtlen, hogy áraikat az egyes panelek vagy lámpatestek hozzáadott előállítási költsége alatt állapítsák meg. Hosszabb távon az anyagokra kifizetett számla gyakran a hasonló elektronikus eszközök költségének a felét reprezentálják tömeggyártás esetén.

Az anyagok és komponensek beszerzésénél a panelgyártóknak gyakran meg kell téríteniük beszállítóik fejlesztési költségeit és más kiadásait is a nyersanyagok árán

[110] J. Hamer: „Problems and Opportunities in OLED Lighting Manufacturing”, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, CA, 2015. jan. 29. (http://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/hamer_oled-mfg_sanfrancisco2015.pdf)

[111] Philips: „Design-in guide: Philips Lumiblade OLED Panel Brite Family”, 2014. augusztus (http://www.lighting.philips.co.uk/pwc_li/gb_en/subsites/oem/download/OLED/2014-Philips-Lumiblade-OLED-Panel-Brite-Family-Design-in-Guide.pdf)

felül. Ez a helyzet az OLED-panelek két kritikus komponense, a foszforeszkáló emitterek és az átlátszó vezetők esetében.

A Universal Display Corporation több mint 20 éve foglalkozik foszforeszkáló emitterek fejlesztésével, több mint 350 millió USD-t költve kutatás-fejlesztésre és szabadalmak megvásárlására. Az 1994-ben alapított vállalat első nyereséges éve 2011 volt [112]. Habár az elmúlt években az eladások jelentősen nőttek, a gyártási költségek még mindig csak kis részét teszik ki a vállalat kiadásainak, 2014-ben mindössze azok 30%-át. Ezért a vállalat panelgyártási árait sokkal inkább a fix költségei irányítják, semmint a foszforeszkáló anyagok gyártási költségei. Az OLED-kijelzőgyártók sikereinek köszönhetően az értékesítési volumen megnőtt, ezért a foszforeszkáló emitterek ára az OLED-panelek árának 2%-a alatt volt tartható. Az egységfelületre eső költség azonban 100USD/m² körüli, ami nincs összhangban az OLED-világítás árára vonatkozó célkitűzéssel.

Szinte minden OLED-panel indium-ön-oxidot (ITO-t) használ átlátszó vezetőként. A szükséges nyersanyagok ára alacsonyabb 0,50 USD/m²-nél, de a mintázattal ellátott ITO-ból készült hordozók ára gyakran már a 20 és 30 USD/m² közé esik. Ezt az árat főként a feldolgozási költségek – különösen, mivel a mintakészítés rendszerint költséges litográfiával jár – és a beszállítók fix költségei határozzák meg. Mivel az OLED-panelekhez megfelelő teljesítőképességű átlátszó alternatív vezetők piaca igen korlátozott, ezek ára inkább a fejlesztés, semmint a gyártás költségeitől függ.

Amíg az OLED-es világítás piaca kicsi marad, jelentős költségcsökkentés legvalószínűbben a többi alkalmazásból adódó sinergiából következhet. Az OLED TV-k értékesítésének sikere a szerves anyagok árcsökkenéséhez vezethet, mivel egy szokásos TV-készülék felülete százszor akkora, mint egy okostelefoné, ezért a költségkorlátok szigorúbbak. Az alternatív átlátszó vezetők – például az ezüst nanohuzalok – fejlesztését az érintőképernyős piac hajtja. A rugalmas kijelzőkhöz és a kvantumponthoz tartásához vékonyfilm-tokozásra van szükség, ami javítja számos folyékonykristályos kijelző színminőségét. Az OLED-es világítópanelek teljesítőképesség-követelményei azonban gyakran szélsőséesebbek, mint más alkalmazásokéi, ezért a technológia további finomítására van szükség.

	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
Értékcsoökkenés (USD/m ²)	1 050	600	125	60	35
Szerves anyagok	200	150	100	35	15
Szervetlen anyagok	200	200	120	50	30
Munkabér	150	100	20	10	5
Egyéb fix költségek	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

6.4 táblázat – Hagyományos módszerekkel gyártott panelek becsült költsége

Összes panelköltség

A 6.4 táblázat egy lehetséges forgatókönyvet mutat be a 2025-ös 100 USD/m² költségcél eléréséhez. Az értékcsoökkenési leírás számítása ötéves, lineáris módon történ.

A költségcsökkentés többségét várhatóan a gyártási volumen növekedése eredményezi. Ez a forgatókönyv a kijelzőgyártók által megtett utat követi: jelentős növekedés a hordozó méretében, megtartva a hagyományos „köteget” feldolgozóstruktúrát. Ez a megközelítés magas beruházási költségekkel jár, ami korlátozhatja a gyártók számát. Alternatív megközelítés lehetne a ciklusidő agresszív csökkentése a hordozó méretének viszonylag kis értéken tartása mellett, mint ahogy az az optikai lemezek iparában történik. Az azonban eddig még nem tisztázott, hogy 1 percnél sokkal rövidebb ciklusidőket el lehet-e érni.

A roll-to-roll gyártás hívei gyakran emlegetik a ciklusidő jelentős csökkentésének a lehetőségét. Ezt az előnyt azonban még igazolni kell. Az OLED-paneleknek a Konica-Minolta új gyártósorával történő sikeres gyártása értékes bepillantást enged a roll-to-roll gyártás gyakorlati kivitelezésébe. A cél havi 1 millió darab panel előállítása, ami 100 000 m² nagyságrendű évi kapacitást reprezentálna. Ekkora gyártási szinten a panelenkénti amortizációs költség 200 USD/m² körül lenne, ami jelentős csökkenést jelentene. A Konica-Minolta még nem hozott nyilvánosságra részleteket a roll-to-roll gyártósoráról, de ha a nyomóhenger szélessége 600 mm, akkor a henger szükséges sebessége minimum 0,5 m/perc lenne.

Az nTACT-tól és a Holst Központtól származó adatok azt mutatták, hogy a kritikus gyártási lépések közül néhány ezzel összemérhető hengersebességgel történhetne [113]. Például:

- a mintázott rétegek hasított szerszámmal (slot-die) történő bevonása 3 m/perc-cel végezhető el;
- a nanoezüst festékek ofszeteljárással történő szinterezéséhez max. 20 m/perc-re lehet szükség;
- a többrétegű barrier- (gát)filmek kialakítása 4 m/perc sebességgel történhet.

Ilyenformán a gyártás fő kihívása annak demonstrálása, hogy valamennyi szükséges lépés elfogadható kihozatal mellett egymás után, sorrendben végrehajtható.

A lámpatestek költségei

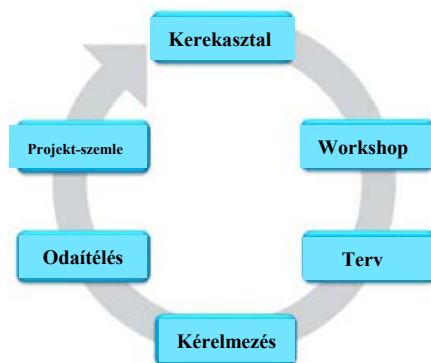
A jelenlegi értékesítési volumenek mellett egy OLED-panelnek lámpatestté történő átalakításának költségét főként a termék tervezésével, a szerszámozással és a meghajtó kifejlesztésével összefüggő fix kiadások határozzák meg. Mint a LED-eket vagy hagyományos fényforrásokat használó dekorációs lámpatesteknél, drága anyagokat használnak fel a vevők figyelmének felkeltésére. A mechanikai védelem fontos, de a hőelvezetés kevésbé problémás, mint más technológiáknál. A modulrendszerű csatlakozók és az alkalmazható meghajtók kifejlesztése segíteni fog e költségek csökkentésében, miközben megmarad a sokféle formai kialakítás képessége.

[112] UDC: „Annual Meeting of Shareholders”, 2013. jún. 20. (<http://www.udcoled.com/downloads/Investor%20Docs/2013%20Annual%20Meeting%20Slides.pdf>)

[113] M. Friedrich: Interviewee, (Private Communication). [Interview]. 2015. április

7.0 K+F terv

A szilárdtest-világítás teljes energiahatékonysági potenciáljának eléréséhez folyamatos K+F tevékenységre van szükség. A gyors fejlődés ellenére a szilárdtest-világítás még korai szakaszában van. Az Egyesült Államok energia- és széndioxid-megtakarítása tekintetében a lehetőségeknek még több mint 95%-a kiaknázatlan. A technológia teljes potenciáljának kiaknázásához folyamatos innovációra és áttérésre van még szükség az anyagok, folyamatok, terméktervezések, vezérlőrendszerek és a gyártás terén.



7.1 ábra – A szilárdtest-világítási program bejövő információi (Forrás: James Brodrick, DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, 2015. jan. [114])

7.1 Folyamat és diszkusszió

Az USA Energiaügyi Minisztériumának szilárdtest-világítási programja a szilárdtest-világítás lehetőségeinek kibontakoztatását a technológia fejlesztésére és az energiamegtakarítások elősegítésére irányuló K+F tevékenységek irányításával és koordinálásával segíti (<http://energy.gov/eere/ssl/aboutsolid-state-lighting-program>). A program K+F elemei a következők: alaptechnológiai K+F, termékfejlesztési és gyártási K+F és technológiaadaptációs K+F. Az alaptechnológiai K+F a szilárdtest-világítás alkalmazott kutatására fókuszál a fényhasznosítás, a teljesítőképesség növelése és a költségek csökkentése érdekében. A termékfejlesztési projektek a kereskedelmi forgalomban kapható anyagok, eszközök vagy rendszerek tökéletesítésén munkálkodnak. A gyártási K+F a költségek csökkentésén és a minőség javításán dolgozik a gyártóberendezések, gyártási folyamatok és a monitorozás tökéletesítésével, amelynek további előnye, hogy erősíti az USA szilárdtest-világítási gyártásban betöltött vezető szerepét. Végül az alkalmazott technológiai K+F az újonnan megjelenő termékek helyszíni és laboratóriumi kiértékelését szolgálja a teljesítőképességgel kapcsolatos visszajelzések és a technikai problémák felderítése érdekében.

A program a 7. ábrán látható szisztematikus folyamatot használja a különböző érdekeltektől beérkező jelzések összegyűjtésére a kritikus technológiai és alkalmazási problémák tisztázása érdekében. A program minden évben rendez kerekasztal-beszélgetéseket a kritikus technológiai kérdések meghatározása és a megfelelő K+F lépések elindítása érdekében. Ezeket az információkat azután az évenként megrendezésre kerülő K+F workshopok

megtervezéséhez használják fel a kulcsfontosságú kérdésekkel kapcsolatos további vita elősegítésére és a szükséges lépések prioritásának megállapítására. E megbeszélések eredményét használják fel a K+F terv aktualizálására és a K+F feladatok prioritásának meghatározására. Ezek a kiemelt K+F feladatok ezután a kérelmezési, majd a következő odaítélési folyamathoz kerülnek. A portfólió projektjeitől érkező visszacsatolás segít a kihívások következő körének összeállításában. Ezután a folyamat megismétlődik.

A program továbbra is felhasználja az ún. FOA (finanszírozási lehetőségek közzététele) K+F támogatási folyamatot mint elsődleges mechanizmust a kulcsfontosságú szilárdtest-világítási K+F tevékenység támogatására és a szilárdtest-világítási technológia állapotának fejlesztésére. Sajnos, nem minden K+F téma alkalmas a szokásos FOA folyamathoz, amely olyan, versenyeztetéssel kiválasztott K+F projekteket támogat, amelyeknek rövid (1-3 év) az időtartama és az a célja, hogy fejlessze az alkalmazott tudományok megismerését és a technológia globális állapotát. Az Energiaügyi Minisztérium ezenkívül különböző támogatási mechanizmusokat is felhasznált azoknak a K+F témáknak a finanszírozásához, amelyek nem alkalmasak a FOA folyamathoz, hogy maximalizálja a program befolyását a világítási energia lehető legnagyobb megtakarításai érdekében.

A FOA folyamathoz nem alkalmas K+F témák támogatásához a szilárdtest-világítási program kooperált az Energiaügyi Minisztérium Energetikai Alap kutatások Osztályával, az NIST-vel, a Pacific Northwest National Laboratory-val és az NGLIA-val. A szilárdtest-világítási program a következő jelentősebb, nem-FOA kutatási projekteket támogatott:

- színhűség és színpreferencia az NIST-tel (<http://www.nist.gov/pml/div685/grp03/color.cfm>);
 - a LED-világítás megbízhatóságával kapcsolatos kutatás a LED Rendszerek Megbízhatósági Konzorciumán (LSRC) keresztül, amelyet az NGLIA tett lehetővé;
 - az alkalmazás széles körének kutatás-fejlesztése a Pacific Northwest National Laboratory segítségével;
 - az OLED-ek tesztelése versenyeztetéssel kiválasztott külső laboratóriumokkal.
- Idén a K+F feladatok prioritásával kapcsolatos megbeszéléseken több olyan K+F téma merült fel, amely előnyösebb a nem – FOA rendszerű K+F támogatáshoz. Ezekről a 7.6 pontban lesz szó.

7.2 A mérés technika fejlődése

7.2.1 Célok és előrejelzések

Az USA Energiaügyi Minisztériuma szilárdtest-világítási programjának magas szintű céljairól az 1.0 Bevezetés c. fejezetben volt szó, a jelen fejezet azonban ismertet néhány, a Minisztérium fényhasznosítási céljainak megvalósulásával kapcsolatos időközben született várakozást is, amely az eddigi teljesítőképességi adatokon alapul. Ezeknek az előrejelzéseknek legnagyobb részében tavaly óta nem történt változás, mivel a fejlődés többé-kevésbé a várható módon alakult. Az előrejelzések „a kategóriájában a legjobb” teljesítőképességen alapulnak, az adott működési feltételekre normalizált módon a fejlődés nyomon követhetősége érdekében, a program-cél az ipar számára azonban az, hogy ezeket a teljesítőképességi szinteket általánosan rendelkezésre álló, a technológia által ígért energiamegtakarítások teljesítéséhez szükséges termékekkel érje el. A fejezet későbbi részében kifejtett egyes feladatoknál számos, az illető feladathoz és az egyes célokhoz alkalmas mutató áll rendelkezésre, amelyek együtt lehetővé teszik a program céljainak az elérését.

A LED-ek fényhasznosításával kapcsolatos előrejelzések

A 7.2 ábra és a 7.1 táblázat megadja a LED-csomagok fényhasznosításának előrejelzéseit a meleg fehér és hideg fehér fényporkonverziós LED-ek esetére, a kísérleti adatokra és a 250lm/W-os felső

[114] J. Brodrick: "R&D Program Direction," DOE SSL R&D Workshop, San Francisco, CA, 2015. jan. 28. http://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/brodrick_rdupdate_sanfrancisco2015.pdf

aszimptota feltételezésére alapozva, amint azt az 5.1.1 pontban megvilágítottuk. A minősített adatpontokhoz tartozó feltételezett működési feltételek esetleg nem felelnek meg a jelenlegi gyakorlatnak, különösen a fényporkonverziós LED-eket monokromatikus LED-ekkel kombináló hibrid megoldásoknál vagy az áramesés minimalizálására alkalmazott alacsonyabb meghajtóáramok egyre elterjedtebb használata esetén. Ezek fontos innovációk a nagy fényhasznosítású termékekhez vezető úton. Mindenesetre standard áram vagy teljesítménysűrűség, fix működési hőmérséklet és korlátozott CCT és CRI tartományokba eső eszközök kiválasztása esetén lehetővé válik az emitterhatásfok (beleértve az áramcsökkenést és a termikus esést) és a lefelé konvertálási teljesítmény javulásának értékelése.

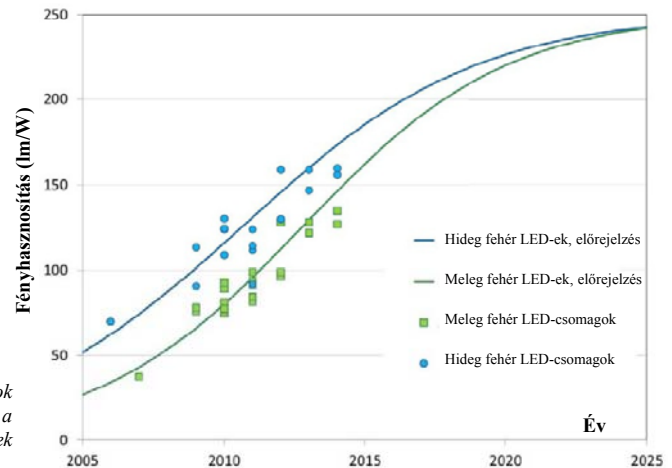
Az eddig előállított valamennyi termék fényporkonverziót vagy hibrid felépítést használt. A hibrid LED-ek gyorsabban eléri az aszimptotát, mint a fényporkonverziósak a keskeny vonalszélességű vörös LED-források könnyű hozzáférhetősége okán. A fényporkonverziós LED-ek fokozatosabban fogják megközelíteni a célt a kék LED-pumpa teljesítmény-átalakítási hatásfokának (PCE) növekedésével és amint keskenyebb vonalszélességű lefelé konvertáló anyagokat tudnak kifejleszteni (különösen a vörös forrásokhoz). A színkeveréses LED-ek még nagyobb fényhasznosítások ígéretét kínálják, ha a zöld és a borostyánsárga LED-fényforrásokat 60%-ot meghaladó teljesítmény-átalakítási hatásfokkal tudják majd előállítani.

OLED-ek fényhasznosítási előrejelzései

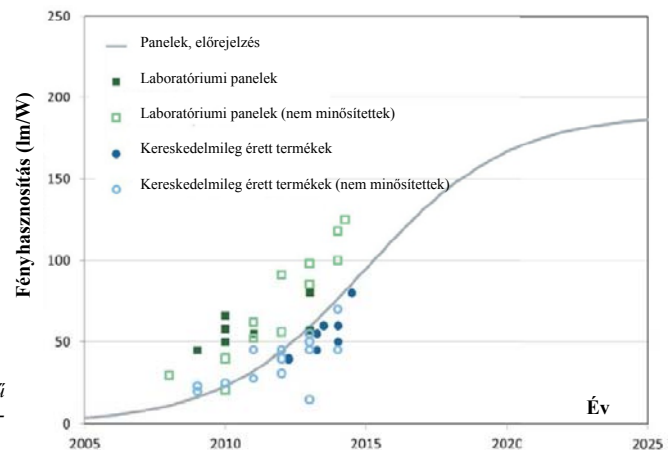
Amint azt a 6.1 fejezetben ismertettük, az OLED-ek teljesítőképességének minden aspektusában jelentős fejlődés volt tapasztalható. A legnagyobb kihívás az, hogy ezeket együtt elérve tovább javuljon a fénykivonás. A 7.3 ábra és a 7.2 táblázat az eddigi teljesítőképességre és a várható fejlődésre alapozva előrejelzéseket közöl az OLED-panelek fényhasznosítására. Meg kell jegyezni, hogy a panelekre vonatkozó adat meglehetősen kevés és meglehetősen változó, ezért a kivetített görbében jelentős bizonytalanság mutatkozik. Az egyes évekre vonatkozó kvalifikált adatok átlagát használtuk fel. A kvalifikált pontok 50cm²-es minimális felületű, 80-as vagy annál nagyobb színvisszaadási indexű és 2580 és 3710K közötti színhőmérsékletű panelek fényhasznosítási jelentéseit tükrözik. Ahol ezek a paraméterek ismertek, magát az adatpontot tekintettük minősítettnek.

Paraméter	Típus	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2025	Cél
LED-csomag fényhasznosítása	Hideg fehér	173	185	196	205	214	220	226	242	250
	Meleg fehér	146	162	177	190	202	212	220	242	250

7.1 táblázat – A LED-csomagok fényhasznosításának (lm/W) várható alakulása



7.2 ábra – LED-csomagok várható fényhasznosítása a kereskedelmileg érett termékek esetén



7.3 ábra – A fehér fényű OLED-panelek fényhasznosításának várható alakulása

Paraméter	2014	2015	2017	2020	Cél
Panellek fényhasznosítása	60	100	125	160	190

7.2 táblázat – Az OLED-panelek fényhasznosításának (lm/W) várható alakulása
Megjegyzés: Az előrejelzés a következő feltételezések mellett készült: CRI > 80, CCT = 2580-3710K.

A 7.2 táblázat összefoglalja az alacsony fényáram-csökkenés melletti 190lm/W fényhasznosítás elérése felé vezető utat. A táblázat azzal a feltételezéssel készült, hogy teljesen foszforeszkáló emittereket fognak használni kétlépcsős tandem struktúrákkal, de azért más útvonalak is elképzelhetők ugyanazon célok elérésére. A fényhasznosítási nyereségek és a fényáram-csökkenési célok elérése nem lesz elég ahhoz, hogy kereskedelmileg életképes világítástechnikai termékek szülessenek. Nagy felületű, olcsó filmek gyárthatósága is szükséges, amelyek

korlátozhatják az anyagok megválasztását. Az OLED-es lámpatestek tárolási élettartamában is javulásokra van szükség. Az OLED-ek érzékenyek az oxigénre, a nedvességre és a működési környezetben lévő más szennyezőanyagokra, ezért az OLED-panelt megfelelő tokozással kell ellátni, különösen a hajlékony hordozók esetén. Ezenkívül az oxigén, a nedvesség és az egyéb szennyezőanyagok beágyazódhatnak az OLED-be a gyártási folyamat során, lecsökkentve ezzel a panel élettartamát.

7.2.2 A program mérföldkövei és közbenső céljai

Mérföldkövek a LED-eknél

A LED-csomagok és LED-es lámpatestek programjának 7.3 táblázatban felsorolt mérföldköveit 2010-ben felülvizsgálták, hogy hozzáigazítsák az iparban tapasztalt legújabb fejlesztésekhez. A 2010. és 2015. pénzügyi év mérföldkövei az 50 000 órás fényáram-tartású LED-csomagok fényhasznosítási és/vagy ár-céljait mutatják. A 2012. pénzügyi év mérföldköve a nagyobb fényhasznosítású lámpatestek fejlesztésére fókuszált. A szilárdtest-világítási közösség sikeresen demonstrálta ezt egy meleg fehér színhőmérsékletű, 100lm/W fényhasznosítású, 1000lm fényáramú, LED-es lámpatest előállításával. Ez a teljesítőképességi szint azt igazolja, hogy fényhasznosításban, fényáramban és színminőségben a leghatékonyabb beltéri hagyományos fényforrásokéhoz, a lineáris fénycsövekéhez hasonló teljesítőképességi szint érhető el.

A 2015. pénzügyi évre várható, hogy a LED-csomagok ára 1 USD/klm alá fog csökkenni a 100lm/W-ot meghaladó nagy fényhasznosítás és az 50 000 órás fényáram-tartás megőrzése mellett. 2017-re (három évvel az eredeti ütemterv előtt) az USA Energiaügyi Minisztériuma várakozásai szerint a fókusz el fog tolni a 3500lm-t meghaladó és 100 USD-nél olcsóbb – ugyanakkor egyszerű fényhasznosítást mutató – tömegcikk-kategóriájú lámpatestek megvalósítása felé. 2020-ra a Minisztérium költséghatékony, intelligens világítás bevezetését várja a mennyezeti lámpatesteknél, beépített vezérlők és 85 USD-nél alacsonyabb ár mellett. Ennél az árnál a LED-fényforrások jelentős javulást fognak reprezentálni árban, teljesítőképességben és a fény teljes árában a hagyományos lámpákból és lámpatestekből felépített rendszerekkel szemben.

A LED-csomagok és LED-es lámpatestek mérföldkövei különálló lépéseket reprezentálnak az olcsó, nagy teljesítőképességű szilárdtest-világítási lámpatestek kifejlesztésében. Az első – néhány évvel ezelőtt megvalósult – lépés az egyszerű fényhasznosítású fehér LED-csomag kifejlesztése volt, amely megfelelő a világítástechnikai piac számára. A LED-csomagok fényhasznosítása tovább fog nőni, miközben csökken az árak a lehető legnagyobb energiamegtakarítás érdekében. A 130lm/W-os és a feletti fényhasznosítású LED-csomagok elérhetősége eltolta a fókuszát a hatékony lámpatestek kifejlesztése felé. Az itt mutatkozó előrelépések és a 120lm/W fényhasznosítás realizálása mellett a fejlődés

7.3 táblázat – A LED-csomagok és LED-es lámpatestek mérföldkövei (Megjegyzés: a tokozott eszközöket 25°C-on, 1 W/m² áramsűrűség mellett mértük. Az árak 1000-re kerekített mennyiségekre vonatkoznak).

Pénzügyi év	Mérföldkövek
2010	LED-csomag: >140lm/W (hideg fehér); > 90lm/W (meleg fehér); < 13 USD/klm (hideg fehér)
2012	Lámpatest: 100lm/W; ~ 1000lm; 3500K; 80 CRI; 50 000 óra
2015	LED-csomag: ~ 1 USD/klm (hideg fehér); ~ 1,1 USD/klm (meleg fehér)
2017	Lámpatest: > 3500lm (semleges fehér); < 100 USD; > 150lm/W
2020	Lámpatest: 200lm/W Intelligens mennyezeti lámpatestek beépített vezérlőkkel: < 85 USD

7.4 táblázat – Az OLED-panelek és OLED-es lámpatestek mérföldkövei

Pénzügyi év	Mérföldkövek
2010	Panel: >60 lm/W
2012	Laboratóriumi panel: 200lm/panel; >70lm/W; >10 000 óra
2015	Kereskedelmi panel: <200 USD/klm (ár); >80lm/W; 40 000 óra; CRI>90
2017	Kereskedelmi panel: 100 USD/klm Lámpatest: 100lm/W; CRI >90
2020	Nagy teljesítőképességű panel: 150 lm/W
2025	Kereskedelmi panel: <15 USD/klm Lámpatest: 150lm/W; megtervezett fényeloszlás

következő lépése a LED-es világítás árának jelentős csökkentése olyan szintre, ahol már versenyképes lesz az egész területen. Ezt a jelenleg is folyó munkát támogatja a „K+F gyártási kezdeményezés”.

Az OLED-ek mérföldkövei

Az USA Energiaügyi Minisztériumának az OLED-alapú szilárdtest-világítással kapcsolatos mérföldkövei a 7.4 táblázatban láthatók. A 2010-es és 2012-es eredmények laboratóriumi panelekre vonatkoznak, és ezek teljesítették a kitűzött célokat. A 2015-ös és az azutáni fókusz a kereskedelmi panelekre és lámpatestekre irányul. Az LG Chem és a Philips is jelezte, hogy teljesíteni tudják a 2015-ös célokat, a 200 USD/klm-es árat és a 40 000 órás L70 élettartamot egy 3000 cd/m² kezdeti fényssűrűség esetén. Az LG Chem valamennyi paneljének színvisztaadási indexe most 90 körüli vagy magasabb, de a többiek túlnyomó része e cél alatt maradt. A gyártók előtt álló legnagyobb kihívás a 80lm/W-os fényhasznosítás elérése anélkül, hogy ez a többi paraméter rovására történne. A panelekre vonatkozó egyetlen explicit mérföldkö a 2017. pénzügyi évre a 100 USD/klm-es ár-cél, amely 50%-os árcsökkentést reprezentál. Mindenesetre a panelek fényhasznosítását növelni kell, hogy legalább 120lm/W fényhasznosítású lámpatesteket lehessen előállítani. A színvisztaadási index vagy az üzemi élettartam további javítása kevésbé fontosnak tűnik. 2020-ra várható, hogy a nagy teljesítőképességű panelek fényhasznosítása elérje

a 150 lm/W-ot. A kisebb fényhasznosítású, egyszerűbb panelek előállítása lehetővé teheti a lámpatest-árak csökkentését és így azt, hogy az OLED-ek szerephez jussanak a tömegtermékek piacain. A fényáramra vonatkoztatott ár azonban számos alkalmazásnál nem megfelelő, ezért a lámpatestek áraira nincs kitűzve mennyiségi cél.

Az OLED-fejlesztés 10-éves mérföldköve a drasztikusan alacsonyabb ár elérése, ami legyőzné a szélesebb körű elfogadás előtt álló akadályt. E fejlesztési szint eléréséhez gyártási problémákat kell megoldani és az anyagköltségeket és a tervezést kell javítani. 15 USD/klm panel-ár és 150lm/W teljesítőképesség a cél, ami a vélekedések szerint lehetővé tenné azt, hogy az OLED-re versenyképes szereplőként tekintsenek az általános világítás piacán.

7.3 A legfontosabb problémák és kihívások

Noha a LED-es és OLED-es világítás teljesítőképessége jelentősen javult az évek során, amit jól demonstrál a piacon rendelkezésre álló számos LED-termék és a kereskedelmi fokozatú OLED-es lámpatestek megjelenése, számos kihívás maradt még ahhoz, hogy teljesülhessenek a Minisztérium fentiekben ismertetett átfogó céljai és maximalizálni lehessen a szilárdtest-világítás energiamegtakarításait. A legfontosabb K+F feladatokat a Minisztérium az érdekeltek bevonásával rendezett különböző megbeszéléseken tisztázta. A LED-világítással kapcsolatos K+F feladatok a következők:

- Emitteranyagok kutatása – cél: a zöld emitterek áramsűrűség-esésének és termikus esésének, a hatásfoknak és a vörös emitterek hőstabilitásának javítása;

- Lefelé konvertáló anyagok – a munka a nagy hatásfokú, stabil, keskeny vonalszélességű vörös és zöld fényporokra vagy kvantumpontokra irányul;

- Tokozás – javított hőstabilitású és nagy törésmutatójú anyagok megcélzása;

- Újszerű emitter-architektúrák – a cél: fejlettebb eszközstruktúrák – lézerek, nanohuzalok, szuperlumineszkáló diódák, elektrolumineszcens kvantumpontok stb. – felhasználásával javított teljesítőképesség;

- Magasabb integrációs szintek – például a tokozott chip, a meghajtó és az optika (2+ szint) rugalmas integrálása LED-modulba, rugalmas gyártási folyamatok igényre szabható integrációs szintek számára stb.;

- Javított fényhasznosítás – a lámpatest-optika fejlesztése, új szabályozási szintek – pl. sugárnyaláb-vezérlés – megcélzása;

- Intelligens vezérlők és érzékelők – a cél: egyszerű, hatékony vezérlők kifejlesztése az interoperabilitás szem előtt tartásával; olcsó, kompakt érzékelők; és integrált végfelhasználói eszközű energiamérő rendszer lámpatestekhez.

Noha a LED-iparnak számos más technológiai kihívással is szembe kell néznie, ezeket választották legsürgetőbb kutatási témáknak a LED-világítás jelenlegi teljesítőképességi hiányosságai megoldásához. OLED-ek esetén továbbra is állandó fejlődésre van szükség a technikai teljesítőképesség és a kereskedelmileg életképes világítástechnikai termékek folyamatos piaci bevezetése terén. Mindenesetre számos olyan alapvető technikai kihívás maradt, amelyeket a Minisztérium által támogatott K+F-nek kellene megoldania.

Az OLED-világítással kapcsolatos K+F feladatok a következők:

- Anyagkutatás – olyan emitterrendszerek (emitterek, gazda- és transzportanyagok) kutatása, amelyek egyidejűleg hosszú élettartamot és nagy hatásfokot is nyújtanak, különösen a kék emitterek esetén, ahol a teljesítőképesség elmarad;

- Fénykivonás – olyan költséghatékony, gyártható megoldások előterbe helyezése, amelyek jelentős javulást tesznek lehetővé a panelek fényhasznosításában a szerves-anyag/anód hullámvezető üzemmódokban csapdázott fény kivonásával és/vagy a felületi plazmonikus veszteségek csökkentésével; az emittált fény eloszlásának vezérlésére való készség további előny lehetne;

- Lámpatest-fejlesztés – a piacképes OLED-es világítás felgyorsítása a termékek differenciálásával, integrálhatóságával,

7.5 táblázat – A feladatleírásban használt feltételezések a hullámhosszak és színek tekintetében

Szín	Csúcs hullámhossz vagy CCT	CRI
Kék	440-460 nm	-
Zöld	520-540 nm	-
Borostyánsárga	580-595 nm	-
Vörös	610-620 nm	-
Meleg fehér	3000K	≥80
Hideg fehér	5700K	≥70

val, könnyű szerelhetőségével vagy más olyan attribútummal, amely segíti az OLED-es világítás vonzerejét és felhasználását;

- Gyártási K+F – a kihozatal és a megbízhatóság növelésére irányul;

- Rugalmas hordozók gyártása – az alakítható/rugalmas OLED-világítás gyártásához szükséges eljárások és anyagok tökéletesítésének folytatása – lehetőleg roll-to-roll gyártás felhasználásával.

Ezek a K+F feladatok három fontos célra összpontosítanak:

1) a teljesítőképesség javítása, különösen a fényhasznosítás javítása tekintetében;

2) termékdifferenciálás alakítható/rugalmas világítás kifejlesztésével vagy más módon;

3) költségcsökkentések.

Noha ez a lista nem tartalmazza az összes olyan fontos kutatási témát, amelyet támogatni lehetne az OLED-technológia tökéletesítéséhez, ezeket találta a legfontosabb kutatási területeknek az USA Energiaügyi Minisztériuma által rendezett K+F workshop és az OLED-ek területén érdekelt bevonásával rendezett megbeszélés.

7.4 A LED-ek kiemelt kutatási területei

A fentiekben ismertetett legfontosabb K+F területekhez konkrét feladatokat tűzték ki. Ezek közül a kiemelt feladatok közül az USA Energiaügyi Minisztériumának finanszírozási programja a rendelkezésre álló források és a jelenlegi projekt-portfólió figyelembevételével fogja kiválasztani a kérelmezőket. A Minisztérium nem tudja bármely adott évben támogatni az összes kiemelt feladatot, ez azonban nem csökkenti annak fontosságát, hogy leküzdjük a siker előtt álló legfontosabb akadályokat. Az ipari kutatókat arra ösztönözzük, hogy a kiemelt feladatok közül a lehető legtöbbet vegyenek célba. Tény, hogy mindegyik K+F feladat érdemes a K+F tevékenység további figyelmére. A kiemelt K+F feladatok korlátozott száma azt a gyakorlati realitást tükrözi, hogy a Minisztériumnak mérlegelni kell a korlátozott K+F alapok elosztásában a lehető legna-

gyobb fejlődés elérése érdekében.

Az itt következő speciális feladat-táblázatokban a színre vagy a színhőmérséklet szöveges leírására találni hivatkozásokat. A különböző színek hullámhosszait és a színhőmérsékletek kifejezéseinek magyarázatát a 7.5 táblázat tartalmazza.

A feladat kiválasztási folyamat célja azon munkaterületek meghatározása, amelyekre szükség van ahhoz, hogy leküzdjük a jelenlegi legfontosabb technológiai akadályokat. Valamennyi alábbiakban ismertetett feladat esetén meg kell jegyezni, hogy a feltüntetett mérföldkövek a folyamat minimális leírását reprezentálják. A feladatok mindegyikéhez szükség lesz a rendszer szintű teljesítőképesség ismertetésének bizonyos további szintjére, de a rendszerek fajtái igen sokfélék. Úgy véljük, hogy e területek kutatói ismerik és képesek kommunikálni a kutatás szerepének rendszer szintű ismeretét.

7.4.1 A LED-ek alaptechnológiai kutatási feladatai

Az alapkutatás a Minisztérium szilárdtest-világítási programjának központi kérdése marad. A teljesítőképességi paraméterek és célok többsége nem változott. A kék emitterek áramsűrűség-esése továbbra is az olcsóbb struktúra forrása maradt olyan LED-es világítás számára, amely kevesebb LED-anyagból több fény előállítására képes. A hatékony zöld emitter továbbra is nehéz kérdés. A sugárzás fényhasznosításának növelése hatékony keskenysávú emittáló/lefelé konvertáló anyagok kifejlesztését igényli, különösen a vörös/borostyánsárga spektrális tartományban, ahol élesebb hosszú hullámhosszúságú levágásra van szükség a nagy fényhasznosítású meleg fehér fényforrások számára. Ezt tökéletesített közvetlenül vöröset sugárzó, magas hőmérsékleten is nagy fényhasznosítású LED-ekkel vagy javított lefelé konvertáló anyagokkal – fényporokkal vagy kvantumpontokkal – lehet elérni. Így a fényemitterek mellett a lefelé konvertáló anyagok tökéletesítése is kiemelt fontosságú marad.

7.4.2 LED-termékek fejlesztési feladatai

A termékfejlesztési feladatok számos, konkrét LED-termékekkel kapcsolatos szempontot ölelnek fel, és nem korlátozódnak a piacon esetleg világítástechnikai termékek-ként megjelenő LED-csomagok, LED-modulok vagy LED-es lámpatestek fejlesztésére. A prioritási lista komponensekkel és alrendszerrel kapcsolatos munkákat tartalmaz, de nem terjed ki újszerű lámpatest-konstrukciókra, intelligens vezérlőkre és csatlakoztatott rendszerekre.

7.5 Az OLED-ek kiemelt kutatási területei

Az OLED-eknek a K+F workshopon folytatott megbeszéléseken alapuló kiemelt feladatait a következőkben ismertetjük.

7.5.1 Az OLED-ek alaptechnológiai kutatási feladatai

Most is a fehér OLED-eszközök fényhasznosításának további fejlesztése a legmagasabb prioritású feladat. Ezt anélkül kell végezni, hogy ennek az élettartam és a színminőség kárát látna. Mivel a korábbi fejlesztések többségét összetettebb, nagyobb gyártási költségeket jelentő struktúrák felhasználásával érték el, egyre nagyobb az érdeklődés az egyszerűbb struktúrák kifejlesztése iránt, amelyeket nagyobb kihozattal és alacsonyabb anyagköltséggel lehet gyártani. Az ilyen célokra épülő projektek a C.1.2 feladatok között szerepelnek, míg a C.6.3 feladat újszerű fénykivonási technikák segítségével törekszik a fényhasznosítás növelésére.

7.5.2 Az OLED-ek termékfejlesztési feladatai

A korábbi években a termékfejlesztési feladatok az OLED-panelekre fókuszáltak. Most helyénvaló foglalkozni néhány olyan kihívással, amelyekkel a lámpatestgyártóknak kell szembenéznük. Noha ezek a gyártók erősen motiváltak olyan tulajdonságok kifejlesztésében, amelyek megkülönböztetik termékeiket más vállalkozások termékeitől, vannak olyan kritikus elemek, amelyek képessé tehetnének valamennyi gyártót a piacbővítésre; ilyenek például a meghajtók és a csatlakozók. Értékesek lehetnek a kibocsátott fény eloszlásának módosítására alkalmas külső optikai rendszerek is. A D.4.2 feladat arra szolgál, hogy a lámpatestgyártóknak nagyobb mozgásteret biztosítson az innovatív lámpatestek kidolgozására.

Az OLED-panelek fejlesztésére továbbra

A.1.2 Emitteranyagok kutatása

Leírás: A hatásfok-esés alapvető fizikai mechanizmusának meghatározása a kék LED-eknél modern epitaxia-anyagok és eszközstruktúrák kísérleti felhasználásával, elméleti analízissel együtt. Az áramesés és a hőérzékenység csökkentésének meghatározási és demonstrálási módjai valamennyi szín esetén kísérleti és elméleti munkával. Hatékony vörös, zöld vagy borostyánsárga LED-ek kifejlesztése, amelyek lehetővé teszik a spektrális hatásfok optimalizálását kiváló színminőséggel a korrelált színhőmérsékleti tartomány mentén, és amelyek szín- és fényhasznosítást mutatnak a működési hőmérséklet tekintetében.

Paraméter	2014-es státusz	2020-as cél
Belső kvantumhatásfok (IQE) 35 A/cm ² -en	89% (kék); 39% (zöld); 75% (vörös); 13% (borostyánsárga)	95% (kék); 54% (zöld); 87% (vörös); 32% (borostyánsárga)
Külső kvantumhatásfok (EQE) 35 A/cm ² és 25°C esetén	76% (kék); 32% (zöld); 54% (vörös); 10% (borostyánsárga)	86% (kék); 46% (zöld); 65% (vörös); 24% (borostyánsárga)
Teljesítményátalakítási hatásfok 35 A/cm ² -en (kimeneti optikai teljesítmény osztva a bemeneti elektromos teljesítménnyel LED-csomag esetén)	60% (kék); 22% (zöld); 44% (vörös); 8% (borostyánsárga)	80% (kék); 35% (zöld); 55% (vörös); 20% (borostyánsárga)
Áramesés, a 100 és 35 A/cm ² -en mérhető külső kvantumhatásfok összehasonlítása	77%	98%
Termikus stabilitás, a 100 és 25°C-on mérhető optikai áram összehasonlítása	90% (kék); 85% (zöld); 50% (vörös); 25% (borostyánsárga) (Közvetlen emitterekre vonatkozik. Borostyánsárga fény-porkonverziós LED-ek akár 83% termikus stabilitást is elérhetnek.)	98% (kék, zöld); 75% (vörös, borostyánsárga)

A.1.3 Lefelé konvertáló anyagok

Leírás: Új, nagy hatékonyságú hullámhossz-konvertáló anyagok felfedezése meleg fehér LED-ek előállításának céljából, külön hangsúllyal a spektrális hatásfok növelésére jó színminőség és javított termikus stabilitás és tartósság mellett. A nem ritka földfém és a nem mérgező lefelé konvertáló anyagok ösztönzése.

Paraméter	2014-es státusz	2020-as cél
Kvantumhatásfok (25°C) a látható tartomány mentén	95% (zöld) 90% (vörös)	99% (zöld) 95% (vörös)
Termikus stabilitás, a 100 és 25°C-on mérhető kvantumhatásfok összehasonlítása	90%	95%
Spektrális FWHM (félérték-szélesség)	100 nm (vörös/zöld)	30 nm (vörös); 70 nm (zöld)
Idővel bekövetkező színeltolódás (fényporkonverziós LED-be építve)	$\Delta u^*v^* < 0.007$ (6000 óránál)	$\Delta u^*v^* < 0.002$ (az egész élettartam alatt)
Fluxussűrűség telítődés, relatív kvantumhatásfok (az 1 W/mm ² -en adódó optikai áram és a csúcs kvantumhatásfok hányadosa)	–	95%

A.2.2 Újszerű emitterarchitektúrák

Leírás: Olyan újszerű emittereszköz-struktúrák kidolgozása, amelyek világos utat mutatnak a világítási rendszer hatásfokának növeléséhez. Olyan javított chip-szintű funkcióképességhez vezető megoldás demonstrálása, amely növeli a lámpatest vagy rendszer fényhasznosítását a jelenlegi megoldásokhoz képest. Új architektúrák kidolgozása a javított fényhasznosítás, színtabilitás és az emisszió irányíthatósága érdekében. Példák: lézerdiodák világításhoz, nanohuzalos LED-ek, szuperlumineszcens struktúrák és elektrolumineszcens kvantumpontok.

Paraméter	2014-es státusz	2020-as cél
Külső kvantumhatásfok (EQE) 35 A/cm ² és 25°C esetén	76% (kék); 32% (zöld); 54% (vörös); 10% (borostyánsárga)	86% (kék); 46% (zöld); 65% (vörös); 24% (borostyánsárga)
Áramesés, a 100 és 35 A/cm ² -en mérhető külső kvantumhatásfok összehasonlítása	77%	98%

is szükség van, különösen a fénykivonási technológiák terén. Habár sokféle megoldást javasoltak, legtöbbjük nem bizonyult alkalmasnak nagy felületek alacsony költségű gyártásához. Az eddigi termékek csak külső fénykivonó mechanizmusokat alkalmaztak, amelyek csupán kb. max. 1,6-szeres fénykivonás-javításra képesek. A háromszoros fénykivonás-javítási cél eléréséhez költséghatékony, méretezhető belső fénykivonási technikák kifejlesztésére van szükség.

Bár a korábbi feladatlisták tartalmaztak új tokozási technikákra vonatkozó munkát, különösen a polimer hordozókat vagy burkolatokat használó eszközök esetében, idén ezek nem kerültek be a legfontosabb feladatok közé. Ennek részben az az oka, hogy az európai és ázsiai vállalatok kijelentették, hogy rendelkezésre állnak elfogadható vékonyréteg-tokozási technikák. [101]. A 3M is demonstrálta, hogy a kijelzőiparnak készülő két filmlap laminálása kielégíti az OLED-es világítópanelek követelményeit [115]. E téma bevételezését a legfontosabb feladatok közé egyelőre felfüggesztettük, amíg e megoldások megbízhatóságát és költségét ki nem értékeltük.

7.5.3 Az OLED-gyártás K+F feladatai

Az OLED-es világítópanelek gyártásához számos különböző eljárást alkalmaznak, de ezek egyike sem mutat világos utat a gyors költségcsökkentéshez. Az M.O.5 feladat kínál lehetőséget arra, hogy az erőfeszítéseket olyan szempontokra koncentráljuk, amelyek a fő akadályokat jelentik annak a célnak az elérése előtt, hogy jó minőségű paneleket alacsony költségeken lehessen gyártani – nagy panelkihozattal, nagy szinkonzisztenciával és nagy megbízhatósággal.

Ázsiában és Európában kitűnő létesítmények vannak komplett OLED-panelek roll-to-roll technikákkal történő gyártására, az Egyesült Államokban azonban az ilyen létesítmények száma korlátozott. Azonban sokan vélekednek úgy, hogy ez a megoldás jelenti a lehetőséget a nagyobb költségcsökkentésre. Az M.O.6 feladat olyan projekteket tartalmaz, amelyek a kritikus komponensek és komplett OLED-ek gyártására vonatkoznak. Ez a széles terület a roll-to-roll gyártást lehetővé tevő anyagokra (hordozók, oldatos eljárással kialakítható elektródák és aktív rétegek, tokozó filmek anyagai), valamint gyártási folyamatok fejlesztésére és berendezésekre irányuló erőfeszítéseket fogja össze. A feladat átfogó volta miatt paramétereiket nem adtuk meg. Az ebbe a kategóriába tartozó

B.3.2 Tokozás (lezárás)

Leírás: Új tokozóanyagok kifejlesztése, amelyek nagyobb törésmutatóval rendelkeznek a LED-csomagból történő fénykivonás javítása érdekében. Új anyagok felkutatása – például magasabb hőmérsékleteket elviselő tökéletesített szilikonkompozitok vagy üveg, nagyobb hőstabilitású tokozóanyagok a fényáram növeléséhez, a hosszú idejű fényáram-tartáshoz és a színeltolódás csökkentéséhez. Matrixyanyagok kifejlesztése fényporos vagy kvantumpontos lefelé konvertáló anyagokhoz, annak jobb megismerésével együtt, hogy a vegyi kölcsönhatások miképp befolyásolják a teljesítőképességet és a megbízhatóságot.

Paraméter	2014-es státusz	2020-as cél
Törésmutató a látható spektrumban	1,54	1,8
Hővezetőképesség	0,2 W/mK	1 W/mK
Hőstabilitás (adott hőmérsékleten és optikai fluxus mellett) – a felhasználó által adott felhasználáshoz definiált módon	A felhasználó által definiált óraszám adott működési feltételek mellett	Javasolt javulás az órák számában vagy megnövelt hőmérséklet és/vagy fluxussűrűség

B.3.6 Csomag/modul-architektúra integrálása

Leírás: Újszerű integrációs sémák kifejlesztése, amelyek a LED-csomag és más lámpatest-alrendszerek vagy érzékelők olyan 2+ szintű LED-modul termékeket eredményező kombinálására fókuszál, amelyek készek a lámpatestekbe építésre. A meghajtó, az optika és a LED-csomag rugalmas beépítéssel történő integrálására alkalmas architektúrákat kell kifejleszteni, amelyek lehetővé teszik az egyedi teljesítőképesség-specifikációk könnyű legyártását. Ösztönözni kell olyan fejlett sajátságok – például optikai komponensek – kifejlesztését, amelyek alkalmasak a sugárnyaláb formálására vagy a LED fényforrások kimeneti színeinek egyenletes keverésére a sugárzási diagram mentén, újszerű hűtéssel és az elektronika integrálásával, a csomag kornak megfelelő fényhasznosításának megőrzése mellett. Ösztönzendő az olcsó érzékelők beépítése a LED-es világítási rendszerekben is.

Paraméter	2014-es státusz	2020-as cél
Lámpatest fényhasznosítása	110 lm/W – a korrelált színhőmérséklettől, a színvisszaadási indextől, a sugárzási szögtől, a fénysűrűség-eloszlástól stb. függően	200 lm/W
Lámpatest költségcsökkenése	Felhasználó által definiált költség (függ az alkalmazástól)	35% költségcsökkenés
Az integráció által lehetővé váló új funkcióképesség	A felhasználó által definiált funkcióképesség	Javasolt befolyás a teljesítőképességre és/vagy az alkalmazás esetére

B.6.4 Újszerű LED-es lámpatestrendszerek

Leírás: Olyan újszerű lámpatestrendszer-architektúrák kifejlesztése, amelyek kihasználják a LED-ek egyedülálló tulajdonságainak előnyeit az energiamegtakarítás érdekében, és a nagyobb piaci elfogadás irányába mutatnak. Újszerű formai kialakításokra, lámpatestrendszer-integrációra és a sugárnyaláb olyan optikai vezérlésére van szükség, amely a kimeneti fényt a megkívánt sugármintázattal alakítja, vagy olyan optikai komponensekre, amelyek egyenletesen keverik a LED-fényforrások színes fényét a sugárzási diagram mentén a fényforrás fényhasznosításának növelése és a fény hatékony felhasználása érdekében. E feladat másik fontos eleme lehetne energiahatékony vezérlők és érzékelők beépítése az egyedülálló LED-tulajdonságok kihasználására és további energiamegtakarítás céljából.

Paraméter	2014-es státusz	2020-as cél
Lámpatest fényhasznosítása (függ az alkalmazástól – a felhasználó megadhat más felhasználási paramétereiket is)	110 lm/W – Függ a korrelált színhőmérséklettől, a színvisszaadási indextől, a sugárzási szögtől, a fénysűrűség-eloszlástól stb.	200 lm/W
Fényhasznosítás (függ az alkalmazástól – a felhasználó megadhat más felhasználási paramétereiket is)	Általános világítás: 85% Helyi világítás: 65%	Általános világítás: 90% Helyi világítás: 85%
Önköltség (függ az alkalmazástól – a felhasználó megadhat más felhasználási paramétereiket is)	Kobrafej: 4000 lm, 200 USD Mélysugárzó: 650 lm, 20 USD	Kobrafej: 4000 lm, 40 USD Mélysugárzó: 650 lm, 5 USD

munkánál általában törekedni kell arra, hogy sikerüljön megőrizni vagy javítani a legkorszerűbb teljesítőképességet, ugyanakkor demonstrálni kell, hogy az alkalmas alacsony költségű (pl. nagy kihozatalú, robosztus, minimális komplexitású és olcsó anyagokkal és berendezésekkel megvalósuló) roll-to-roll feldolgozásra.

7.6 További kiemelt K+F feladatok

Idén a szokásos K+F-prioritási megbeszéléseken felmerült több olyan K+F feladat, amelyek némelyike nem illeszkedik az ún. FOA (finanszírozási lehetőségek közzététele) rendszerű K+F támogatási folyamatához. Ezek a feladatok általában átfogóbb, hosszabb időtartamú, kevesebb konkrét céllal és eredménnyel jellemezhető erőfeszítéseket igényelhetnek. E K+F feladatok és a javasolt támogatások rövid ismertetése az alábbiakban következik.

Tápegységek – Az előző években ez a téma már szerepelt a FOA finanszírozások között, de a jelenlegi fontos kérdések ennél az alrendszerrel sokkal inkább a megbízhatósággal, a világítási alkalmazásokhoz megfelelő komponensek kiválasztásával és a tápellátás teljesítőképességi attribútumainak jellemzésével és a lámpatestgyártók felé történő kommunikációjával kapcsolatosak. Az IES és az ANSI szabványosítási bizottságok bevonásával folynak munkák a tápegységek robosztusságának könnyebb demonstrálására és arra vonatkozóan, hogy a tápegységek teljesítőképességi paramétereit egyértelműbben lehessen megadni arra az esetre, ha a LED-ekkel együtt lámpatestekbe építik be azokat.

Fényszabályozók – Amint azt az előző részben leírtuk, nagy az érdeklődés a LED-fényforrások alapvető szabályozhatóságának kihasználása iránt a fejlett szabályozás, intelligencia és olyan kommunikációs rendszerek kifejlesztése érdekében, amelyek még több energiát takaríthatnak meg és további előnyökkel szolgálnak a fogyasztók számára. A szabályozók egyre növekvő alkalmazása és elfogadása óriási lehetőség a hagyományos technológiák LED-alapú technológiákra való átváltása kapcsán. A fejlett világításszabályozási technológia bevezetése és elfogadása előtt álló legnagyobb akadályok az eszközök interoperabilitásával, a fogyasztói elfogadással, az energiamonitorozással és a szabályozási módszer előnyeinek megismeretetésével kapcsolatosak. Akárcsak a LED-technológia korai szakaszában, a szabályozók bevezetése és elfogadása szabványosított jellemzőkön alapuló megközelítéseket igényel. A szabványosított jellemzők megkönnyítik az összehasonlítást, és a teljesí-

C.1.2 Stabil fehér fényű eszközök

Leírás: Olyan újszerű anyagok és struktúrák kifejlesztése, amelyek segítenek nagy fényhasznosítású, stabil fehér fényű eszközöket előállítani. Az eszköznek jó fényszínnel, hosszú élettartammal és nagy fényhasznosítással kell rendelkezniük még nagy fényerősség esetén is. A megoldás része lehet nagy fényhasznosítású kék emitteranyagok és gazdaanyagok kifejlesztése vagy olyan eszközarchitektúra, amely hosszabb élettartamot eredményez. Valamennyi javasolt megoldásnál szem előtt kell tartani a költséget, a komplexitást és a megvalósíthatóságot. Az anyagokat/struktúrákat olyan OLED-eszközökben kell demonstrálni, amelyek teljesítik az alábbi paramétereket. Az újszerű anyagoknak/struktúráknak nagy stabilitást kell mutatniuk, miközben megőrzik vagy javítják a többi paramétert.

Paraméter	2014-es státusz	2020-as cél
Fényáram-tartás (L70) 10 000 lm/m ² -ről	40 000 óra	>50 000 óra
Fényhasznosítás a fénykivonás javulása nélkül (lm/W)	35 lm/W	50 lm/W
CRI	90	>90

C.6.3 Újszerű fénykivonás és fényhasznosítás

Leírás: Új optikai és eszközkonstrukciók tervezése az OLED-ek fénykivonásának javítására az OLED-panelek profiljának és korszerű teljesítőképességének megőrzése mellett. A javasolt megoldás az OLED-ek rétegszerkezetének módosításaival is járhat az elektródákon belül vagy azok szomszédságában, vagy az eszközön kívül. A pályázatoknak meg kell vizsgálniuk, hogy a megoldások hogyan befolyásolják az energiavesztéseket a hullámvezetés és plazmon üzemmodokban, és tartalmazniuk kell mintát vagy olyan kvantitatív elemzést, amely támogatja a javasolt módszert. A megoldások vonatkozhatnak fénynyaláb-formáló technikákra is, amelyeket integrálni lehet a javasolt fénykivonási technológiába a generált fény nagyobb hasznosítása érdekében. Az ilyen megoldásoknak lehetővé kell tenniük az intenzitáseloszlás szögének bizonyos szabályozását, de minimalizálniuk kell a színnek a szögtől függő eltolódását. A megoldásnak költségcsökkentési lehetőséget is kell kínálnia, és egy legalább 1 cm²-es OLED-eszközzel kell demonstrálni az alkalmazhatóságot és a nagy panelméretű eszközök potenciális elkészíthetőségét.

Paraméter	2014-es státusz	2020-as cél
Fénykivonási hatások (EQE/IQE)	40%	70%

D.4.2 OLED-es lámpatestek

Leírás: Általános világításra szánt OLED-es lámpatestrendszerek és komponensek kifejlesztése, amelyek utat nyitnak a nagyobb piaci elfogadás felé. A javasolt lámpatesteknek elsősorban OLED-es fényforrásokon kell alapulniuk és olyan egyedi tulajdonságokkal kell rendelkezniük, amelyek igazolják a piacépítést és a termék iránti keresletet. A jellemzők közé – nem kizárólagosan – a következők tartoznak: nagy teljesítőképesség (fényhasznosítás, hosszú élettartam, színminőség); alacsony költség; a szín állíthatósága; modulálhatóság; egyedi formatervező (vékony, rugalmas); jó hatásfokú tápegységek; továbbfejlesztett elektromos csatlakozások stb. A javaslatoknak az alábbi paraméter megcélzásán túl megkülönböztető teljesítőképességekre kvantitatív célokat kell tartalmazniuk. A potenciális vevői vonzerőt, valamint a piacméretet és a piaci behatolást költség-haszon összehasonlítással és versenyképességi elemzéssel kell támogatni, amely más világítási technológiákon alapuló versenyképes termékeket vesz figyelembe.

Paraméter	2014-es státusz	2020-as cél
Fényhasznosítás	51 lm/W	125 lm/W
Fényáram-tartás (L70)	15 000 óra	50 000 óra

tőképesség kommunikálása jelentősen megnöveli a fogyasztói bizalmat és elfogadást.

A PNNL jelenleg szervez egy olyan programot, amelyet a szabályozókkal ellátott LED-rendszerek interoperabilitásának és energetikai mérésének szentelnek. Ennek az új programnak a fókuszterületei a következők:

- Együttműködés az ipari konzorciumok törekvéseivel az interoperabilitással és az energetikai méréssel kapcsolatos szabványok összeállítására érdekében
- Harmadik fél segítése és/vagy harmadik félként való fellépés az eszközök és rendszerek interoperabilitásának igazolására

- A különböző mérési módszerek teljesítőképességének és megvalósíthatóságának kiértékelése

- Rövid távú minta tesztközpontok tervezése és kialakítása a legfontosabb kihívások kiértékelésére

Megbízhatóság – Amint már említettük, a LED-es világítási termékek megbízhatóságának mélyebb megértésére vonatkozó fejlesztést részben a Levine Science Research Center végzi. Az USA Energiaügyi Minisztériumának szilárdtest-világítási

[115] F. McCormick, "Transparent Barrier Films and Adhesives for Flexible Electronics," Printed Electronics USA, Santa Clara, CA, 2014.

programja is támogat egy, az RTI International-nél folyó, a LED-rendszerek megbízhatóságának kutatására és modellezésére vonatkozó K+F projektet. A LED-es világítási rendszerek megbízhatóságának fontosabb kérdései: a katasztrófális meghibásodás, a fénysugár-csökkenés és a színpont stabilitása. Mindhárom hibamechanizmust és kölcsönhatásukat is jobban meg kell érteni. A legkevésbé ismert hibamechanizmus a színpont stabilitása. A különböző LED-csomagok különböző módokon fellépő színeltolódása és a lámpatestek optikai anyagainak megváltozása is súlyosbíthatja az eltolódást. Valamennyi hibamechanizmust és kölcsönhatásukat is jobban meg kell ismerni, mivel ez a téma a K+F erőfeszítések kombinációját igényli.

Emberi tényezők – Az emberi tényezőkkel és a termelékenységgel kapcsolatos K+F téma (az ún. „Emberközpontú világítási rendszerek”) a Minisztérium 2015-ös szilárdtest-világítási K+F workshopján merült fel a K+F prioritások vitája során. Az ezzel a témával összefüggő K+F kihívások a spektrálisan beállított világítás pszichológiai és termelékenységi előnyeinek számszerűsítésére vonatkoznak. Az ilyen természetű K+F a pszichológiai és a termelékenységi hatások hosszú távú, átfogó tanulmányozását szükségelteti. A Minisztérium szilárdtest-világítási programja a PNNL-nél végzett munkán keresztül játszik szerepet e témában a hiteles, igazolt kutatási eredmények konszolidálása és kommunikálása segítségével. Ez egy fontos K+F téma az energiahatékony világítás hosszú távú sikere tekintetében. Az e témával kapcsolatos jövőbeni K+F tevékenységet a Minisztérium szilárdtest-világítási programja, a Nemzeti Egészségügyi Intézmények (NIH), a Munkahelybiztonsági és Egészségügyi Hivatal (OSHA) és más érdekelt szervezetek közötti együttműködéssel lehetne támogatni.

Fényminőség – A fény pontos leírása és jellemzése továbbra is kihívást jelent. A jelenlegi paraméterek évtizedekkel korábbi kutatáson alapulnak, ezért lehet, hogy nem írják le pontosan a LED-fényforrások fényének minőségét. Ráadásul a jelenlegi paraméterek hallgatólagosan bizonyos fényminőséggel kapcsolatos preferenciákat tükröznek fel (CRI = 100 a feketetést fehér fényre vonatkozóan), ugyanakkor a legfrissebb kutatások azt mutatják, hogy a CRI maximalizálása nem feltétlenül számít preferenciának az élénkséget vagy színtelítettséget reprezentáló színskála-terület miatt [116]. A legfrissebb kutatások azt is mutatják, hogy nincs magától értetődő preferencia a feketetést görbéjén adódó a

D.6.3 Panelek fénykivonása és fényhasznosítása

Leírás: Az OLED-panelek javított fénykivonási hatásfokára alkalmas gyártható megoldások demonstrálása. A megoldásnak meg kell őriznie az OLED-panelek vékony profilját és korszerű teljesítőképességét (pl. a fénykivonó rétegek nem okozhatnak feszültségnövekedést, nem csökkenthetik az eszköz fényhasznosítását és nem okozhatják a színnek a fénysugár szögétől való függőségét. A javasolt technológia nem jelenthet kompromisszumot a panel hozama, élettartama, teljesítőképessége és költsége tekintetében. A megoldások járhatnak az OLED-ek rétegstruktúráján belüli vagy az elektródák közelében és/vagy az eszközön kívül elvégzett módosításokkal is. A megoldást nagy teljesítőképességű, nagy felületű (> 25 cm²-es) OLED-eszközön kell demonstrálni, és a megoldásnak alkalmasnak kell lennie olcsó gyártásra.

Paraméter	2014-es státusz	2020-as cél
Fénykivonási hatásfok (EQE/IQE)	40%	70%
Járulékos költség	–	< 10 USD/m ²
Szín szögeltolódása (0-75°)	$\Delta u'v' \leq 0,004$	$\Delta u'v' \leq 0,002$

M.O.5 OLED-panelek gyártása

Leírás: Gyártási folyamatok fejlesztésének támogatása gyakorlati OLED-panelek számára. A megfelelő fejlesztési tevékenységek valószínűleg a következő egy vagy több területre fognak fókuszálni: Gyártási lépések integrálása; Megbízhatóság; Reprodukálhatóság és kihozatal; Változtatások a konstrukcióban vagy a folyamatban a gyártási költségek csökkentése érdekében

Optimalizált konstrukciók vagy folyamatok a hatékony és olcsó gyártás érdekében. A fejlesztésnek jobb minőségű, javított szinkronizációjú, alacsonyabb gyártási költségű és/vagy kihozatalú panelek előállítását kell lehetővé tennie. A kifejlesztett stratégiákat a piaci igényeknek megfelelő teljesítőképességi szinttel rendelkező panelekkel kell demonstrálni. A projektet a megoldásnak a legkorszerűbb gyártási módszerekkel való összehasonlításával kell igazolni. A tényleges kihozatal részletes analízise – beleértve a katasztrófális korai kiesések, a fő meghibásodások, a lépéssidő, az anyagfelhasználás, a berendezések rendelkezésre állása és a folyamat elemzését – segíthet a javítási lehetőségek beazonosításában a költség és a teljesítőképesség vonatkozásában.

Paraméter	2014-es státusz	2020-as cél
Panelkihozatal	–	≥ 80%
Megbízhatóság (katasztrófális meghibásodás)	< 1/1000	< 1/10000
Panelenkénti színeltérés – $\Delta u'v'$	± 0,004	± 0,002
Panel ára	–	< 100 USD/klm

M.O.6 OLED-gyártás roll-to-roll eljárással

Leírás: Anyagok, eljárások és berendezések kifejlesztése az OLED-es világítási eszközök roll-to-roll gyártása fejlődésének támogatására. Az OLED-es világítástechnikai eszközök roll-to-roll technikával történő gyártása alacsonyabb gyártási költségeket tesz lehetővé és jól illeszkedhet a nagyobb felületű, rugalmas hordozójú OLED-eszközök gyártásához. Ezért a megoldás fejlesztésének a támogatása végső soron az olcsó, megkülönböztetett tulajdonságú (nagy felületű, rugalmas/hajlítható, vékony) fényforrások bevezetését teszi lehetővé. Olyan anyagokra van szükség, amelyek támogatják a nagy teljesítőképességű roll-to-roll eljárással készülő eszközöket, például integrált rugalmas hordozókhoz, oldatos eljárással kialakított elektródákhoz, aktív rétegekhez és a környezeti hatásokkal szembeni védelemre alkalmas anyagok. E feladat során fontolóra kell venni a mintakészítéshez, nyomtatáshoz és a különböző anyagok bevonásához szükséges folyamatokat és berendezéseket is.

Paraméter	2014-es státusz	2020-as cél
Gyártási költség csökkenése	–	Felhasználó által definiált
Hozzáadott érték	–	Felhasználó által definiált

fény fényvel kapcsolatosan [117]. A Minisztérium szilárdtest-világítási programja eddig is támogatta és továbbra is támogatni fogja az NIST-t a színjellemzők és preferenciák fontos kutatásában.

[116] T. Ohno, "NIST Research on Color Quality of SSL Sources," DOE SSL R&D Workshop, Tampa, FL, 2014. jan. 28. http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ohno_colorquality_tampa2014.pdf.

[117] J. P. Freyssinier, "The Class A Color Designation for Light Sources," DOE SSL R&D Workshop, Hilton Long Beach, CA, 2013. jan. http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/freyssinier_designation_longbeach2013.pdf.