

1 A szilárdtest-világítás 2019

(Forrás: <https://www.researchgate.net/publication/330545079>

<https://www.energy.gov/eere/ssl/downloads/2018-solid-state-lighting-rd-opportunities>, 2019. jan.

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 termékre, eljárásra vagy szolgáltatásra kereskedelmi névvel, védjeggyel, gyártóval vagy másképp történő hivatkozás nem jelenti szükségképpen annak az Egyesült Államok kormánya vagy bármely ügynöksége, vállalkozója vagy annak alvállalkozója általi jóváhagyását, ajánlását vagy támogatását. A szerzőknek a jelentésben kifejtett nézetei és véleményei nem feltétlenül fejezik ki vagy tükrözik az Egyesült Államok kormánya vagy bármely ügynöksége nézeteit és véleményét.

A jelen kiadvány a forrásra való hivatkozás esetén részben vagy egészében sokszorosítható oktatási vagy non-profit célokra a szerzői jog tulajdonosának külön engedélye nélkül, amennyiben hivatkozás történik a forrásra a következőképpen:

„DOE BTO SSL Program, “2018 Solid-State Lighting R&D Opportunities,” edited by James Brodrick, Ph.D.; Editor: James Brodrick, DOE BTO SSL R&D Program; Lead Author: Morgan Pattison, SSLS, Inc.; Contributors: Norman Bardsley, Bardsley Consulting; Clay Elliot, Navigant Consulting, Inc.; Monica Hansen, LED Lighting Advisors; Kyung Lee, Navigant Consulting, Inc.; Lisa Pattison, SSLS, Inc.; Jeffrey Tsao, Sandia National Laboratories; Mary Yamada, Navigant Consulting, Inc.”

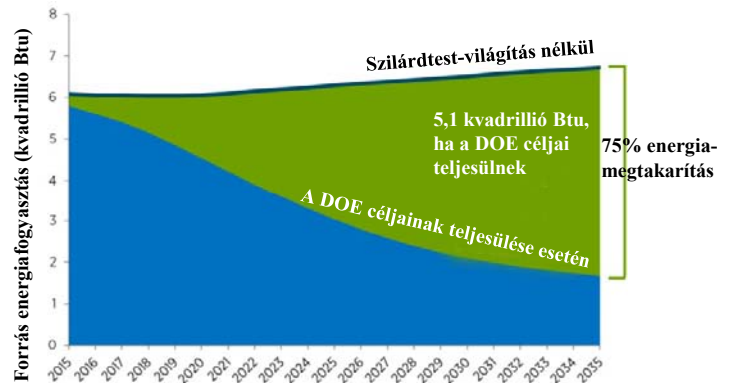
1 VEZETŐI ÖSSZEFOGLALÓ

A szilárdtest-világítás (SSL) – különösen a szilárdtest-világításon alapuló LED fényemittelő dióda jó úton halad afelé, hogy meghatározó technológiává váljon valamennyi világítástechnikai alkalmazás területén. A szilárdtest-világítás lm/W-ban mért fényhasznosítása folyamatosan növekszik a fényporbevonatú LED-architektúrák 255 lm/W-os gyakorlati és a közvetlen fénykibocsátó konstrukciók 325 lm/W-os végső elméleti határértéke felé. Ez a fejlődés az alapvető, korai szakaszában

lévő K+F munka során elért számos, folyamatos áttérés eredménye, amelyeket a szilárdtest-világítás értékláncának egészében hasznosítottak. A jelen tanulmány további részletekkel szolgál ezekről az előrelépésekről és azokról a kiemelt K+F témákról, amelyeket az Egyesült Államok világítástechnikai tudományos K+F közösségének tagjai javasoltak, akik együttműködnek az USA Energiaügyi Minisztériumának (DOE) Energiahatékonysági és Megújuló Energiák Hivatalán belül működő Épülettechnológiai Irodájával (BTO) a DOE szilárdtest-világítási programjának megvalósításában.

A nagy hatékonyság és az alacsony költségek jó hatásfokú, költséghatékony világítást eredményeznek, amelynek gyors az elfogadása, és amely jelentős mennyiségű energiát takarít meg. Ezen felül, a korábbi energiatakarékos világítási technológiáktól eltérően, a LED-es világítás nem igényel kompromisszumokat a teljesítőképesség terén. Úgy lehet megtervezni, hogy olyan – szinte tetszőleges – spektrummal rendelkezzen, amely jó színminőséget biztosít. Alapvető módon dimmelhető – azonnal és folyamatosan. Végezetül, a fényforrás kis mérete jobb optikai kontrollt tesz lehetővé. Ezek a teljesítőképességi jellemzők, valamint a LED-es világítás nagy hatékonysága és alacsony költségei lehetővé teszik az energiahatékonysági technológiák ritka hármasának – a nagy hatékonyságnak, az alacsony költségnek és a jobb teljesítőképességnek – a megvalósítását, ami gyors elfogadást és óriási energiamegtakarítást eredményezett. Ezek a tulajdonságok és előnyök a világítás környezeti hatásainak csökkentése mellett érhető el (az alacsonyabb energiatermelés előnyeinek túl) – ami az anyagok toxikusságának és ökológiai hatásának csökkentését illeti.

Eddig a szilárdtest-világításra való áttérés előnyei a hagyományos világítástechnikai termékek hatékonyabb szilárdtest-világí-



tási termékekre való lecsereléséből származtak – ugyanazon alapvető világítási feladat során – megvilágítás és láthatóság a szem fotopos reakciója alapján. A szilárdtest-világítási technológia új képességei azonban – az új világítástechnikai ismeretekkel együtt – lehetőséget kínálnak a világításra fordított energia további csökkentésére, a világítás teljesítőképességének új formákban való tökéletesítésére és a korábbi világítástechnológiák negatív hatásainak csökkentésére.

A szilárdtest-világítási technológia által kínált hatásfok- vagy fényhasznosításváltozástól további energiamegtakarítás érhető el az optikai vezérlés, a spektrumok igényekre szabása és a fényerősség még pontosabb vezérlése folytán. Ugyanakkor új keretmunkát kell kialakítani e tényezők közötti kompromisszumok, valamint a fényforrások hatásfokának modellezésére és értékelésére.

A spektrum „igényre szabása” lehetővé teszi a világítás teljesítőképességének javítását azáltal, hogy a fény igen speciális tulajdonságait – színtartományt, különbségtételi és reprodukálási képességet – lehet így beállítani. A jobb optikai kontroll lehetővé teszi a fény kápráztatásának csökkentését és pontosabb irányíthatóságát. A fényerősség szabályozhatósága azt is lehetővé teszi, hogy a világítás az alkalmazáshoz szükséges szintre álljon be és dinamikusan alkalmazkodjon a külső környezet változásaihoz vagy az emberi szükségletekhez.

A legújabb kutatások és a világítástechnika jobb megértése azt mutatták, hogy vannak olyan megfontolások, amelyek túlmutatnak az alapvető világítási és színminőségi tulajdonságokon (pl. a CRI színvisszaadási indexen vagy a CCT korrelált színhőmérsékleten). Az intenzív és nagyobb kértartalmú fény befolyásolja éberségünket és melatonin-kiválasztásunkat, ami jelentős egészségügyi következményekkel jár.

A világítástervezőknek figyelembe kell majd venniük ezeket a hatásokat, valamint a szem fotopos fényérzékenységét, amikor új világítási rendszereket terveznek. A világítástechnikai termékek fejlesztőinek pedig világos iránymutatásokra lesz szükségük az intenzitással és a spektrummal kapcsolatosan, hogy olyan termékeket tudjanak kifejleszteni, amelyek nem csupán hatékonyabbak, hanem az egészség és a jó közérzet támogatása szempontjából is meghaladják a hagyományos világítástechnikai rendszereket. Az energiamegtakarítás és a jó közérzet előnyeinek ezt a ritka kombinációját kizárólag a szilárdtest-világítási technológia kínálja.

A szilárdtest-világítás új felfedezéseinek, hatásainak és lehetséges előnyeinek köre nagyrészt a LED-ek hatásfoka terén elért előrelépésekből fakad. A hatásfok növelése csökkenti a költségeket és a méreteket, miközben új formai kialakításokat, jobb optikai teljesítményt és új világítási alkalmazásokat tesz lehetővé. Ezért az előrejelzett energiamegtakarítási célok eléréséhez és a világítási alkalmazások jobb hatásfokával elérhető energiamegtakarítások maximalizálása érdekében folyamatos K+F tevékenységre van szükség. Az új világítási alkalmazások jövőbeni hatásfokjavulásainak biztosítaniuk kell, hogy a jó közérzet és a termelékenység ne kerüljön veszélybe, sőt, ahol csak lehetséges, javuljon.

Végül, figyelembe véve a szilárdtest-világítás gyors fejlődését és tökéletesedését, nagyon fontos, hogy a gyártási eljárások a kihozatal javítása, a rugalmasság növelése, az anyagfelhasználás csökkentése és általában a gyártási sebesség és hatékonyság növelése révén lépést tartsanak ezzel. Ráadásul az Egyesült Államokban a világítástechnikai termékek típusainak és alkalmazási követelményeinek széles skálája azt jelenti, hogy egyre inkább „testre szabják” és „igény szerint” gyártják azokat. E trend támogatásához új, rugalmas gyártási eljárásokra van szükség. Különösen az additív gyártási eljárások* fejlesztésének van nagy hatása a termékinlátat maximalizálása s egyúttal a tárolt komponensek minimalizálása érdekében. Az additív gyártási eljárások alkalmazhatók lennének a gyártási értéklánc egészében, a lapka-szintű feldolgozási eljárásoktól a lámpatest-gyártásig.

A szilárdtest-világítási család másik technológiai csoportját a szerves LED-ek (OLED-ek) képezik. Az OLED termékek egyedülálló, a LED világítást kiegészítő előnyöket kínálnak. Az OLED világítással

kapcsolatosan azonban továbbra is jelentősek a technológiai akadályok, ezért a fejlődés elmarad a LED-ek teljesítőképességéhez és költségeihez képest. Az OLED-ek fényhasznosítása a jelenlegi 90 lm/W és a megcélzott 190 lm/W értékekkel jelentősen elmarad a LED-ek fényhasznosításától, vannak azonban alkalmazás-specifikus előnyeik is. Az OLED világítási technológiának mindenesetre folyamatos K+F-re van szüksége ahhoz, hogy a laboratóriumi léptékű hatásfok- és teljesítőképesség-javulás kereskedelmileg használhatóvá váljon. Különösen a hatásfok javítható az anyag, az eszköz és a fénykivonás szintjén. Ezek a hatásfok-növekedések közvetlen hatással lennének a költségekre és a megbízhatóságra.

Az OLED világítás érdekes teljesítőképességi és gyártási ellenpontot kínál a LED-es világítással szemben. Természeténél fogva diffúz, ami azt jelenti, hogy a megvilágítandó személy vagy tárgy közvetlen közelében felszerelhető. Minden más világítási technológiánál – ideértve a LED-eket is – optikailag kell teríteni a fényt, hogy védelmet biztosítsunk a nagy intenzitású fényforrások kápráztató hatásával szemben. Jelenleg számos LED-es világítási termék hullámvezető optikát használ a karsú profil eléréséhez, míg az 1-2 ábrán bemutatotthoz hasonló OLED-ek természetükénél fogva diffúz fényt állítanak elő anélkül, hogy kiegészítő optikára lenne szükség. Noha az OLED világítás felkínálja ezeket az egyedülálló világítási lehetőségeket, még nem képes hatékonyan működni a meglévő, elterjedt formai kialakítású lámpatestekkel.

Gyártás tekintetében az OLED-ek megkövetelik a leválasztott szerves anyagok vastagságának nanométer léptékű ellenőrzését – igen nagy (négyzetméternyi) területeken, nagy sebesség mellett. A gyártásellenőrzésnek ez a szintje nagy kihívást jelent és olyan új gyártási eljárások kidolgozását igényli, amelyek kompatibilisek a leghatékonyabb OLED anyagokkal és eszközökkel. Ezenkívül az OLED eszközöket és anyagokat védeni kell a környezeti oxigén és nedvesség hatásaitól, amelyek megzavarhatják a finoman „hangolt” anyag és eszköz teljesítőképességét. Emellett ezeket a technológiai és gyártási kihívásokat úgy kell megoldani, hogy közben teljesüljenek a fogyasztóknak az árral, teljesítőképességgel és megbízhatósággal kapcsolatos elvárásai. Ezeknek az akadályoknak a leküzdésével jelentős előnyöket lehetne elérni a világítási alkalmazásoknál az energiamegtakarítás, a kom-

**Olyan eljárások, amelyek során vagy a gyártósor alakítható át nagyon gyorsan a szükségleteknek megfelelően, vagy a termékek 3D CAD modellek alapján készülnek. – A Szerk.*



1-1 ábra – OLED panel (Forrás: Digital Trends, 2018. szept. [1])

fort és az általános jó közérzet terén. Az OLED világításban elért bármilyen előrelépés elősegítené az alkalmazások széles skálájának fejlődését, ideértve a napelemeket, a kijelzőket, a fejlett nyílászárók (ablakok) területét és sok minden mást – további jelentős energiamegtakarítási lehetőségek mellett.

A jelen tanulmány a fent leírt területeken történő előrelépéshez szükséges K+F témákat tárgyalja. A felsorolt konkrét kutatási témák a BTO szakértőitől származnak, akik a tudományos körök, országos laboratóriumok és az ipar azon érdekelt feleivel konzultáltak, akik a BTO szilárdtest-világítási programjában dolgoznak. A végleges K+F témákat a lehetséges finanszírozás figyelembevételével a DOE határozza meg. A BTO szilárdtest-világítási programja továbbra is agresszív teljesítőképességi és költség-célokat tűz ki a LED-es és OLED-es világítástechnológiák számára, és e célok eléréséhez a K+F tevékenység korai szakaszához anyagi támogatást és kutatási segítséget nyújt.

Az alábbiakban felsoroljuk azokat a jelenlegi fontos K+F kihívásokat, amelyeket az érdekeltek felek a kerekasztal és a munkaértekezlet során javasoltak. Az egyes K+F témák részletesebb leírását a támogatásokkal együtt a jelen tanulmány 3. fejezete tartalmazza. (Mivel kifejezetten az Egyesült Államokra vonatkozik, e fejezet ismeretétől eltekintettünk. – A Szerk.)

A LED-alapú világítás K+F javaslatai

• **Fényemittáló diódák és anyagaik** – A látható spektrum egészében emittáló LED-ek felé történő elmozdulás, amely fejlődést igazol a csúcs hatásfok és a nagy meghajtóáramoknál és magas hőmérsékleteknél adódó stabil hatásfok tekintetében. És alapvető modellek kifejlesztése a LED-eszközök teljesítőképességének előrejelzé-

[1] Digital Trends: LG's flexible OLED lamps are ribbons of light you can twist into any shape, <https://www.digitaltrends.com/home/lg-oled-lamp-news/#/1>

sére számos anyag, eszközstruktúra és szintézistechnika felhasználásával.

- **Tökéletesített emittereszköz-struktúrák** – Tökéletesített emittereszköz-struktúrák kidolgozása modern emitteranyagokkal a fehér fotonok LED-csomagból való kinyerésének növelése érdekében, a teljes LED-csomag lm/W-ban mért átalakítási hatásfokának és a fehér fotonoknak a cél irányába történő eljuttatási képességének meghatározásával, amely általában javul a lm/mm^2 -ben mérhető fénykibocsátással.

- **Kvantumpontos optikai lefelé konvertáló anyagok** – A chipen kialakított, nagy hatásfokú, kvantumpontos (QD) lefelé konvertáló anyagok jobb megismerése, hogy el lehessen érni vagy meg lehessen haladni a chipekre felvitt hagyományos fényporok teljesítőképességét az emissziós hullámhosszak széles tartományában.

- **Tökéletesített LED-es világítási koncepciók** – Olyan tökéletesen optimalizált, színkeveréses LED-es világítási termék-koncepciók kidolgozása, amelyek hatásfokjavulásokat vagy jobb világítási alkalmazási hatásfokkal rendelkező világítás-technikai termékeket eredményeznek.

- **LED-es teljesítmény- és funkcionális elektronika** – Olyan nagy teljesítményt szolgáltató, fejlett prototípus kifejlesztése nagy hatásfokú lámpatestek számára, amelyek a működési tartomány egészében nagy hatásfokkal, nagy megbízhatósággal, minimális méretekkel és súllyal rendelkeznek.

- **Additív gyártási eljárások a világítás számára** – Additív tömeggyártási technológiák kidolgozása a LED-es világítás-technikai gyártás értékláncának bármely részéhez, amely csökkenti az alkatrészek számát és költséghatékony.

Az OLED-alapú világítás K+F javaslatai

- **Stabil, hatékony fehér fényű eszközök** – Olyan új anyagok és struktúrák kidolgozása, amelyek segíteni képesek az igen nagy hatásfokú, stabil fehér OLED-ek megvalósítását.

- **Fejlett gyártástechnológia az OLED-ek számára** – Olyan új eljárások kifejlesztése és olyan tökéletesítések az anyagleválasztás, az eszközgyártás vagy az OLED-ek tokozása terén, amelyek jelentősen csökkentik a gyártási költségeket a teljesítőképesség lerontása nélkül.

- **Fénykivonás és -hasznosítás** – Új optikai és eszközstruktúrák kidolgozása az OLED-ek fénykivonásának javítására az OLED panelek vékony profiljának és fejlet, korszerű teljesítőképességének megőrzése mellett.

- **Prototípus OLED világítási platformok** –

Olyan OLED-es világítási platformok kidolgozása, amelyek segítenek az OLED-es világítástechnológia teljesítőképességi és tervezési céljainak elérésében és egyértelmű eltérést mutatnak a meglévő termékekhez képest.

Világítással kapcsolatos közös – LED-es és OLED-es – K+F javaslatok

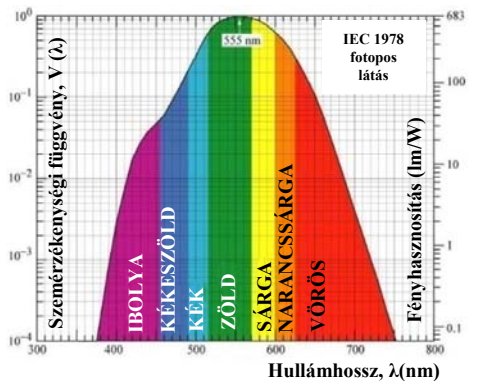
- **A fény fiziológiai hatásainak jobb megismerése a hatékonyság javítása érdekében**

– Kutatást kell végezni az általános populáció számára fiziológiai szempontból optimalizált világítás jobb megismerése érdekében a fényre adott objektív fiziológiai válaszok és/vagy a szubjektív válaszok kiterjedt gyűjtése alapján a világítás hatásfokának optimalizálása céljából.

- **A világítási alkalmazások hatásfokának jobb megismerése** – Általános keret, matematikai modell és számítógépes szimulációs eljárás kidolgozása bármilyen világítási alkalmazás hatásfokának jellemzésére a világítási alkalmazás négy elsődleges szempontja – a fényforrás hatásfoka, az optikai továbbítás hatásfoka, a spektrális hatásfok és az intenzitás hatásfoka – tekintetében.

4 A világítástudomány irányzatai

A szilárdtest-világítás óriási lehetőséget kínál a világítás hatásfokának, teljesítőképességének és értékének javítására új alkalmazások és előnyök létrehozásával. A LED és az OLED kifejlesztésének kezdeti motivációja a fényforrások nagy fényhasznosításának ígérete és a félvezetőgyártási folyamatok kiaknázhatóságának lehetőségei voltak. Bár még mindig van jelentős fejlesztési lehetőség, a szilárdtest-világítás már teljesíti ígéretét, mivel folyamatosan demonstrálja a hagyományos fényforrásoknál jobb fényhasznosítását, a hosszú élettartamot, amely egyszerű időn belül lehetővé teszi a megtérülést, és új funkciókkal is rendelkezik, ideértve a spektrum állíthatóságát, a fejlett vezérléseket és a csatlakoztathatóságot. Ezek a tulajdonságok a szilárdtest-világítás gyors elfogadásához vezettek – máris jelentős energiamegtakarításokat eredményezve. Ezen felül – a technológia fejlődésével – egyértelművé vált, hogy hatásai messze meghaladják csupán csak az energiamegtakarítást. A szilárdtest-világításnak komoly kedvező hatásai lehetnek a környezetre, a kertészetekre, a szállítás biztonságára, egészségünkre és termelékenységünkre, amelyek mindegyike megvalósítható, miközben jelentős energiát takaríthatunk meg a hagyományos világítási technológiákhoz képest.



4-1 ábra – Szemérzékenységi függvény, IEC 1978 – Fotopos látás (Forrás: LEDs Magazine, Radiometric and Photometric Terms [3])

Ugyan a szilárdtest-világítás betartja a folyamatos energiamegtakarítással és az új világítási értékekkel kapcsolatos ígéretét, ám ezeknek teljes megvalósításához folyamatos K+F tevékenységre van szükség. Valójában a szilárdtest-világítás megjelenése tette lehetővé a világítás tudományának legfontosabb felfedezéseit, amelyek számos új és fontos összefüggést tárnak fel a világításnak való kitettség és a biológiai hatások között. Ezek az összefüggések azt is jelzik, hogy a meglévő teljesítőképességi paraméterek, mutatók, tervezési normák és útmutatások nem elégségesek ahhoz, hogy leírják, hogyan kell specifikálni a világítást egy adott alkalmazáshoz. A világítási tudományban K+F munkára van szükség annak biztosításához, hogy a szilárdtest-világítás továbbra is hajtóereje legyen az energiamegtakarításnak, mivel a szintónusok szabályozása, a vezérlők és a komplex érzékelőhálózatok növekvő használata célzott kutatás nélkül növelheti az energiafogyasztást. A következő fejezetek a szilárdtest-világítás tudományának számos kulcsfontosságú irányzatát tárják fel.

Az elmúlt 15 évben a szilárdtest-világítás fejlődését lm/W -ban mértük. Ez a mértékegység a számlálóban a fénykeltés mértékét, a lument, a nevezőben pedig a fény előállításához szükséges fogyasztást, a bemeneti elektromos teljesítményt tartalmazza. Noha ez a mértékegység könnyen használható, további információra van szükség annak biztosításához, hogy a keletkezett lumen hatékony legyen a tervezett világítási alkalmazáshoz.

[2] Office of Management and Budget: Memorandum for the Heads of Executive Departments and Agencies, FY 2020 Administration Research and Development Budget Priorities, 2018. júl. 31., <https://www.whitehouse.gov/wpcontent/uploads/2018/07/M-18-22.pdf>

[3] LEDs Magazine: Radiometric and Photometric Terms, 2005. ápr. 1., https://www.ledsmagazine.com/content/dam/leds/migrated/objects/features/1/1/11/CI_Ephotopic.jpg.

Szokásosan további színminőségi mértékegységek – ideértve a CRI színvisszaadási indexet és a CCT korrelált színhőmérsékletet – is rendelkezésre állnak az adott alkalmazáshoz megfelelő világítástechnikai termék megválasztásához. Noha a lumen a létrehozott fény mennyiségét méri, értéke függ az ember fényre adott válaszából, amelyet a fotopos látás spektrális érzékenységi görbéje reprezentál. Amint az a 4-1 ábrán látható, a szem érzékenyebb a zöld spektrális tartományokba eső fényre, ezért ezek a fotonok nagyobb súllyal esnek latba, mint a spektrum mélyvörös vagy ibolya tartományába esők. A lumen értékét azután a fényforrás által kibocsátott spektrum és a fotopos szemérzékenységi görbe konvolúciójával („átlagolásával”) számítják ki. Ezért annak a fényemisszióknak, amely a 4-1 ábrán látható fotopos szemérzékenységi görbén kívülre esik, kisebb a szerepe és nem járul hozzá jelentős mértékben az észlelt lumen értékéhez.

A lumen értékének ez a számításmódja reprezentálja a lm/W-ban mért fényhasznosítás mértékegységének alapját, amelyet mind a mai napig eredményesen használtak a hatékony szilárdtest-világítási megoldások kidolgozásához és a teljesítőképesség javításához. A LED technológia fejlesztései azonban olyan új szinteket hoztak be a szabályozhatóság és a funkcionalitás területére, ami miatt a lm/W mértékegység sok világítástechnikai alkalmazásnál már nem képes tökéletesen leírni a LED-ek hatásfokát, hatékonyságát és értékeit. Két olyan példa, ahol a lm/W mérőszám nem elegendő: az egyik az ember fényre adott nem vizuális fiziológiai válasza, a másik a kertészetek megvilágítása. Amint azt a későbbi, 4.2 fejezetben tárgyalni fogjuk, ezek az alkalmazások különböző hullámhosszúságú fényt használnak a fiziológiai aktivitás – azaz a spektrális érzékenység – befolyásolására a világítás hatékonyságának meghatározásához.

Az új és a már létező világítási alkalmazásoknál a világítás hatékonyságát nem lehet kizárólag a lumenek nagyságával leírni. A világítás láthatóságon túli egyéb hatékonysági szempontjainak leírásához új spektrális érzékenységi görbét fognak használni. A spektrumnak a szilárdtest-világítás által kínált szabályozhatóságával optimalizálható a kibocsátott fény új spektrális érzékenységi görbével való „lefedése”. Ezenkívül, ha a világítási rendszereket csak a kibocsátott lumenekkel jellemezzük, akkor nem vesszük figyelembe a világítási rendszer további olyan elemeit, amelyek jelentős mértékben befolyásolhatják a hatékonyságot.



4-2. ábra – Lehetséges módszer a világítási alkalmazás hatásfokának kiértékeléséhez

A szilárdtest-világítási technológiák a kibocsátott fény erősségének és irányának pontos kontrollját kínálják, ami lehetővé teszi, hogy még pontosabban tudjuk eljuttatni a megfelelő nagyságú fényt a megfelelő helyre a megfelelő időben.

Összességében a pontos spektrális, optikai és intenzitásvezérlés új határokat szab az energiamegtakarítás számára, amelyet a szilárdtest-világítási fényforrás nagy hatékonysága tesz lehetővé.

Noha nem lehet vele tökéletesen leírni a világítási alkalmazás teljesítőképességét, azért a lumen még mindig a legfontosabb mértékegység marad a világítási szolgáltatás jellemzésére, mivel a fény legfontosabb funkciója a fizikai tér és a benne lévő objektumok megvilágítása marad. A szándékolt alkalmazás kívánt célját (legyen az akár biológiai, akár élettelen tárgy) megvilágító fény jellemzésére egy holisztikusabb megoldás azonban hasznos lesz a szilárdtest-világítási technológia valamennyi tökéletesített funkciójának demonstrálására.

4.1 A világítási alkalmazás hatásfoka – Új módszer és lehetőség az energiamegtakarítások számára

A világítási rendszerek hatékonyságának és hatásfokának jellemzésére szolgáló új módszer javítaná azt a módot, ahogy adott alkalmazáshoz megkülönböztetjük a világítás teljesítőképességét. Az új módszerre potenciálisan szükség lehet ahhoz, hogy megvizsgáljuk:

- a spektrális hatásfokot (l. a 4.1.1 fejezetben),
- a lámpatest fényforrásának hatásfokát (l. a 4.1.2 fejezetben),
- az optikai továbbítás hatásfokát (l. a 4.1.3 fejezetben) és
- a hatékonyság intenzitását (l. a 4.1.4 fejezetben).

Összességében ezt a négy elemet használhatnánk a világítási alkalmazás szilárdtest-világítási rendszerekkel demonstrált teljes hatásfokának leírására. Noha mindegyiket bemutatták, értékelték és tanulmányozták már külön-külön a szilárdtest-világítással kapcsolatban, összességében, holisztikusan, közös módszer keretében még nem vizsgálták. Ha a világítási alkalmazás

hatékonyságának egyes összetevőit külön-külön vizsgáljuk, ez óhatatlanul korlátozza az iparon beüli használhatóságukat és eltékoztolt lehetőséget jelet az energiamegtakarítás terén.

A holisztikus megközelítéssel a világítási alkalmazás hatékonyságát különböző szempontokból lehetne megvizsgálni és optimalizálni a különböző alkalmazásokhoz. Ez a 4-2 ábrán bemutatott új módszer iránymutatást adna a világítási alkalmazások hatékonyságával kapcsolatos jövőbeni K+F tevékenységhez, amelynek célja az adott alkalmazáshoz a teljesítőképesség legnagyobb hatással járó szempontjainak megcélzása.

A világítási alkalmazások hatékonyságának megállapításához alkalmazott holisztikus módszer koncepciója új dolog, különösen a szilárdtest-világítás új lehetőségeinek figyelembe vétele esetén. Az itt és a következő fejezetekben ismertetett definíciók és módszer előzetesnek tekintendő.

4.1.1 Spektrális hatásfok

A spektrum beállítása a szilárdtest-világítás központi témája lett a kezdetektől fogva – jelentős erőfeszítéssel és kutatási tevékenységgel a világítás teljesítőképességének javításával kapcsolatosan, amelyet a legáltalánosabb mértékegységekkel – lumennel, CCT koordinált színhőmérséklettel és CRI színvisszaadási indexszel – mértek. A spektrum optimalizálásának tekintetében ez csak a kezdet, és számos alkalmazás fog előnyt élvezni a finomabban beállított spektrumokból – nem csupán az illető alkalmazáshoz szükséges energia csökkentése, hanem a benntartózkodók jó közérzete és termelékenysége tekintetében is.

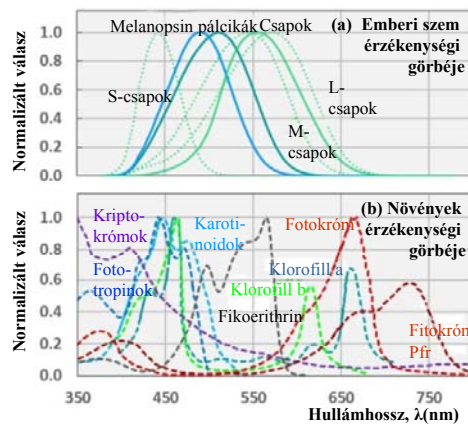
A spektrális hatásfokot a kibocsátott spektrumnak az adott alkalmazáshoz szükséges válasz létrehozási képességével lehet definiálni. Egy adott alkalmazáshoz szabott spektrum lehetővé teszi a megkívánt hullámhosszak maximalizálását és a spektrum illető világítási feladathoz káros vagy szükségtelen részének elhagyását vagy csökkentését. Ez a koncepció még viszonylag új az általános világítási alkalmazások terén, mivel a spektrum finomhangolása csak a hatékony LED-technológia

legutóbbi fejlesztéseinek eredményeként vált lehetővé. A legtöbb világítási alkalmazás esetén az optimális spektrum még nem ismert megfelelőképpen, ezért jelentős kutatómunkára lesz szükség az ismeretek elmélyítéséhez.

A spektrális hatások azt adja meg, hogy a világítási termék által kibocsátott spektrális teljesítménysűrűség (SPD) milyen jól fedti le a világítási alkalmazáshoz szánt megkívánt spektrális érzékenységi görbét. Jelenleg a legtöbb világítástechnikai termék úgy lett tervezve, hogy a fotopos szemérzékenységi görbéhez igazodjon (amiből a „lumen” definíciója származik) – amint az a 4-1 ábrán látható. Ezenkívül a jövő világítási rendszereihez a szem érzékenységi görbéjén kívül további spektrális érzékenységi görbét is figyelembe kell majd venni. Amint a fényre adott fiziológiai válaszokkal kapcsolatos kutatások előrehaladnak, olyan fiziológiai válaszokhoz fognak kidolgozni spektrális érzékenységi görbéket, mint a melanopikus válasz, a reflexiós kontraszt (a színek láthatósága), a szintetizettség, a növények növekedési reakciója és az állatok reakciói, amint az az alábbi 4-3. ábrán látható. (Az állatok és növények fényre adott válaszát a szilárdtest-világítási program érdekelt felei nem sorolták a prioritásnak tekintendő K+F témák közé, de az ezekre az alkalmazásokra adott spektrális válaszok a szilárdtest-világítási technológia által kínált spektrum-kialakítás további előnyeire mutatnak be példákat.) A jövőbeni világítási rendszereknek különböző vagy akár több spektrális érzékenységi görbét kell figyelembe venniük, és ezeknek a rendszereknek a végső spektrális hatékonyságát wattrá vetítve lehetne jellemezni a lm/W-hoz hasonlóan. A fiziológiai válaszok és a modern világítás lehetséges előnyei megismerésének elmélyítéséhez igen fontos a szövetségi ügynökségek (pl. az NIH és az USDA) által képviselt szélesebb körű érdekeltekkel való együttműködés.

4.1.2 Fényforrás-hatások

A lehetséges világítási funkciók kibővült tartománya okán a 4.1.1 fejezetben tárgyalt különböző spektrális érzékenységi görbékkel a spektrum tulajdonságait pontosan kell ismertetni. A radiometriai hatások és a spektrális teljesítménysűrűség használata lehetővé fogja tenni a beállított spektrum olyan pontos leírását, amelyet a CCT korrelált színhőmérséklettel és a CRI színvisszaadási indexszel soha sem lehetne. Ezeket a paramétereket azután fel lehetne használni az alkalmazáshoz szükséges spektrális hatások meghatározásához,



4-3. ábra – Az emberek (a) és a növények (b) érzékenységi görbéje [5]

azaz ahhoz, hogy a kibocsátott spektrum milyen jól fedti le a spektrális érzékenységi görbét az adott alkalmazás esetén. Bizonyos esetekben több spektrális érzékenységi görbére és a hatékonyság hozzájuk tartozó mértékegységére lehet szükség a világítási alkalmazáshoz szükséges megfontolásokhoz.

Jelenleg egy átlagos teljesítőképességű LED-es világítási termék (a tápegységét is beleértve) körülbelül 42% hatásokkal alakítja át a bemeneti elektromos teljesítményt fényre, amit teljesítményátalakítási hatásoknak (PCE) is neveznek. (A jelen tanulmány 3000K színhőmérsékletű és CRI 80 színvisszaadási indexű, meleg fehér világítástechnikai terméket tételez fel, amelynek 137 lm/W a fényhasznosítása, a LER sugárzási fényhasznosítása pedig 323 lm/W, amint az a DOE 2017. évi „SSL Suggested Research Topocs Supplement” című anyagának 4.2 táblázatában szerepel. Elosztva egy világítástechnikai termék tényleges fényhasznosítását a LER értékével, kapjuk meg a termék teljesítményátalakítási hatását.)

A fényforrások hatékonyságának javításáról szóló fejtegetéseket a jelen tanulmány 5. és 6. fejezete részletesebben is tárgyalja. A szilárdtest-világítási komponensek teljesítményátalakítási hatásoknak a legutóbbi években tapasztalható javulása folytán a hangsúly most a világítástechnikai alkalmazás hatékonyságának más elemeire is kiterjedhet. A fényforrás hatások és a spektrális hatások között azonban továbbra is vannak kompromisszumok. Például a nagy CRI színvisszaadási indexű fényforrásoknak kisebb a hatások a fényforrás átalakítási veszteségeinek hozzáadódása folytán. A magas CRI színvisszaadási indexű fényforrásokat igénylő alkalmazások esetén a színminőségre vonatkozóan indokolható a hatásokkal kapcsolatos kompromisszum (a szem spektrális érzékenysége-

nek megfelelő spektrális egyezés csökkenése), habár folynak fejlesztések e kompromisszum minimalizálására.

Más spektrális érzékenységi görbéjű fényforrások konstruálása más kompromisszumokat vonhat maga után a fényforrás hatások és a spektrális hatások között. Hasonlóképpen, az optikai továbbítás hatások a fényforrás hatások és a korszerű optikai kontrollhoz általában szükséges nagy fényesség között vonhat maga után kompromisszumokat (l. az 5.4.2 fejezetben). Végezetül, a fényintenzitás optimális hatásoknak eléréséhez szükség lehet a fényforrás fényerősségének csökkentésére, noha sok beépített világítástechnikai terméknél csökken a tápforrás hatások csökkentett fényerősség-beállítások esetén. Ez egy másik olyan kompromisszum, amelyet figyelembe lehet venni a világítási alkalmazások hatásoknak meghatározási módszere során.

A fényforrás hatások és a világítási alkalmazás hatásoknak egyéb elemei közötti hatások-veszteségek jobb megértése lehet a vezérfonal a világítási rendszerek tervezése és e kompromisszumok csökkentésére irányuló K+F munka során.

4.1.3 Az optikai továbbítás hatások

A LED-es lámpatestek 200 lm/W-ot elérő hatásokkal igen hatékonyak lehetnek. Noha a hatások növelése fontos, a fény céltárgyhoz való eljuttatása hatásoknak növelésével is lehet növelni a világítás hatását. További kutatásokra van szükség a világítás optikai vezérlése terén, hogy a keletkezett fény nagyobb részét lehessen felhasználni az adott alkalmazáshoz. Az alkalmazás szempontjából megváltozik a „hasznos fény” meghatározása, és további kutatásokra is szükség van annak kiderítésére, hogy mi is a „hasznos”. Egyes esetekben a vízszintes munkafelület, más esetekben egy adott tárgy megvilágítása, és végül fény szolgáltatása a szem számára mind a vizuális, mind a nem vizuális fiziológiai hatásokhoz. Noha nagy fényt bocsátanak ki, a lámpatestek által kibocsátott fénynek a helyiségben a szemhez eljutó hányada a becslések szerint 1×10^{-6} és 1×10^{-9} közé esik [6]. (A becslések a kö-

[4] R. J. e. a. Lucas: Action spectra adapted supplemental workbook, Trends Neurosci, vol. 37, no. 1, 2014.

[5] M. Roedererq: Conjugation of monoclonal antibodies, 2004. aug., <http://www.drmr.com/abcon/>

[6] J. Y. Tsao, M. H. Crawford, M. E. Coltrin, A. J. Fischer, D. D. Koleske, G. S. Subramania, G. T. Want, J. J. Wierer és R. F. Karlicek: Solid-State Lighting: Toward Smart and Ultra-efficient Solid-State Lighting, Advanced Optical Materials, vol. 2, no. 9, pp. 809-836, 2014.

vetkezőkön alapulnak: 1) az emberi látómező geometriai elemzése egy tipikus helyiségben, 2) a szembe jutó fény nem publikált meghatározása egy speciális vizsgálati helyiségben kibocsátott összes fény figyelembevételével.) Ez nagymértékben függ a helyiség geometriájától, a világítás elrendezésétől, a benntartózkodók elhelyezkedésétől, a felületek fényvisszaverő képességétől és még sok minden mástól, de ezek a becslések azt mutatják, hogy van lehetőség az optikai továbbítás hatékonyságának gyakorlati javítására anélkül, hogy az a világítási rendszert jelentősen befolyásolná. A világítási elrendezéseket jelenleg úgy alakítják ki, hogy azok egyenletesen világítsák meg az illető helyiség vízszintes szintjeit, ami természetesen nem veszi figyelembe az emberi szemnek a függőleges orientálódáshoz szükséges fényszinteket, sem a foveális, sem a perifériás látás tekintetében. Noha a világítási tervezés folyamata összetett, és különféle kiegészítő jellemzőket is figyelembe vesz, például a termék árát és esztétikai megjelenését, fontos mérlegelni az olyan mutatók értékét is, amelyek pontosabban meghatározzák a benntartózkodók világítással kapcsolatos követelményeit. Az optikai továbbítás nagyobb hatásfoka elérési lehetőségeinek mérlegelésekor azonban jelentős akadályokba ütközünk.

Például a retrofit LED-es világítási termékeket korlátozzák a teljesítőképességi határok, a lámpatestek elrendezése és a hagyományos világítási technológia optikai eloszlása, és nem a benntartózkodók szemébe jutó fény biztosítására vannak optimalizálva. A világítási termékeket általában nem úgy tervezik, hogy az illető alkalmazáshoz pontosan szükséges nagyságú és típusú fényt szolgáltatassák, hanem ehelyett főként a meglévő, régi világítási rendszerek helyettesítésére koncentrálnak. E paradigmából való kitéréshez tökéletesíteni kell a világítástervezés gyakorlatot, fejlett szoftvereszközökre és továbbfejlesztett, kontrollálható optikai eloszlású világítási termékekre van szükség.

Az, hogy egyszerűen megduplázzuk a fény optikai úton való továbbítását a szembe, olyan konzervatív cél, amely jelentős K+F tevékenységet igényel. Különösen olyan módszer kidolgozásához van szükség kutatómunkára, amely hozzájárul az optikai továbbítás jelenlegi hatásfokának széles körű megismertetéséhez és jellemzéséhez valamennyi világítási alkalmazás esetén – mind a tér vizuális észlelése, mind a nem vizuális biológiai tényezők tekintetében. Amint sikerült megszerezni ezt az alapvető ismeretet, az erőfeszítés a világítási rend-

szerek és termékek optikai eloszlásainak optimalizálására szolgáló szoftver kifejlesztése felé fordulhat. A különböző alkalmazásokhoz szükséges fény optimális optikai és spektrális eloszlásának megismerésén túl arra is szükség van, hogy javítsuk a fény kívánt helyre való eljuttatásának képességét is. Kutatómunkára van szükség a lámpatestrendszerek olyan új optikai vezérlési technológiájának kifejlesztéséhez is, amely javítja az elsődleges és másodlagos optikák hatásfokát és irányíthatóságát. A megvizsgálandó különböző technológiák közé tartoznak a metaanyagok, az új eszközstruktúrák és az állítható optikák. Ezenkívül erőfeszítéseket kell tenni a felülvizsgált világítási tervezési gyakorlatok, valamint az új szoftvereszközök és optikai továbbítási módszerek megismertetése érdekében is.

4.1.4 Az intenzitás hatásfoka

Óvatos becsléssel a létrehozott fény 50%-a (vagy annál több) akkor keletkezik, ha nincs jelen megfigyelő, aki láthatná azt az épületekben vagy az utakon, ami a fény és energia pazarlásához vezet [6]. A fény rossz hatásfokú felhasználása jobb fény-szabályozókkal javítható. Az intenzitás, fényerősség hatásfoka meghatározása szerint biztosítja azt, hogy adott időben (amikor észlelők vannak a megvilágított területen) megfelelő fény mennyiséget használjunk fel, és segít azt is meghatározni, ha nem megfelelő a szolgáltatott fény erőssége, ami befolyásolja a fényszolgáltatás hatékonyságát. A LED-es világítás jobb hatásfokot eredményezhet, mivel a hagyományos világítási technológiákhoz képest eredendően szabályozható – teljes, azonnali dimmelhetőséggel együtt. Például, ha van elegendő napfény, vagy nincs szükség világításra, a termékek fényerősségét le lehet csökkenteni, vagy ki is lehet kapcsolni azokat energiamegtakarítás céljából. A kereskedelembe kaphatók vezérlők és szabályozók, és alkalmazták is azokat az intenzitás hatásfokának növelésére. A szabályozók elfogadása és ezáltal a hatékonyság növelése érdekében azonban javítani kell a teljesítőképességet, az árát és a fogyasztói bizalmat. Ezenkívül a szabályozóknak és a szilárdtest-világítási fényforrásoknak hatékonyaknak kell lenniük és csak kis teljesítményt szabad fogyasztaniuk csökkentett fényáramú és készenléti állapotban, nehogy háttérbe szorítsák az energiamegtakarítást.

A világítástechnikai tudomány szempontjából új útmutatókat kell kidolgozni a tárgyak alapvető megvilágításához és a nem vizuális élettani válaszokhoz szüksé-

ges optimális intenzitás szintjeire. Ezenkívül a jövőbeni ipari útmutatóknak a szemet és nem csak a felületet elérő fény színére és erősségére is koncentrálniuk kell. A különböző világítási alkalmazások – az útvilágítástól az irodavilágításon keresztül az ipari létesítmények stb. megvilágításáig – különböző lehetőségeket kínálnak az optimális fényerősség megismerésére és a megfelelő fényerősség eléréséhez szükséges szabályozók alkalmazására. A világítási alkalmazások hatásfokának más elemeihez hasonlóan, a világítási rendszerrel kapcsolatosan ellentmondásos igények is adódhatnak. A világítási feladat megvilágításához és teljesítőképességéhez szükséges fényszintek eltérhetnek a fiziológiai válaszokhoz szükséges optimális fényszintektől. Egy megvilágított térben a különböző embercsoportoknak eltérőek lehetnek a fényerősséggel kapcsolatos igényeik is. Az idősebbek szeméhez nagyobb megvilágítási szintekre van szükség. E megfontolások közül több jól ismert a képzett világítási szakemberek előtt, de a szilárdtest-világítási technológia a fényerősség szabályozásának olyan új szintjeit kínálja, amelyeket a korábbiakban a gyakorlatban nem használtak.

A tér aktív fény-szabályozásával kapcsolatos különböző fényerősség-követelmények és lehetőségek mérlegelésére vonatkozó keretmunka „terelgethetné” a világítástervezőket a fényerősség szintjeinek leghatékonyabb és leggyakorlatiasabb megoldásai felé

4.2 A fényre adott vizuális és nem vizuális válaszok

Az emberek folyamatosan ki vannak téve a természetes és az elektromos világítás hatásainak, amelyeknek mindegyike hatással van életfunkcióinkra – tekintet nélkül magára a fényforrásra. Ma már világos, hogy a fénynek fontos hatásai vannak, amelyeket ki lehet használni az egészség megőrzésére és a közérzet javítására. A legutóbbi kutatások segítették annak megérését, hogy a fény nem csak a látást teszi lehetővé, hanem igen fontos jelzés biológiai rendszereink számára is, befolyásolja a cirkadián ritmust, a pupillareflexeket, az éberséget és még sok minden mást.

A cirkadián ritmusok eredendően össze vannak kapcsolódva a természetes napfény ciklusaihoz – a fény fokozza az éberséget, a sötétség pedig elősegíti az alvást. A természetes környezetben az emberek akkor kelnek fel reggel, amikor a nap felkel és erős, kékben gazdag fényt sugároz felénk. Azután estére elkezdünk fáradni, amikor a természetes fény kék tartalma csökken. Az

elektromos világítás megjelenésével a természetes ciklusok eltolódtak.

Az elektromos világítás nem csupán elegendő fényt biztosít ahhoz, hogy napközben dolgozni lehessen a belső terekben, hanem meg is hosszabbítja a természetes napszakot és a természetes környezettől eltérő világítással kapcsolatos jeleket ad. A hagyományos világítási technológiák és gyakorlatok napközben (a legtöbb helyen) viszonylag alacsony intenzitásintéket állítanak elő a déli napfény által nyújtotthoz képest. Ráadásul a legtöbb beltéri világításnak viszonylag „meleg” színhőmérséklete (kisebb CCT értéke) van, mint a természetes nappali fénynek. Este, elalvás előtt túl sok lehet a túl nagy kék tartalmú fény, különösen ha figyelembe vesszük az elektronikus megjelenítőkből (tv-készülékekből táblagépekből stb.) származóakat. Ezek az elektromos fényjelek megzavarhatják természetes napi ritmusunkat. A fényre adott fiziológia válaszok feltárása új, és egybeesik a szilárdtest-világítási technológia fejlődésével. A szilárdtest-világítási technológia lehetővé teszi, hogy a világítási rendszereket úgy tervezzük meg, hogy azok hatással legyenek az ember fiziológiai reakcióira; világos iránymutatásokra van azonban szükség ahhoz, hogy a fényforrások fiziológiailag hatásos fényt biztosítsanak anélkül, hogy a hatékonyságot veszélyeztetnék.

4.2.1 A fényre adott vizuális és nem vizuális válaszokkal kapcsolatos K+F irányzatok

A BTO szilárdtest-világítási programjának célja a világításra fordított energia csökkentése. A K+F munkában érdekelték azonban a szem által közvetített fényre adott válaszokat jelölték meg a szilárdtest-világítási technológia fejlesztésének és elfogadtatásának legfontosabb kérdéseiként. Ma már egyértelmű, hogy a meglévő világítási technológiákat és megoldásokat nem lehet az egészség és a jó közérzet szempontjából optimalizálni. A fényszintek a nap folyamán túl alacsonyak, elégtelen kék tartalommal rendelkezők is lehetnek. Éjszaka viszont – különösen a belső terekben – túl nagyok, túl nagy kék tartalommal rendelkezők lehetnek, ami – az előző, 4.2 fejezetben leírtak szerint ellentétes az embernek a természetes cirkadián szabályozáshoz szükséges világítási igényeivel. A világítás az épített környezet elengedhetetlen része, amelyet először is az optimális egészség és jó közérzet, másodsorban a nagy hatékonyság szempontjából kell megtervezni és kivitelezni. Ezért nagyon fontos, hogy a fényre adott fizio-

lógiai válaszokat jól megismerjük, majd hatékonyan alkalmazzuk, más szavakkal a fényforrásoknak mindenekelőtt hatékonnyaknak kell lenniük és másodsorban jó hatásfokúaknak a megvilágítás és az optimális egészségbiztosítás szempontjából. A BTO szilárdtest-világítási programja szoros együttműködési megállapodások kidolgozásán munkálkodik az országos egészségügyi intézetekkel ezen a területen.

Noha állnak rendelkezésre alapvető útmutatások, a jelenlegi tudásbázis meglehetősen korlátozott, és a fényre adott alapvető fiziológiai válaszok többsége még ismeretlen vagy klinikai vizsgálatokkal próbálják igazolni azokat. Több K+F munkára van szükség ahhoz, hogy tökéletesen meg lehessen érteni, hogy milyen fény-inputokra van szükség a különböző nem vizuális hatások előidézésére és hogy hogyan lehet azokat megfelelően szabályozni valós környezeti feltételek között. A fényre adott fiziológiai válaszok megértéséhez és feltérképezéséhez folyamatos alaputatásra van szükség. Ezenkívül további kutatómunkára van szükség az alapvető, laboratóriumi szintű kutatások eredményeinek megerősítéséhez és valós világítási felhasználásokba való átültetéséhez. Csak ekkor kezdetjük meg a világítástechnológiák fejlesztését és a világítástervezést e fiziológiai válaszok kiderítésére energiahatékony módon. Különösen fontos, hogy jobban megértsük a dózis-intenzitás-szín viszonyrendszert a fény és a fiziológiai válaszok szempontjából valódi világítási környezetekben a világítás gyakorlati útmutatóinak összeállításához. Ez a megismerés fog segíteni abban, hogy a világítási rendszerek hatékonyak legyenek a fiziológiai válaszok fogadásában, amelyek viszont képessé teszik a világítástechnikai gyártókat arra, hogy a leghatékonyabb megoldásokat fejlesszék ki. A K+F munkában érdekelt felek a BTO szilárdtest-világítási programjához adtak néhány, a fényre adott fiziológiai válaszokkal kapcsolatos kutatási témát:

1. Az alapvető nem vizuális fiziológia-fény kölcsönhatások megértése, beleértve az endokrin reakciókat és más, szem által közvetített fiziológiai válaszokat.
2. A dózis-intenzitás-szín viszony és a fiziológiai küszöbértékek megismerése. A legmagasabb ponté, ahol a több fény vagy a kékben gazdagabb dózis nem növeli az éberséget vagy a melatonin elnyomását. És az alsó vég, ahol a fényszintek túl alacsonyak ahhoz, hogy befolyásolják a melatonin-kiválasztást.
3. A különféle fényszínek közötti szinergikus kölcsönhatások megismerése. A

kékben gazdag fehér ugyanolyan fiziológiai hatású, mint az azonos kék tartalommal rendelkező monokróm kék fény? És hogyan befolyásolják az eltérő spektrális tartalmú, de azonos színpontú metamerek a fiziológiai válaszokat?

4. Legjobb gyakorlatok kidolgozása a benntartózkodók fiziológiai reakcióinak realiztikus világítási környezetben történő mérésére.

5. Eljárás kidolgozása annak meghatározására, hogy a közzétett tudományos bizonyítékok elegendőek-e a fényre adott fiziológiai válasz meghatározásához valóságos világítási környezetben, és konszenzus elérése a bizonyítékokon alapuló világítási iránymutatások kidolgozásának elkezdésére.

A kutatási eredmények nyilvánosságra hozatala után megbízható mechanizmust kell kidolgozni az eredmények értékeléséhez, és ha azok megerősítést nyertek, akkor az eredményeket továbbítani kell olyan szabványügyi testületek számára, amelyek iránymutatásokat és legjobb gyakorlatokat tudnak kidolgozni a világítástechnikai ipar számára. Olyan módszerekre is szükség van, amelyek beazonosítják és megkérdőjelezzik a világítási termékekkel kapcsolatos azon állításokat, amelyeket nem támasztanak alá a tudományos körök és a közzétett kutatási eredmények által bemutatott tudományos bizonyítékok.

4.2.2 Az energiamegtakarítás és a jó közérzet kialakulása közötti kölcsönhatás megismerése

Amint azt a fentiekben megvilágítottuk, a világítási rendszerek megvilágítással és az egészség megőrzésével kapcsolatos hatékonyságának kell elsőbbséget biztosítani, azután következik a hatásfok. A szilárdtest-világítás javítási lehetőségeket kínál a világítás teljesítőképessége és az emberek egészsége és jó közérzete tekintetében, ugyanakkor jelentős energiamegtakarítást is lehetővé tesz. A fényre adott fiziológiai válaszokkal kapcsolatos legutóbbi K+F munka útmutatást nyújt arra, hogy hogyan lehet a világítási rendszereket optimalizálni az emberek egészségi állapota és jó közérzete szempontjából, jöllehet további K+F munkára van szükség ahhoz, hogy megértsük az esetleges új világítási irányvonalak energiafogyasztási következményeit.

A korai tanácsok azt sugallják, hogy a magasabb fényszintek, különösen reggel (de valószínűleg egész nap) „ébresztő” hatással lesz az emberekre, és a nap végén javítja a melatoninfunkciót. Fontos azonban emlékeztetni arra, hogy a nagyobb

fényszintek nagyobb energiafogyasztást is jelentenek. A kutatómunka még folyik, és eddig még nem született útmutatás arra, hogy milyen nagy fényszintekre van szükség, milyen hosszú ideig van szükség ilyen nagy fényszintekre és a fényben mekkorának kell lennie a kék tartalomnak. További K+F munkára van szükség az időzítés, az időtartam, az intenzitás és a fény színe közötti összefüggések és annak tisztázásához, hogy hol van az a küszöbérték, amelynél a pozitív hatások telítődnek. Ennek megismerése lehetővé tenne olyan világítási megoldásokat, amelyek maximalizálják a hatékonyságot és a hatásfokot is. a napközbeni világítási környezetek számára a Bizonyos megvilágított terekben a kutatók vizsgálják az olyan világítás előnyeit, amelyet a napközbeni nagyobb kék tartalmú fehérről az este közeledtével kisebb kék tartalmú fényre lehet váltani. Ez a dinamikusan szabályozható fény jelzést küldene testünk számára a nap folyamán, és a vélekedések szerint javítaná a cirkadián szabályozást és a megfelelő melatonin-kiválasztást. Ez a megoldás azonban befolyásolja az energiafogyasztást, mivel az állítható fehér fényű világítástechnikai termékek általában kisebb hatásfokúak a nem állítható tónusúaknál. Az állítható fehér fényű termékek több energiát fogyasztanak, mivel többféle típusú LED fényforrásra van szükségük, amelyek esetleg nem lehet a legjobb üzemi tartományukban működtetni. Emiatt a több színkeveréses LED fényforrásból eredményül kapott fehér fény gyakran kisebb hatásfokú a statikus, nem állítható fehér fényűeknél, amelyek fehér LED-eket használnak. Ezek a rendszerek megnövelhetik az optikai veszteségeket is a különböző színű LED fényforrások fényének keverése folytán. És a különböző színű LED fényforrások vezérléséhez többcsatornás tápegységekre van szükség, ami nem optimalizált működési körülményeket eredményez. A technikai hatásfok-csökkenések az állítható fehér fényű világítástechnikai termékekenél nem alapvetőek a LED technológiában, de azért jelentős műszaki kihívásokat jelentenek a világítási termékek tervezése terén. A LED fényforrások és tápegységek nagy hatásfokú működtetéséhez ezek a megfontolások a működési feltételek szélesebb tartománya esetén jelentősen befolyásolták az 5. fejezetben ismertetett K+F feladatok prioritását.

Az azzal kapcsolatos ismeretek, hogy a világítást hogyan lehet optimalizálni az egészség szempontjából, meglehetősen korlátozott, ezért még nem ismerjük a világítási energiafogyasztás hatásainak minden

részletét. Az azonban világos, hogy az általános világítási alkalmazásokban a fiziológiai válaszokat vizsgáló kiterjedt K+F munka az állítható fehér világítási rendszerek megalkotásával kapcsolatos K+F tevékenységgel együtt olyan termékek kifejlesztését fogja lehetővé tenni, amelyek a leghatékonyabbak és legnagyobb hatásfokúak lehetnek az emberi egészség és jó közérzet biztosításához szükséges világítás létrehozásához.

4.3 Csatlakoztatott világítás

A világítási infrastruktúra LED termékekkel történő lecserélése lehetőséget kínál a jövő csatlakoztatott világítási rendszerei (CLS) számára, amelyek viszont módot nyújtanak nagyobb energiamegtakarítások elérésére, új világítási alkalmazások világítási hatékonyságának megteremtésére és nagy értékű adatgyűjtésre az épületekben és a városokban. Például a csatlakoztatott világítási rendszerek terjedésével várható, hogy egyre nagyobb mértékben kínálják lehetőséget az erőforrások és az eljárások optimalizálására, az egészség és a termelékenység javulására, valamint új bevételi forrásokra. Továbbá valószínű, hogy ezek a képességek olyan előnyöket fognak biztosítani, amelyek elérők, vagy meg is haladják az általuk elérhető energiamegtakarítások értékét. A hálózatba kötött szilárdtest-világítási rendszerekből származó adatok folytán lehetővé váló szolgáltatások értéke részben vagy teljesen fedezheti az érzékelők, hálózati interfészek és más járulékos komponensek folytán megnövekedett költségeket. A csatlakoztatott világítási eszközökkel létrejött rendszerek adatgyűjtő platformokká válhatnak, amelyek még nagyobb világításra és nem világításra fordított energiamegtakarításokat tesznek lehetővé az épületekben, városokban – és még sok minden más is.

4.3.1 Energiamegtakarítások és más értékes tulajdonságok

A szilárdtest-világítás fejlődésével a csatlakoztatott szilárdtest-világítási rendszerek energiamegtakarításának maximalizálása egyre inkább függ az épített környezetbe történő sikeres integrációtól. A világítás-szabályozóknak is megvan a lehetősége arra, hogy jelentős energiamegtakarításokat érjenek el azzal, hogy a fény nagyságát és típusát hozzáigazítják az adott tér és a benntartózkodók valósidejű igényeihez. A szilárdtest-világítási termékek katalizátor-ként képesek felszabadítani a világítás-szabályozók energiamegtakarítási potenciálját példátlan vezérelhetőségük és az egy-

re terjedő automatizált konfigurációs lehetőség okán – beépített érzékelők és intelligencia, valamint más olyan funkciók és képességek révén, amelyek az általuk összegyűjtött adatokat használják fel. Az olyan világítási rendszerekről, amelyek képesek érzékelni a benntartózkodást, felhasználni a természetes fényt, a nagyteljesítményű vezérlést, a személyes terület vezérlését vagy ezeknek a megközelítéseknek bármely kombinációját, bebizonyosodott, hogy a szilárdtest-világítási energiafogyasztásának 20-60%-át képesek megtakarítani az alkalmazástól és a felhasználás módjától függően [7].

A csatlakoztatott világításnak az a képessége, hogy hasznos adatokat tud gyűjteni és cserélni, valamint az a lehetőség, hogy a gyorsan növekvő Tárgyak Internetének (IoT) „gerinceként” szolgáljon, a szolgáltatások, előnyök és bevételi források széles skáláját teszi lehetővé, amelyek növelik a világítási rendszerek értékét, és tökéletesítik azokat az épületrendszereket, amelyek már régóta elszigetelten működnek. A csatlakoztatott világítási rendszerek segíthetnek az épülettulajdonosoknak megismerni azt, hogy a teret miként használják ki a benntartózkodók, és abban, hogy olyan adaptív világítási stratégiákat vezessenek be, amelyek növelik a világítás energiahatékonyságát. Egy, a világítással összefüggő, fejlett érzékelőhálózat óriási mennyiségű adatot képes szolgáltatni az épület környezetéről (pl. energiafelhasználást, hőmérsékletet, a napfény mértékét), vagy az épületben folyó tevékenységekről (pl. benntartózkodás, eszközök elhelyezése és mozgása). Ez az információ felhasználható az energiamegtakarítás növelésére a napfény kihasználásával, a benntartózkodás érzékelésével, igényre reagáló programokkal, a nappali fényviszonyoknak megfelelő dimmelési ütemtervvel és a valósidejű energiamegtakarítási riportokkal. Más információk az épület jobb kihasználásához és jobb karbantartásához vezethetnek, ideértve a benntartózkodás modern észlelését, a nagyfokú stabilitást, a személyre szabott beállítási profilt és a lámpatest-meghibásodás lejelentését.

A benntartózkodást és a napfényt érzékelő eszközök széles választékán kívül más típusú érzékelők is felszerelhetők, ideértve azokat, amelyek a szén-dioxid szintet, a rezgést, hangot és a légköri nyomást mérik, ami olyan „okosváros” funkciókat

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

eredményez, mint a levegőminőség figyelése, időjárással kapcsolatos figyelmeztetések, lopások észlelése, szabad parkolóhelyek feltüntetése és az utazás optimalizálása.

A csatlakoztatott útvilágítási rendszerek lehetőséget kínálnak az önkormányzati tisztviselők számára adaptív világítási stratégiák megvalósítására (például az útvilágítás 100%-os fényerősségre állítása a sötétség beálltakor, azután az éjszaka közepén fokozatosan 50%-ra csökkentése, majd kora reggel visszaállítva a teljes fényerőre a munkába indulók kedvéért), ami további energiamegtakarítást eredményeznek. A csatlakoztatott útvilágítás a város számára megmutatja az egyes lámpaoszlopok elhelyezkedését, megkönnyítve ezzel azok kezelését, különösen meghibásodások esetén. Ha a csatlakoztatott világítási termékeknek megvan a képességük saját paramétereik mérésére és az energiafelhasználás lejelentésére, az áramszolgáltatók az ügyfeleknek ösztönző tarifákat tudnának kínálni a tényleges megtakarítások alapján a becsült megtakarítások helyett. Az adatvezérelt energiagazdálkodás jelentősen csökkentheti az energiafogyasztást és új piaci lehetőségeket kínálhat, például a „fizess a teljesítményért” energiahatékonysági kezdeményezéseket; fogyasztáson alapuló számlázást azokra az eszközökre, amelyek jelenleg átalánydíjasak; a közüzemi kezdeményezésű tranzakciók (pl. a csúcsidős fogyasztásra és más igények teljesítésére adott válaszlépések) igazolt teljesítését; alacsonyabb költségeket, az energiamegtakarítások pontosabb jóváhagyását a szolgáltatás-alapú üzleti modellek számára; és a rendelkezésre álló (azaz forgalomképes) „épületenergetikai szolgáltatások önjellemzését”.

A szilárdtest-világítást már ma is használják beltéri helymeghatározási platformként kiskereskedelmi és más nagy forgalmú épületekben – Bluetooth® és/vagy a látható fényvel való kommunikáció segítségével, hogy személyre szabott, helyfüggő szolgáltatásokat tudjanak kínálni a benn tartózkodók számára mobil eszközeiken keresztül. A kiskereskedők a lámpatestek felhasználásával helyspecifikus adatokat tudnak továbbítani a vásárlók számára – például kedvezményes kuponokat, vagy azt, hogy hogy hol találják meg az egyes termékeket. A LED-es lámpatestekbe épített markerek lehetővé teszik az épület használat és a forgalom monitorozását és elemzését, ami működési hatékonysághoz, fokozott biztonsághoz és megnövelt bevételekhez vezethet például a repülőterek, bevásárló- és logisztikai központok,

egyetemek és egészségügyi intézmények esetén. A csatlakoztatott világítást a Li-Fi nevű szélessávú kommunikáció ígéretes új forrásának tekinthető, amely a fény modulálásával végzi az adattovábbítást. A csatlakoztatott világítást ezenkívül sokféle formában kombinálják a spektrum szabályozásával, hogy a fiziológiai reakciókkal javítani tudják a hangulatot, a termelékenységet és az egészséget.

4.3.2 A világításvezérlők interoperabilitása

Amint a szilárdtest-világítási technológia sok új szereplőt vont be a világítástechnikai iparba (pl. félvezetőgyártókat és mikroelektronikai rendszerfejlesztőket), a világítás, a kommunikációs hálózatok, a Big Data* és a korszerű elemzések várható hatásaként – a Tárgyak Internete (IoT) segítségével – jelentősen megváltoztatja a világítástechnikai ipar képét. (*Igen nagy adatállományok kezelésére szolgáló komplex rendszer – A Szerk.)

A csatlakoztatott világítási rendszereket az épületek energiagazdálkodási technológiáinak nagyobb környezetein belül kell működtetni. A kihívás olyan közös platformok és protokollok kidolgozása a világítástechnikai termékek körében és a kiterjesztett Tárgyak Internetén belül, amelyek felszabadítják a Tárgyak Internete teljes potenciálját azáltal, hogy lehetővé teszi a használható adatok cseréjét a világítási rendszerek, más épületvezérlési és irányítási rendszerek, valamint a felhő között.

Az interoperabilitásra mint a Tárgyak Internete bevezetésének és ezáltal a csatlakoztatott világítási rendszerek elfogadásának és az ezzel járó energiamegtakarításnak legfontosabb elősegítőjére és katalizátorára tekintenek [8] [9]. Az interoperabilitás megfelelő szintjének biztosítása kulcsfontosságú az eszközök, alkalmazások, hálózatok és rendszerek számára ahhoz, hogy megbízhatóan és biztonságosan végezhessek az adatcserét.

Hagyományosan, kevés interoperabilitás volt, vagy egyáltalán nem is volt interoperabilitás a versengő világításvezérlő eszközök és rendszerek között, mivel a gyártók a szabadalmaztatott technológiák vagy az ipari szabványok saját verziójának kidolgozására és népszerűsítésére összpontosítottak. Az interoperabilitás előnye, hogy lehetővé teszi a különféle eszközök, alkalmazások, hálózatok és rendszerek együttműködését és adatcseréjét. A felhasználók számára csökkenti az eszközök vagy gyártók elavulásának kockázatát, valamint azok korlátozott hardver-, szoft-

ver-, adat- és szolgáltatási lehetőségeit. Ezenkívül javítja a rendszer teljesítőképességét azáltal, hogy lehetővé teszi a többgyártós rendszereket, csökkentve ezzel a fejlesztések növekvő költségeit, biztosítva a nagyobb adatcserét és bátorítva a szolgáltatás-alapú rendszerek megvalósítására.

Az interoperabilitáshoz szükség van arra, hogy az ipar olyan közös platformokban és protokollokban egyezzen meg, amelyek lehetővé teszik a felhasználható adatok cseréjét a világítási eszközök, más rendszerek és a felhő között. Számos konzorcium dolgozik azon, hogy olyan közös specifikációkat és szabványokat állítson össze, amelyek támogatják a nagyobb interoperabilitást – ilyen az Open Connectivity Foundation, a TALQ Consortium, a oneM2M, a Bluetooth Special Interest Group, az Industrial Internet Consortium és a Zigbee® Alliance. A számítástechnika fejlődésével ezek a csoportok különböző megközelítéseken vagy a puzzle különböző részeivel foglalkoznak. Jelenleg csak kis mértékű interoperabilitás van a kereskedelemben kapható világítási rendszerek között.

4.3.3 A csatlakoztatott világítás kísérleti eszköze

A BTO szilárdtest-világítási programja szoros együttműködésben dolgozik az iparral a csatlakoztatott világítási rendszerekhez szükséges technológiai fejlesztések meghatározása és az együttműködés tekintetében. A BTO erőfeszítéseinek központi eleme egy csatlakoztatott világítási kísérleti eszköz (CLTB), amelyet a Pacific North-west National Laboratory (PNNL) tervezett és működtetett a csatlakoztatott világítási rendszerek képességeinek feltérképezésére. Ennek eredményei növelni fogják az új eszközök és rendszerek képességeinek és teljesítményének átláthatóságát, és információs visszacsatolásokat hoznak létre a technológiafejlesztők informálására azokról a szükséges fejlesztésekről, amelyek a DOE prioritási területeire vonatkoznak az energiafelhasználási riportokkal, az interoperabilitással, a konfigu-

[8] Open Connectivity Foundation: New Survey Highlights Importance of Interoperability in the Internet of Things, 2017. febr. 22. <https://openconnectivity.org/announcements/new-survey-highlights-importance-interoperability-internet-things>.

[9] American Hospital Association: Why Interoperability Matters, www.aha.org/content/15/interoperabilitymatters.pdf

[10] Pacific Northwest National Laboratory: Connected Lighting System Interoperability Study, Part 1: Application Programming Interfaces, 2017.

ráció bonyolultságával, a kiberbiztonsággal és a legfontosabb új funkciókkal kapcsolatosan.

A csatlakoztatott világítás CLTB próba-programjának olyan infrastruktúrája van, amely lehetővé teszi a beltéri és kültéri világítástechnikai eszközök hatékony felszerelését. Két mennyezeti rácsozat áll rendelkezésre a beltéri lámpatestek felszereléséhez. Mindkettő függőlegesen állítható a felszerelés megkönnyítése és a különböző lámpatest-magasságok beállíthatósága érdekében. A rácsozatnak bedugaszolható csatlakozói vannak, amelyek lehetővé teszik a könnyű elektromos csatlakoztatást, valamint az áramkör szintű teljesítmény és energia mérését az őket kiszolgáló elektromos panelekben. A rendszernek van egy kifejezetten az útvilágításra szánt infrastruktúrája is, ugyancsak bedugaszolható csatlakozókkal az elektromos csatlakoztatás megkönnyítése érdekében.

A több eszköz és rendszer tesztelhetősége érdekében a CLTB tartalmaz egy szoftver-interoperabilitási platformot is, amely lehetővé teszi azoknak a felszerelt világítási eszközöknek és rendszereknek a kommunikálását, amelyek eredendően nem képesek az egymás közti az adatcserére. Több kereskedelemben kapható beltéri és kültéri csatlakoztatott világítási rendszert szereltek fel a szoftver-interoperabilitási platformot is tartalmazó CLTB-be, és elérhetővé tették a csatlakoztatott világítási rendszerek és egyéb vizsgálatok számára.

A CLTB-vel a csatlakoztatott világítási rendszerek számos területét és képességét vizsgálják, ideértve az interoperabilitást, az energiariportokat és a kiberbiztonsági teszteket. Egy nemrégiben elkészült tanulmány alkalmazásprogramozási interfészek (API-k) felhasználásával megvalósított interoperabilitással foglalkozott több csatlakoztatott világítási rendszerben, és jellemezte az általuk elért interoperabilitás mértékét [10]. A CLS-kereskedőtől jelenleg beszerezhető API-k felhasználhatók a világítási rendszerek közötti bizonyos interoperabilitás megkönnyítésére, amely lehetővé teszi a világítási rendszerek tulajdonosai és üzemeltetői számára a többféle forrásból beszerzett termékek alapvető integrálási szintjét, a távolból történő konfigurálást és kezelési szolgáltatásokat, valamint bizonyos adaptív világítási stratégiákat. Az API-inkonzisztencia és éretlenség azonban sok esetben szükségtelenül növeli az e szolgáltatások és stratégiák megvalósításához szükséges erőfeszítéseket, és csökkenti az általuk nyújtott értéket és teljesítményt. Az API-fejlesztőknek meg kell vizsgálniuk és meg kell próbálniuk

megvalósítani az erőforrások megnevezésére és szervezésére, valamint a közös információs és adatmodellekre vonatkozó közös megoldásokat, amelyek kulcsfontosságúak a heterogén rendszerek integrálásához szükséges erőfeszítések minimalizálása és a funkcionális, nagy értékű felhasználások lehetővé tétele érdekében.

4.3.4 Biztonság

Mivel egyre több eszköz válik egyfajta csatlakoztatott világ részévé, az előnyök biztonsági kockázatokkal járnak. Ezt néhány közzétett eset bizonyította is, amelyeknél a tűzfalakat áttörték, meghekkelve a világítási termékeket [11].

Az internethez csatlakoztatott világítási rendszer a hekkerek számára belépési pontokat kínálhat a hálózati tűzfalak mögött például otthoni számítógéphez, a kereskedők pénztárgépeikhez vagy a kormányhivatal értékes adatbázisaihoz. A tanulmányok azt mutatták, hogy gyakran még azokat a legalapvetőbb biztonsági intézkedéseket sem tartották be, amelyek meg tudták volna akadályozni ezeket a hekkeléseket – ideértve a titkosítás és a hitelesítés hiányát, a tisztán szöveges protokollok használatát az érzékeny információk (pl. jelszavak) továbbítására, valamint az alapértelmezett jelszavak használatát az ügyfélkörnyezetben [11]. E potenciális sebezhetőségek miatt elengedhetetlen, hogy a gyártók már a kezdetektől fogva beépítsék a biztonságot termék- és szoftver-fejlesztésükbe.

A csatlakoztatott világítási és más, a Tárgyak Internetéhez kapcsolt rendszerek további munkát igényelnek a végpontok közötti biztonság beépítése terén. A lámpatesteknek minden egyes csomóponthoz hitelesítési és biztonsági tanúsítvánnyal kell rendelkezniük, és az érzékelő adatait „alá kell írni”, hogy meg lehessen bizonyosodni arról, hogy azok a megfelelő érzékelőtől származnak-e. A Tárgyak Internetéhez csatlakoztatott rendszerek sok esetben nem lesznek egyszerű felhasználású, egyetlen tulajdonjogú megoldások. Az eszközök és az adatok gyűjtésére és továbbítására szolgáló vezérlőplatform eltérő tulajdonosi, működési, kezelési és kapcsolódási tulajdonságokkal rendelkezhetnek. Következésképpen az eszközöktől megkövetelhető, hogy több adatfelhasználóhoz és adatkezelőhöz biztosítsanak hozzáférést, miközben továbbra is őrizték meg az adatok magántermészetét, amennyiben az az ilyen fogyasztók körében szükséges.

A mindennapi vásárlók körében kulcsfontosságú az információk elérhetősége, ugyanakkor az adatok elkülönítése. A fel-

használói adatok és a magánélet védelme, a rendelkezésre állás biztosítása és a hálózathoz csatlakoztatott eszközök védelme az illetéktelen hozzáférés ellen igen fontos lesz azoknak a vállalatoknak, amelyek szeretnék megszerezni és fenntartani a bizalmat a csatlakoztatott világítás vásárlóival.

A DOE együttműködik az Underwriters Laboratory (UL) és a Security Claims Evaluation Testbed más, az IIC Ipari Internet Konzorciumhoz tartozó tagjaival a kiberbiztonsági sebezhetőség vizsgálati módszereinek kidolgozása terén. A nemrégiben befejezett V0 verziójú tesztmódszer értékelése folyamatban van a DOE CLTB-ben egy olyan tesztbeállítás segítségével, amely jelenleg egy kiberbiztonsági átjárót, két kereskedelemben kapható kiberbiztonsági szoftverszolgáltatást és egy Kali Linux rendszert tartalmaz. Ha egy vagy több tesztmódszer kielégítőnek bizonyul, a DOE tanulmányokat fog készíteni a csatlakoztatott világítás kiberbiztonsági sebezhetőségének és esetleg a kapcsolatos stratégiák és technológiák hatékonyságának kiértékelésére.

5 Irányzatok a LED-tudományban

A LED-es világítástechnológia drámai módon fejlődött az elmúlt évtizedben – elérve a rendelkezésre álló fehér fényforrások egyik legnagyobb hatásfokát. A gyártásban bekövetkezett fejlesztések lehetővé tették, hogy a LED-es termékek ára elég alacsonyan legyen ahhoz, hogy mérhető elfogadottságot érjenek el valamennyi általános világítási alkalmazás terén. A fejlődések ellenére további fejlesztésekre és még nagyobb energiamegtakarítások elérésére van szükség. A LED-es világítás hatékonysága és más tulajdonságok – például a színminőség, a fényeloszlás, a formatényező és az architektúrákba való beépítés – további fejlesztésekre adnak lehetőséget. A LED-es világítás gyártástechnológiáját is lehet még továbbfejleszteni az árak csökkentése és a piaci behatolás növelése érdekében, ami az ország számára a lehető legnagyobb energiamegtakarítást eredményezheti.

A következő fejezetek a 3.2 fejezetben ismertetett LED-technológiák jelenlegi állapotát, teljesítményjavítási lehetőségeit és kihívásait vizsgálják. A LED-technológiával jelenleg szembesülő legfontosabb kihí-

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

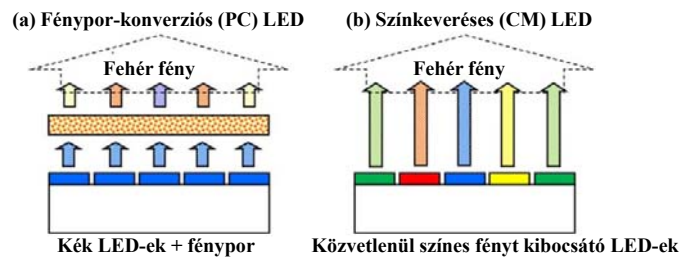
vások egyben a teljesítőképesség-növekedés legnagyobb lehetőségeit is reprezentálják. A fejezetek mind a fehér fényt előállító LED-csomagokkal, mind a LED-es lámpatestekkel foglalkoznak, amelyekbe beépítik azokat és amelyek a megfelelő kapcsolatot biztosítják az elektromos tápforrás, a mechanikai integráció, a hőelvezetés és a fény optikai eloszlása között.

5.1 A fehér fényű LED-ek technológiája

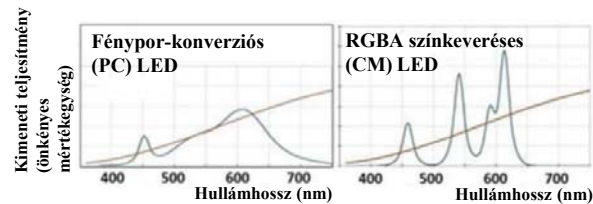
A következő fejezetekben a diszkusszió középpontjában a fehér fény előállításának két általános architektúrája áll – a sárga és vörös hullámhosszúságú, lefelé konvertáló optikai anyagokat (szokásosan fényporokat) gerjesztő kék LED-en alapuló fényporkonverziós pc-LED és a színkeveréses cm-LED, amely a fehér fény előállításához vörös, zöld, kék és borostyánsárga primer színeket adó (RGBA) LED-ek fényét használja fel. Ezeket mutatja be az 5.1 ábra; a fehér LED-struktúrák megfelelő optikai spektrális eloszlásai pedig az 5.2 ábrán láthatók.

A pc-LED architektúra messze a domináns fehér fényt előállító megoldás. Három fontos tulajdonsága van: egyszerűség (csak egyetlen LED-típust használ), hőállóság (az InGaN kék LED és a YAG (ittrium-alumínium-garnet) fényporos lefelé konvertáló anyagok viszonylag magas hőmérsékleteken képesek működni) és a színstabilitás (a fényforrás vörös, zöld és kék színeinek arányát a gyártás során a fénypor optikai sűrűségével határozzák meg, és ezek az arányok viszonylag stabilak maradnak az idő múlásával).

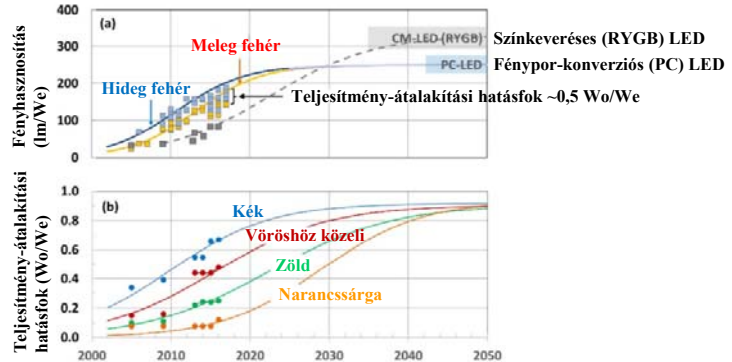
Az 5-3 ábra a pc-LED-ek fényhasznosításának alakulását mutatja a BTO szilárdtest-világítási programjának elindítása és a fejlesztések megvalósulása óta eltelt idő alatt. Fontos megjegyezni, hogy a feltüntetett értékek feltételezett működési feltételei nem egyeznek meg feltétlenül a gyakorlattal, különös tekintettel az áramsűrűség-csökkenés minimalizálása érdekében alkalmazott alacsonyabb meghajtóáramok növekvő használata miatt. Mindenesetre rögzített működési hőmérséklet és korlátozott korrelált színhőmérsékletű és színvisszaadási indexű válogatott eszközök standard áramának (vagy A/cm²-ben mért áramsűrűségének) alkalmazása lehetővé teszi a kutatók számára, hogy értékeljék az emitterhatásfok terén elért fejlesztéseket (beleértve az áramsűrűség és a hő hatására bekövetkező és csökkentését) és a lefelé konvertáló anyag teljesítőképességének javulását. (A LED-termékek értékeléséhez kapcsolatos további részletek az 5-3 ábrá-



5-1. ábra – A két legfontosabb fehér fényt előállító LED-konstrukció – Megjegyzések: (a) A fényporkonverziós (PC) LED kék LED-eket használ a sárga és vörös lefelé konvertáló anyagok gerjesztéséhez; (b) A színkeveréses (CM) LED közvetlenül különböző színű fényt emittáló LED-eket használ a fehér fény előállításához



5-2. ábra – Fehér fényű LED-konstrukciók tipikus szimulált spektrális teljesítmény-eloszlása – Megjegyzés: A csúcserőtelket mutató hullámhosszak és a relatív intenzitások mindkét esetben ott adódnak, ahol a LER sugárzási fényhasznosítás maximumát éri el 3000K korrelált (meleg fehér) színhőmérséklet, „standard” Ra 80-as színvisszaadási index és R9 >0 kilencedik, mélyvörös Munsell-színű példány esetén. A különböző fényforrás-színek spektrumainak szélessége megfelel a jelenlegi legkorszerűbbeknek. Az egyes spektrumoknál feltüntetettük az izzólámpás feketetest fényforrás 3000K-es spektrumát is.



5-3. ábra – A fehér és színes LED-csomagok fényhasznosításának és hatásfokának alakulása az idő függvényében. Megjegyzés: Valamennyi görbe logisztikusan illeszkedő, a hosszú távú jövőbeli teljesítőképességre vonatkozó különféle feltételezések és a történeti kísérleti adatok felhasználásával. Az adatok 25 °C-os és 35 A/cm²-es reprezentatív működési feltételeken minősített termékektől származnak. Ezek eltérnek néhány, kereskedelemben kapható terméktől, különösen azoktól, amelyek alacsonyabb meghajtóáram-sűrűségekkel működtetnek az áramesés minimalizálása érdekében.

• A felső (a) ábra 3000K-es meleg fehér és 5700 K-es hideg fehér, fényporkonverziós LED-ek és 3000-4000K korrelált színhőmérsékletű hipotetikus színkeveréses CM-LED-ek fényhasznosításait mutatja. A fényhasznosítást a fény lumenben kifejezett tipikus fotopos észlelésének és a W-ban mért tipikus bemeneti elektromos teljesítménynek a hányadosa. 2017-ben a kereskedelmi forgalomban kapható termékek a hideg fehér fényporkonverziós LED-eknél kb. 180 lm/W-ot, a meleg fehéréknél pedig kb. 160 lm/W-ot értek el. Ezek az értékek az elektromos teljesítmény optikai teljesítményre történő átalakítása kb. 0,5 Wo/We teljesítmény-átalakítási hatásfokának felelnek meg.

• Az alsó (b) ábrán a legnagyobb fényhasznosítási tényezőjű és nagy színvisszaadási színkeveréses CM-LED-ekhez szükséges, különböző direkt színt (kék, zöld, narancssárga és vöröshöz közeli) emittáló LED-ek teljesítmény-átalakítási hatásfokai láthatók. A jövőben várható körülbelüli teljesítmény-átalakítási hatásfokok 90%-os telítettségi értéként vannak feltüntetve valamennyi szín esetén a 2035-2040-es évektől kezdődően. E fényforrások történeti teljesítmény-átalakítási hatásfokait vetettük össze és súlyoztuk megfelelően a színkeveréses LED-ek és az (a) ábrán látható átalakítási hatásfokok kiszámításához.

hoz fűzött megjegyzésekben találhatók.) E feltételezett működési körülmények mellett a fényhasznosítások mindössze 10 év alatt több mint háromszorosára nőttek – 50 lm/W-ról kb. 165 lm/W-ra. Az alapvető ok a kék LED hatásfokának növekedése volt, noha fejlesztések történtek a fényporok hatásfoka és az emberi szem reakciójához illeszkedő hullámhosszai tekintetében és a

tokozás hatásfoka (optikai szórása/abszorpciója) terén is. E fejlesztések ellenére a hatásfok növelésére továbbra is jelentős tartalékok maradtak. Amint azt az 5-3 ábra kék és sárga görbéinek telítettségi értékei mutatják, a fényporkonverziós LED esetében gyakorlatilag lehetőség van 255 lm/W körüli fényhasznosítási érték elérésére.

A színkeveréses struktúrák esetében a feltevések szerint 325 lm/W-os felső határ érhető el a jelen fejezetben ismertetett technológiai fejlesztések eredményeképpen. Noha a teljesítőképességi potenciál nagy, a jelenlegi hatásokok jóval alacsonyabbak, mint a fényporkonverziós LED-ek esetében a közvetlenül zöld és borostyánsárga fényt emittáló LED-ek elégtelen hatásfoka miatt. Az 5-3 ábra b része a 440-460 nm-es kék, az 530-550 nm-es zöld és a 610-620 nm-es vöröshez közeli fényt emittáló LED-ek teljesítmény-átalakítási hatásfokait mutatja ismét csak logisztikailag illesztve a várható teljesítőképességekhez és 90%-os felső határt véve figyelembe a teljesítményátalakítási hatásfoknál.

Az 5-1 táblázat ezenkívül bemutatja a meleg fehér és hideg fehér fényporkonverziós és színkeveréses LED-csomagok történeti és várható hatásfokait.

5.2 Új anyagok utáni kutatás és új műszaki felfedezések a LED-ek fejlesztéséhez

Amint azt az előző, 5.1 fejezetben írtuk, az elmúlt 10 évben figyelemre méltó fejlődés történt a LED-ek fényhasznosításában, ugyanakkor a LED-technológiában még jelentős tökéletesítési lehetőségek vannak. Noha a fényporkonverziós LED-struktúra a leggyorsabb fejlődést mutatta, a színkeveréses LED-ek továbbra is a legnagyobb hatásfoknövekedési lehetőséggel rendelkező struktúrák. A BTO szilárdtest-világítási programjának célja a fehér fényporkonverziós LED-ek esetében 250 lm/W, a fehér színkeveréses LED-eknél pedig 325 lm/W, ami azt jelenti, hogy további 30%-os növekedésre van lehetőség azután, hogy a fényporkonverziós megoldás eléri a maximális hatásfokát.

A színkeveréses LED-struktúrák hatásfokának növeléséhez azonban meg kell javítani a zöld-borostyánsárga-vörös spektrumtartományok hatásfokát, ahol eddig még csak korlátozott fejlődés volt tapasztalható. Lehetséges megoldások a jelenlegi LED-anyagok – például az InGaN és az AlInGaP – használatával, vagy új LED-anyagok kifejlesztésével érhetőek el. Ezt a bizonytalanságot szem előtt tartva, két lehetséges kutatási irány adódik: új anyagokkal kapcsolatos kutatómunka, vagy a jelenleg alkalmazott LED-anyagrendszerek továbbfejlesztése.

Fel kell gyorsítani a korszerű anyagok kutatásával kapcsolatos munkát, amelynek során új, potenciálisan életképes anyagok fedezhetők fel. Ez a folyamat nagy számú anyagkombináció kiértékelését igényli fejlett számítógépes eljárások alkalmazásá-

Paraméter	Típus	2016	2017	2025	2035	Cél
LED-csomag fényhasznosítása (lm/W)	Hideg fehér	160	172	241	249	250
	Meleg fehér	140	156	237	249	250
	Színkeveréses	90	100	196	288	330

5-1. táblázat – Fényporkonverziós és színkeveréses LED-csomagok történeti és megcélzott fényhasznosítása

val. Tekintettel a lehetséges anyagok óriási mennyiségére, a szuperszámítógépek lehetővé teszik a kutatók számára, hogy olyan technikákat alkalmazzanak az anyagkutatás problémáinak megoldására, mint például a machine learning-et (gépi tanulást). További K+F-re van szükség annak meghatározásához, hogy a fejlett anyagkutatási technikák hogyan alakíthatók úgy, hogy azonosítani lehessen azokat az anyagokat, amelyek képesek csökkenteni vagy akár kiküszöbölni a zöld-borostyánsárga-vörös résből adódó hatásfokvesztéseket (mind az áramsűrűség, mind a hőhatás által bekövetkezőket). Ezt potenciálisan úgy lehet megtenni, hogy számtalan tulajdonságot meghatározunk és megvizsgálunk – például az anyagszintézis és az elektrolumineszcencia hatásfokát a kívánt spektrális tartományon belül.

Noha a korszerű anyagkutatás képes a megfelelő anyagösszetételek azonosítására, a laboratóriumi és a színkeveréses LED-struktúrában történő tesztelésükhöz mérnöki munkára van szükség. Például számos olyan anyagot találtak, amelyek azzal a lehetőséggel kecsegtetnek, hogy csökkentik vagy kiküszöbölik a zöld és a vörös spektrumtartományokban fellépő hatásfokvesztéseket – ezek között található a GaNP, a BInGaN, az ultravékony és/vagy a rendezett InGaN, valamint a perovszkitek. Valamennyi talált anyag tudományos feltárása igen időigényes lenne, ezért az erőfeszítéseket a legígéretesebb anyagrendszerekre kell koncentrálni. E néhány kiválasztott nagy hatásfokú szintézisek, anyagok és tulajdonság-meghatározó eljárások segítségével tesztelni kell – összehangolva az eredményeket a szilárdtest-világítási teljesítőképességi célokkal.

Ezenkívül a mérnöki feltárási folyamatból származó ismereteket vissza kell csatolni a korszerű anyagkutatáshoz, hogy további útmutatást nyújtsanak az új anyagok kutatási folyamatának javításához.

Ez a két kutatási irány eredendően ciklikus, azaz a korszerű anyagkutatás betekintést nyújt ahhoz, hogy miként lehet a legjobb laboratóriumi kutatásokat végezni. A mérnöki feltárás ezután visszajelzést ad, amely felhasználható ahhoz, hogy a technikákat és szűrési folyamatokat jobban

hozzá lehessen igazítani a korszerű anyagkutatáshoz. E módszerek kombinálásával meg lehet oldani a zöld-borostyánsárga-vörös rés problémáját a szilárdtest-világítás egyéb kihívásai közül.

5.3 A LED-ekben fellépő „esések” megértése

Az, hogy milyen „keményen” hajtjuk meg a LED-eket, nagyon fontos a szilárdtestvilágítás számára a költségsökkentés szempontjából. Ha a lm/W fényhasznosítást meg lehet őrizni, akkor minél „keményebben” hajtunk meg egy LED-et (minél nagyobb a chip egységterületére eső bemeneti teljesítmény), annál nagyobb lesz az egységnyi chip-területen keletkező fény. Mivel a chipköltségek közelítőleg a chip területével arányosak, több fényt lehet így előállítani egységnyi chipköltségenként. Ez volt történetileg a fő motiváció a kék LED hatásfok-esésének kiküszöbölése vagy csökkentése esetén – a nagy fényhasznosítás megőrzésére a LED-ek nagyobb áramokkal történő meghajtásával, ami lehetővé teszi, hogy a LED-ek a költségükre vetítve több lument állítsanak elő. A chipek költségeinek csökkenésével azonban mindez a LED-csomagok teljes költségének egyre kisebb részét teszi ki. Így a hatásfokesés kiküszöbölésének költséghatása csökkent. Mindenesetre a hatásfokesés kiküszöbölése továbbra is jelentős előnnyel kecsegtet a teljes LED-rendszer összköltségének figyelembe tekintetében, mert csökkentésével csökkenteni lehet a hordozók, hűtőbordák, optikák stb. egységnyi kimeneti fényre eső méreteit.

5.3.1 Kék LED-ek

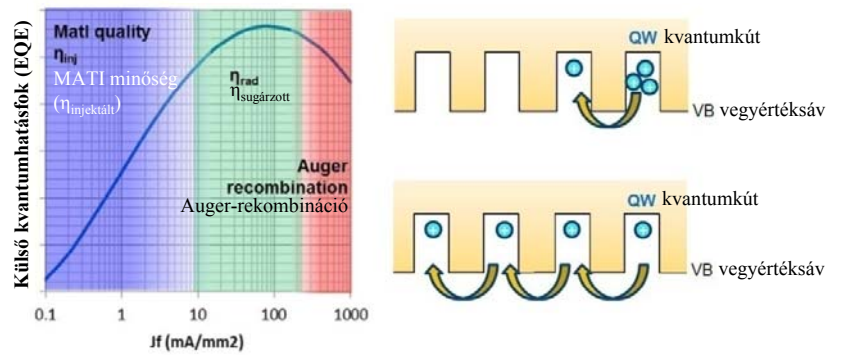
A kék LED-ek hatásfoka óriási mértékben javult az elmúlt évtizedben. A vezető kutatások olyan kék LED-eket mutattak be, amelyek meghaladják a 80%-os külső kvantumhatásfokot (EQE), de csak viszonylag alacsony áramsűrűségek mellett. A LED hatásfoka nagy áramsűrűségnél továbbra is korlátozott a hatásfok- vagy áramsűrűség-esésnek nevezett jelenség miatt. A nagyobb áramsűrűséggel történő üzemeltetés a chipből kibocsátott fény maximalizálása érdekében kívánatos – csökkentve így a LED világítási termékek által kibocsátott lumenre eső költségeket.

Különböző fizikai mechanizmusok léteznek, amelyek befolyásolják a hatásfokot különböző áramsűrűségeknél, amint az 5-4. ábrán látható. Alacsony áramsűrűségeknél az anyaghibák száma jelentős hatással van a hatásfokra, ahol a sugárzást nem keltő Shockley-Read-Hall (SRH) rekombináció dominál. Nagyobb áramsűrűségű működésnél az Auger-rekombináció dominál – ez egyfajta nem sugárzó töltéshordozó-rekombinációs folyamat, amely nemlineárisan növekszik a hordozó- (és ezáltal az áram-)sűrűséggel. Az Auger-rekombinációs veszteségek eliminálásának egyik lehetséges módja a versengő sugárzó rekombináció arányának növelése (akár összetétel/geometriai konstrukció, akár alternatív rekombinációs mechanizmusok alkalmazásával, mint amilyen például a stimulált emisszió a lézertűdőkben), vagy a töltéshordozók sűrűségének csökkentése az aktív tartományban (akár sávstruktúra/transzportmechanizmus vagy alternatív geometriák, például alagút pn-átmenetekkel összekapcsolt rétegezett aktív tartományok révén). E megközelítések mindegyikének kulcsa az összetett epitaxiális anyagok szintézisének megismerése és kontrollálása annak érdekében, hogy az anyagminőség megőrizhető legyen a LED-struktúrában [12].

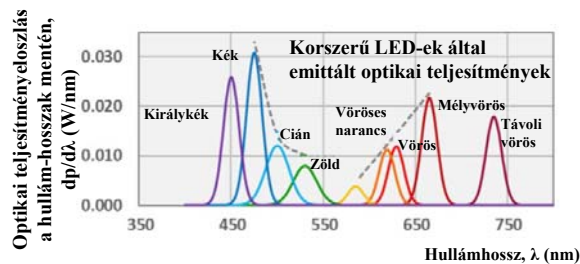
Az Auger-rekombináció mértékét a LED-aktív tartományában lévő egyes kvantumkutak (QW) Auger-állandója és az Auger-töltéshordozó-sűrűsége szabályozza, ezért fontos, hogy minden kvantumkútban egyenletes legyen az áraminjektálás. A LED epitaxiális felépítése módosítható a töltéshordozó-transzport növelése érdekében, hogy egyenletes áraminjektálást kapjunk az egyes kvantumkutakba, amint azt az 5-4. ábra szemlélteti. A probléma az, hogy a továbbfejlesztett heterostruktúra, amely egyenletes töltéshordozó-injektálást eredményez az aktív tartományba, olyan növekedési körülményekhez vezet, amelyek növelik a nem sugárzó Shockley-Read-Hall (SRH) rekombinációt. Noha ezen a téren történt előrelépés a finanszírozott K+F projektek révén, további kutatómunkára van szükség az InGaN epitaxiális növekedésnél az anyagminőség és a töltéshordozó-transzport továbbfejlesztett heterostruktúrájának kiegyensúlyozása érdekében [13].

5.3.2 Zöld LED-ek

Noha az InGaN ötvözet elméletileg lefedheti a teljes látható spektrumot, kvantumhatásfoka 500 nm felett gyorsan lecsökken, amikor az emisszió kékről zöldre vált. A látható spektrum hosszú hullámhosszúságú



5-4. ábra – Kék LED külső kvantumhatásfoka az áram függvényében és a LED kvantumkútja vegyértéksávjának sematikus ábrája [14] – Megjegyzés: A kék LED külső kvantumhatásfoka az áramsűrűség függvényében (baloldalon); a sátrózott tartományok a domináns rekombinációs üzemmódokat mutatják. Egy töltéshordozó-felhalmozódást mutató LED kvantumkútja vegyértéksávjának sematikus ábrája (jobb oldali felső kép) és egyforma hűkinjekciója (jobb oldali alsó kép)



5-5. ábra – Kereskedelemben kapható korszerű LED-ek spektrális teljesítményeloszlása a hullámhossz függvényében – Megjegyzések: A szaggatott vonalak a tekintetünket vezetve jelzik a „zöld rést”: a fényhasznosítás csökkenése a kéktől, illetve a vöröstől a zöldessárga irányába halad. Az adatok 55 °C-ra vonatkoznak és spektrális Gauss-görbék alakjára „formáltak a Lumileds Luxeon C Color Line DS144 (2018. 02. 19.) adatlapjának hatásfokai, központi hullámhosszai és spektrális vonalszélességei felhasználásával.

részen AlGaInP anyagrendszerrel elő lehet állítani nagy teljesítőképességű vörös LED-eket, bár a hatásfok a borostyánsárga tartományban meredeken csökken [15]. Ezt a jelenséget „zöld résznek” hívják, és az 5-5. ábra szemlélteti. A zöld LED alacsony hatásfoka különösen kritikus, mivel a színkeverésen alapuló ultrahatékony fehér LED-eknek szükségük van 540 nm körüli zöld fényt emittáló LED-re – közvetlenül a „zöld rész” középpontjában.

Az AlGaInP anyagrendszer hatásfok-csökkenésének forrása a közvetlen sávszélességről egy indirekt sávszélességre való átmenetnek köszönhető, a borostyánsárga/zöld spektrumtartományban. Az InGaN esetében az anyagoknak kisebb a hatásfokuk a zöld tartományban, a nagymértékű indium-összetevők (anyagproblémák), a polarizációs mezők (kevesebb elektronlyuk-hullámfunkció-átfedés) és a nagyobb Auger-rekombináció együttes hatása miatt. A zöld LED-ek jelenlegi áramsűrűség-csökkenési problémája még súlyosabb, mint a kék LED-ek esetében. Az 5-6. ábra a töltéshordozó-eloszlást szemlélteti egy kék és egy zöld LED aktív tartományában. A töltéshordozó-eloszlás a zöld LED aktív tartományában szegényes, mivel a nagyobb energiájú potenciálgátak lassítják a függőleges transzportot az aktív tartományban.

A töltéshordozó-transzport megnövekedett akadályai kisebb elektromos hatásfokot is eredményeznek a kék LED-ekhez képest, mivel a fotonenergiájukhoz viszonyítva nagyobb a nyitófeszültség [14].

A zöld LED-ek jelenlegi áramsűrűség-esésének kezelése érdekében kritikus fontosságú a kvantumkutak közötti töltéshordozó-transzport javítása – még nagyobb mértékben, mint a kék LED-ek esetében. A legnagyobb kihívás azonban az, hogy a legtöbb LED-es heterostruktúrában bekövetkező változás, amely javítja a töltéshordozó-transzportot, rontja az anyagminőséget – ismét nagyobb mértékben a zöld, mint a kék LED-ek esetében. Az esések csökkentési stratégiájával kapcsolatos alapvető kutatás mind a kék, mind a zöld LED-ek számára hasznos, bár a kihívások a zöld spektrumtartományban nagyobbak.

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

[13] Lumileds: Improved InGaN LED System Efficacy and Cost via Droop Reduction – DOE EERE Funded Project DE-EE0007136.

[14] I. Wildeson: Progress and outlook for III-nitride blue, green and longer wavelength direct emitters, DOE SSL R&D Workshop, Nashville, Tennessee, 2018.

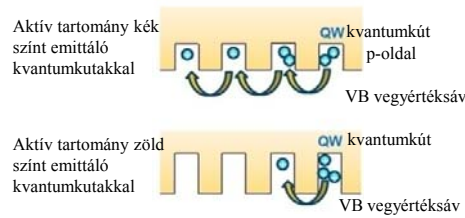
[15] W. Goetz: LED Science and Technology Advancements, DOE SSL R&D Workshop, Nashville, Tennessee, 2018.

5.3.3 Termikus esés

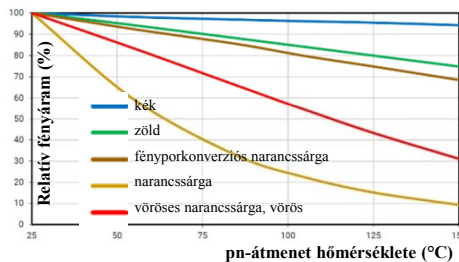
A termikus esés a LED-eknél egyszerűen az optikai teljesítmény csökkenése a hőmérséklet növekedésével, ami korlátozza hatásfokukat az áramsűrűség-esés hatásán túl. A termikus esés fontos a kereskedelemben kapható eszközöknél, mivel a hőmérséklet megemelkedik a LED-es lámpatestekben a tipikus működési feltételek között. Egyes kereskedelmi forgalomban kapható fehér LED-eknél a névleges maximális üzemi hőmérséklet max. 150 °C, noha a 150 °C-on működő eszközök optikai teljesítményük akár 25%-át is elveszíthetik a szobahőmérsékleten működtetettekhez képest. A fénytelsítmény csökkenése súlyosabb az AlGaInP alapú rendszernél, ahol az optikai teljesítmény 70%-kal is eshet 150 °C-on. Az 5-7. ábra különböző színű LED-ek tipikus termikus esését mutatja.

A termikus esés a hőmérsékletfüggő félvezetőtulajdonságok következtében lép fel, amelyek sugárzással nem járó rekombinációt és töltéshordozó-vesztést idéznek elő. A kutatók az InGaIn LED-ek termikus esésének eredetét vizsgálták. A kaliforniai Santa Barbara Egyetem kutatói által végzett munka azt mutatta, hogy, ha kék LED-eket megemelt hőmérsékleten működtetnek, akkor megnövekszik az elektronvesztés a töltéshordozó-elszivárgás és/vagy a töltéshordozók túlzott felhalmozódása miatt. Az elszivárgás és a túlzott felhalmozódás növekedése egybeesik a fénytelsítménynek 75 °C körül fellépő csökkenésével – tehát olyan hőmérséklettartományban következik be, ahol a LED-ek szokásosan működnek. Ezek az eredmények összhangban vannak a termikus esésnek a tudományos irodalomban széles körben közölt adataival [17]. Olyan új, InGaIn-alapú, heterostrukturájú LED-ekre van szükség, amelyek minimalizálják a töltéshordozók nagyobb hőmérsékleten bekövetkező felhalmozódását, miközben megőrzik az anyagok minőségét és a nagy hatásfokot.

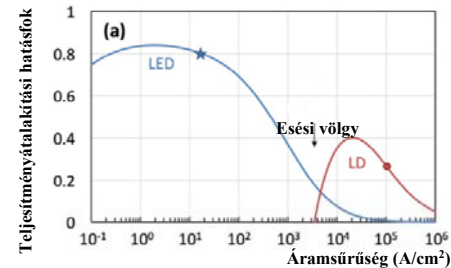
Az AlGaInP-alapú LED-eknél a termikus esés sokkal nagyobb, mint az InGaIn-alapúaknál. Ennek oka a félvezetőrendszer anyagtulajdonságaiban keresendő. Az AlGaInP kis sáveltoldásokkal rendelkezik, ami jelentős mértékű töltéshordozó-felhalmozódáshoz vezethet a hőmérséklet növekedésével, különösen a rövidebb – például a borostyánsárgához tartozó – hullámhosszaknál. Az új feszültségoldó megoldások kutatása az aktív tartomány epitaxiális növesztésénél ígéretes megoldásnak tűnik a töltéshordozó-korlátozás javításához és túlcsoportulásuk csökkentéséhez.



5-6. ábra – LED kvantumkút vegyértéksávjának vázlatos ábrája [14] – Megjegyzések: LED kvantumkút vegyértéksávjának vázlatos rajza, amely egy korszerű kék LED kvantumkút aktív tartományának töltés-eloszlását mutatja (felső ábra), illetve amelyen egy zöld LED aktív tartománya p-oldali kvantumkútjában fellépő töltéshordozó-felhalmozódás látható (alsó ábra).



5-7. ábra – LED-ek hatásfoka a pn-átmenet hőmérsékletének függvényében [16] – Megjegyzés: A LED fényhasznosítása a pn-átmenet hőmérsékletének növekedésével csökken. Az AlGaInP és az AlGaAs LED-ek mutatják a legnagyobb csökkenést.



5-8. ábra – Teljesítményátalakítási hatásfok az áramsűrűség függvényében egy modern LED és egy ibolya hullámhosszon sugárzó lézertióda esetén [18] Megjegyzés: Az ábra kiemeli a fényforrás-típusok közötti „esési völgy” keresztveződést

5.4 Korszerű LED-struktúrák

A korszerű LED-eszközök felépítése képes javítani a hatásfokot vagy az eszköz működési tartományait. Ez javíthatja az áramsűrűség-esést, vagy olyan kívánatos eszköztulajdonságokat eredményezhet (például nagy fényerősséget, amelyet hagyományos LED-ekkel nem lehet elérni).

5.4.1 Az esés mérséklése

Az esés csökkentésére vagy hatásának enyhítésére többféle módszer létezik. Az egyik a LED aktív tartományainak átstrukturálására vonatkozik a bennük fellépő töltéshordozó-sűrűség csökkentése érdekében, amint azt az előző, 5.3 fejezetben tárgyaltuk. Ez csökkenti ugyan az esést, a gyártók azonban azt tapasztalták, hogy ezekkel a kis esést biztosító konstrukciókkal igen nehéz megőrizni a LED-ek anyagminőségét.

Az esés mérséklésére léteznek eszközkonstrukciós megoldások is – ilyen például a lézertióda (LD) ilyen célra történő felhasználása. A lézertiódaokban az esés a lézerhatás fellépésével megszűnik, mivel valamennyi többlet töltéshordozót „elfogyasztja” a stimulált emisszió, ezzel lecsökkentve a sugárzást nem okozó Augerrekombinációs folyamathoz rendelkezésre álló töltéshordozók mennyiségét. Ez nagyobb fluxussűrűséget és nagyobb WPE (wall-plug) energiakonverziós hatásfokot eredményez az igen nagy áramsűrűségekkel működtetett LED-eknél. A lézertióda „rögzíti” a töltéshordozó-sűrűséget, ezért az esés nem növekszik exponenciálisan a meghajtóáramok növekedésével, a lézertiódaoknál is fennáll azonban egyfajta kompromisszum a hatásfok maximuma és az esés-csökkenés között. A kutatók dolgoznak a lézertiódaok maximális hatásfokának elérésén és olyan megoldásokon, amelyekkel be lehet építeni azokat a gyakorlati világítástechnikai termékekbe.

Az úgynevezett „esési völgy”-be, az áramsűrűségnek abba a tartományába nyújt érdekes betekintést az 5-8. ábra, amely elég nagy ahhoz, hogy jelentős LED-esések lépjenek fel, de még elég alacsony, hogy a lézertiódaoknál ne induljon be lézereffektus. Egészen a közelmúltig úgy vélték, hogy az esési völgygel összefüggő áramsűrűségek optimálisak: ha a LED-eket elég keményen lehetne meghajtani mindaddig, amíg a „meghiúsult” fotonjaik kevésbé drágák lennének; a lézereket pedig elég „lágyan” mindaddig, amíg a lézerfolyamat ellenállásvesztései kisebbek és hatásfokaik nagyobbak lennének.

Noha az esési völgyhöz tartozó áramsűrűségek még mindig kívánatosak lennének, két trendet érdemes gazdasági szempontból megfontolni az esési völgy mindkét oldalán. Egyrészt, mivel a chip – és különösen az epitaxia – költsége tovább csökken, a kisebb áramsűrűséggel meghajtott nagyobb chippek hamarosan gazdaságosabbak lehetnek. Ezért érdemes tovább növelni a kis áramsűrűségű működtetésnél adódó maximális hatásfokokat.

[16] Cree, Inc.: Cree XLamp XP-E2 Datasheet, 2018. <https://www.cree.com/led-components/media/documents/XLampXPE2.pdf>.

[17] DOE SSL Program: University of California at Santa Barbara is Determining the Origins of Efficiency Loss in Gallium Nitride-Based LEDs Used in Lighting, 2018. júl. 24. <https://www.energy.gov/eere/ssl/articles/university-california-santa-barbara-determining-origins-efficiency-loss-gallium>.

[18] J. J. Wierer, N. Tansu, A. J. Fischer és J. Y. Tsao: III-nitride quantum dots for ultra-efficient solid-state lighting, *Laser & Photonics Reviews*, vol. 10, no. 4, pp. 612-622, 2016.

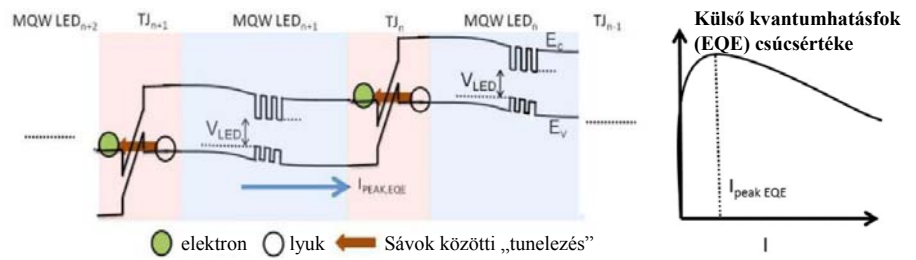
Másodszor, az irányított fény egyre fontosabbá válik, mivel javítja a fotonkihasználás hatásfokát. Külön előnyt jelent a kis fényforrások számára, amelyeket a térben fókuszálni és irányítani lehet. Ez a nagy áramsűrűségek területe: az esési völgyön túli kék lézerdiodák és messze az esési völgyben meghajtott kék LED-ek. További K+F tevékenygre van szükség a lézervilágítás terén – ideértve a lézerdioda WPE (wall-plug) energiakonverziós hatásfokának növelését a jelenlegi 30-40%-ról 60%-ra (LED-szintre). Végezetül, olyan új struktúrák kidolgozására van szükség, amelyek egyidejűleg lehetővé tennék az esési völgyön való hatékony „átkelést” egyetlen struktúrában: lépcsős tuneles pn-átmenetekkel (TJ) összekapcsolt LED-ekkel. Lényegében így több, sorba rendezett LED jönne létre, amelyek növelnék a feszültséget, ugyanakkor alacsony szinten tartanák az áramot. Így több fény jöhetne létre a LED-anyag területéről az alkalmazott áram – és az eredményül kapott esés – megőrzése mellett, amint az az 5-9. ábrán látható.

Noha a tuneles pn-átmenetekkel kapcsolatos kutatás az utóbbi években növekedett, számos kihívás maradt még. A rétegek megnövekedett feszültsége miatt bekövetkező nagyobb feszültséges problémát jelenthet a tuneles pn-átmeneteknél, ezért csökkenteni kell.

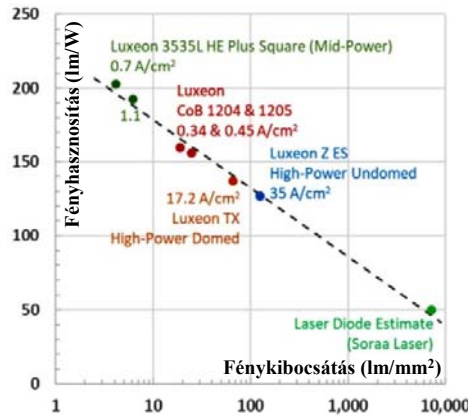
Ezenkívül InGaN tuneles pn-átmenetek használata esetén vannak problémák a szerves fémgőzleválasztással (MOCVD) és abszorpcióval előállított eltemetett aktív tartományokban a p-típusú adalékanyag aktiválásával összefüggésben. Ezenkívül kiváló minőségű tuneles pn-átmenetek növesztési folyamatainak kidolgozására van szükség a defektsűrűség alacsony szinten tartásához és a következő LED-es pn-átmenetekre kifejlesztett negatív hatások minimalizálása érdekében. Alternatívaként a szerves fémgőzleválasztással kapcsolatosan felmerülő növesztési és aktiválási kihívások leküzdésére olyan növesztési eljárásokat lehetne alkalmazni, mint amilyen például az MBE molekulásugaras epitaxia (bár a szekunder növesztési technika többeltköstségeit kezelni kell tudni).

5.4.2 Nagy fényűréség

Miközben a LED-ek által kibocsátott fény hatásfokának javítására nagy figyelmet fordítottak a LED-iparban, ugyanilyen fontos az is, hogy a fényt hogyan lehet előállítani a világítási alkalmazások számára. Vannak olyan világítási alkalmazások – például a kiemelő világítás –, amelyek a megkívánt tárgy megvilágításához igen



5-9. ábra – Rétegzett aktív tartományú, alagútátmenetekkel rendelkező LED sávdiaagramjának vázlatos képe (baloldali ábra); A külső kvantumhatásfok a LED működtető áramának csúcserőtelénél (jobb oldali ábra) [19]



5-10. ábra – Korszerű, kereskedelmi forgalomban kapható fehér LED-ek fényhasznosítása a fénykibocsátás függvényében – Megjegyzés: A szaggatott vonal a szövegben megadott egyetlen felhasználásával kapott tapasztalati görbe.

keskeny fénysugarat igényelnek. Ha a fényt nem fókuszáljuk megfelelően keskeny fénynyalábban, a fényforrás által keltett fény jelentős mennyisége kihasználatlan, így csökkenti a lámpatest-rendszer optikai hatásfokát.

A fényforrás irányíthatósága ugyancsak nagy szerepet játszik annak hatásfokában. Minél „keményebben” tudunk meghajtani egy fényforrást, annál több fényt lehet előállítani adott területen, ezzel növelve a fénykibocsátás értékét. A fénykibocsátás az egységnyi felületre eső fényáram lm/mm²-ben kifejezve. Ha növelni tudjuk a fénykibocsátást, akkor csökkenthető az adott fényáram előállításához szükséges optikai forrás mérete. Minél kisebb az optikai forrás mérete, annál kisebb lehet a megvilágított terület egy adott méretű LED-csomag/lámpatest-optikához. Más-képpen szólva: annál kisebb LED-csomag/lámpatest-optika használható adott méretű megvilágított területhez. Így az irányított megvilágításnál, ahol a megvilágítási terület térbeli profílja testreszabott, a LED-ek „keményebb” meghajtása a kisebb forrásméret elérése érdekében még fontosabbá válik.

Ugyanakkor – ugyanúgy, ahogyan a hatásfok-esés kompromisszumot generál a költség és a teljesítőképesség között, amint

azt az 5.3. fejezetben tárgyaltuk – ehhez is kompromisszumra van szükség a fényhasznosítás és a fénykibocsátás között. Az 5-10. ábra összehasonlít néhány 2017-ben kereskedelmi forgalomba került reprezentatív, korszerű fehér fényű LED-csomagot, és bemutatja a hatásfok és a fénykibocsátás közötti jelentős eltéréseket. A bemeneti áramsűrűség növekedésével a fényhasznosítás csökken, a fénykibocsátás pedig nő. Balra legfelül egy közepes teljesítményű, 0,7 A/cm²-rel meghajtott LED-csomag adata látható (sötétzöld felirattal), míg középen egy 35 A/cm²-rel meghajtott nagyteljesítményű fehér LED-é (kék szöveg). Jobbra legalul egy lézerdiodás fehér LED-csomag becsült adatát tüntettük fel (világoszöld szöveggel).

Az adatpontokhoz illeszkedő logaritmikus-lineáris görbe a következő empirikus egyenletet adia:

$$\eta = 225 \frac{\text{lm}}{\text{W}} - 46.4 \times \log_{10} \left[\frac{\text{MV}}{1 \frac{\text{lm}}{\text{mm}^2}} \right]$$

Ez az egyenlet úgy tekinthető, hogy meghatározza az η fényhasznosítás és az MV fénykibocsátás közötti kompromisszumot. További kutatómunkára van szükség, amely olyan anyagokra és eszközstruktúrákra fókuszál, amelyek messze túlmutatnak a jelenlegi legkorszerűbbekben, hogy lehetővé váljon mind a nagy fényhasznosítás, mind a nagy fénykibocsátás, amint ez az 5-10. ábra jobb felső sarkában látható. A kutatási területek között szerepel a LED hatásfok-esésének további csökkentése; a lefelé konvertáló anyagok tökéletesítése, hogy nagyobb hatásfok és stabilitás legyen elérhető nagyobb fénysűrűségek mellett; a tokozóanyagok tökéletesítése, hogy meg lehessen előzni a degradációt nagyobb optikai fluxussűrűségek és hőmérsékletek esetén; valamint megfelelő optikai konstrukció a színazonosság a különböző szögekből történő szemlélés esetén.

[19] S. Rajan: Tunneling-based Cascaded LEDs for Efficient Solid State Lighting, DOE SSL R&D Workshop, Raleigh, Észak-Karolina, 2016.

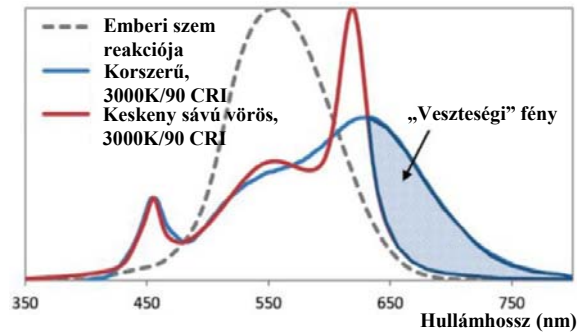
5.5 Optikai lefelé konvertáló anyagok

A korszerű LED-lámpák és LED-lámpatestek főként fényporkonverziós LED-ekre épülnek. A fényporkonverziós LED-ekben felhasznált fényporok széles vonalszélességű emissziót eredményeznek, ami viszont korlátozza a általános spektrális hatásfokukat, vagyis a sugárzás fényhasznosítását (LER). A nagy vonalszélességnek gyakorlati jelentősége van a spektrum vörös tartományában, mivel a széles sávú emisszió folytán a teljes fényeloszlás nagyobb része emittálódik a látható spektrum azon részeiben, ahol az emberi szem kevésbé érzékeny. Ez a rész megnövekszik a CRI színvisszaadási index növekedésével, mivel a nagy színvisszaadás szigorúbb követelményeket támaszt a vörös hullámhossz-tartományban kibocsátott fény mennyiségével kapcsolatosan a látható spektrum szélén. Mivel azonban a fényporkonverziós LED-ek fényük nagyobb részét emittálják e tartományokban, a 90-es színvisszaadási indexű fényporkonverziós LED-ekkel készült lámpáknak vagy lámpatesteknek e „spektrális elégtelenség” miatt kisebb lesz a hatásfoka, mint a 80-as színvisszaadási indexűekkel készülteknek. Ezt a hatásfok-rést minimalizálni kell a 90-es színvisszaadási indexű fényporkonverziós LED-ek nagyobb elterjedésének ösztönzése érdekében.

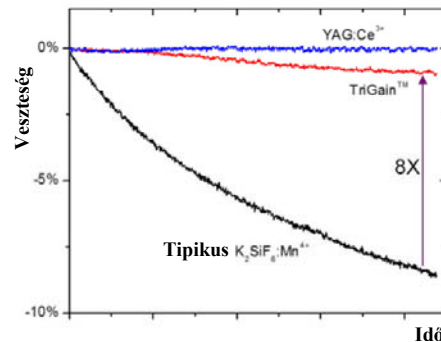
5.5.1 Keskeny sáv szélességű fényporok

A tipikus nitrid- vagy oxinitrid-alapú vörös LED-fényporoknak közel 100 nm-es FWHM (a maximum felénél adódó teljes szélesség) értékű emissziós vonalszélességük van. Ez jelentős fényszóródást okoz a mélyebb vörös hullámhossz-tartományba, ahol az emberi szem kevésbé érzékeny, és jelentősen hozzájárul a jelenlegi fényporkonverziós LED-ek fehér fényének elégtelen spektrális hatásfokához. Az 5-11. ábra ezt a viselkedést szemlélteti úgy, hogy egy 110 nm FWHM sáv szélességű, 3000K korrelált színhőmérsékletű, $CRI \geq 90$ és $R9 > 50$ színvisszaadási indexű vörös fényport használó fehér LED-et hasonlít össze egy hasonló színminőségű, de 30 nm-es sáv szélességű vörös fényporral készült fehér LED-del. A széles sávú vörös fénypor helyettesítésével 22%-os növekedés volt elérhető a spektrális hatásfokban, ami csökkenti a mély vörös és a 650 nm-en túli infravörös tartományokba jutó veszteségi emissziót [20].

A közelmúltban jelentős fejlesztések történtek a keskeny sávú lefelé konvertáló vörös fényporok területén. A GE továbbra is forgalmaz „Tri-Gain” márkanéven olyan világítástechnikai termékeket, amelyek



5-11. ábra – 90-es színvisszaadási indexű fényporkonverziós LED, 90-es színvisszaadási indexű hagyományos vörös fényporú LED és az emberi szem reakciójának spektrális összehasonlítása [20]



5-12. ábra – A LED-csomagokban lévő fénypor fényvesztése nagy kék fény sűrűsége esetén (baloldali ábra) és színeltolódás feszített működési körülmények esetén (jobb oldali ábra) [21]

keskenysávú „KSF” vörös fényporral készülnek [21]. (A KSF, vagy K₂SiF₆:Mn⁴⁺ kálium-fluoroszilikát fénypor.) Ezeknek a fényforrásoknak kiváló a színminősége és nagy a hatásfoka, ami a keskeny emissziós spektrumú vörös fénypornak köszönhető. Noha ezt a fényport már több évvel ezelőtt kifejlesztették, az anyagok finomítása folyamatosan javította hosszú távú viselkedésüket. Ilyen tökéletesítések voltak a kisebb színeltolódású LED-csomagok és a nagyobb fényáram-tartási képesség nagy kék fluxussűrűségek mellett, amint azt az 5-12. ábra mutatja [21]. A Lumileds is hozott kereskedelmi forgalomba olyan közepes teljesítményű LED-csomagokat, amelyek a cég „SLA” fényporával készültek a keskenysávú vörös emisszió, a jó színminőség és a nagy hatásfok érdekében [20]. (Az SLA, vagy Sr[LiAl₃N₄]:Eu²⁺ nitrido-aluminát vegyület

Noha az elmúlt néhány évben jelentős javításokat hajtottak végre a keskenysávú vörös fényporokkal kapcsolatosan, továbbra is léteznek lehetőségek az anyag összetételének javítására, hogy kevesebb legyen az anyaghiba és lehetővé váljanak a nagyobb mangánaktivátor (Mn) koncentrációk, ami csökkentheti a LED-ekhez szükséges fénypor-anyagok mennyiségét. Ezek a további fejlesztések alacsonyabb fénypormennyiségeket eredményeznének ugyanolyan színpontnál, mint a jelenlegi összehasonlítható LED-ek esetén.

A megbízhatóság további javítására is szükség van ahhoz, hogy nagyobb működési áram-sűrűségeket és hőmérsékleteket lehessen alkalmazni.

5.5.2 Kvantumpontos lefelé konvertáló anyagok

Már régóta foglalkoznak azzal, hogy a kvantumpontokat (QD) két egyedülálló emissziós tulajdonságuk – a hullámhossz-ságok beállíthatósága és a keskeny emissziós sáv szélességük – okán lefelé konvertáló anyagként használják a LED-ekben. Ezek a kvantumbezáras félvezető nanokristályok szervesen fém nélküli anyagból és szokásos, kolloid szintetikus „növesztéssel” készülnek elektron- és lyuk-bezárással, ami egyedülálló optikai tulajdonságokat eredményez. A kolloid kvantumpontokat állítható tiltott sáv jellemzi, amely nanométeres felbontással képes lefedni a teljes látható spektrumot a részecske méret és a keskeny FWHM beállításával, a tiltott sáv szelétől való közvetlen átmenetnek köszönhetően.

Egészen mostanáig a kvantumpontok nem kaptak elég figyelmet a LED-csomagokba történő beépítés tekintetében, mivel a LED-ek üzemi hőmérséklete és a kék fény

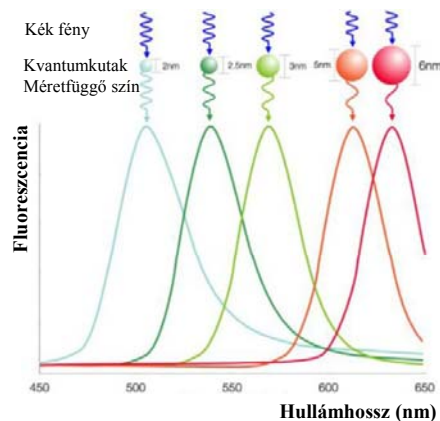
[20] Lumileds: Narrow Red Phosphor Technology, 2016

[21] J. Murphy: Narrow-Band Emitting Phosphors for Energy Efficient SSL, DOE SSL R&D Workshop, Nashville, Tennessee, 2018.

erőssége erős termikus emissziócsökkenést és gyors foto-degradációt eredményez. Ugyanakkor jelentős K+F előrelépések történtek ezen a területen azáltal, hogy a Lumileds idén kereskedelmi forgalomba hozott egy vörös kvantumpontokból készült (és fényporokkal kombinált) lefelé konvertálókat használó közepes teljesítményű LED-csomagot [22] [15].

A kvantumpontok lefelé konvertálóként történő felhasználása – akárcsak az 5.5.1. fejezetben ismertetett keskenysávú fényporok esetében – jobb spektrális hatásfoknövekedést eredményezhet azáltal, hogy csökkenti a veszteségi fénykibocsátást a spektrum mélyvörös és infravörös tartományokban. A vörös kvantumpontok hagyományos fényporanyagokkal történő együttes alkalmazása a LED-ek fényátalakítási hatásfokát 5%-ról 15%-ra növelheti a 2700 és 5000K közötti korrelált színhőmérsékletű, kereskedelmi forgalomban kapható fényporkonverziós LED-ek esetén [23]. A Lumileds chipre épített kvantumpontokat használó LED-jei működni képesek, ha a kvantumpont hőmérséklete meghaladja a 100 °C-ot és a kék fény erőssége eléri a 0,2 W/mm²-t közepes teljesítményű LED-csomagok esetén. Ezek a kvantumkutakkal elért eredmények demonstrálják azokat a fontos megbízhatósági követelményeket, amelyek a kereskedelmi forgalomba kerüléshez szükségesek [24]. A kereskedelmi forgalomban kapható LED-ekben lévő jelenlegi nagy teljesítőképességű kvantumkutak tartalmaznak azonban kis mennyiségű kadmiumot is. A kadmium használatát az elektronikus eszközökben az Európai Unió a veszélyes anyagok korlátozásáról szóló irányelvében (RoHS) szabályozza, amely szerint a fémeket tartalmazó elektronikus eszköz legkisebb homogén komponense maximum 100 ppm kadmiumot tartalmazhat. A chipre épített kvantumkutak esetén a legkisebb homogén komponens a kvantumkutakat, egyéb fényporokat és a LED-csomag belsejében leválasztott szilikon kötőanyagot tartalmazó lefelé konvertáló réteg. A kadmium pontos koncentrációja több tényezőtől függ – például a LED-csomag felépítésétől és a végső szintponttól –, de a becslések szerint a 150 és 500 ppm közötti tartományba esik [25].

Noha a kadmiumot tartalmazó kvantumpontok a mai napig a legjobb teljesítőképességet nyújtják, szükség van alternatív, kadmiummentes kvantumpontok további vizsgálatára a kadmiumhasználatra vonatkozó szabályozási követelmények miatt. A legfejlettebb kadmiummentes technológiát jelenleg az InP-alapú kvantumpontok képviselik, de az emisszió jelenlegi



5-13. ábra – CdSe kvantumpontok emissziós hullámhossza a pont átmérőjének függvényében [26]

FWHM (a maximum felénél adódó teljes szélesség) értéke és a környezeti stabilitás nem éri el a kadmiumot tartalmazó megfelelőik szintjét. Az FWHM értéke javult az elmúlt néhány év során, és most megközelítőleg 40 nm a zöld és 50 nm a vörös esetén, megközelítve ezzel a BTO 30 nm-es célkitűzést [26]. Az előrehaladást az eltelt néhány év során a jobb anyagtervezés eredményezte, de a stabilitás továbbra is jelentős akadály, amely további kutatást és fejlesztést igényel. Egyéb potenciális kvantumpont-rendszerek (amelyek nem tartalmaznak kadmiumot és így kielégítik az RoHS követelményeket) a perovszkitek és a CuSeS kvantumkutak, amelyek azonban még mindig csak a fejlesztés kezdeti stádiumában vannak és még sok munkát igényelnek a teljesítőképességi szintek és a stabilitás eléréséhez.

A LED-csomagokba történő beépítéshez szükséges teljesítőképesség-paraméterekkel és megbízhatósági tulajdonságokkal rendelkező kvantumpontok létrehozása mellett a szilárdtest-világításban történő felhasználás szempontjából kritikus jelentőségű a nagy mennyiségű kvantumpont-anyag-tételek gyártása. A kvantumpontszintézis egyik jelentős akadály a aktuális kvantumpontok méretének ellenőrzése. Az átmérők kis mértékű eltérése hullámhossz-változásokat idéz elő a lefelé konvertáló anyagokban, amint az az 5-13. ábrán látható. Ha kissé változó átmérőjű kvantumpontokat építünk be egy LED-csomagba, az emissziós FWHM érték kiszélesedhet. A rétegek szintézisét új eljárásokkal lehetne ugyan javítani, de ezeket konzisztens módon nehéz kontrollálni.

A nagy teljesítőképességű kvantumpontok méretezhető szintézisének potenciálisan jelentős javítására irányuló erőfeszítések egyfajta konvergencia (nem pedig lineáris) megközelítést alkalmaznak, amely egylépcsős heterostrukturális szintézisen alapul.

*A prekursor olyan anyag, amely egy másik vegyületet eredményező kémiai reakcióban vesz részt. – A Szerk.

Ezek egy sor prekursor* állítható reakciós kinetikáját felhasználó többlépcsős ötvözetből felépülő kvantumpont-struktúrát hoznak létre. A kvantumpontok megbízhatóan beállítható mérete, koncentrációja és monodiszperzitása jól kontrollált prekursor-konverziót igényel. Új koloidos szintézis felhasználásával kutatások folynak a szintézis reprodukálhatóságának, a kvantumpontok teljesítőképességének és megbízhatóságának igazolására.

A chipre felépített kvantumpontokkal készülő LED-es alkalmazások jelentősen fejlődtek az elmúlt néhány évben. Idén megjelent egy olyan LED-csomag, amely CdSe-alapú kvantumpontokkal épült fel – demonstrálva ezzel kereskedelmi életképességét [22]. Noha a fejlődés ígéretes, további K+F munkára van szükség a nagy teljesítőképességű, chipen kialakított kvantumponthoz lefelé konvertáló anyagokkal kapcsolatos ismeretek elmélyítéséhez, hogy el lehessen érni vagy túl is lehessen szárnyalni a hagyományos, chipre felvitt fényporok teljesítőképességét. Ezenkívül tovább kell fejleszteni az olyan kvantumpontokat, amelyek nem tartalmaznak nehézfémeket (például kadmiumot vagy ólmot), vagy kevés ilyen anyagra van szükség az ezekre az anyagokra vonatkozó változó jogszabályi követelmények kielégítése érdekében.

5.6 Additív gyártási eljárások a világítástechnika számára

Az eltelt néhány év során az additív gyártási eljárások egyre nagyobb területet hódítottak meg a szilárdtest-világítási termékek prototípusai és gyártási eljárásai között. Az additív technika egy olyan gyártási eljárás, ahol egy háromdimenziós tárgy állítanak elő számítógép-vezérlésű anyagleválasztással (rétegek egymás utáni felvitelével) számítógépes (CAD) tervezésű modell alapján. A 3D nyomtatás az

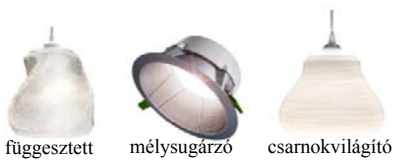
[22] Lumileds: Lumileds 3535 HE Plus Datasheet, 2017

[23] K. T. Shimizu, M. Bohmer, D. Estrada, S. Gangwal, S. Grabowski, H. Bechtel, E. Kang, K. J. Vampola, D. Chamberlin, O. B. Shchekin és J. Bhardwaj: Toward commercial realization of quantum dot based white light-emitting diodes for general illumination, Photonics Research, vol. 5, no. 2, pp. A1-A6, 2017.

[24] LED Professional: Quantum Dot Based White LEDs for General Illumination, 2017. szept. 25. <https://www.led-professional.com/resources-1/articles/quantum-dot-based-white-leds-for-general-illumination>.

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

[26] P. Palomaki: Quantum Dot Downconverters for SSL, DOE SSL R&D Workshop, Nashville, Tennessee, 2018.



5-14. ábra – 3D-eljárással nyomott LED-es lámpatestek [27]



5-15. ábra – UV nyomtatófej „anyagcseppeinek” leválasztása a hordozó anyagára (bal felső ábra). A polimercseppek a felszíni feszültség hatására szétterülnek az UV-fénnyel történő kikeményítés előtt az optikához szükséges síma felület elérése érdekében (bal alsó ábra). Mikrooptikai lencsetömbök (jobb oldali ábra) [28]

additív gyártás egyik legáltalánosabb példája. Sokkal nagyobb határfokú lehet, mint a hagyományos „kivonásos” gyártási módszerek – maratás, csiszolás és polírozás –, amelyeknél anyageltávolítás történik a megkívánt forma eléréséhez – akár közvetlenül a termék, akár öntőformák és szerszámok elkészítése révén.

Az additív gyártás néhány kulcsfontosságú előnye:

- olyan bonyolult formák készíthetők, amelyekre hagyományos gyártási eljárásokkal nincs lehetőség;
- többféle anyagtypust lehet használni ugyanannál a LED-csomagnál;
- kevesebb energiára van szükség, mivel lényegesen kevesebb anyag felhasználásával gyártási lépéseket lehet elhagyni és könnyebb termékeket lehet előállítani;
- minimalizálni lehet a berendezések kezdeti beruházási költségeit – azaz nincs szükség szerszámokra, ami rugalmasságot biztosít a formák terén és csökkenti az ugyanolyan berendezések raktározását;
- könnyebb megismételni a termékváltozatokat vagy a funkcionális formaillesztési folyamatokat és tesztelést; és
- igény szerinti gyártási képességekre van mód a rövidebb átfutási idejű projektekhez.

Az additív gyártás a szilárdtest-világítási ellátólánc és gyártási folyamatok sok különböző szegmensében alkalmazható. Néhány ilyen terület:

- lapka-szintű csomagolás – ideértve a lefelé konvertáló anyagok és a tokozás leválasztását is;
- a tápellátás komponenseinek és moduljainak gyártása;
- az optika, a hűtőborda vagy a ház gyártásához szükséges szerszámok gyors létrehozása; és

- az optika vagy a lámpatestek rugalmas előállítására.

Az additív gyártás fő felhasználási területe a szilárdtest-világításnál a gyors prototípus-készítés az új terméktervezési koncepciók számára. A 3D-nyomatás lehetővé teszi a szebb esztétikai megjelenésű, jobb funkcióképeségű és kisebb költségű egyedi lámpatestek konstruálását. A Philips Lighting (most: Signify, ugyanis 2018. máj. 16-tól ez a neve –<https://www.signify.com/en-us/about/news/press-releases/2018/20180516-philips-lighting-is-now-signify>) Telecaster programja számos lámpatestformához dolgozott ki additív gyártási eljárást, ideértve a 3D-nyomatású dekorációs függesztékeket, áramvezető sínre szerelhető spotlámpákat, mélysugárzókat és nagyméretű csarnokvilágítókat. Az 5-14. ábra három példát mutat be a 3D-nyomatással készült lámpatestek közül.

A lámpatestházak előállításánál alkalmazott additív gyártáson túl ezt az eljárást alkalmazták a lámpatestek funkcionális komponensei – például az optikák – előállítására is. Ezek az optikák UV-fénnyel kikeményíthető polimerfestékből készülnek, és kikeményítésük UV-lámpa segítségével történik a nyomtatófejben a nyomtatott festékcseppek minden áthaladása alatt, amint azt az 6-15. ábra mutatja. Ez a módszer lehetővé teszi a geometriai és tetőszöleges egyéb formák kialakítását is a megkívánt optikai vezérlés létrehozásához, ugyanakkor kiküszöböli az öntőminták és szerszámok költségeit és pontos időre elkészülő gyártást tesz lehetővé.

A 3D-nyomatásnak a szilárdtest-világítási értékláncban való további alkalmazása kapcsán az egyik legnagyobb kihívás a világítástechnikai felhasználásokhoz alkalmas speciális – optikai, elektronikai és termikus – tulajdonságokkal rendelkező, nyomtatható anyagok kifejlesztése. Ezen a területen előnyök lehetnek az ERE Advanced Manufacturing Office gyártási fejlesztései, ugyanakkor szükség van további alkalmazás-specifikus K+F munkára. Például kihívást jelent olyan, megfelelő hővezetőképességű hűtőborda előállítás, amely vezető kitöltőanyagokból álló, polimer-alapú festékek felhasználásával készül. Noha ezeket az anyagokat fel lehet használni hűtőborda nyomtatásához, a hővezetőképesség elmarad az alumínium hűtőbordákéitól. Vizsgálták a nyomtatott áramköri panelekhez alkalmas elektromos vezetőcsíkok kivitelezését is, de azt találták, hogy ugyan lehet nyomtatni azokat, a csíkok ellenállása azonban nagyobb lesz, mint a vörösrézé [29].

Noha léteznek olyan eredmények, amelyek

igazolják az additív gyártási koncepciónak a szilárdtest-világítási értéklánc sok területén való alkalmazhatóságát, további K+F munkára van szükség olyan nyomtatható anyagok kifejlesztéséhez, amelyek megfelelő tulajdonságokkal rendelkeznek ahhoz, hogy felválthassák a meglévő gyártási eljárásokat az elektromos, hűtő és optikai komponensek terén.

Az additív gyártás szilárdtest-világítási értékláncban való alkalmazásának másik érdekes területe a szerszámok 3D-nyomatással történő előállítására. Az öntő- vagy sajtólószerszámok elkészítésének átfutási ideje gyakran 10-12 hét. 3D-nyomatással az átfutási idő jelentősen csökkenthető – akár 2-4 hétre is, ami lerövidíti a termékfejlesztési ciklust és a kísérleti gyártásor elkészítésének idejét. Ezt a koncepciót használták az autók 3D-nyomatással való kivitelezhetőségének igazolásához is. Az additív gyártás szerszámkészítéshez való felhasználása határfoknövekedést eredményezhet a szilárdtest-világítási termékek gyártása során is.

5.7 A LED-es világítás korszerű koncepciói

A LED-ek egyedülálló előnyeit élvező világítási rendszerek kidolgozása maximalizálhatja a LED-es világításnak a hagyományossal szembeni óriási lehetőségeit. A LED-es világítás olyan tulajdonságokat kínál, mint a színminőség magas energiahatékonysága, a kompakt és egyedi formák és egyéb, nem energiával járó előnyök (például a fény fiziológiai hatásai). A világítás nagyobb hatékonysága (l. a 4.1. fejezetben) tovább növelheti a lámpatestek teljesítőképességi szintjeit és korszerű megvilágítási értékeket biztosíthat (például az emberi szervezet által élvezhető fiziológiai előnyöket, amelyeket a spektrum és az intenzitás e reakciók beindításához szükséges szintjei demonstrálnak). A világítási alkalmazás hatékonyságát javító koncepcióknak a jövőbeli kutatás és fejlesztés középpontjába kell kerülniük.

Az állítható színárnyalatú LED-es lámpatestek képesek a spektrum és fényerősség módosítására, ami megvalósíthat néhány, a LED-világítással kapcsolatos hozzáadott értékkel bíró funkciót olyan alkalmazások

[27] 3DPrinting.Lighting: Philips Lighting Telecaster, 2018. márc. 8. <http://www.3dprinting.lighting/philips-lighting-telecaster/>.

[28] LED Professional: Additive Manufacture of Optics Goes Digital by LUXeXcel B.V., 2016. júl. 5. <https://www.led-professional.com/resources-1/articles/additive-manufacture-of-optics-goes-digital-by-luxexcel-b-v>.

[29] N. Narendran, Strategies in Light, Long Beach, Kalifornia, 2018.

esetén, mint például a kórházvilágítás és a kertészet. Ezekben a szabályozható színárnyalatú – RGB, RGBA, spektrálisan szabályzott vagy színváltós – világítási rendszerekben rendszerint három vagy több LED található, amelyeknek kimeneti fényteltjesítménye külön-külön változtatható a fehér vagy más, telített színű fények előállítására. Ezek között lehetnek közvetlenül keskeny (például kék vagy vörös) sávban emittálók, de lehetnek olyan fényporbevonatokkal ellátott monokromatikusak is, amelyek valamivel szélesebb színspektrumú fényt állítanak elő (pl. a „menta” zöld fényporbevonatos kék LED). A különböző monokromatikus LED-színek közé a vörös, a zöld és a kék (azaz RGB, a fény elsődleges színei) tartoznak, de ezeket borostyánsárgával (A) vagy más monokromatikus színekkel is ki lehet egészíteni. A LED-színek minimális száma a teljes színbeállításához három, de négy-, öt- és hétszínű rendszerek is található az architekturális világítási piacon, és bizonyos kifinomult színű rendszerek további egyedi színű LED-eket is használnak.

Az ilyen típusú színbeállítás egyedülálló előnye, hogy képes eltolni a színpontot a feketetéstől színpontjától, más szavakkal: a különböző színhőmérsékletű fehéren túl adott színhőmérsékletű fényt képes előállítani. Például egy irodában napközben 4000K színhőmérsékletű fényt produkál, majd este egy „lilas hangulatú” partihoz alkalmas színárnyalatra vált. Így lehetővé válik, hogy ezeket a teljes színskála mentén állítható termékeket színházakban, szórakoztató helyeken és éttermekben is használják. A teljes színskála mentén való állíthatóság másik előnye, hogy hozzáigazítható bármilyen más fényforrás színéhez. Az egyes LED-ek színeinek beállíthatósága a kiskereskedelmi alkalmazásoknál is jól használható, például egy vitrin világítása beállítható úgy, hogy a virágdíszítés teljes színompájában legyen élvezhető.

A négy színű RYGB színekéréses LED-struktúra, amelyben valamennyi színt közvetlenül LED-ek állítják elő, jelentősen javíthatja a hatásfokot, mivel kiküszöböli lefelé konvertáló anyagokban a fényporok és kvantumpontok hatására fellépő alapvető Stokes-veszteségeket. Amint azt az 5-3. ábra szaggatott szürke görbéje mutatja, a négy színű RYGB színkeverék es LED legnagyobb fényhasznosításának maximuma 325 lm/W, amelyet csak a valóságos LED-ek várható 80-90%-os hatásfoka és azok a veszteségek korlátozhatnak, amelyek a tiszta fényszínnek fehér fénné való összekeveréséből adódnak. Jelenleg a zöld/borostyánsárga LED-ek kis külső kvan-

tumhatásfoka miatt a színkeveréses rendszerek teljes rendszerhatásfoka kisebb, mint a fehér fényporkonverziós LED-eké. Amint azt a korábbiakban írtuk, a zöld és a borostyánsárga LED-ek hatásfokát növelni kell a maximalizált nagy hatásfok és a teljes színterminál együttes lehetőségének elérése érdekében.

A beállítható színű lámpatestek forgalomba hozatalával a színkeverés egyre nagyobb kihívássá vált. Új színkeverő optikai rendszerekre (például fénytörő+fényvezető optikákra) van szükség a lámpatestekben a karcsú, lapos és a fényt hatékonyan keverő optikák előállításához, és ahhoz, hogy csökkenteni lehessen a költségeket a jelenlegi lámpatestekben alkalmazott hagyományos, „menyiség-keverő” rendszerekhez képest. A színkeverés hatásfokának javítása érdekében fontolóra kell venni a hatékony optikai elemek kifejlesztésének szükségességét.

A színkeverés nagyobb bonyolultsága mellett nagyobb bonyolultságra van szükség a színeit teljes mértékben beállítható LED-es lámpatestek vezérlési stratégiáihoz is. A teljes színbeállítás nagy mértékű változtathatósága olyan felhasználói interfészt igényel, amely sokkal bonyolultabb az egyszerű csúszkás dimmernél. Ezeknél az állítható lámpatesteknél a LED-meghajtók eredeti nagyságú, „dimmeletlen” teljesítményt igényelnek, amely hagyományos kábelezési technikák felhasználásával a szokásos 120 vagy 277V-os hálózathoz nyelhető. Általában külön utasításokat igényelnek az optikai keverésében részt vevő (a termék konstrukciójától függően pl. meleg fehér, hideg fehér, vörös, zöld, kék, borostyánsárga stb.) LED-ek színének intenzitásáról. A dimmelési szinttel és a színnel kapcsolatos utasítások különálló vezetékeken vagy vezeték nélküli jelek formájában jutnak el a felhasználói interfésztől a meghajtóhoz vagy egy „fekete doboz”-hoz, amely feldolgozza a vezérlőjeleket és átalakítja azokat parancsokká a meghajtók számára. Egy vezérlőprotokoll – pl. DMX vagy DALI – megcímezhető úgy is, hogy a lámpatesteket a fényerősség- és színbeállítás jeleitől függetlenül kelljen táplálni. A DMX-et eredetileg a színházvilágításhoz fejlesztették ki, ma már azonban gyorsasága folytán széles körben alkalmazzák dinamikus világításhoz is – a fényerősséget és a színt szinte azonnal képes megváltoztatni.

Noha ezek a színszabályozási stratégiák ma is hozzáférhetőek, új meghajtó-konstrukciókkal csökkenteni kell bonyolultságukat. Ilyen fejlesztés lehet a LED-meghajtók kimeneti csatornáinak egyediről

kombinált vezérlésre történő csökkentése. Egy másik olyan terület, ahol van tökéletesíteni való, a színkeverés logikai rendszerének megvalósítása. A színkeverésnek és a LED-kimenet vezérlésének a hordozón kialakított LED-csatornára történő át helyezése például ígéretesen csökkenthetné a bonyolultságot [30]. Fokozottabb K+F tevékenységre lenne szükség a színszabályozós rendszerekhez alkalmas, nagy hatásfokú, kompakt, többcsatornás meghajtók kifejlesztéséhez is.

5.8 LED-ek meghajtó és funkcionális elektronikája

A LED-meghajtók a LED-es lámpatest kritikus komponensei, mivel ők látják el tápfeszültséggel a LED-eket. Különböző típusú bemeneti jeleket fogadnak – hagyományos váltakozóáramú hálózati jeleket, vagy egyenáramú mikrohálózatokról vagy Ethernetről érkező PoE (Power over Ethernet) jeleket. A meghajtók a LED-csomagokkal kompatibilis feszültségeket és áramokat szolgáltatnak egy vagy több csatornán keresztül, és szolgáltathatnak vezérlőfunkciókat is például a fényerősség és a színhőmérséklet beállításához. A meghajtóknál a két legfontosabb szempont a megbízhatóság és a teljesítőképesség, amely magában foglalhatja a hatásfokot, a villódzásmentességet, a túlfeszültség elleni védelmet, a nagyobb világítástechnikai és a világítással össze nem függő egyéb funkciókat, valamint a méretet, a súlyt és teljesítményszintet (SWaP).

5.8.1 A meghajtók teljesítőképessége

A meghajtók legfontosabb teljesítőképességi mutatói arra fókuszálnak, hogy mennyire képesek megfelelő módon és hatásfokkal átalakítani a teljesítményt, miközben megvédik az utánuk következő komponenseket a túlfeszültségektől és a nem megfelelő minőségű bemeneti teljesítménytől. A LED-meghajtók e teljesítőképességi mutatói közé tartozik a teljes és a lecsökkentett teljesítménynél adódó hatásfok, a dimmelési szint, a villogásmentesség, a túlfeszültség elleni védelem, a méret, a súly, valamint az alkalmazkodási képesség a többcsatornás és az alternatív bemeneti teljesítménnyel történő működtetéshez.

A ki-/bekapcsolási/dimmelési képesség egyre fontosabb, amint a világítás csatlakoztatottá válik és adaptálódik a felhasználói igényekhez és preferenciákhoz. Ezek

[30] C. Stalker: DOE SSL R&D Directions: Color-Tunable Lighting, DOE SSL R&D Workshop, Nashville, Tennessee, 2018.

a funkciók nagy meghajtó-hatásfok mellett kell hogy érvényesüljenek, ami kihívást jelent a jelenlegi meghajtóknál, ahol a hatásfok dimmelt állapotban lecsökken. A villogásmentesség fontos minden fényforrás esetén, ami kihívást jelenthet az alacsonyosságok – például a villogás százaléka és a villogási index – szabványos meghatározásainak hiánya miatt. Ez némileg tovább komplikálódik a villogások új típusai – pl. az állítható színű világítási rendszerek színhőmérséklet-változásai miatt.

A több csatornához való alkalmasság fontos a színbeállításához és/vagy több LED és LED-füzér meghajtásához. Az alternatív bemeneti teljesítmény felhasználásának képessége olyan táplálást is magában foglal, mint pl. a DC mikrohálózatok vagy az Ethernetről érkező PoE, amelyek létfontosságúnak lesznek a multifunkcionalitás szempontjából. A PoE gyorsan fejlődő terület, mivel az IEEE PoE szabványait frissítették, hogy a világítási alkalmazásoknak portonként és eszközönként magasabb maximális teljesítményt nyújthassanak. Egy másik átfogó tulajdonság a meghajtó mérete, súlya és teljesítménye. Gyakorlatilag minden esetben jobb a kompakt meghajtóforma; bizonyos esetekben azonban alapvető fontosságú a lámpatest működése szempontjából. Általánosságban elmondható, hogy a kisebb méretű lámpatestek nagyobb rugalmasságot és felszerelési sűrűséget biztosítanak, ami viszont lehetővé teszi a világítástervezők számára, hogy szabadon kontrollálják a világítási jeleneteket és sűrűbb térbeli lefedettséget biztosítsanak az érzékelők számára. Ezért fontos kihívás a SWaP (méret, a súly és teljesítményszint) folyamatos fejlesztése, még akkor is, ha fenntartjuk a fent említett teljesítőképességi mutatókat. Nagy kihívás a nagy hatásfok és a kis, könnyű meghajtók megőrzése nagy működési teljesítmény-tartomány mentén. A széles tiltott sávú félvezetőkomponensek beépítése a meghajtókba lehetővé teszi, hogy előtérbe kerüljenek ezek a teljesítőképességi mutatók, és ez egyben lehetséges K+F programot is kijelöl. A nagyobb letörési feszültséggel és a túlfeszültségekkel szemben nagyobb ellenállással rendelkező, széles tiltott sávú GaN vagy SiC félvezetők lehetővé teszik a kétfokozatú meghajtók egyfokozatúra való csökkentését. A széles tiltott sávú félvezetők esetén nagyobb lehet a kapcsolási sebesség is a feszültségátalakításnál. Ezek az előnyök csökkenthetik a méretet és javíthatják a hatásfokot.

Noha jelenleg a SiC vezet, mind a SiC, mind a GaN sokkal kevésbé érett, mint a Si, ezért a költségek viszonylag magasak.

További kutatómunkára van szükség a konzisztencia és a megbízhatóság javítására és a SiC- és GaN-alapú komponensek költségeinek csökkentésére. A GaN teljesítmény-elektronika egyik előnye, hogy képes kihasználni az InGaN/GaN-alapú LED-világítás által létrejött jelentős meglévő ismereteket és gyártási bázist. Emiatt a LED-es világítás jelentős hasznot húzhat a GaN LED-meghajtókba való beépítéséből. Mivel ugyanolyan anyagplatformon osztoznak, az InGaN/GaN LED-ekkel hosszú távú lehetőség nyílik a GaN teljesítmény-elektronika integrálása. Az ilyen monolitikus integráció azonban kihívásokat is jelenthet: esetleges összeférhetlenségeket az epitaxiális növesztési és gyártási folyamataikban, valamint azt, hogy az egyes gyártási tételeknél nehéz összeválogatni és összeilleszteni az elektronikai és optoelektronikai tulajdonságokat. Az ilyen monumentális integráció ugyanakkor lehetőségeket is kínál: a fent tárgyalt pixelezett fényforrások a legelegánsabb módon a LED-fényforrások alá beépített GaN-alapú képernyőmeghajtókkal valósítható meg.

5.8.2 Megbízhatóság

A meghajtó általában a lámpatest első olyan komponense, amely meghibásodik. Ennek általában az az oka, hogy a LED-ek természetüknél fogva oly mértékben megbízhatóak, hogy a meghajtók lesznek a leggyengébb láncszemek. A meghajtók megbízhatósága bizonyos esetekben még csak el sem éri a hagyományos világítás korábbi generációihoz használtakét, például az ipari létesítményekben felszerelt nagyintenzitású kisülőlámpák vörösreztékercses előtérteinek megbízhatóságát. Ez azért van így, mert a feszültségelőkések és más olyan elektromos események, amelyek befolyásolják a teljesítmény minőségét jobban károsíthatják a LED-es világítási komponenseket, mint a hagyományos világítási rendszereket. Ez nem a világítás egyetlen problémája, mivel a szilárdtest-világítási rendszerekbe a LED-es lámpatestek rossz minőségű teljesítménnyel szembeni védelme érdekében beszerelt sérülékenyebb komponensek még fontosabbá válnak. A jelenlegi túlfeszültség ellen védő rendszerek a nagyobb események ellen védenek, ami azt jelenti, hogy néhány kisebb jelentőségű esemény vagy tranzienst érheti a túlfeszültség ellen védő rendszereket, és ezek a terhelésváltozások térorösség-hibákat okozhatnak, ha a teljesítmény minősége nem megfelelő.

A meghajtók megbízhatósága olyan terület, amely fontos fejlesztési lehetőséggel kecsegtet, beleértve a meghajtó számos

összetevőjének – az elektrolitnak és a rétegekondenzátoroknak – alapvető megbízhatóságát, és mindezt az előző, 5.8.1 fejezetben tárgyalt nagyobb teljesítőképesség jelenlegi trendjével összhangban. Egy másik cél a teljesítmény állapotának jobb fenntartása – különösen azért, mert sérülékenyebb komponensek kerültek a szilárdtest-világítási rendszerekbe a teljesítőképesség javítása – különösen a multifunkcionalitás – érdekében. Jelenleg a legtöbb túlfeszültség ellen védő rendszert úgy tervezték, hogy azok a nagyobb feszültségelőkések ellen védjenek, így a kisebbek okozta károsodások idővel felhalmozódhatnak, és végül károsíthatják a sorban ezután következő komponenseket.

Szorosan idetartozó kihívás a meghajtó megbízhatóságát „megjósoló” modellek és paraméterek kifejlesztése. A jelenlegi paraméterek – például az egyedi komponenseknél a meghibásodások között átlagosan eltelt idő (MBTF) – nem tekinthetők megfelelőeknek. Ezért hasznos lenne a szilárdtest-világítási ipar számára olyan további mérési módszer kidolgozása, amely definiálná és előre jelezné a meghibásodást. Kívánatos lenne olyan paraméter is, amely leírná a teljesítőképességet – a meghajtó hatásfokát, a környezeti hőmérséklethez képesti maximális hőmérsékletemelkedést és azt is, hogy ezek hogyan változnak az idővel. Az ilyen modellekkel és paraméterekkel standard, erősen forszírozott megbízhatósági tesztelési protokollokat lehetne kidolgozni, amelyek gyorsan, hetek alatt produkálnának eredményeket.

További kutatómunkára van szükség a meghajtók hőmérséklettel kapcsolatos teljesítőképességének, túlfeszültséggel szembeni ellenállásának, megbízhatóságának javításához és költségeinek csökkentéséhez. A szilárdtest-alapú komponensek meghajtókba való beépítését egyfajta robusztusabb alternatívaként kellene kezelni, mivel a szilárdtest-világítási meghajtók csökkenthetik a komponensek számát és a meghibásodásokat. Növelni kellene a túlfeszültséggel szembeni ellenállást és csökkenteni kellene a meghajtók méreteit. A GaN- vagy SiC-alapú teljesítményelektronika felé történő elmozdulás javíthatja a hatásfokot és a megbízhatóságot, habár ma még ezek a szilárdtest-alapú komponensek még mindig drágák, ezért további kutatómunkára van szükség az elektronikai iparban a meghibásodások és a költségek csökkentésére. Fontos lehetőség a GaN- és SiC-alapú komponensek megbízhatóságának és a meghajtók megbízhatóságára gyakorolt hatásának megerősítése.

5.8.3 A meghajtók fokozott funkcióképessége

A megnövelt világítástechnikai funkcióképesség döntő fontosságú meghajtófunkció lesz a tökéletesített tulajdonságokkal rendelkező csatlakoztatott világítás jövőbeni fejlesztéséhez és lehetővé teszi a funkciók programozható vezérlését is. A fény irányításának valósidejű vezérlése az egyik ilyen fontos funkcióképesség. Például az optikai fénynyaláb digitálisan vezérelhető folyadékkristályos lencsékkel történő formálása jelentősen javíthatná a fény felhasználásának hatásfokát azáltal, hogy a megvilágítási látóteret valós időben a felhasználói látómezőhöz igazítja. Egy másik példában a fénypontokból álló fénysugarak nemcsak a fényfelhasználás hatásfokának hasonló javulását tehetik lehetővé, hanem „kibővíthetik” a valóságot is – kiemelve a felhasználói környezet legfontosabb jellemzőit, vagy más információt szolgáltatva a felhasználó számára. A logikai korlátok figyelembe vétele mellett a kibővített valóság a megvilágítás és a kijelzők együttesének valamiféle formája lenne, amelyhez videoképernyő-szerű illesztőprogrammal rendelkező meghajtókra lenne szükség.

Végezetül, a csatlakoztatott világítás megjelenésével a lámpatestek válhatnak a tárgyak internetének legszélesebb körű hálózatához csatlakoztatott végpontjaivá, ami számos kívánatos új funkciót építhet be a lámpatestbe. Rövidesen különálló meghajtókat lehet majd használni ezekhez az új funkciókhoz. Hosszú távon azonban megjelenhetnek olyan beépített meghajtók, amelyek mind a LED-eket, mind ezeket az új komponenseket képesek lesznek meghajtani. Az egyik új funkcióképesség a Li-Fi-n keresztüli kommunikáció, amelyhez nagy sebességű moduláció, interoperabilitás és végponttól-végpontig terjedő biztonsági követelmények szükségesek. Egy másik új lehetséges funkció a környezet valamennyi aspektusát – hangot, fényt, hőmérsékletet, vegyi anyagokat, mozgást, emberi jelenlétet, talán még a LIDAR-alapú 3D-s leképezést is – monitorozó érzékelők jelentik. E kínálatok bonyolultsága óriási, mivel mindegyiknek megvan a saját igénye az interoperabilitásra és a végpontok közötti biztonságra.

6 Irányzatok az OLED-tudományban

Az OLED-technológia szünet nélkül fejlődik a kereskedelemben már kapható termékek révén, amelyek már elérik a nagy hatásfokkal, hosszú fényáram-tartási idők-



6-1. ábra – Az Acuity cég irodájában felszerelt OLED-es lámpatestei (Forrás: PNNL: OLED Lighting Products: Capabilities, Challenges, Potential, 2016. máj. [31] Fotó: Aurora Lighting Design)

kel és a jó színminőséggel kapcsolatos célokat. A 6-1. ábra egy kereskedelmi épület irodájának OLED-es világítását mutatja be.

Ezenkívül hajlítható panelek is kerültek kereskedelmi forgalomba. Az amerikai székhelyű OLEDWorks panelgyártó cég tavaly nagy előrelépést tett a Brite 3 panelcsalád bejelentésével. A standard, 3000 cd/m² fénysűrűségű, 3000K meleg fehér színárnyalatú panelek 85 lm/W fényhasznosítással és 100 000 órás L70-es élettartammal rendelkeznek. Ez a korábbi, Brite 2 generáció 63 lm/W-os paneljeihez képest lenyűgöző, 35%-os fényhasznosítás-növekedést jelent, és lényegében megduplázza az L70-es élettartamot. A Brite 3 paneljeinek színminősége is kitűnő: CRI >90-es és R9 >50-es színvisszaadási indexet kínálnak. A hajlítható panelek irányába történt másik előrelépés az egy tengely mentén hajlítható – BendOLED-ként is emlegetett – Brite 3 Curve panel kifejlesztése is. Ez a panel a Corning ultravékony Willow üvegét használja hordozóként.

A hajlítható panelek még nem tartalmaznak belső fénykivonó technológiát, így fényhasznosításuk 56 lm/W körüli értékre korlátozódik. A Brite 3 panelcsalád szállíthatóságát 2018-ra ígérték – a merev panelekét a 3., a hajlíthatóakét pedig a 4. negyedévre. A család valamennyi tagja 4000K semleges fehér vagy 3000K meleg fehér színárnyalatban készül, hatrétegű tandem OLED-struktúrában – 7000-8500 cd/m²-es nagy fénysűrűség előállításához. A semleges fehér paneleknek kisebb a fényhasznosítása (61 lm/W a merev és 44 lm/W a hajlékony panelek esetén), az R9

színvisszaadási indexük viszont meghaladja a 75-öt [32].

Az LG Display paneljei teljesítőképességének javítása helyett inkább a gyártás tökéletesítésére koncentrált. 2017-ben katalógusukban olyan háromrétegű, 3000K meleg fehér, merev paneleket kínáltak, amelyeknek fényhasznosítása 90 lm/W, színvisszaadási indexe pedig 93 volt. E nagy fényhasznosítású panelek szállíthatósága azonban a jelentések szerint korlátozott volt. Az LG a koreai Gumi-ban befejezte új gyártósorát, és elkezdte Luflex elnevezésű paneljeinek gyártását. A Luflex-család többféle – kör, négyzet és téglalap – alakú paneleket tartalmaz, méretük 30 cm x 30 cm. Katalógusok kínál 3000K meleg fehér vagy 4000K semleges fehér paneleket is, amelyeknek színvisszaadási indexe nagyobb 90-nél. A Brite 3 család termékeihez hasonlóan a semleges fehér merev paneleknek kisebb, 52 lm/W a fényhasznosítása a meleg fehér merev változatok 72 lm/W-jához képest.

A hajlítható paneleket meleg fehér fényű kivitelben kínálják, fényhasznosításuk 50 lm/W. A panel reklámozott élettartama kielégítő: az L70-es érték 3000 cd/m² mellett 40 000 óra a meleg fehér és 30 000 óra a semleges fehér változatnál [33].

Míg az LG Display és az OLEDWorks folytatja az OLED-panel technológiát és gyártást, addig a japán Lumiotecet megszerezte a V-Technology, amely a teljesítőképességre és a termelés fejlesztésére összpontosítva leállította az OLED-panelek gyártását [34]. A Lumiotecnek van egy nagy, max. 4600 cd/m² fénysűrűséget előállító, 3000, 4000 és 5000K színhőmérsékletű és 30-45 lm/W fényhasznosítású panel-családjá. A panelek értékesítése a készlet erejéig folytatódik.

Az OSRAM bejelentette, hogy kilép az OLED-es világítási üzletágból. 2016-ban a fókuszát az általános világítási alkalmazásokról a gépjárművekhez alkalmas OLED-ek gyártására helyezte át. Azóta az Audi és a BMW vezető beszállítói lettek, akik megkezdték az OLED-ek beépítését az autók hátsó lámpáiba és belsőtéri világításába. Habár még 2020-ban is szállítanak

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

[32] OLEDWorks: Brite 3, <https://www.oledworks.com/oled-lighting-products/brite-3/>

[33] LG: Luflex LG OLED Light, https://www.lgoledlight.com/wp-content/uploads/down/Luflex_Eng_view.pdf

[34] Lumiotec: Information about revision of OLED panel product lineup, 2018. febr. 23. <http://www.lumiotec.com/en/news/pdf/20180223.pdf>.

OLED-eket az autóipar számára, további K+F tevékenységet nem terveznek az OLED-es világítás területén.

A kínai First-O-Lite bejelentette, hogy OLED-es világítási termékeket gyártó második generációs gépsorán a legnagyobbak közé tartozó, 37cm x 47cm-es, és 65 lm/W-ot meghaladó fényhasznosítású paneleket állít elő. A panelek L70-es élettartama közlésük szerint meghaladja a 20 000 órát 3000 cd/m² mellett [35].

Miközben egyes panelgyártók nyomulnak előre, mások visszahúzódnak, az OLED-ek általános teljesítőképessége továbbra is javul.

A 6-1. táblázat az OLED-panelek és OLED-lámpatestek hatásfok-előrejelzéseit foglalja össze. A kiváló színminőséggel, az akár 100 000 órát is elérő élettartammal és a 100 lm/W-ot megközelítő fényhasznosítással jellemezhető OLED-ek specifikációi már versenyképesebbeknek tűnnek. Noha az árak gyorsan csökkennek, további jelentős csökkenésre van szükség piaci lehetőségeik realizálásához.

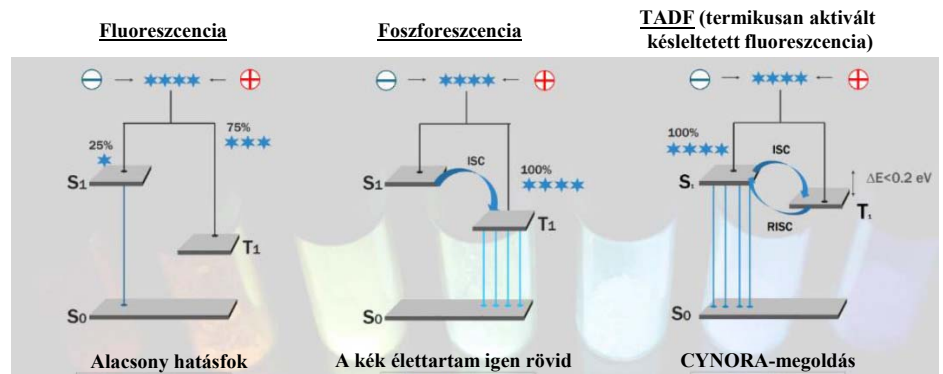
A jelen fejezet először a panelek és a lámpatestek fényhasznosítás-előrejelzéseivel foglalkozik, majd sorra veszi az OLED-világítás főbb K+F kihívásait, amelyek befolyásolják az OLED-ek költségeit és teljesítőképességeit. Ezek a következők: 1) a stabil, hatékony eszközökhöz szükséges anyagok; 2) fénykivonás; 3) korszerű gyártástechnológia és 4) világítási platformok. Kiemeljük a korszerű módszereket és az új technológiai irányzatokat és javaslatokat teszünk a jövőbeni teljesítőképesség-növelési célok eléréséhez.

6.1 Stabil, hatékony, fehér fényű szerves emitterek

Az OLED-eknek nagy lehetőségei vannak energiamegtakarítások elérésére a nagy területek szilárdtest-világítási fényforrásainál. Az alkalmazások ösztönzéséhez azonban javítani kell az OLED-ek árain és teljesítőképességein (pl. az eszközök hatásfokán és élettartamán). Amíg rendelkezésre állnak olyan foszforeszkáló vörös és zöld emitterrendszerek, amelyek kielégítik az élettartamra és a hatásfokra vonatkozó követelményeket, a kék emitter- és gazdaanyagok folyamatos kihívást jelentenek. A kék fotonok elállításához szükséges nagy energia olyan gerjesztett állapotok kialakításához vezet, amelyeknek energiái összevethetők a szerves anyagok molekulái közötti kötés szilárdságával. Ezek a gerjesztett állapotok számos nem-sugárzó mechanizmus miatt leépülnek, ami a szerves rétegek gyorsított degradációjához és a fényhasznosítás csökkenéséhez vezet.

Paraméter	2016	2018	2020	2025	Cél
Panel fényhasznosítása (lm/W)	60	85	110	150	190
Lámpatest optikai hatásfoka	100%	100%	100%	90% ²	90% ²
Meghajtó hatásfoka	85%	85%	90%	90%	95%
Az eszköztől a lámpatestig mért teljes hatásfok	85%	85%	90%	81%	86%
Eredményül kapott lámpatest-hatásfok ¹ (lm/W)	51	72	99	122	162

6-1. táblázat – Az OLED-ek történeti és célul kitűzött fényhasznosításai (Megjegyzések: 1. A Fényhasznosítási előrejelzések CRI>90 és CCT=3000K értékek feltételezésével készültek; 2. A sugárnyaláb-formáló optikák lehetséges használata esetén adódó veszteségek)



6-2. ábra – A Cynora termikusan aktivált késleltetett fluoreszcenciás megoldása a fluoreszkáló és foszforeszkáló megoldásokkal összevetve[36]

Ez a probléma fluoreszcencia esetén nem olyan súlyos, mivel a szingulett állapot élettartama rövid, a foszforeszkáló rendszereknél azonban a triplett állapotokból származó sugárzási emisszió sokkal lassúbb, ami megnöveli a sugárzással nem járó leépülés veszélyét és így csökkenti az eszköz élettartamát. Noha a Universal Display Corporation-nél és más vállalatoknál végzett sok éves kutatómunka folytán sikerült javulásokat elérni a foszforeszkáló emitterek teljesítőképességében, a jelenlegi élettartam nem elegendő a világítástechnikai vagy kijelzési célokra történő kereskedelmi elfogadáshoz. A gyakorlati stabilitási szintek eléréséhez, a kereskedelmi forgalomba kerülő paneleknek fluoreszkáló kék emittereket kell használniuk. A fluoreszkáló emitterek hatásfoka azonban sajnos 25% körüli értékre korlátozódik a 25% szingulett és 75% triplett állapot miatt, míg a foszforeszkáló emitterek közel 100%-os belső kvantumhatásfokot (IQE) képesek elérni

Az OLED-kijelzők gyártói a kék emitterekkel és gazdaanyagokkal birkóznak, és kemény beruházásokat eszközölnek az anyagok fejlesztésébe. Vannak különbségek az anyagigényekben, például a kijelzőkhez szükség van a mélykékre, míg az általános világításhoz az égék megfelelő. Ezenkívül az általános világítási alkalmazásoknak általában hosszabb az élettartamigényük, mint a megjelenítőknek. A műszaki fejlesztések és az anyagfejlesztés

azonban valószínűleg segítik egymást az OLED-megjelenítők és az OLED-es általános világítás esetén. A világítás rövid távon (azaz 5-10 éves távlatban) a gőzfázisú leválasztással készülő kis molekulájú anyagokra fókuszál, amelyek a legjobb teljesítőképességet kínálják. (Az elmúlt néhány évben költségmegtakarítási okokból szorgalmazták az oldatból leválasztott anyagok fejlesztését, de ezek az erőfeszítések most az olyan megjelenítős alkalmazásokra koncentrálnak, amelyek eltérő teljesítőképességeket és olyan struktúrákat igényelnek, amelyek jobban megfelelnek a nyomtatáshoz.) A „hengerről hengerre” végzett roll-to-roll* leválasztás még mindig fontos az OLED-ek számára, de az emissziós rétegek gőzfázisú leválasztása beépíthető a roll-to-roll gépsorokba. A megjelenítők és a világítástechnika is olcsó anyagokat igényel. Noha az anyagfelhasználás hatásfoka folyamatosan javul, a költségcélok megkívánják az anyagok árának csökkentését is.

Az eszközök stabilitásának és hatásfokának a költségek csökkentése melletti javításához különböző alternatív anyagokkal kísérleteznek. Az utóbbi években a termikusan aktivált késleltetett fluoreszcencia (TADF) bizonyult a leghatékonyabbnak. Ez a technológia megkísérli felhasználni a szingulett és a triplett excitonokat is a kék fotonok nagyon hatékony és stabil emissziójához.

[35] First O-Lite, <https://fol.manufacturer.lighting/>

sziójához a fluoreszcencia útvonalain keresztül. Azokban a molekulákban, amelyekben a triplett állapot energiája megközelíti a szingulett állapotét, a triplett állapotról a szingulettbe való termikus felfelé konvertálódás elméletileg lehetővé teszi a 100%-os IQE belső kvantumhatásfokot, amint az a 6-2. ábrán látható.

A Cynora olyan égkék (CIE = 0.37), termikusan aktivált, késleltetett fluoreszcenciás (TADF) anyagokat fejlesztett ki, amelyeknek EQE külső kvantumhatásfoka 22%, L50-es élettartama 1000 cd/m² mellett pedig meghaladja az 1500 órát [37]. Beszámoltak egy olyan mélykék (CIE = 0.14) emittorról is, amelynek külső kvantumhatásfoka 20%, L97-es élettartama pedig 700 cd/m² mellett 20 óra. A Samsung és az LG 25 millió USD nagyságú beruházást eszközölt a Cynorába olyan alternatív TADF-anyagok kifejlesztésére, amelyeknek tömeggyártása 2020-ban kezdődik meg.

A TADF anyagok fejlesztése iránt folyamatos az érdeklődés. Koreában a Material Science – amely jelenleg elektron- és lyuktraszport-rétegekhez alkalmas anyagokat szállít az OLED-gyártóknak – kék TADF emittort és gazdaanyagokat fejlesztett ki a Samsung és az LG Display kereskedelmi OLED-termékei számára.

A National Taiwan University csoportnak rekord eredményeket sikerült elérnie orientált TADF emittort felhasználásával. Közel 37%-os külső kvantumhatásfokot tudtak elérni égszínkék szerves elektrolumineszcenciával hagyományos planár eszközstruktúra mellett. Egy igen nagy hatásfokú TADF emittort használtak fel a spiroakridin-triazin hibrid hordozón, és közel egyforma (100%-os) fotolumineszcenciás kvantumkihozatalt értek el kiváló termikus stabilitás és erősen vízszintes orientációban emittáló dipólok (83%-os vízszintes dipolarány) mellett [38].

A Kyushu University csoport a TADF módszer olyan további kiterjesztését javasolta, amelynél két – egy TADF és egy fluoreszkáló – adalékanyagot alkalmaznak. A TADF adalékanyagánál excitonok képződnek, amelyek mindegyike a fluoreszkáló emitter szingulett állapotába megy át, amint azt a 6-3. ábra mutatja. Az eljárás támogatói azt jósolják, hogy az eszköz stabilitása és hatásfoka a triplettek átalakulás miatt lecsökken energiája, a rövidebb gerjesztési élettartam és a hatékonyabb továbbítási folyamatok következtében javulhat a hagyományos TADF-hez képest. Emellett ez a módszer kihasználhatja a rendelkezésre álló fluoreszkáló emittort előnyeit, és alkalmas megjelení-



6-3. ábra – A TADF termikusan aktivált késleltetett fluoreszcenciás és a hiperfluoreszcencia mechanizmusainak összehasonlítása [41]

tőkhöz is, mivel keskenyebb spektrumú, de nagyobb hatásfokú fluoreszkáló emittort eredményez. A módszert „hiperfluoreszcenciának” nevezték el és a Kyulux cég forgalmazza [39].

Habár a Kyulux eredeti célja kereskedelmi forgalomba hozható vörös, zöld és sárga emitter/gazda-anyag rendszerek kifejlesztése volt, beszámoltak nagy teljesítőképességű hiperfluoreszkáló kék anyagokról is. Legutóbbi eredményeik közé tartozik egy 470 nm hullámhosszúságú, 750 cd/m² mellett 100 órás L95-ös élettartammal és 1000 cd/m² esetén 26-22%-os külső kvantumhatásfokot mutató kék anyag. A japán Nagase vegyipari gyártó 4,6 millió dollárt investált a Kyuluxba. A Kyulux hiperfluoreszcenciás sárga emittort alkalmazza a Wisechip hajlékony, passzív mátrixos OLED-es (PMOLED) megjelenítőben, lehetővé téve ezzel, hogy a megjelenítő energiafogyasztása közel 50%-kal csökkenjen a normál fluoreszkáló PMOLED-hez képest. A panelek várhatóan 2018 végére kerülnek tömeggyártásba [40]. A hiperfluoreszkáló technológiát HyperOLED projekt név alatt kutatta egy európai csapat is (a Merck vezetésével), valamint a Georgia Tech a BTO szilárdtest-világítási K+F programjának keretein belül.

Noha a TADF megközelítések alternatívát kínálnak a foszforeszkáló anyagok mellett, az élettartam korlátozódása hasonló a nagy energiák és a gerjesztett állapotok hasonló nagyságrendű élettartamai miatt. Ha a gerjesztett állapotok hosszú élettartamúak, akkor nagyobb a hosszú élettartamú triplett excitonok sűrűsége, ami növeli a megsemmisülés lehetőségeit. A kék emittáló vegyületekben az ilyen kioltási reakciók által disszipálódott energia elég nagy lehet ahhoz, hogy az emittáló anyagrétegben molekuláris disszociációt indítson el. Az emittálóréteg gazdamolekuláinak degradációja ugyanolyan gondot okoz, mint az emittormolekulák stabilitása. A kék emittortrendszerekhez olyan új gazdaanyagokra van szükség, amelyeknek megfelelő az energiaszintjük, töltéshordozó-transzportjuk és a stabilitásuk.

Exciton kollekció (TADF)

Gazda-anyag – S1
Adalék-anyag – S2

FLUORESCENCIA TADF FOSZFORESCENCIA

HIPER FLUORESCENCIA

A felhalmozódás megszűnésének megakadályozására a foszforeszkáló, fluoreszkáló és TADF emittortekben a gazdamátrixban kis (<20%) adalékanyag-koncentrációkat alkalmaznak. A kutatók azonban elkezdtek feltárni az ambipoláris TADF vegyületeket, amelyek „tisztá” – teljes egészében a TADF vegyületéből álló – emittortétegekként működhetnek [42]. Mind a Dél-Kaliforniai Egyetemen (USC), mind a Georgia Tech-en folynak kutatások ennek a lehetőségnek a feltérképezésére a BTO által finanszírozott kutatásai részeként. A TADF molekulákat hasonlóképpen fel lehet használni a foszforeszkáló emittortek gazdaanyagoként is az eszközök élettartamának megnövelésére. Ebben az esetben a gazdaanyag triplett excitonjai (amelyek szokásosan instabilok) gyorsan

[36] L. Bergmann: Blue high-efficiency TADF emitters for OLED lighting, DOE SSL R&D Workshop, Nashville, Tennessee, 2018

[37] OLED-info: An interview with Cynora's CMO Dr. Andreas Haldi – talking about TADF, lifetime, color points and more, 2018. aug.7. <https://www.oled-info.com/interview-cynoras-cmo-dr-andreas-haldi-talking-about-tadf-lifetime-color-points-and-more>.

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

[39] Kyulux: <http://www.kyulux.com/technology.html>

[40] WiseChip Semiconductor: Wisechip to commercialize Hyperfluorescence TADF PMOLEDs by year's end, 2018. márc. 2. <http://www.wisechip.com.tw/en/news-39263/Wisechip-to-commercialize-Hyperfluorescence-TADF-PMOLEDs-by-year-s-end.html>.

[41] Allled OLED: Hyper Fluorescence, 2018. <http://allled.tistory.com/50>

[42] X. Zhang, C. Fuentes-Hernandez, Y. Zhang, M. W. Cooper, S. Barlow, S. R. Marder és B. Kippelen: High performance blue-emitting organic light-emitting diodes from thermally activated delayed fluorescence: A guest/host ratio study, *Journal of Applied Physics*, vol. 124, no. 5, 2018.

[43] H. Fukagawa, T. Shimizu, Y. Iwasaki és T. Yamamoto, Operational lifetimes of organic light-emitting diodes dominated by Förster resonance energy transfer, *Scientific Reports*, p. Article number: 1735, 2017.

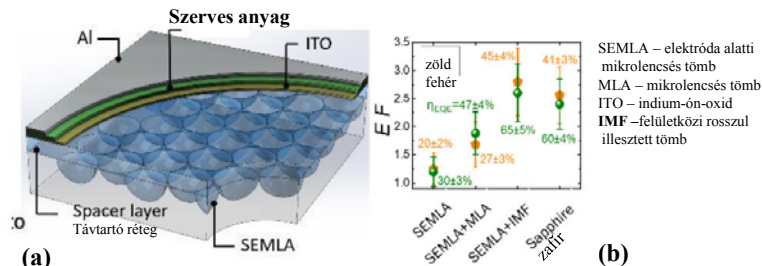
átkerülnek a foszforeszkáló adalékanyaghoz [43].

A Dél-Kaliforniai Egyetemen (USC) fehér OLED-ek előállítására alkalmas hibrid fluorenszkáló/foszforeszkáló megoldással kísérleteznek. Az egyik BTO által finanszírozott és Mark Thompson által vezetett projektben az emissziós réteg (EML) gazdaanyaga a szinguletteket a kék fluorensz, a tripletteket pedig a vörös/zöld foszforeszkáló adalékanyagokhoz továbbítja. Az ilyen típusú rendszerben nagy stabilitást és hatásfokot lehetne elérni a szingulettel és triplettel egymástól függetlenül volt okán.

Az új anyagok utáni kutatás és a számítógépes modellezés értékes eszköznek bizonyult a szóba jöhető anyagok feltárásához. A Merck cég és a Harvard University kutatói a Kyulux és a Dél-Kaliforniai Egyetem és mások közreműködésével használja ezeket az eszközöket a molekuláris tulajdonságok megismeréséhez.

Az anyagok teljesítményének és stabilitásának javítására irányuló egyéb módszerek közé tartoznak a leválasztási eljárások módosításai. Amíg a fényelemekhez szükséges szerves anyagok tulajdonságait részletesen tanulmányozták, az OLED-anyagokkal kapcsolatosan kevés tanulmány látott napvilágot. A közelmúltban a TU Drezda és az Università Autònoma de Barcelona kutatási eredményeket tett közzé a leválasztási hőmérsékletnek az OLED-anyagok tulajdonságaira gyakorolt hatásáról. Megállapították, hogy a szerves anyagok megfelelő leválasztási sebességgel és horfozó-hőmérsékleten történő elpárolgatásával rendkívül stabil üvegek állíthatók elő. Az üveg átmeneti hőmérséklete kb. 85%-ánál megfelelő hőmérsékleteken és kis (általában 5 A/s körüli) növesztési sebességeknél elpárolgatott üvegek növelik az üveg sűrűségét – és így annak stabilitását is. Négy különböző foszforeszkáló emitter felhasználásával 15%-nál nagyobb hatásfok-növekedést és működési stabilitást sikerült elérni. Az aktivált készlettel fluorenszcenciájú (TADF) anyagokkal kapcsolatos fejlesztési eredmények várhatóan még hatásosabbak lesznek [44].

Panelhibák is keletkezhetnek az emittorétegekben vagy az elektródákban kialakuló hibák és azok növekedése folytán. A Penn State University-n a BTO szilárdtest-világítási programja által támogatott kísérletek kimutatták, hogy ezek a hibák a szerves anyagok szennyeződéseiből adódhatnak, és javaslatokat tettek arra, hogy miként lehetne enyhíteni a kis hibák katasztrófális rövidzárlattá történő növekedését.



6-4. ábra – A Michigan-i Egyetem szubelektronikus mikrolencsés tömbje: (a) az eszköz felépítése; (b) fénykivonás-növelési tényező [46]

A BTO-nak az a célja, hogy az ilyen hirtelen fellépő meghibásodások száma kisebb legyen 1/10000-nél.

6.2 Fénykivonás

A fénykivonási hatásfok a panelből kibocsátott látható fotonok és az emissziós tartományban keletkező fotonok hányadosa. A sík üveghordozókon kialakított szokásos OLED-eszközök esetén a keletkező fénynek a panel csak kb. 20%-át bocsátja ki. Ennek fő oka az abszorpció, amely felerősödik a fotonoknak az elektródákba, átlátszó hordozókba és belső rétegekbe történő csapódásával, ami azért jön létre, mert a fotonoknak az emittorétegtől az eszköz külső részéhez való eljutásig vezető út mentén a törésmutató nem egyforma. Azokban az eszközökben, amelyekben a katód közel van az emissziós tartományhoz, jelentős energia veszhet el a felszíni plazmon-módusok gerjesztődése révén.

A fényt a hordozókból külső mikrolencsés tömbök vagy az átlátszó OLED-hordozóra rétegezett fényzórórétegek felhasználásával lehet kivonni. Ez kb. 1,5-1,6-szeresére növelheti a fénykivonást, ami az eszköz külső kvantumhatásfokát 30-35% körülire állítja be. Annak érdekében, hogy az anódban és a szerves rétegekben általában hullámvezetéses üzemmódokban elvesztett fényt ki lehessen vonni, a hordozó és az anód közé belső fénykivonó rétegek helyezhetők el. Ez sokkal nagyobb kihívás, tekintve, hogy a kiegészítő rétegek bonyolultabbá tehetik az OLED-eszközök gyártását. Belső és külső fénykivonó technológiáknak az eszközökbe történő beépítésével a panelgyártók 2,2-szeres fénykivonás-növekedést és 40%-ot meghaladó külső kvantumhatásfokot is képesek elérni. A fénykivonásban elért javulások a rétegek finomításával és nagyobb törésmutatójú katódok használatával (ahol ezüsttel helyettesítik az alumíniumot) a világító panelek fényhasznosítását 85-90 lm/W-ra sikerült megnövelni. Noha ez jelentős teljesítmény-növekedést jelent az előző generációs eszközökhöz képest, a fénykibocsátási hatásfok tekintetében a BTO

célja 75%, ami több mint 3,5-szeres fénykivonás-növekedésnek felel meg.

A jelenlegi termékek fényvonási hatásfoka mindössze 30-50%, bőséges teret engedve a fejlesztésnek és az energiahatékonyság növelésének. Számos megoldást vizsgálnak: 1) fényzóró rétegeket; 2) funkcióval felruházott (pl. belső rácszattal, lencsékkel, bordázattal ellátott) hordozókat a sík szimmetria megtörésére és a fénynek az eszközön kívülre történő irányításához; 3) bordázott hordozókat a felületi plazmon-módusok csökkentésére; 4) a fénytörési indexhez történő illesztést; 5) az emittoréteget orientálását és 5) az OLED-tömb optimalizálását. Fontos megjegyezni, hogy továbbra is jelentős eltérések vannak a panelgyártók tömb-struktúrái, leválasztási technológiai és értékajánlatai között. Ezért jelentős eltérések mutatkoznak a különféle fénykivonási technikák alkalmazhatóságában is, mivel ezek függnek az OLED-struktúrától, a méretnövelési potenciáltól és a költségektől.

6.2.1 Fényzóró rétegek

Néhány kereskedelmi termék az átlátszó elektróda és a hordozó között fényzóró rétegekkel is el van látva. A piacvezető Pixelligent cégtől származó filmekben ZrO_2 nanorészecskéket használnak egy nagy indexű polimer mátrix előállításához, amely ugyancsak tartalmaz nagyobb TiO_2 fényzóró részecskéket. A ZrO_2 részecskék sűrűségét úgy lehet meghatározni, hogy e rétegnek megfelelő törésmutatója legyen a Fresnel-reakciók csök-

[44] J. Rafols-Ribe, P. Will, C. Hanisch, M. Gonzalez-Silveira, S. Lenk, J. Rodriguez-Viejo és S. Reineke: High-performance organic light-emitting diodes comprising ultrastable glass layers, *Science Advances*, vol. 4, no. 5, 2018.

[45] K. Yamae, H. Tsuji, V. Kittichungchit, Y. Matsuhisa, S. Hayashi, N. Ide és T. Komoda: High-Efficiency White OLEDs with Built-up Outcoupling Substrate, *Society for Information Display, International Symposium Digest of Technical Papers*, vol. 34, no. 1, pp. 694-697, 2012.

[46] Y. Qu, J. Kim, C. Coburn és S. Forrest: Efficient, Nonintrusive Outcoupling in Organic Light Emitting Devices Using Embedded Micro-lens Arrays, *ACS Photonics*, vol. 5, no. 6, pp. 2453-2458, 2018.

kentése érdekében. E megfelelő törésmutatójú megoldás alkalmazásával kb. 2,5-szeres fénykivonás-növekedésről számoltak be.

A megoldással kapcsolatos problémákat a kiegészítő rétegeknek és anyagoknak az eszközbe való bejuttatása jelenti. Minden belső fénykivonó rétegnek stabilnak és az OLED-ek következő gyártási lépésével kompatibilisnek kell lennie. Polimer gázdaanyagok használata esetén azoknak alkíthatóknak kell lenniük, hogy megakadályozzák a víz és oxigén fénykivonó rétegen keresztüli bejutását az eszközbe.

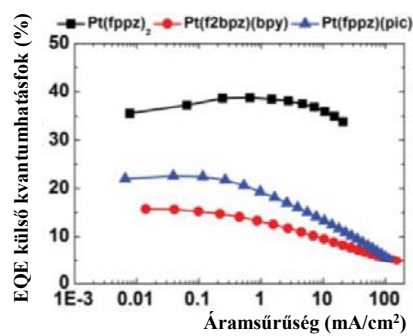
Ezenkívül az anód leválasztási és hőkezelési hőmérséklete korlátozódhat, az anód alakra formálása nehézségekbe ütközhet és oldószereket juttathat be. Szükség van tehát olyan nagy teljesítőképességű fénykivonási módszerekre, amelyek legalább 2,5-szeres fénykivonás-növekedést érnek el és az élettartam és a kihozatal csökkenése nélkül építhetők be a panelekbe.

6.2.2 Funkciókkal ellátott hordozók

Nehéz növelni a fénykivonást olyan eszközökből, amelyben az összes kapcsolódó felület sík. A fényzóó részecskék beépítése csak az egyik példa abból a számos stratégiából, amellyel háromdimenziós struktúrát alakítanak ki az eszköz belsejében. Egy másik javaslat rácsok kialakítása az emissziós rétegek és az átlátszó anódok között, vagy belső többlencsés tömbök létrehozása. Az utóbbi megoldás igen hatékonyan bizonyult a Panasonic által végzett laboratóriumi kísérletek során, de kereskedelmi panelekbe nem sikerült beépíteni [45]. A Michigan-i Egyetem kutatói hasonló módszert fejlesztettek ki, amelynél többlencsés tömböt ágyaztak be a hordozóba. Ezzel az elektróda alatti mikrolencsés tömbbel (SEMLA) max. 70%-os külső kvantumhatásfokot értek el zöld OLED-eszközök esetén. Ezt a nagy hatásfokot figyelték meg egy törésmutatóhoz illeszkedő folyadékknak és nagy félgömb alakú lencsének a hordozóból való legtöbb fény kivonására történő felhasználásánál. A SEMLA-nak külső mikrolencsékkel együtt történő felhasználásával 47% körüli külső kvantumhatásfok volt megfigyelhető zöld és 27% fehér OLED-ek esetén, amint azt a 6-4. ábra mutatja.

6.2.3 Hullámosított hordozók

Számos kutató javasolta a hullámosított hordozók használatát, amelyek hatásosan megszakítják a fény kicsatolódását a felület plazmon (plazmahullám) polarizációs (SPP) módusaihoz. Ezt több. a BTO szilárdtest-világítási programja keretében



6-5. ábra – Pt-alapú emitterekkel ellátott foszfor-encsencs OLED-ek külső kvantumhatásfoka [51]

finanszírozott projektben vizsgálják. Az Észak-Karolinai Állami Egyetem csoportja kvázi-véletlenszerű rácsos szerkezeteket hozott létre, amelyek átlagos ismétlődése 260 nm, FWHM értéke (a maximum felénél adódó teljes szélesség) 50 nm, és a tipikus hullámosság mélysége 90 nm. 87%-os javulást tapasztaltak a szivárgási áram növekedése nélkül [47]. Az Iowa-i Állami Egyetemi csoportja max. 2,4-szeres növekedési tényezőről számolt be, 215-500 nm mélységű, plikarbonátba nyomott minták felhasználásával [48]. Ennek a módszernek a legnagyobb problémája a hullámosított hordozókon elkészített OLED-ek megbízhatóságában rejlik. A hullámosított hordozóknál elektromos zárlatok léptek fel, és hozzájárulhatnak a lokális nagy erőkterek által indukált degradációhoz. Sok év telhet el addig, amíg a gyártók elfogadják ezt a kockázatot.

6.2.4 Törésmutató

Az átlátszó hordozóknak jelenleg használt anyagok törésmutatója közel 1,5, míg az emittorrétegekben használtaké kb. 1,75. Ez azt jelenti, hogy a fény nagyobb része nem éri el a hordozót és nem lehet kivonni a mikrolencsés tömbbel (MLA). A külső réteg sokkal hatékonyabb lehetne, ha nagyobb törésmutatójú hordozókat használnánk. Sajnos nem találtak még olyan anyagot, amelyen megbízható OLED-ek megfigyeltetők árón készülhetnének. Mindenesetre egy azonos törésmutatójú anyagválaszték megnövelhetné a külső mikrolencsés tömb (MLA) hatékonyságát és kiküszöbölné a Fresnel-tükröződések a belső határfelületeken. Néhány csoport vizsgálja a szerves réteganyagok törésmutatójának megváltoztatását (Giebink professzor a Penn State csoportnál), vagy az anód és a hordozó közötti fokozatos törésmutatójú rétegeket (Pixelligent).

6.2.5 Az emitter-dipolok orientációja

A fotonok nagyobb a valószínűsége, ha a fotonok a merőlegeshez közeli

irányba emittálódnak. Ennek akkor van nagyobb valószínűsége, ha a molekuláris dipolok az OLED síkjában helyezkednek el. Az orientált molekulákkal rendelkező foszforozkáló rétegek fejlesztését széles körben folytatják az iridium-alapú emitterek területén a Dél-Kaliforniai Egyetemen, a platina-alapú emitterek területén pedig az Arizonai Állami Egyetemen és a Szöuli Nemzeti Egyetemen [49] [50] [51]. A 6-5. ábra mutatja, hogy 35%-ot meghaladó külső kvantumhatásfok érhető el bármilyen fénykivonást segítő struktúra nélkül is [51].

A közelmúltban a kutatók kifejlesztettek 56%-os külső kvantumhatásfokot mutató OLED-eket, amelyek molekula-orientációval és a nyitóirányban intenzív fényzórásra szabott külső fényzórórétegekkel készültek [52]. A fényzóó réteg-halmaz jellemzőinek – pl. szimmetria-paraméterének, fényzóóási hatásfokának és a szóórásnak – a beállításával a csapatnak sikerült növelnie a külső fényzóóó réteg hatékonyságát. Szimulációik azt is mutatták, hogy a külső kvantumhatásfok maximuma jelentősen megnő a vízszintes dipol-orientációval még külső fényzóóóréteg alkalmazása esetén is. Egy tökéletesen orientált dipolokkal rendelkező OLED maximális külső kvantumhatásfoka elérheti a 63%-ot, míg izotropikus orientáció esetén értéke 43%-ra korlátozódik. SiO₂ vagy TiO₂

[47] F. So: Low cost corrugated substrates for OLEDs, DOE SSL OLED Stakeholder Meeting, Corning, New York, 2016

[48] e. a. Eeshita Mann, DOE SSL R&D Workshop, Long Beach, Kalifornia, 2017

[49] M. Thompson: Advances in Organic Materials for White OLEDs, DOE SSL R&D Workshop, Long Beach, Kalifornia, 2017

[50] J. Li: Efficient and Stable OLEDs for Employing Square Planar Metal Complexes, DOE SSL OLED Stakeholder Meeting, Corning, New York, 2016

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

[52] J. Song, K. Kim, E. Kim, C. Moon, Y. Kim, J. Kim és S. Yoo: Lensfree OLEDs with over 50% external quantum efficiency via external scattering and horizontally oriented emitters, Nature Communications, vol. 9, no. Article 3207, 2018

[53] D. Yokoyama, Y. Setoguchi, A. Sakaguchi, M. Suzuki és C. Adachi: Orientation Control of Linear-Shaped Molecules in Vacuum-Deposited Organic Amorphous Films and Its Effect on Carrier Mobilities, Advanced Functional Materials, vol. 20, no. 3, pp. 386-391, 2010

[54] S. Dalal, D. Walters, I. Lyubimov, J. Pablo és M. Ediger: Tunable molecular orientation and elevated thermal stability of vapor-deposited organic semiconductors, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, vol. 112, no. 14, pp. 4227-4232, 2015

fényszóró rétegekkel készült dipol-orientált ($\Theta=0.865$) Ir(dmppy-ph)2tmd emittorokkal végzett kísérletek 50%-ot meghaladó – akár 56%-ot is elérő – külső kvantumhatásfokot mutattak.

Az emittormolekulák molekuláris orientációjának elérésében a molekula alakjának nagy szerepe van. Néhány tanulmány azt is kimutatta, hogyan lehet a különböző szerves félvezetőmolekulák molekuláris orientációját beállítani a leválasztási hőmérséklet változtatásával [53] [54]. Az alacsonyabb leválasztási hőmérsékletek általában nagyobb mértékű vízszintes orientációt eredményeznek.

6.2.6 A rétegszerkezet optimalizálása

Az eszközök rétegszerkezetének optimalizálása minimalizálja az emisszió és a veszteségi módusok közötti kapcsolatot. Az „üreg” beállítása mellett a rétegek vastagságára és az eszköz architektúrájára is figyelmet fordítanak. Például az emissziós tartománynak a katód anyagától mérhető távolsága befolyásolja a felületi plazmon módusok kialakulását. Így a többrétegű tandem eszközöknek és a vastag elektrontranszport-rétegekkel (ETL) készült eszközöknek kisebbek lesznek a veszteségei a felületi plazmon polarizációs (SPP) módusokban. A rétegvastagság és az anyagok tulajdonságai is fontosak az OLED-rétegek optikai abszorpciójának csökkenthetősége szempontjából. A többrétegű OLED-ek túlsúlya és a fényszóró rétegek bevezetése – amelyek sok foton „visszafogatnak” az eszközön belül – fokozott aggodalomra ad okot az abszorpciós veszteségek miatt. Minden alkalommal, amikor egy foton visszaverődik a fényszóró rétegről vagy az átlátszó hordozóról, akkor kétszer kell áthaladnia az átlátszó anódon és a szerves rétegeken, majd visszaverődik a katódról. E tekintetben három komponens különös figyelmet érdemel: az átlátszó indium-ön-oxidból (ITO) készült anód, a töltésgeneráló rétegek és a katód.

• **Átlátszó anód:** A kereskedelemben kapható OLED-ekhez indium-ön-oxidot (ITO) használnak. Kivételesen nehéz kis (10 Ω /négyzet-nél kisebb) rétegenállást és kis (5%-nál kisebb) optikai abszorpciót elérni egyszerre. Az alternatív átlátszó vezetőkkel kapcsolatos kutatások során biztató laboratóriumi eredmények születtek polimer gazdaanyagba ágyazott ezüst nanohuzalokkal, de ilyen elektródákra leválasztott, megbízható OLED-eket még nem sikerült kifejleszteni.

• **Töltésgeneráló rétegek:** Az OLED Works, az Aixtron és az RTW Aachen University közötti együttműködés során

	2016	2018	2020	2025
Hordozó felülete (m ²)	0,2	1,2	1,2	2,7
Tőkeköltség (millió USD)	50	125	125	200
Ciklusidő (perc)	3	2	1	0,5
Kapacitás (1000 m ² /év)	17	175	350	2400
Értékesítés (USD/m ²)	600	140	70	35
Szerves anyagok (USD/m ²)	150	100	50	15
Szervetlen anyagok (USD/m ²)	200	140	100	30
Munkaerő költsége (USD/m ²)	100	25	15	5
Egyéb fix költség (USD/m ²)	50	15	10	5
Összes fix költség (USD/m ²)	1100	420	245	90
Jó termék kihozatala (%)	70	80	85	90
Összes költség (USD/m ²)	1570	525	290	100

6-2. táblázat – A hagyományos módszerekkel előállított panelek jelenlegi helyzete és költségcéljai



6-6. ábra – Az OLEDWorks Brite 3 Curve, BendOLED-je a Corning Willow Glass üvegén [57]

kimutatták, hogy a töltésgeneráló rétegek jelentős optikai abszorpciót eredményezhetnek, gyakran 90% alatti transzmissziós sebességek mellett [55]. Ez a veszteség különösen veszélyes a hat szerves rétegű eszközöknél, ahol a becslések szerint a fénykivonási hatások 4%-kal csökken a 3-réteges struktúráról 6-rétegesekre való áttérés során [56].

• **Katód:** A katódnál létrejövő tökéletlen visszaverődés a fotonabszorpció fő okozója lehet. Az OLEDWorks csoport kimutatta, hogy a fényhasznosítás jelentősen megnövelhető, ha a szokásos alumíniumkatódot ezüstkatódra cserélik. Ezüstkatód, belső fényvisszaverő réteg és külső fólia felhasználásával 65%-os fénykivonást értek el egyrétegű és 57%-osat 3-rétegű eszközöknél. Sok szerző kifejezett aggodalmát fejezte ki a katód felszíni plazmonjainak gerjesztése miatt, amikor az emittoréteg nagyon közel van a fém elektródához. A hatás vastag elektrontranszport-réteg alkalmazásával csökkenthető, és a probléma többrétegű eszközöknél kisebb jelentőségű.

6.2.7 A fénykivonás növelése hajlékony OLED-eknél

A jelenleg rendelkezésre álló belső fénykivonó rétegek nem konzisztensek a rugalmas OLED-ekkel. A fő probléma megfelelő nanorészecskék vagy gazdaanyagok és

leválasztási eljárások kidolgozása olyan rétegek kialakításához, amelyek stabilak maradnak a hajlítás során és amelyekre átlátszó elektródák és OLED-ek vihetők fel. A másik probléma a fénykivonó rétegek formázása a víz és oxigén szélék mentén történő behatolásának megakadályozására. Az OLEDWorks és az LG Display kínálatában szerepelnek olyan hajlékony, külső fénykivonással rendelkező OLED-panelek, amelyeknek fényhasznosítása 50 lm/W körüli és élettartama 3000 cd/m² mellett 40-50 000 óra. Az OLEDWorks BendOLED elnevezésű terméke ultravékony Corning Willow-üvegen készül, míg az LG Display a gyártást az üveg törékenységevel kapcsolatos problémák miatt polimer hordozók felhasználásával végzi.

6.3 Korszerű gyártástechnológia OLED-ek számára

Az OLED-panelek gyártásával kapcsolatos két fő kihívást a költségek csökkentése és olyan könnyű, rendkívül vékony, formálható panelek előállításának lehetővé tétele jelenti, amelyek egyedi formai kialakítású lámpatestek előállításához alkalmasak. Ahhoz, hogy a LED-es lámpatestekkel versenyképes, nagy volumenű értékesítés legyen megvalósítható, az OLED-es világítópanelek gyártási költségét 100 USD/m² körülire kell lecsökkenteni, ami lehetővé tenné, hogy 200-500 USD/m² tartományban lehessen a lámpatesteket értékesíteni.

[55] M. Brast, S. Axmann, M. Slawinski és M. Weingarten, Efficient Stacked OLED processed by Organic Vapor Phase Deposition (OVDP), MRS Online Proceedings Library, vol. 1788, pp. 13-18, 2015

[56] M. Boesing: Recent Advances in OLED Lighting, International Display Workshop, Fukuoka, Japán, 2016. dec.

[57] OLEDWorks: OLEDWorks Listed as one of EdisonReport's Top 10 Must See List, 2018. máj. 18. <https://www.oledworks.com/news/oledworks-listed-as-one-of-edisonreports-top-10-must-see-list/>

A 2017. évi javasolt kutatási témák ki-
egészítésében szerepeltek a célok hagyomá-
nyos gyártási technikák alkalmazásával
való elérésének módjai (6-2. táblázatban)

6.3.1 Értécsökkenési költségek

Az értécsökkenési költségek elsősorban a
termelési létesítmény költségeitől és a jó
termékek kihozatalától függenek. A 6-2.
táblázatban a 2016-ra megadott becslések
összhangban álltak a 2016-os és a 2017-es
év gyártási soraival. Az egyetlen új
létesítmény 2018-ban az LG Display
Gumiban létesített üzemeltetett gyára volt.
1,1 m x 1,25 m hordozófelülettel és havi
15 000 panel tervezett teljesítményével a
létesítmény kapacitása meghaladhatja a 6-
2. táblázatban 2018-ra feltételezett szintet.
A termelést azonban fokozatosan bővítik,
de 2018. augusztus közepétől nem
jelentettek kereskedelmi értékesítést. Az
előző LG gyártósoron csak havi 4000 db
panel kihozatalt értek el.

Gyakran emlegették, hogy a roll-to-roll
(R2R) feldolgozás meg fogja könnyíteni a
ciklusidő csökkentését. A megjelenítőket
gyártó iparban azonban alkalmazott sheet-
to-sheet („lemezről-lemezre”) eljárással
általában 90 másodperces ciklusidőket
tudnak elérni. Rövid távon a nagyobb
kihozatali sebesség akadályai az egyes
folyamatokhoz, például a szerves anyagok
leválasztásához és a tokozáshoz szükséges
idő jelenti.

A szilárdtest-világítás hosszú távú céljai-
nak eléréséhez – anélkül, hogy a hordozók-
ra olyan nagy összeget ruháznának be,
mint amekkorákat jelenleg a kijelzőket
gyártó iparba – fontosnak tűnik, hogy az
OLED-es világítópanelek gyártásának cik-
lusideje jóval egy perc alá csökkenjen. A
30 másodperc megfelelő célkitűzés marad
minden új K+F projekt számára.

6.3.2 Szerves anyagok leválasztása

A szervesanyag-rétegek leválasztásához
szükséges idő 60 másodperc alá csökken-
tése kihívást jelent. A termikus párologta-
tással történő leválasztás felgyorsításának
hagyományos módszere a forrás hőmér-
sékletének megnövelése. A szerves anya-
gok stabilitása magas hőmérsékleten az
egyik probléma, a másik a leválasztókamra
hűtése – különösen műanyagból készült
hordozók esetén. A szerves anyagok gőz-
fázisú leválasztásának (OVPD) vagy a tin-
tasugaras nyomtatásnak az alkalmazása
meggyorsíthatná ugyan az alacsonyabb hő-
mérsékleten történő leválasztást, de ezeket
az eljárásokat még nem alkalmazzák a
kereskedelmileg érett termékeknél.

A hibakontroll továbbra is komoly problé-

ma, és korlátozza a rendelkezésre álló
panelek méretét. A Pennsylvanai Állami
Egyetemen a BTO által támogatott kutató-
sok legfrissebb eredményei azt mutatták,
hogy a leválasztás során szennyeződések
keletkezhetnek, és hogy kerülni kell a
szerves anyagok felhalmozódását a kamra
falain.

Az OLED megjelenítők iparának adatai azt
mutatják, hogy a szerves anyagok költsége
akadályozhatja az OLED-es világítás költsé-
gécéljainak elérését. Az LG Display által
az OLED-es televíziókhöz használt pane-
lek szerves rétegeinek felépítése hasonló a
világításhoz használtakéhoz. A Display
Supply Chain Consultants (DSCC) arról
számolt be, hogy az anyagok összköltsége
130 USD/m², amelynek 40%-át az emiszi-
ós rétegek, 60%-át a transzport- és tölté-
sgeneráló rétegek teszik ki. Előrejelzésük
szerint a költségek csak 25%-kal fognak
csökkenni a következő négy év során.
Ezért a szerves anyagok vesztesége a 6-2.
táblázatban látható költségcélok eléréséhez
kritikus fontosságú.

6.3.3 Hordozók és tokozás

A DSCC becslése szerint a merev OLED-
es megjelenítőkhöz hordozóként használt
üveg átlagos költsége körülbelül 18
USD/m². A hajlékony hordozók költsége
jóval nagyobb, 60 USD/m², főleg azért,
mert magas hőmérsékleteket kell fenntar-
tani az aktív mátrix tartópanel kialakítása
során. Az OLED-es világításhoz alkalmas
kevésbé költséges hordozók kifejlesztése
csak kevés sikerrel járt, ezért további K+F
munkára van szükség, különösen az alakít-
ható panelek esetén. Noha nagyon magas
hőmérsékleteket nincs igényel, a legtöbb
olcsó műanyag-hordozó felületének minő-
sége nem elegendő az OLED-ek gyártásá-
hoz. A DuPont-Teijin által kifejlesztett,
lefejtetően tiszta felületű (PCS) polieti-
lén-tereftalát (PET) kifejlesztése ígéretes,
új hordozót kínál, amelyet Európában a
Lyteus-projekt keretei között tesztelnek. A
plazmával aktivált kémiai rétegleválasztás-
sal (PECVD) készített SiN barrier(gát)-
filmmel történő kiegészítés jó védelmet
nyújt a víz és az oxigén behatolásával
szemben. Az alakítható panelekben hasz-
nált ultravékony üveg szükségtelenné teszi
a gátfilm alkalmazását, a költség azonban
túl magas lehet a legtöbb világítástechnikai
alkalmazáshoz.

Jelentős előrelépés történt az OLED-es
megjelenítők tokozási eljárásaiban a
többretegű hibrid filmek alkalmazásával.
A szerves rétegek leválasztása nitrogén
atmoszférában tintasugaras nyomtatással
(IJP), a szervetlen rétegeké pedig atomi ré-

tegleválasztással (ALD) plazmával aktivált
kémiai rétegleválasztással (PECVD) törté-
nik. Az ezekhez a folyamatokhoz szüksé-
ges berendezések azonban rendkívül drá-
gák, hozzávetőleg 250 USD/m²-rel növel-
ve meg az értécsökkenési költségeket. A
világítástechnikai alkalmazásokhoz kevés-
bé költséges tokozási eljárásokra van szük-
ség. Rövid távú megoldásként vékony
fémréteget lehet használni az alsó emit-
tálópanelek lefedéséhez, ami segíti a hő-
elvezetést is.

Az OLED-paneleknél igen fontos az élek
kialakítása is. A szerves anyagból készült
rétegek jelenléte következtében a víz és az
oxigén képes bejutni a panel széleinél, ami
korai eszköz-meghibásodáshoz vezet. Az
egyik megoldást a nyomtatási technikák
adják – például az IJP tintasugaras nyom-
tatás vagy a slot-die (széles résű szer-
számmal készített) bevonat annak biztosítá-
sára, hogy a szélek mentén nem válasz-
tódnak le szerves anyagok. Alternatív
megoldásként a szerves anyagokat a levá-
lasztás után lézerrel lehet eltávolítani.
Ügyelni kell azonban arra, hogy ne sérül-
jenek meg a megmaradó törékeny OLED-
anyagok, és hogy elkerüljük a törmelék
okozta szennyeződéseket.

6.3.4 Átlátszó vezetőanyagok

Az OLED-ipar már régóta keresi az in-
dium-ön-oxidnak (ITO) mint átlátszó ve-
zetőanyagot a helyettesítőjét – részben a
hajlítási törekenység, részben az indium
esetleges hiánya következtében felmerülő
áremelkedéstől való félelem miatt. A sok-
éves kutatómunka ellenére azonban eddig
még nem sikerült kereskedelmileg érett al-
ternatívát találni. Az ITO képes a megfe-
lelő alakú világítási panelek korlátozott
hajlítását elviselni, és az anyagköltségek
sem növekedtek. A formázott ITO külső
szállítóktól történő beszerzésének költsé-
ge és kényelmetlensége azonban aggodal-
omra adnak okot, mivel az Egyesült Álla-
mokban korlátozott források állnak csak
rendelkezésre. A BTO szilárdtest-világítási
programja és mások által támogatott labo-
ratóriumi kísérletek azt igazolták, hogy
különböző alternatívák – pl. ezüst nano-
huzalok és huzalhálók – képesek kielégí-
teni a megkívánt teljesítőképességi célo-
kat, de az OLED leválasztásához elegendő-
n sima felületű, formázott elektródák
gyártására megbízható módszert még nem
sikerült kidolgozni.

Az ITO hajlékony panelekhez való fel-
használásának egyik problémája a vi-
szonylag gyenge teljesítőképesség, ha ala-
acsony hőmérsékleten történik a leválasztás.
A Corning demonstrálta, hogy az ultravé-

kony üveg alkalmazása lehetővé teszi a leválasztást akár 350°C-on is, 80%-nál nagyobb átlátszóságot és 12 Ω /négyzet rétegellenállást eredményezve.

6.3.5 A hordozók kezelése

Noha az OLED-es világítópanelek roll-to-roll eljárással történő előállítását több ázsiai és európai laboratóriumban tanulmányozták, az USA-ban csekély aktivitás volt tapasztalható a GE kutatási központjában 2012-ben elindított projekt óta. A Konica Minolta az egyetlen olyan cég, amely megkísérelte a roll-to-roll eljárást alkalmazni tömeggyártásban. 2014-ben fejezte be havi 1 millió darab panel gyártására alkalmas gyártólétesítményét. De még soha nem fedték fel az üzemükben gyártható panelek teljesítőképességét, és az sem világos, hogy ezek a panelek kereskedelmi forgalomba kerültek-e.

Noha a Konica Minolta nem tárta fel az ennél a módszernél tapasztalt problémák okait, a többi kísérleti gyártósoron szerzett tapasztalatok lehetővé teszik a fő kihívások azonosítását és az előrehaladás értékelését. A leghasznosabb információk az európai PI-SCALE projektbe bevont laboratóriumokból származnak – az eindhoveni Holst Center és a drezdai Fraunhofer Intézet kísérleti gyártósoraitól. A Holst Center csapata a műanyag és fém fóliákon additív és szubsztraktív eljárással végzett oldat-feldolgozást tanulmányozta. Kimutatták például, hogy a slot-die (széles résű szerszámmal készített) bevonás alkalmazható négyzetletes mintázatok készítéséhez. A leválasztott rétegekben lévő oldóanyagokat hőkezeléssel távolítják el, ami hosszú idejű kályházást igényel. Jó, +5 nm-en belüli vastagságtűrést értek el max. 30 m/perces hordozó-sebességek mellett. A Holst kutatói kimutatták, hogy hatékony hibridgátakat lehet készíteni polietilén-tereftalát (PET) vagy polietilén-naftalát (PEN hordozókon 4m/perc-es hordozó-sebesség mellett, amelyet plazmával aktivált kémiai rétegleválasztással (PECVD) előállított kemény SiNx bevonattal rendelkező szerves polarizációs réteggel egészítenek ki.

A Fraunhofer Intézet kutatói 14 vákuumos leválasztóeszközt használnak, amelyek egy nagy dob köré vannak elrendezve. A dob hűtést és mechanikai támasztékot nyújt a hordozóhoz, amely lehet műanyag, fém vagy ultravékony üveg. A rendszert max. 1 m/perc-es hordozó-sebességre tervezték, amelyet kezdetben 0,2 m/perc-re korlátozták a hordozó fémleválasztás alatti túlmelegedésének megelőzésére.

A karcoldások és részecske-leválasztó-

dások elkerülése érdekében a hordozó kezelése során a csapat tagjai nyomtatékosan javasolják, hogy a közvetlen kontaktust az egyik oldalra korlátozódjon, és hogy helyezzenek el egy közbenső réteget, ha a részben feldolgozott hordozókat kezelés közben felfektekerésnek a panel szétválasztása előtt. Az OLED-rétegek leválasztása után, rétegezéssel be lehet „tokozni” őket egy előre elkészített gátfilm segítségével, majd lézer segítségével szét is darabolhatók. Ily módon kis OLED-ek állíthatók elő 80% fölötti kihozattal és 20-25 lm/W fényhasznosítással.

A minőségellenőrzés fenntartása az egyes gyártási lépések során és a hordozó szélességének megnövelése a jelenlegi 300 mm-ről 1 és 1,5 m közé annyi problémát jelent, hogy csak a viszonylag szerény hordozó-sebességek tűnnek kivitelezhetőeknek. A 2-6 m/perc sebességnek elegendőnek kell lennie a következő évtizedre vonatkozó reális kihozattal célok eléréséhez. Több kutatócsoport becslése szerint a roll-to-roll feldolgozásból származó potenciális megtakarítás körülbelül 20-30%. Ha ez a becslés pontos, akkor a költségcsökkentés zömét máshol kell keresni.

6.4 OLED-világítási platformok

6.4.1 Az OLED-ek tulajdonságai

Az OLED-panelek legfontosabb előnye a nagy felületek káprázásmentes megvilágítása. Az OLED-es világítás korai támogatói OLED-ekből készült tapétákat, mennyezeteket és függönyöket vizionáltak. A fény-sűrűséget 3000 cd/m² alatt tartva a felhasználók megközelíthetnék a fényforrást anélkül, hogy szemüket árnyékolniuk kellene. Mióta azonban az OLED-panelek költsége inkább a méreteikkel került közvetlen összefüggésbe az előállított fény mennyisége helyett, a lumenenkénti árat a panelek fény-sűrűségének növelésével lehetett csökkenteni. Tény, hogy már akár 8000 cd/m² fény-sűrűségű termékeket is kínálnak. Így a lámpatesttervezőkre váró egyik kihívás az, hogy egysúlyt találjanak a fény-sűrűséggel és az élettartammal kapcsolatos megfontolások és a gyártási költségek között.

A fejmagasság felett felszerelt lámpatestek esetében a kápráztatást a sugárnyaláb formálásával lehet csökkenteni. A tipikus Lambert-sugárzó által produkálttól jelentősen eltérő fényeloszlást nehéz megvalósítani, a s közben megőrizni a vékony panel-profil is, de elképzelhető, hogy a fénykivonás növelésével kapcsolatos kutatásból származik majd néhány olyan koncepció, amelyet fel lehet használni a sugárnyaláb még keskenyebbé tételéhez.

Az OLED-ek másik előnye a vörös, zöld és kék fény közvetlen előállítása, ami azt jelenti, hogy – szemben a LED-ekkel – alacsony színhőmérsékletű fehér fény keltése nem a fényhasznosítás kárára történik. Noha a színek dinamikus beállítása elvileg lehetséges az RGB-fényforrások vízszintes vagy függőleges szétválasztása révén, ezt a költségek jelentős növekedése vagy a fényhasznosítás csökkenése nélkül még nem tudták megvalósítani a kereskedelmi termékeknél.

6.4.2 Különleges alkalmazások

Az OLED-ek veleszületett tulajdonságait és teljesítőképességét számos speciális alkalmazás élvezi. Az OLED-panelek kis súlya és karcsú formája különösen vonzó a közlekedéssel kapcsolatos alkalmazásoknál. Az 1000-2000 cd/m² fény-sűrűséget előállító szegmentált panelek révén nagyobb figyelmet kaptak a gépjárművek hátsó helyzetjelző lámpái. A fék- és irányjelző lámpákhoz nagyobb fény – max. 20 000, illetve 50 000 cd/m² fény-sűrűségű – panelekre van szükség. A törvényi előírások betartásához emellett a sugárnyalábok formázására is szükség van [58]. A formálható fehér panelek elérhetősége jelentős hatást gyakorolhat a gépjárművek belső világítására is. Bár néhány prototípus már bizonyított, további előrelépésre van szükség a költségek csökkentése és a hosszú élettartam biztosítása terén.

A súlycsökkentés és a formatényező még fontosabb a repülőgépeknél, ezért szinte valamennyi légitársaság lelkesen alkalmazni kezdte a szilárdtest-világítást [59]. Egyes légitársaságok állítható színárnyalatú világítási rendszereket kínálnak, amelyek egyedi világítási jelenetek beállítására alkalmasak. A légitársaságok architektúrális és funkcionális világítással tovább alakíthatják belső tereiket. Lévéen a légitársaság márkajelzésének kritikus eleme, a kabinvilágítási rendszereket intenzív ellenőrzésnek vetik alá, ami szigorú szín- és fény-sűrűség követelmények betartását jelenti.

A karbantartási költségek csökkentése érdekében a meghibásodások közötti átlagosan eltelt idő (MTBF) és a nem tervezett csere közötti átlagosan eltelt idő (MTBUR) alapján mért megnövelt megbízhatóságra van szükség. Sok alkatrészt 20 éves üzemelési élettartamra terveznek.

[58] Audi, OLED World Summit, San Francisco, Kalifornia, 2017

[59] Boeing: Integration of OLED Lighting on Aircraft, DOE SSL R&D Workshop, Nashville, Tennessee, 2018

A fent tárgyalt autó- és repülőgép- alkalmazási példákhoz hasonlóan az OLED-es világítási termékekhez továbbra is olyan új és már létező világítási alkalmazásokat kell keresni, amelyek kedvezőek a technológia számára és jelentős energiamegtakarításokat kínálnak. A világítás 4.1 fejezetben tárgyalt hatásfokával kapcsolatosan az OLED-ek jobb optikai hatásfokot kínálhatnak, mivel kis fényerősségük és lapos voltuk miatt sokkal közelebb elhelyezhetők a munkafelülethez anélkül, hogy káprázást okoznának.

6.4.3 Modulok és összetett modulok (Light Engine-ek)

Az OLED-panelek és OLED-meghajtók gyártói olyan összetett modulokat – light engine-eket – terveznek, amelyek megkönnyítik az OLED-es lámpatestek piaci bevezetését. Az egyik ilyen korai termék

az OLEDWorks Keuka modulja volt, amely a merev panelekhez alkalmas karcsú felszerelőkerettel, csatlakozókkal és dimmerrel kiegészített meghajtóval volt ellátva. A tápellátó elektronikát is tartalmazó OLED-modulok segíthetnék az OLED-es világítástechnika gyorsabb elterjedését azáltal, hogy leegyszerűsítik az OLED-ek beépítését a világítási termékbe. A könnyen használható, költséghatékony és nagy teljesítőképességű OLED-modulok elérhetősége új ötleteket is nyújthat az OLED-es világítási termékekkel kapcsolatban.

6.4.4 Meghajtók és tápegységek

A meghajtók fejlesztésében jelentős előrehaladás volt tapasztalható, különösen az OLED-ekhez alkalmasak terén. Már kaphatók 5 mm-nél laposabb, túlfeszültségekkel és zárlatokkal szemben védelmet nyújtó, szabályozható meghajtók is.

Ezeket több panel közé lehet elhelyezni megfelelő alakú lámpatestekben, de érdeemes lenne tovább csökkenteni a méreteket. A DC-DC átalakítás hatásfoka 90% feletti, de váltakozó feszültségű tápforrásokhoz csatlakozni még mindig kihívást jelent – részben azért, mert a szükséges meghajtófeszültség jelentősen megnőhet a panel élettartama során. Az ár is gondot jelent, különösen a több panel egymástól független vezérlésével szerelt lámpatestek esetén. A vékonyfilm-elektronika közelmúltbeli fejlődése felveti annak lehetőségét, hogy egy olyan ultravékony hátlapot alkalmazzanak, amely a meghajtókat és az érzékelő elektronikát is tartalmazza. Az európai IMOLA projekt keretein belül kidolgozták egy 3 mm vastagságú OLED-es világítási rendszer prototípusát, amely a kutatók szerint akár 0.3 mm körülire is csökkenthető lenne [60].

[60] A. Monte, J. Kundra, J. Schram, M. Cauwe, A. Baric és J. Doutrelouigne: A Modular and Interactive OLED-Based Lighting System, The Journal of the Illuminating Engineering Society, vol. 13, no. 4, pp. 211-221, 2017.