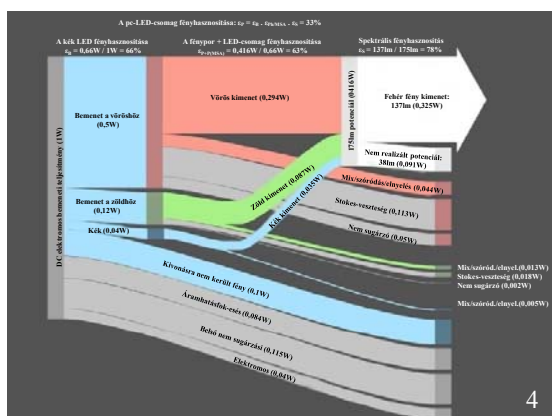
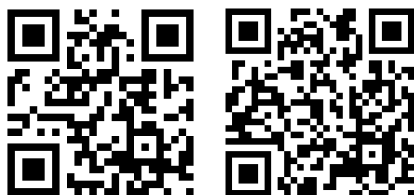




Tartalom

1 Rövid hírek

- Az európai szervezetek közös nyilatkozata az új világítási technológiákra való áttérés reális ütemtervéről
- Tridonic a második az Osztrák Szabadalmi Hivatal „leg-innovatívabb osztrák vállalatok” rangsorában
- Megnyílt a Zumtobel Csoport új Világítási Központja Bécsben

2 A RIDI Csoport legújabb termékei 2018-ban

3 Tridonic LED- és érzékelő-technológia teremt jó közérzetet a Poitiers-i egyetemi kórházban

4 Szilárdtest-világítás 2017, 4. rész – A LED-technológia és LED-gyártás helyzete, lehetőségei és kihívásai – A LED-csomagok és LED-alapú lámpatestek technológiája



Az európai szervezetek közös nyilatkozata az új világítási technológiákra való áttérés reális ütemtervéről

(Forrás: lightingeurope.org, Press Release, 2018. márc. 27.)

A LED technológiával tervezett termékek energiahatékonysági követelményeinek növekvő szintje nem csak a fogyasztók, hanem a környezetvédelem, a társadalom és az európai ipar versenyképessége szempontjából is előnyös.

Jelenleg három olyan jogalkotási kezdeményezés van folyamatban a világítás-technikai termékekkel kapcsolatosan (részletesen lásd a II. mellékletet), amely jelentős változásokat hozhat a hatályos jogszabályokhoz képest:

- A fényforrások környezetbarát tervezési követelményei
 - A fényforrások energiacímkézési követelményei
 - A veszélyes anyagok felhasználását korlátozó irányelv (RoHS) alóli mentesség megújítására vonatkozó kérelmek
- Mi, alulírott egyesületek támogatjuk a környezetbarát tervezés, az energiacímkézés és az RoHS célkitűzéseit.

Felszólítjuk a hatóságokat arra, hogy fogadjanak el pragmatikus és reális átállási ütemtervet a világítási technológiák és termékek kiváltására. Az ütemtervnek figyelembe kell vennie az ilyen világítási termékek végfelhasználóinak szokásos karbantartási és javítási ciklusait.

A piacoknak elegendő időre van szükségük ahhoz, hogy megismerjék és kiértékeljék az alternatív világítástechnikai termékeket, majd módosítsák költségvetésüket és a cserék időtartamait. A termékek korai kivonása szükségtelen hulladékokhoz és költségekhez vezethet.

Az átmeneti időszaknak lehetővé kell tennie az érintett vállalatok számára, hogy új gyártólétesítményeket építsenek fel, kiképezzék az alkalmazottakat és segítsék őket egy másfajta szakmai környezetbe való átállásban (lásd az I. mellékletet).

Ha nincsenek megfelelő helyettesítő termékek és technológiák, akkor a hatóságokat arra kérjük, hogy továbbra is engedélyezzék a különleges célú termékeket az EU piacán, mentesítve őket a környezetbarát tervezési szabályok alól és megújítva RoHS-mentességüket.

Az erőteljes és kiegyensúlyozott hatásvizsgálat érdekében felszólítjuk az Európai Bizottságot, hogy vegye figyelembe az értéklánc valamennyi részvevőjétől – a világítástechnikai gyártóktól, a felszerelést

végzőkön át a végfelhasználókig – beérkező és a két jogalkotási folyamat (az RoHS és a környezetbarát tervezés) során felmerülő észrevételeket.

I. MELLÉKLET

Miért kérjük a világítási technológiák fokozatos megszüntetésének elhalasztását?

Amint azt az Európai Bizottság is elismeri, számos világítási technológia a dolog természeténél fogva már megszűnőben van anélkül, hogy további szabályozási intézkedésekre lenne szükség, ami jelentős energiamegtakarítást eredményez.

A LED-es világításra való áttérés folyamatban van és visszafordíthatatlan.

Ez világosan látható a LED-eladások növekedéséből és a hagyományos fényforrások értékesítésének jelentős csökkenéséből. (Lásd például a VHK által kidolgozott és 2015 után az Európai Konzultációs Fórumon elfogadott „MELISA – Európai Fényforráselemzések Modellje” című dokumentumot.)

A világítási technológiáknak a meglévő karbantartási és javítási ciklusok keretében nem végrehajtható korai tilalmának bevezetése számos hátrányos következménnyel járhat Európa gazdasága és társadalma számára:

- **Nincs elegendő tőke az új LED-technológiák beszerzésének és felszerelésének finanszírozására:** A LED világításra való átállást jó előre meg kell tervezni a vásárlók megfelelő tájékoztatása és felvilágosítása érdekében. Az átállásnak illeszkednie kell a tulajdonosok és a végfelhasználók költségvetési és csere ciklusaihoz is.

- **A régi technológiák fokozott elővigyázatosságból történő beszerzése:** egyes iparágak „gyors és könnyű” megoldásként „készletezéssel” igyekeznek megoldást találni egyes termékek nem tervezett tilalmának kezelésére és létesítményeik megfelelő és biztonságos működésének garantálására. Ez teljesen semlegesíti az energia- és CO₂-megtakarítás kívánt hatását, és csökkenti a nem kívánt anyagok mennyiségét a piacon és a hulladékkezelésben.

- **Negatív hatás Európa számos ipari gyártási tevékenységére:** amint azt mind az Energiaügyi, mind a Környezetvédelmi Főigazgatóság szakértői elismerték, nincsenek tökéletes helyettesítők minden higanytartalmú kisülőlámpához.

Számos ipari és kereskedelmi alkalmazásban használnak speciállámpákat (például a félvezetőgyártásban a mikro-litográfiánál, vagy a szórakoztató világítás terü-

letén stb.). Ezeknek az iparágaknak a jövőjét az intézkedés komolyan érintené.

- **Jelentős mennyiségű szükségtelen hulladék:** a technológiák korai betöltése jelentős mennyiségű szükségtelen hulladékot eredményez, mivel a jelenleg felszerelt, hosszú üzemi élettartammal rendelkező lámpatestek idő előtt bekerülnek a hulladékkezelési folyamatba.

- **Munkahelyek elvesztése:** a világítás-technikai iparágon belül a korai tilalom jelentős munkahely-vesztéseket eredményez, mivel az ágazatnak nem lesz elég ideje a létesítményeknek és az alkalmazottaknak az új munkafolyamatokra és az új termékekre való átcéltéréséhez.

II. MELLÉKLET

Magyarázó megjegyzések a vitatott jogszabályokkal kapcsolatosan

A fenti szövegben említett változtatások számos, az Európai Bizottságban jelenleg megvitatás alatt álló szabályozásban előkészületi fázisban vannak:

1) **A világítástechnikai termékekre vonatkozó előírások felülvizsgálata (mind a környezetbarát tervezés, mind az energiacímkézés vonatkozásában).**

Az Európai Bizottság jelenlegi munkadokumentum-tervezetei a lámpák kitiltásából következő fontos változásokat tartalmaznak a hatályos jogszabályokhoz képest (mind az energiahatékonysági teljesítmény, mind a kivonásnak a körkörös gazdaságot érintő követelményei tekintetében). Mindez érinthetné az európai irodaépületekben és ipari létesítményekben legáltalánosabban használt fényforrásokat, a T8-as lineáris fénycsőveket, a becsavarható kompakt fénycsőveket és néhány halogénlámpát és lámpatestet már 2020 szeptemberétől kezdve.

2) **A higanytartalmú lámpákra vonatkozó RoHS-mentesség.** A környezetbarát tervezésnek az Energiaügyi Főigazgatóság által végzett felülvizsgálatával párhuzamosan a Környezetvédelmi Főigazgatóság azt vizsgálja, hogy a jelenleg piacon lévő leghagyományosabb fényforrások (pl. a lineáris és kompakt fénycsővek – beleértve a T8-as fénycsőveket is –, valamint a nagynyomású nátrium- és egyéb kisülőlámpák és speciállámpák) esetében meg lehet-e újítani az RoHS-mentességet. Az Európai Bizottság eldöntheti, hogy sok ilyen terméket betilt még 2020 előtt is.



Tridonic a második az Osztrák Szabadalmi Hivatal „leginnovatívabb osztrák vállalatok” rangsorában

(Forrás: www.tridonic.com, Press Release, 2018. máj. 7.)

Az Osztrák Szabadalmi Hivatal nemrégiben jelentette meg 2017. évi éves jelentését. Az összesen 84 db bejegyzett szabadalom birtokosa között a Tridonic – mint az intelligens és hatékony világítási megoldások egyik vezető globális vállalata – a második helyet szerezte meg a legtöbb szabadalmi bejelentéssel rendelkező vállalatok listájában.

Az innovációk és a hozzájuk tartozó szabadalmak fontos versenyképességi tényezőt jelentenek. Az Osztrák Szabadalmi Hivatal a 84 szabadalmat és használati modellt felsorakoztató 2017. évi jegyzékében a Tridonic Ausztria három leginnovatívabb vállalata között szerepel. 2015 és 2016 után ez a dornbirni központú vállalat harmadszor erősítette meg helyét a rangsor három legjobbjában.

Megnyílt a Zumtobel Csoport új Világítási Központja Bécsben

(Forrás: www.zumtobelgroup.com, Press Release, 2018. máj. 18.)

2018. május 17-én a Zumtobel Csoport megnyitotta új világítási központját a bécsi Wagramer Strasse-i IZD Tower-ben. Mint globális világítástechnikai vállalat, ezen az új helyen bemutatja a professzionális világítás terén kínált széles termékválasztékát és a világítás felhasználásának számos területét. A 250 m²-es világítási központot a norvég Snøhetta építéstudióval közösen hozták létre.

Közös hely a Zumtobel valamennyi márkája számára

A Zumtobel Csoport már képviseltette magát az IZD Tower-ben egy kb. 70 főből álló értékesítési irodával. A hely mostantól az új kiállítóteremmel bővült ugyanabban az épületben.

2014-ben a Zumtobel bezárta a Jasomirgottstrasse-i régi világítástechnikai bemutatótermét, amely akkoriban fizikailag elkülönült az értékesítéstől. A cél az volt, hogy találjanak egy olyan új helyet, amely ötvözné a bemutatótermet és az értékesítési irodát, és lehetővé tenné a vállalatcsoport valamennyi márkájának egyidejű jelenlétét. A többmárkás megjelenéssel a szinergiák az ügyfelek előnyére használhatók fel.

„Az Osztrák Szabadalmi Hivatal által nemrég közzétett számadatok kiemelik innovatív képességünket és piacvezető szerepünket. Örülünk annak, hogy Ausztria-szerte is vezető pozíciónk van a 2017. évi összehasonításban. Kutatási és fejlesztési tevékenységeink azonban mindig a vevői értékekre fókuszálnak. Elsődleges prioritásunk az, hogy innovatív és hatékony világítási megoldásokkal hozzáadott értéket hozzunk létre vevőink számára.” – nyilatkozta Steffen Riemer, a Tridonic K+F tevékenységért felelős alelnöke.

Vevőközpontú innovációk

A Tridonic jelenleg több mint 2500 szabadalom és szabadalmi bejelentés birtokosa – az Osztrák Szabadalmi Hivatalban bejegyzett védjegyjogok mellett. Ezek között számos európai és egyesült államokbeli szabadalom szerepel.

„A felfedezés öröme és a leleményes szellem – ezek a vállalat karakterének legfontosabb elemei, és ez nem csak a K+F részlegünkre vonatkozik. Más osztá-

TRIDONIC

lyok is felelősek az innovatív ötletekért. Ennek fényében az osztályok közötti együttműködés kiemelt fontosságú. Elért helyezésünk azt is mutatja, hogy ez az együttműködés jól folyik.” – tette hozzá Steffen Riemer.

Vorarlberg - az innováció fontos helyszíne

Igen innovatív vállalként a Tridonic a világítástechnikai tevékenységének központját jelentő Vorarlberg szövetségi államban is jelentősen növeli az ott nyilvántartott szabadalmak számát. Ami a népesség számát illeti, Vorarlberg regisztrálta 2017-ben lakosonként a legtöbb szabadalmat. Évenkénti 12 000 szabadalmával Ausztria az EU-ban a hatodik, világviszonylatban pedig a tizenegyedik helyet foglalja el a regisztrációk országonkénti összehasonlításában. Ausztria egész területén 2900 szabadalmat regisztráltak és 1450 szabadalmat és hasznosítási modell adtak ki az előző évben.



A bécsi világítási központ a svéd malmői mellett a második, amelyet a nemzetközi hírnévnek örvendő norvég építészeti iroda tervezett. A „nyitott tér” koncepciót a Snøhetta vállalati kultúrája inspirálta, amelynek irodái nyitottak, barátságosak és így megkönnyítik az információcserét és a hálózatépítést. Ezt alapul véve a bécsi világítási központ nyitott tárgyalói ösztönzik a csoportos hálózatépítést, segítik a márkák egymást erősítő hatásait és az ügyféllel kialakítandó kölcsönhatást.

Az új világítási központban a Zumtobel Csoport bemutatja az acdc, a Thorn, a Zumtobel és a Zumtobel Csoport Szolgáltatásai (ZGS) márkáit különböző alkalmazási területeken. A kiállítási terület különböző zónákra van felosztva. A bemutató egyik attrakciója minden bizonnyal a „fény-élmény tér”, amelyben szándékosan kerültek a kiemelt termékek felvonultatását, s helyette a fényt mint anyagot mutatják be, tisztán márkasemleges módon. A világítási központnak ebben a részében a látogatók a fény bűvöletes voltát tapasztalhatják meg. A kiállítás jelenleg időszakosan bemutatja az amerikai sztárépítész, Daniel Libeskind „mesterdarabját” is. A Zumtobel Csoport művészi évkönyveinek kiadásai iránt érdeklődők pedig az elmúlt tíz évből szemlélhetnek meg válogatást a recepción. (A művészi évkönyvekről a HOLUX Hírek 133. és 157. számai közölnek bővebb információt. – A Szerk.)

zumtobel group



2 A RIDI Csoport legújabb termékei 2018-ban

(Forrás: a RIDI „Best of 2018” című kiadványa, 2018. március)

RIDI

Spectral® lify®

F-EDGE



Az F-EDGE lámpatest a jól ismert F-LINE családot egészíti ki mindazzal a tér- és méretbeli szabadsággal, amelyet a LED-technológia felhasználása tesz lehetővé.

A RIDI kiváló LED-moduljai a szélektől kezdve egyenletes, homogén megvilágításról gondoskodnak. A többretegű panel-felépítés a helyiségekben rendkívül jó, diffúz világítási effekteket eredményez.

A számítógépes munkahelyekre vonatkozó előírásoknak megfelelő világítás biztosítására nanoszerkezetű réteget használnak.

A lámpatestház anyaga és mérete ugyanolyan, mint az F-LINE család többi tagjéé. Az elektromos komponenseket a mindössze 22 mm magasságú lámpatestházba szerelték.

A lámpatest függesztve szerelhető. Csak direkt fénykomponenst, vagy indirekt fénykomponenssel kiegészített fényt szolgáltat. A megfelelő csatlakozók használatával bármilyen opcionális konstrukció összeállítható.

FLAKE – Egyszerű, lapos lámpatestház



Ezt a kecses irodai lámpatestet elegáns házának felfelé elkeskenyedő formája jellemzi. Minimális méretű házának enyhén trapéz alakja finom távolságot tart a négy-szögletes prizmás diffúzortól.

Az oldalsó elemek matt felületével megvilágítva fénylő kontúr benyomását kelti.

Noha csak 37 mm magasságú, a lámpatestház valamennyi elektronikus komponensnek helyet biztosít. Az indirekt fénykomponenst a lámpatest felső felületének szintjéig besüllyesztett LED-modulok hozzák létre.

A FLAKE állítható fehér és 840-es fény színű változatban áll rendelkezésre. A függesztett változathoz illeszkedő módon egy felületre szerelhető, 150 mm élhosszúságú és 37 mm magasságú, négyzetes típus is készül.

H 140-Profil – Folytonos vonalak és görbék



A H 140-Profil kifejezetten nagy, folytonos fényszalagok előállításához fejlesztették ki. A profiloknak alul beépített tartójuk van a diffúzorok rögzítéséhez. A diffúzorok és a fölülük szerelt fényforrások tökéletesen egyforma, homogén fényt szolgáltatnak.

A profilok közötti középső támasz szélessége változtatható, ami számtalan lehetőséget biztosít a lámpatest geometriájának alakításához. A H 80-Profilhoz hasonlóan a fényforrások az alsó, a meghajtó a felső részbe vannak beszerelve.

A süllyesztett szereléshez a H 140-Profil belső szerelőnyílás-záró panelekkel is el lehet látni, amelyek lehetővé teszik a felső részben lévő komponensek cseréjét és karbantartását anélkül, hogy az álmennyezetet meg kellene bontani. Mindezt a folyamatos világítás esztétikai megjelenésének megzavarása nélkül.

LBK – Modulrendszerű és kifinomult



Az LBK (Lichtbaukasten) "fényépítőszekrény" szinte kimeríthetetlen alkalmazási lehetőséget kínál. Egyenként, sorokban vagy konfigurált konstrukció formájában a modulrendszerű lámpatest elemei bármilyen helyiségnek tökéletes megjelenést kölcsönöznek.

Az elegáns kialakítást 25mm x 50mm-es keresztmetszetű, lineáris LED-modulokkal és egy PMMA-ból készült, szintbe süllyesztett diffúzorral ellátott alumínium profil határozza meg.

E sima, egyszerű lámpatest négy különböző hosszúsága sokféle konstrukció létrehozására alkalmas. Speciális PMMA diffúzora folytán ez a szabadsugárzó, ultramodern lámpatest indirekt fénykomponenssel is szolgál. Mivel ugyanolyan tápegységgel van ellátva és a szerelési furatok elrendezése is azonos, alkalmas az eredeti, T5-ös fénycsövekkel szerelt lámpatest lecserélésére. A lámpatest minimális méretei ellenére az összes elektromos alkatrész biztonságosan be van építve a profil belsejébe. A kész konstrukció hatása a könnyed tisztaságában van – nincs fénytérelő, amely csökkentené a könnyű vonalak kecses eleganciáját.

look! – A modulrendszer egyéniséget teremt



A look! ("nézd csak!") lámpa mögött húzódó koncepció olyan integrális formatervezési megoldás volt, amely bármilyen fényforráshoz alkalmas a helyiség egyedi megvilágításának biztosításához.

Az elgondolás egy olyan moduláris rendszeren alapul, amely lehetővé teszi, hogy egyedi konstrukciók készülhessenek szabványos alkatrészekből.

A stuttgarti *blocher partners* építészirodával együttműködve ez a koncepció kiindulópontja lett egy olyan moduláris lámpatestcsaládnak, amelynek a központi magja magában foglalja az összes elektromos komponenst, és az összes különböző változat alapját képezi.

Erre az alapmodulra épülve, amely két méretben, 100 vagy 160 mm-es átmérőjű alapelemként szolgál, függesztékek, fali-, álló- és asztali lámpák készülnek.

A lámpák opcionális módon kiegészíthetők fém, üveg sokféle textil búrával. Fényforrásként LED-modulok vagy E27 fejű lámpák használhatók.

A lámpatestek választható módon mobil

eszközre letöltött applikáció vagy vezeték nélküli kapcsoló segítségével RIDI Smart Control-lal, vagy az Alexa and Co. eszközével vezérelhetők.

A look! asztali lámpa mobil, vezeték nélküli, akkumulátoros működtetésű fényforrással is készül.

A look! lámpatestcsalád minimalista tervezéssel készül, hogy tökéletesen illeszkedjen a modern szállodákhoz és lakókörnyezetekhez.

A modulrendszer lehetővé teszi az egyedi vevői preferenciák kielégítését is. Az anyagok például adaptálhatók, vagy színes koncepciók integrálhatók – egyenesen a megfelelő üveg tónusokhoz.

MAXI Flat – A gyengéd ragyogás



A Maxi Flat fali- és mennyezeti lámpa nevezhető bárminek, csak unalmasnak nem. Kerek textilbúrájával gyengéd fényben fűrösztli a szobát, és pazar színeivel felkelti az érdeklődésünket.

A lehetőségeknek nincsenek határai: a búrák a textiltváltozatok széles skálájával burkolhatók. A lámpabúrák 400, 500 vagy 600 mm-es átmérővel készülnek, magasságuk pedig mindössze 100 mm.

Ezek az alacsony Maxi-modellek ideálisan alkalmazhatók minimális mennyezeti magasságú helyiségek mennyezeti lámpáiként, de falilámpaként is használhatók.

A lámpabúrák mágnesesen vannak rögzítve a szerelvénylaphoz, így tisztításhoz egyszerűen levehető. Fényforrásként kapcsolható és DALI rendszerrel dimmelhető LED-modulok és E14 fejű egyéb lámpák is használhatók.

CARPE – Gazdagon strukturált

Újrahasznosított kartonból készült, természetes fényáteresztő lámpabúrájával a Carpe teljesen egyedi, strukturált megjelenésű lámpa.

A szerkezeti hézagokon áthaladó fény lenyűgöző fény- és árnyékhatásokat hoz létre.

A 350 mm átmérőjű Carpe II és az 500 mm-es Carpe I a további biztonság érdekében tűzálló anyaggal van kezelve.

– A búra finoman strukturált, matt felületű
– A szövetbevonatú vezeték fekete, de más színekben is kapható



3 Tridonic LED- és érzékelő-technológia teremti jó közérzetet a Poitiers-i egyetemi kórházban

(Forrás: www.tridonic.com, Press Release, 2018. márc. 28.)

A franciaországi Poitiers-i egyetemi kórházban felszerelt új világítás az emberközpontú világításnak köszönhetően támogatja a rákos betegek kezelését egy erre a célra kialakított különleges helyiségben. A modern, állítható fehér színtónusú LED-technológia és az egyedi igények szerint kialakított megvilágított mennyezet segítségével természetes környezetet szimulálnak, ami növeli a jó közérzetet. Emellett a kórház új adminisztrációs blokkjában több mint 800 LED-alapú Tridonic lámpatestet és LED-meghajtót szereltek fel.

A Poitiers-i egyetemi kórház az egész Vienne-i tartomány egészségügyi központja. Interregionális projektek és más egyetemi kórházakkal kialakított partneri kapcsolatok részeként kutatásokat végez az egészségügyi és terápiás újításokkal, a klinikai folyamatok fejlesztésével és a betegek jobb tapasztalatainak elnyerésével kapcsolatosan.

Emberközpontú világítás a rákkezelés támogatására

A betegek optimális közérzetének elérése és a kórházban eltöltött idejük kényelmesebbé tétele érdekében a modern egészségügyi intézményekben biológiailag hatékony világítást alkalmaznak. Ez az emberközpontú világítás elnevezéshez kötődik, és olyan világítási megoldásokat foglal magában, amelyek segítik a betegek felépülését, optimalizálják az alvási és ébrenléti időszakokat és javítják általános közérzetüket. A Poitiers-i egyetemi kórház onkológiai osztályán nemrégiben emberközpontú világítást szereltek fel a rákkezelés javítása érdekében. Egy ablaktalan helyiségben mesterséges világítást használnak dinamikus világítási hangulatok kialakítására. A világítási rendszer a Tridonic mennyezetre szerelt QLE Premium moduljaiból épül fel. Ezek a négyzetes LED-modulok az állítható fehér technológiának köszönhetően 3000 és 6000K között állítható színhőmérsékletet kínálnak állandó és 10-100% között változtatható fényáram mellett a beállított színhőmérséklet megváltozása nélkül. A fénylő mennyezet az eget utánozza. A mennyezeti lámpatestet connecDIM világításvezérlő rendszer szabályozza. A LED-modulok egy internettel összeköthető átjáró segítségével lehetővé teszik a fény decentralizált vezérlését. A kórház műszaki szolgáltató részlege ezt a rendszert száz, előre beállított – különböző színhőmérsékletű



és fényerősségű – világítási jelenethez használja, úgyhogy a világítás utánozni képes a természetes fény napközbeni változásait. A lassú mozgások és színváltozások a természetes égbolt képét idézik fel. A betegektől, orvosoktól és nővérektől beérkezett pozitív visszajelzések hatására röviddel ezután a földszinti liftek előterében is felszereltek egy ugyanilyen világítási rendszert, ahová egyébként nem jut be természetes fény. Az új világítási rendszer nemcsak nagyobb fényű és kellemesebb környezetet teremti, hanem megkönnyíti az orientációt is. A látogatók az égbolt képéből rögtön tudják, hogy a földszinten vannak, mivel ez a terület lényegesen elüt a többi emelet felvonó előtti területeitől.

Innovatív LED-es világítás az új adminisztrációs épület számára

Az egyetemi kórház új adminisztrációs épületébe a Tridonic SFEL partnercégének több mint 800 db Suna típusú lámpatestét szerelték fel. Az épület az összes adminisztrációs részleget egy fedél alá hozza össze, javítva ezzel a belső folyamatokat és koordinációt. A nagy teljesítmőképességű, innovatív világítástechnológia csökkenti az energiaköltségeket. Az irodákban, a nyitott területeken és a tárgyalókban felszerelt lineáris lámpatestek Tridonic gyártmányú LLE G3 LED-modulokkal és Premium LED-meghajtókkal vannak ellátva. A fénypontok közötti kis távolság biztosítja, hogy a lámpatestek teljes hosszuk mentén homogén megvilágítást hozzanak létre. Minden lámpatesthez egy-egy kompakt basicDIM vezérlőmodul is csatlakozik, bennük fényérzékelővel, amelyek a rendelkezésre álló természetes fénynek megfelelően automatikusan beállítják a fényerősséget.



A vezérlőmodulba mozgásérzékelő is be van építve, amely automatikusan ki- vagy bekapcsolja a fényt annak függvényében, hogy tartózkodik-e valaki a munkahelyen vagy a helyiségben. Ez további energiamegtakarítást jelent.

Az új világítási megoldások javíthatják a betegek és a látogatók közérzetét és az alkalmazottak munkakörnyezetét is. Az új adminisztrációs épület kezelői nem csupán az optimális világítás előnyeit élvezik, hanem a beépített érzékelőknek köszönhető költségmegtakarításokat is.

A Poitiers-i egyetemi kórház – amely az egész Vienne-i régió központi egészségügyi ellátóközpontja – nemcsak az emberközpontú világítás terén tekinthető úttörőnek. Hírnevet szerzett a kardiológia, az onkológia, a geriátria, az idegsebészet, a gyermekgyógyászat, az orvosbiológia és orvosi képalkotás terén is. A kórház 1900 ágy kapacitással rendelkezik Poitiers-ben, Lusignan-ban és Montmorillon-ban.

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

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

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

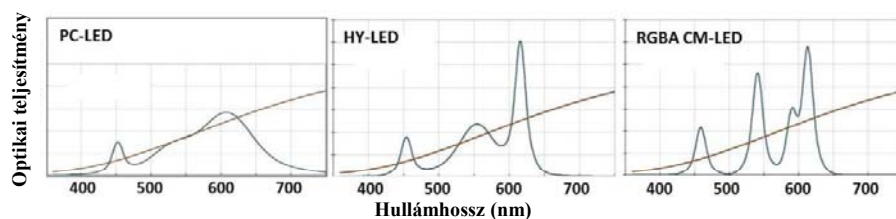
A következőkben megvizsgáljuk a LED-technológia jelenlegi helyzetét, javításának lehetőségeit és a felmerülő kihívásokat. A LED-technológiával kapcsolatos jelenlegi legnagyobb kihívások egyben a teljesítőképesség javításának néhány nagy lehetőségét is reprezentálják.

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

4.1 A LED-csomagok technológiája

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

Ebben a részben a három felépítés kvanti-



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

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

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

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

1. A meghajtóáram sűrűsége (35 A/cm²)

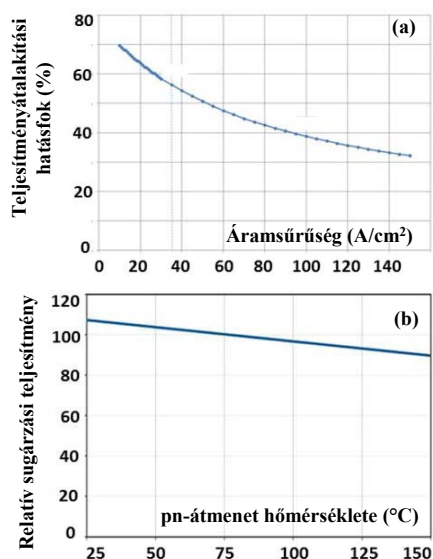
A meghajtóáram meghatározza a LED-csomagban keletkező fényáram nagyságát. A felső kategóriás kereskedelmi LED-csomagok 200 lm/W fényhasznosítást képesek elérni, de csak kisebb áramsűrűségek esetén, ezáltal kisebb teljes fényáram jön létre a LED-csomagban, s így nagyobb lesz a lumenenkénti ár. A nagyobb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

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

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

3. Korrelált színhőmérséklet (meleg fehér, 3000K)

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

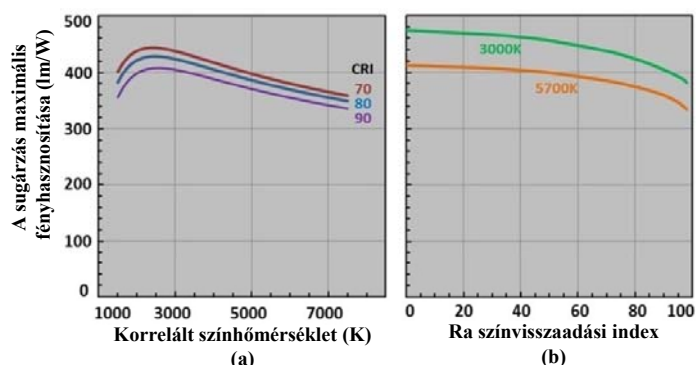


4.2 ábra – Példák az áramhatásfok-esésre (a) és a termikus hatásfok-esésre (b) (Forrás: a Cree XLamp XT-E adatlapja [93])

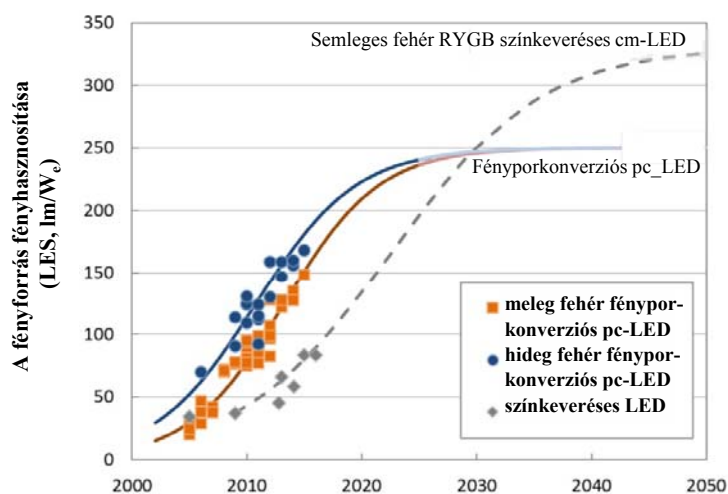
esetén. Amint az a 4.3(a) ábrán látható, a sugárzás maximális fényhasznosításai CRI 80 esetén valamivel nagyobbak (kb. 114 lm/W 3000K esetén) a meleg fehér LED-eknél, mint a hideg fehér LED-eknél (kb. 390 lm/W 3000K esetén). Ennek az az oka, hogy az emberi szem érzékenyebb a vörös fényre, mint a kékre.

4. Színvisszaadás (Ra = 80, R9 > 0)

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



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



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

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

4.1.1 A fényporkonverziós pc-LED-ek jelenlegi helyzete

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

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

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

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

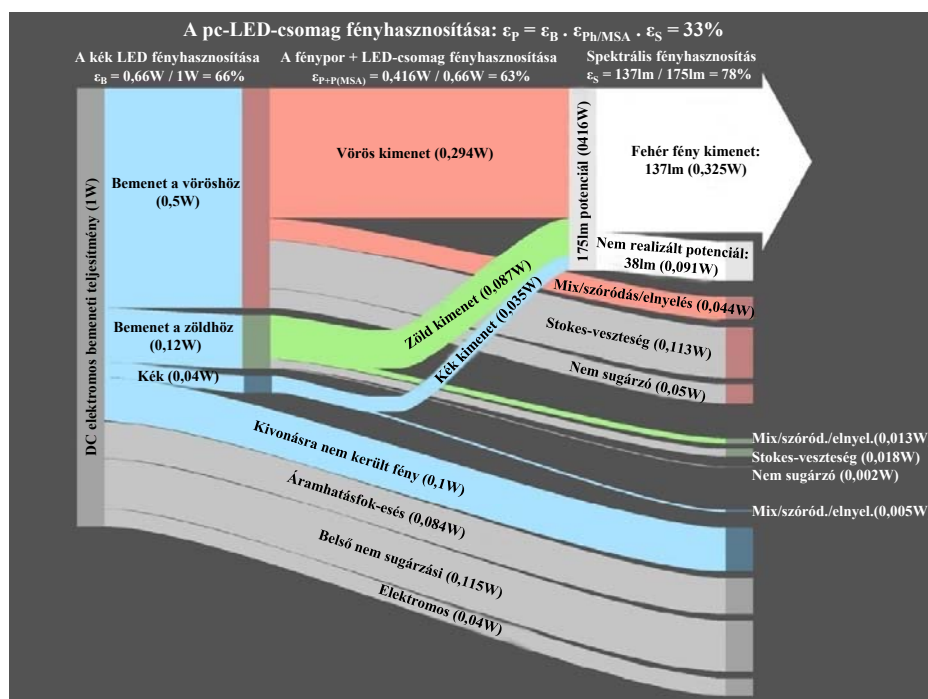
[95] Illuminating Engineering Society: „IES TM-30-15: IES Method for Evaluating Light Source Color Rendition”, 2015

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

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

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

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



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

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

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

4.1.2 A fényporkonverziós pc-LED architektúra lehetőségei és kihívásai

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

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

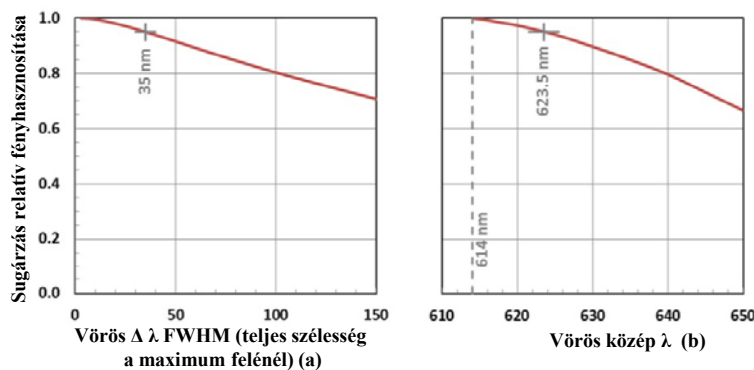
veszteség, 100% hatásfok nem lehetséges. Amint azt a 4.1 és 4.2 táblázat mutatja, a jelenlegi spektrális optikai teljesítmény-eloszlású pc-LED-ek maximális fényhasznosítása legfeljebb 220 lm/W (LER x Stokes-veszteségek) lehet – még akkor is, ha az összes többi veszteséget kiküszöböljük. Ez az optikai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

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

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

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

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



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

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

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

Lehetőség/kihívás: A vörös lefelé konvertáló anyag vonalszélességének csökkentése

Amint azt a korábbiakban említettük, a

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

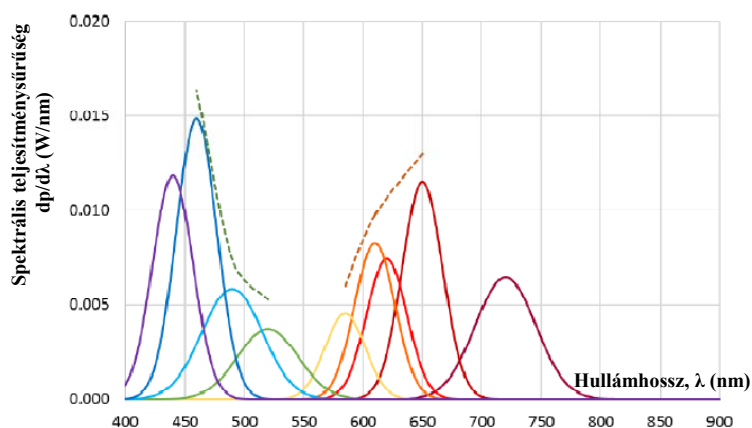
A keskenysávú lefelé konvertáló vörös anyagok terén új fejlesztési eredmények születtek. A GE folytatja „Tri-Gain” már-

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

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

Lehetőség/kihívás: A kék LED hatásfok-esése

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



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

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

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

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

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

val nagyobb, mint az InGaP-alapú kék LED-ekkel kapcsolatos. Ezekhez az igen különböző termikus viselkedésekhez szükség van egy vezérlőrendszerre a konszisztens színpont megőrzése érdekében, ami növeli a világítási rendszer bonyolultságát és költségét. Várható, hogy az emberközpontú világítás számára egyre növekvő érdeklődésre számot tartó, állítható színhőmérsékletű fényforrások lefelé fogják hatni az ilyen vezérlőrendszerek költségeit, s így minimalizálni fogják a jövőben ezt a hátrányt. A másik az, hogy az AlInGaP-alapú vörös LED hatásfoka a rövidebb vörös hullámhosszúságoknál csökken – amint azt a 4.7 ábrán a különböző LED-ek spektrális teljesítménysűrűségei mutatják. 614 nm-nél – amely a világításhoz ideális vörös csúcspontnak tekinthető, mivel még elég hosszú a jó színvisszaadás biztosításához, de még elég rövid az emberi szem jó érzékeléséhez (észszerűen magas LER mellett) – a kutatások mai állása szerint a LED-ek külső kvantumhatásfoka (EQE) mindössze 25% körüli. Ezért ez az architektúra egy sor kihívással néz szembe, amelyek közül kettő ugyanaz, mint a fényporkonverziós pc-LED-eknél: a fénykivonás és a keverés/szórás/abszorpció hatásfokának a javítása és a kék LED hatásfokcsökkenése. De a legfontosabb az, hogy tökéletesíteni kell a vörös LED-eket.

Lehetőség/kihívás: A vörös LED hatásfokának javítása

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Lehetőség/kihívás: A zöld/borostyánsárga LED hatásfokának növelése

A jó hatásfokú LED-ek megvalósítása a

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

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

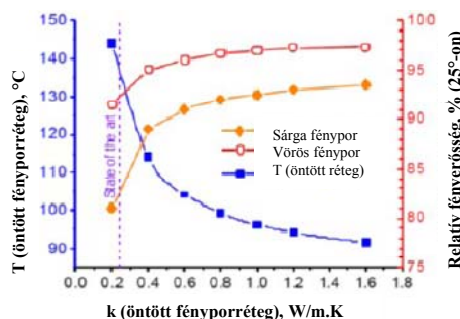
A hullámhossz lefelé konvertálásával működő LED-ek hatásfoka lényegesen nagyobb, mint a közvetlen borostyánsárga LED-eké, még a hullámhossz lefelé konvertálásával együtt járó Stokes-veszteségek figyelembe vétele után is. Ez azt mutatja, hogy a hatékony keskeny sávú lefelé konvertáló anyagok kifejlesztése,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

4.1.5 A LED-csomagok tokozása

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

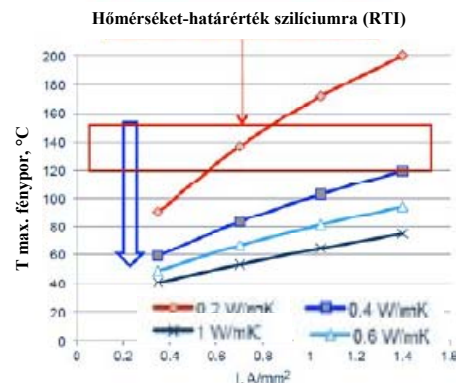
A LED-csomag által előállított fehér fény tulajdonságai és hatásfokai					Mérték- egység	Ma	Jövő (célok)				
						2015	2018	2020	2025	Cél	
Meleg fehér: CCT=3000, R _a >80, R _g >0	Fényporkonverziós PC-LED	A fehér fény forrás- teljesítményének megoszlása	Kék			0,08	0,09	0,10	0,12	0,12	
			Zöld			0,21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

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



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

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



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

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

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

Lehetőség/kihívás: Nagy hővezetőképességű és törésmutatójú tokozóanyagok

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

4.1.6 Általános következtetések és jövőbeni kilátások

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

tekben az új IES TM-30 irányelvekkel összefüggésben tárgyaltakat.

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

4.2 A LED-es lámpatestek technológiája

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

4.2.1 A lámpatestek fényelőállítási hatásfoka: fejlődés, lehetőségek, kihívások

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

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

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

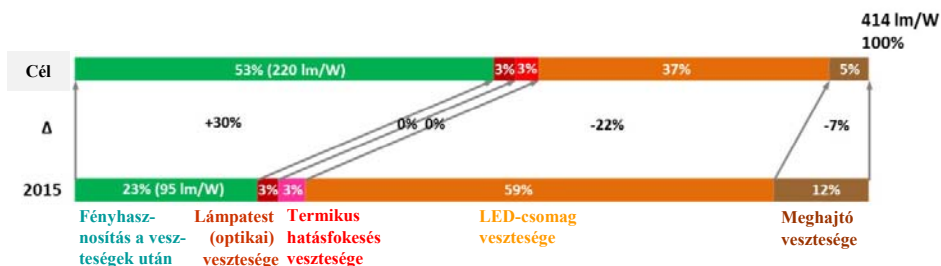
A táblázatban nem az átlagos, hanem a „legjobb eset” szerinti hatásfok-bebecslések láthatók, ezért bármilyen adott alkalmazásnál nem érhetők el feltétlenül. Sokféle világítási alkalmazás létezik, és mivel a lámpatest a végső vásárolt elem, amely megszabja, hogy a fehér fény hogyan illeszkedik az alkalmazáshoz,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

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

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

Lehetőség/kihívás: Elektromos meghajtó

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



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

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

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

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

és kiemelt kutatási területet képez.

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

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

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

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

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

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

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

4.2.2 A lámpatestek fényeloszlása

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

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

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

A fénynyaláb-vezérlési technológia első példája az Osram OmniPoint távvezérlésű



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

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

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

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

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

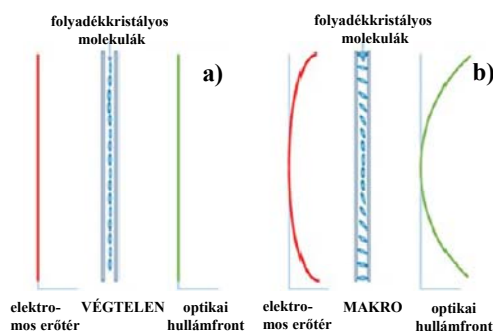
[105] OSRAM: „Osram constructs the world's most efficient LED lamp”, 2014. márc. 28. (http://www.osram.com/osram_com/press/press-releases/_trade_press/2014/osram-constructs-the-worlds-most-efficient-led-lamp/index.jsp)

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

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

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

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

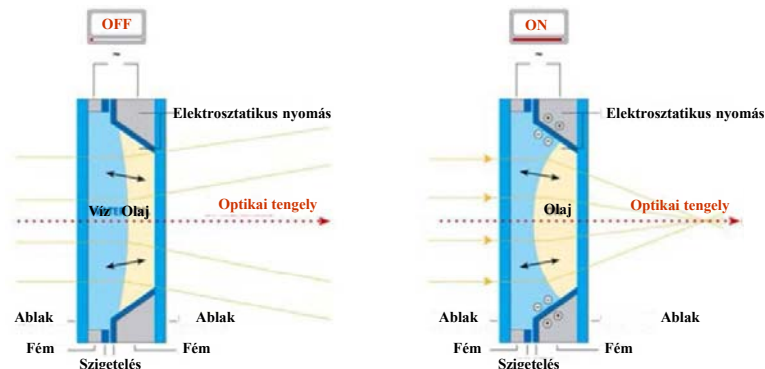


4.11 ábra – A folyadékkristályos lencse és az elektro-mos erőtér optikai hullámfrontjára kifejtett hatás (a) állandó gradiens és (b) változtatható gradiens esetén (Forrás: LensVector, How it Works, 2017 [107])

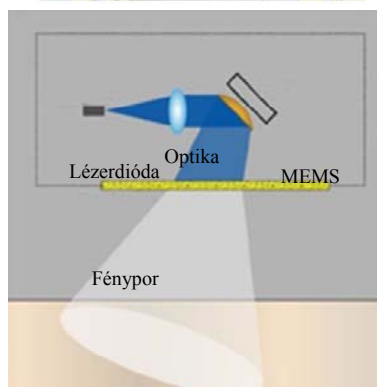
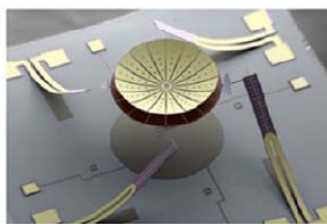
megemeli a rendszer költségeit és bonyolultságát. Egy olyan optikai fénynyaláb-vezérlő technológiára van szükség, amely könnyen képes megváltoztatni a fénysugár irányát, méretét és alakját. Különböző technológiák több kutatási területe foglalkozik ezzel az igénnyel – a MEMS mikro-elektro-mechanikai rendszerektől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

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

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



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



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

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

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

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

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

HOLUX Kft. 1135 Budapest, Béke u. 51-55.

HOLUX Központ és Műhelyiroda Tel.: (06 1) 450 2700 Fax: (06 1) 450 2710

HOLUX Vevőszolgálat Tel.: (06 1) 450 2727 Fax: (06 1) 450 2710

HOLUX Üzletház Tel.: (06 1) 450 2718 Fax: (06 1) 320 3258

HOLUX Fényszaküzlet Kőrmend Tel.: (06 94) 594 315 Fax: (06 94) 594 316

HOLUX Fényszaküzlet Nyíregyháza Tel.: (06 42) 438 345 Fax: (06 42) 596 479

HOLUX Fényszaküzlet Pécs Tel.: (06 72) 215 699 Fax: (06 72) 215 699

HOLUX Fényszaküzlet Szeged Tel.: (06 62) 426 819 Fax: (06 62) 426 702

www.holux.hu www.fenyaruhaz.hu e-mail: hoso@holux.hu

A kiadványunkban közölt információkat a legnagyobb körültekintéssel igyekeztünk összeállítani, az esetleg mégis előforduló hibákért felelősséget nem vállalunk. A közölt adatok változtatásának jogát minden külön értesítés nélkül fenntartjuk.

Minőségirányítási
rendszer



A MEE Világítástechnikai Társaság
tagja

