



2019. október (No. 193)

3











Tartalom

- 1 Rövid hírek
 - Az EucoLight és a LightingEurope közös állásfoglalása a hulladékkezelési díjak környezetvédelmi szempontok szerinti módosításáról

LIGHTINGEUROPE

1c

- Tridonic LLE advanced 5: jobb hatékonyság és nagyobb rugalmasság a lineáris és területvilágító lámpatestek tervezéséhez
- Új Tridonic LED-modulok élelmiszerek, ruházati cikkek és műalkotások élethű színben történő megvilágításához
- 2 A Tridonic Bluetooth-os világításvezérlése igény szerinti világítási beállításokat szolgáltat a svájci Lutry-templom számára
- 3 A LED-technológián alapuló szilárdtest-világítás, 1. rész
- A 2019. évi Lumen világítástechnikai díjjal kitüntetett alkotások, 4 1. rész

Az EucoLight és a Lighting Europe közös állásfoglalása a hulladékkezelési díjak környezetvédelmi szempontok szerinti módosításáról

(Forrás: www.lightingeurope.org, Press Release, 2019.júl. 19.)

Bevezetés

A világítástechnikai iparba egyedülálló betekintést nyújtó két uniós szintű szervezet, a *LightingEurope* és az *Eucolight* azért készítette el ezt az állásfoglalást, hogy megvizsgálja, hogyan lehet a módosított díjakat alkalmazni a lámpákra és a lámpatestekre.

Felajánljuk szakértelmünket az Európai Bizottságnak a pénzügyi hozzájárulások módosítására (a díjak környezetvédelmi szempontból történő "öko-módosítására") vonatkozó iránymutatásaihoz, amelyeket a hulladékokról szóló 2008/98/EK irányelvet módosító (EU) 2018/851 hulladék-keretirányelv szerint kell bevezetni (8.5 cikk).

Állásfoglalásunk dióhéjban

A jelenlegi hulladékgazdálkodási díjrendszer érvényesítése továbbra is kihívást jelent a világítás tekintetében az EU piacának minden szereplője és minden terméke esetében - az EucoLight egyik tagjának 2018-as felmérése szerint az internetes értékesítésre rendelkezésre álló világítástechnikai termékek 76%-a nem tett eleget az elektromos és elektronikus berendezések hulladékkezelésével kapcsolatos WEEE irányelv előírásainak. Javasoljuk, hogy a hatóságok fordítsanak nagyobb figyelmet a jelenlegi szabályozási követelmények betartásának biztosítására, hogy minden piaci szereplő eleget tehessen a WEEE irányelvvel kapcsolatos kötelezettségeinek - mielőtt további összetettségi szinttel bővítenénk a rendszert.

A díjak ökológiai módosítására irányuló javaslat célja a gyártók ösztönzése a termékek tartósságának, javíthatóságának, újrafelhasználhatóságának és újrahasznosíthatóságának növelése, valamint a körkörös gazdaság és az erőforrás-hatékonyság felé történő elmozdulás tekintetében a termékek tervezése során. A módosított díjakat akkor tekinthetnénk hatékonyaknak, ha feltehetőleg befolyásolnák a gyártók magatartását (a fejlesztés alatt álló új termékek tekintetében), vagy a fogyasztói magatartást (a megvásárolt termékek vonatkozásában).

A világítástechnikai termékek esetében a LightingEurope és az EucoLight arra a kö-

vetkeztetésre jutott, hogy a WEEE szerinti díjtételek környezetvédelmi szempontok alapján történő módosítása nem lesz hatékony hajtóereje a változásnak. Az 1. és 2. mellékletben bemutatjuk a világítástechnikai termékek két fő kategóriájával – a lámpákkal és a lámpatestekkel – kapcsolatos indokolást.

Ezért azt javasoljuk, hogy a díjak környezetvédelmi szempontok szerinti módosításával kapcsolatos döntést az egyes termékcsoportokra külön hozzák meg az adott termékcsoport sajátosságai alapján. A díjakat csak akkor kellene ezek alapján módosítani, ha egyértelműen kimutatható, hogy a fentiekben felsorolt célokat más szabályozási követelményekkel és intézkedésekkel még nem sikerült megvalósítani.

A világítástechnikai termékek esetében úgy véljük, hogy a WEEE irányelv szerinti gyártói kötelezettségek módosítása nem felelne meg a hulladékokról szóló irányelv 8a. cikke követelményeinek. A díjszabás módosítása ugyanis megsértené annak biztosítását, hogy a díjak ne haladják meg a hulladékgazdálkodáshoz szükséges költségeket és mert a 8a. cikk újrahasznosíthatóságra és tartósságra vonatkozó követelményei ellentmondásos díj-módosításokhoz vezetnének.

Az EU szintjén közös, harmonizált kritériumokkal rendelkező megfelelő rendszer elengedhetetlen egy olyan keret biztosításához, amely könnyen érthető, alkalmazható és érvényesíthető az egész EU-ban, ahelyett, hogy ugyanazok a gyártók különféle formák és környezetvédelmi szempontok szerinti módosítási rendszerek keverékével találkoznának a különböző tagállamokban. Ez nem csupán jelentős terhet róhatna a gyártókra, hanem ellentmondásos kritériumokat is eredményezhetne. A franciaországi tapasztalatok azt mutatják, hogy ilyen intézkedés nemzeti hatálya nem ösztönzi a világítási ágazat elektromos és elektronikus berendezéseinek gyártóit.

1. melléklet - Módosított díjak alkalmazása a WEEE-irányelv keretében a 3. kategóriájú lámpákra

A WEEE irányelv 8a. cikkének (4b) bekezdése kimondja, hogy a gyártó kötelezettségeit lehetőség szerint módosítani kell a termékek tartósságát, javíthatóságát, újrafelhasználhatóságát és újrahasznosíthatóságát, valamint a veszélyes anyagok jelenlétét figyelembe véve.

Tekintettel arra, hogy jelenleg szinte minden lámpa – a technológiától függetlenül – javíthatatlan és újrahasználhatatlan, e be-



kezdés fő szempontjai a tartósság, az újrahasznosíthatóság és a veszélyes anyagok jelenléte. Mindezeket az alábbiakban vesszük sorra.

A fogyasztói igények, valamint az EU-nak a környezetbarát tervezésre és a veszélyes anyagok felhasználásának tiltására vonatkozó Ecodesign és RoHS jogszabályai által vezérelt piaci átalakulások sokkal hatékonyabban hajtják végre a higanytartalmú lámpákról a retrofit LED-lámpákra való áttérést, mint amilyent a díjszabás módosításával el lehetne érni. Javasoljuk, hogy a lámpákra vonatkozó díjak ne módosuljanak, és ezt az álláspontot fogadják el az egész EU-ban.

A gázkisülőlámpák tartalmaznak veszélyes anyagnak számító higanyt, míg a retrofit LED-lámpák nem. Ezenkívül a retrofit LED-lámpáknak általában hosszabb az élettartama, mint a kisülőlámpákénak, azaz jóval tartósabbak. A díjak módosításának legkézenfekvőbb módja ezért engedmény (bonusz) alkalmazása a retrofit LED-lámpákra, vagy pótdíj (malusz) a kisülőlámpákra. Ez a higanytartalmú lámpákra irányuló megközelítés azonban hatástalan lenne, és több okból sem felelne meg a 8a. cikk követelményeinek:

 A legtöbb esetben az összes lámpát – a LED-eket és a kisülőlámpákat is – együtt kezelik, ugyanabban a feldolgozóüzemben.
 Ezért a kezelési költségek azonosak. Sőt ugyanabban a konténerben együtt is szállítják őket, azaz a szállítási költségek azonosak. Így a különféle díjak alkalmazása sértené a 8a. cikk (4c) bekezdésének követelményét, amely előírja, hogy a gyártói felelősségvállalási költségek nem haladhatják meg a hulladék költséghatékony kezeléséhez szükséges költségeket;

2. Habár tartalmaznak higanyt, a kisülőlámpák újrahasznosítása során az anyagok visszanyerési hányada meghaladja a 90%ot, és csak igen kis mennyiségű hulladék marad vissza. Ezzel szemben a retrofit LED-lámpák anyag-visszanyerési hányada tipikusan 50% körüli. Azaz a kisülőlámpák újrahasznosíthatósága lényegesen jobb hatásfokú a retrofit LED-lámpákénál. Ezért a (4b) bekezdés újrahasznosíthatósági követelményeinek való megfeleléshez pótdíjat (maluszt) kellene alkalmazni a retrofit LED-lámpákra és kedvezményt (bonuszt) a kisülőlámpákra.

A díjak bármilyen módosításától függetlenül a világítástechnikai iparban nagyszabású technológiai átalakulás megy végbe, mivel a végfelhasználók a kisülőlámpáktól a LED-technológiák irányába haladnak. A változás ütemét számos tényező befolyásolja: 1. a környezetbarát tervezéssel kapcsolatos előírások, amelyek szigorúbb energiahatékonysági követelményeket írnak elő a világítástechnikai termékekre. Például a fénycsövek egyik vezértípusát, a T8-at a fényforrások környezetbarát tervezésére vonatkozó közelgő szabályozás 2023. szept. 1-jével be fogja tiltani;

2. a veszélyes anyagok felhasználását tiltó RoHS követelményei, amelyek fokozatosan megszüntetik a higanyt tartalmazó termékeket. Ez azt jelenti, hogy a kisülőlámpák és a kevésbé energiahatékony fényforrások egyre nagyobb hányadát kivonják a piacról;

3. a végfelhasználók – mind a vállalkozások, mind a fogyasztók – igénye az energiahatékonyabb és sokoldalúbb világítástechnikai termékek iránt.

A fenti tényezők együttes hatása a forgalomba hozott kisülőlámpák átlagosan 20%-os csökkentését eredményezi évente - és ezzel párhuzamosan persze a piacra kerülő retrofit LED-lámpák növekedését. Úgy véljük, hogy a díjak módosításának elhanyagolható hatása lenne a jelenleg zajló erőteljes piaci átalakulásokhoz képest. Az EucoLight egyik felmérésében a résztvevők beszámoltak arról, hogy alkalmanként beépítettek egyfajta módosított díjat (például kereskedelmi okokból, új résztvevők vonzása érdekében). A tapasztalatok azonban azt mutatták, hogy ezek semmilyen változást nem eredményeztek a gyártók magatartásában a terméktervezés vagy a portfolió vonatkozásában.

Azt javasoljuk, hogy a politikai döntéshozók ne módosítsák környezetvédelmi alapon a lámpákra vonatkozó díjazást és alkalmazzák a jelen dokumentumban körvonalazott megközelítést az EU egészére. A díjak tagállam-specifikus módosítási követelményeinek elfogadása növelné a gyártók adminisztrációs költségeit, és gyakorlatilag nem lenne hatással a gyártói magatartására.

2. melléklet – Módosított díjak alkalmazása a WEEE-irányelv keretében a 4. és 5. kategóriájú lámpatestekre

Arra a következtetésre jutottunk, hogy a lámpatestek WEEE szerinti hulladékkezelési díjainak módosítása nem lesz hatékony a gyártó vagy a vevő magatartásának megváltoztatásában, ehelyett jelentős adminisztratív terhet jelentene a gyártók, a rendszerek és az új rendszer végrehajtásáért felelős hatóságok számára. A világítástechnikai ágazatban óriási a választék a különféle alkalmazásokra szánt termékportfoliók tekintetében – mind a professzionális, mind a háztartási szektor vonatkozásában, és a választékokat a vevői elvárások és a meglévő követelmények nagy száma befolyásolja.

A lámpatest-piac nagyobb része vállalatok között zajlik (ún. business-to-business alapú), és a megfelelő lámpatest kiválasztását számos tényező befolyásolja a világítástervezési folyamat részeként. A megfelelő lámpatestre vonatkozó döntésekre – különösen közterületek esetében – olyan közbeszerzési szabályok vonatkoznak, amelyek már számos "zöld" elemet tartalmaznak. A szabványok a különböző alkalmazások működési követelményeit, az EU szabályzatai pedig a minimális hatékonysági és teljesítőképességi követelményeket határozzák meg.

Az ilyen lámpatestek környezetvédelmi okokból módosított díjai tehát nem lesznek további hatással a vevők és a gyártók magatartására, mivel a környezetvédelmi követelmények már szerepelnek a termékspecifikációkban.

Közigazgatási és végrehajtási szempontból a változó díjak kezelése e termékek és alkalmazások esetében óriási adminisztratív terhet jelentene a gyártók, a rendszerek és a hatóságok számára. A rendszer bonyolultsága azt jelentené, hogy a gyártók nagyobb valószínűséggel hibáznának, és a hatóságoknak jelentős forrásokat kellene fordítaniuk az egyenlő versenyfeltételek biztosítására.

A lámpatestek díjainak módosításával kapcsolatban két lehetséges kritériumot vizsgáltunk meg, és azt találtuk, hogy egyikük sem lenne teljesen megfelelő különböző okoknál fogya:

1. Hagyományos lámpatestek (amelyek nem tartalmaznak LED-eket) szemben a LED-es lámpatestekkel

2. Teljesen integrált LED-es lámpatestek szemben azokkal, amelyekben a végfelhasználó cserélheti a LED-modulokat.

1. Hagyományos lámpatestek szemben a LED-es lámpatestekkel

A díjakat úgy módosítanák, hogy a LED-et részesítenék előnyben a kevésbé tartós vagy kevésbé energiahatékony technológiákkal szemben. Ezzel az átállással kapcsolatosan azonban már erős a piaci nyomás, amelynek eredményeként a hagyományos lámpatestekről gyors az áttérés a LEDesekre. Jelenleg átlagosan (a 2018-ban piacra került termékekre vonatkozó ZVEIadatok szerint) a forgalomba hozott lámpatestek több mint 80%-a LED-es.

A piaci nyomás az alábbiak eredménye: a. energiamegtakarítási lehetőségek a végfelhasználók számára;

b. a hagyományos lámpák korlátozott elérhetősége a hagyományos technológiáknak az EU egyéb jogszabályai (Ecodesign környezetbarát tervezés, RoHS) szerinti fokozatos megszüntetése miatt;

c. nagyobb lehetőségek a színhőmérséklet változtatására és szabályozására;

d. további funkciókkal – LiFi, lokalizált GPs stb. – való kiegészíthetőség.

Ennek eredményeként a legtöbb forgalomba helyezett lámpatest most már LEDes vagy LED-ekkel kompatibilis. Ez azt jelenti, hogy a hagyományos lámpatestekre kivetett magasabb díjakat nagyrészt nem vennék igénybe, így nem lennének hatással a gyártók vagy a fogyasztók magatartására, sőt, hosszabb távon negatív hatással lehetnének a hulladékgyűjtő és újrahasznosító rendszer finanszírozására.

2. Teljesen integrált LED-es lámpatestek szemben a végfelhasználó által cserélhető modulokkal felszerelt lámpatestekkel

A díjak úgy módosíthatók, hogy jutalmazzák a végfelhasználó által cserélhető modullal rendelkező LED-es lámpatesteket. Azonban:

a. Ezt a követelményt már előírják a világításra vonatkozó új környezetbarát tervezési szabályok, amelyek szerint a lámpatesteknek eltávolítható fényforrással és meghajtóval kell rendelkezniük, továbbá előírják a gyártók számára, hogy ezt az információt közöljék a vevővel (például piktogrammal).

b. Ez negatív hatással lenne a robosztus, tartós termékekre, amelyek jó okokból nem cserélhetők (pl. biztonsági okokból vagy az optimális teljesítmény biztosítása érdekében bizonyos körülmények között, például víz alatt vagy nehezen elérhető helyeken).

Tridonic LLE advanced 5: jobb hatékonyság és nagyobb rugalmasság a lineáris és területvilágító lámpatestek tervezéséhez (Forrás: www.tridonic.com, Press Release, 2019. 05. 09.)

Az LLE ADV modulok ötödik generációja bámulatos fejlődést kínál a 16 és 55 mm szélességű modulok fényhasznosítása és új tulajdonságai terén. A 16 mm szélességű modulok 70 mm hosszúságban készülnek, az 55 mm szélességűek pedig lyukakkal vannak ellátva, hogy jobban illeszkedjenek a kereskedelemben kapható búrákhoz.

A két modulcsalád irodákhoz és oktatási intézményekhez a legalkalmasabb. Lenyűgözően nagy, max. 190 lm/W a fényhasznosításuk és igen hosszú, 72 000 órás az élettartamuk. 2700 és 6500K között többféle színhőmérsékletben készülnek, szín-

Új Tridonic LED-modulok élelmiszerek, ruházati cikkek és műalkotások élethű színben történő megvilágításához

(Forrás: www.tridonic.com, Press Release, 2019. 06. 03.)

Árucikkek és műalkotások bemutatásánál a jó világítás segít a különleges atmoszféra megteremtésében és a szemlélők "elkápráztatásában". A különböző termékekhez, anyagokhoz és színekhez azonban speciális világítási hangulatok kellenek. A Tridonic az élelmiszerek, divatcikkek és műalkotások igényes megvilágításának kritériumait kielégítő, új, hetedik-generációs SLE excite (EXC) LED-moduljaival széles termékválasztékot kínál a különleges világítási feladatokhoz.

Akár friss péksüteményekről, színes textíliákról vagy értékes műalkotásokról van is szó, a Tridonic LED-moduljainak széles választéka megfelelő fényt kínál bármilyen tárgyhoz: a péksüteményekhez meleg, intenzív barnákat, a húspulthoz vörösben gazdag, a divatkollekciókhoz pedig valódi színt megjelenítő fényt. A felhasznált fényszínek a lehető legjobb módon mutatják be a divatcikkeket, élelmiszereket és műalkotásokat. Valamennyi komponenst szigorú minősítési folyamattal választanak ki és fejlesztenek. A fényhasznosítás és a színvisszaadás közötti egyensúlyt szabadalmaztatott fényporokkal optimalizálják

"A spotfényekhez alkalmas SLE G7 excite modulcsaládok a vevőinknek a fényszínek széles választékát kínálják, jól kielégítve ezzel az árucikkek bemutatásával kapcsolatos világítási feladatok sokféleségét – visszaadás indexük Ra > 80. MacAdam 3nak megfelelő szűk színtoleranciájukkal kiváló minőségű fényt szolgáltatnak. Dugaszolható csatlakozók segítségével könnyen, gyorsan csatlakoztathatók egymáshoz. A fény több egymás után csatlakoztatott modul esetén is homogén marad. Az LLE ADV 5 16 mm-es moduljai non-SELV (nem biztonsági törpefeszültségű) üzemeltetéshez lettek tervezve. 140, 280, 560 - és most már - 70 mm hosszúságú változataik óriási szabadságot jelentenek a tervezők számára. Valamennyi modul szabadon kombinálható egymással - sokféle opciót kínálva ezzel. A 70 mm hosszúságú modulok alkalmasak a fénysávok kis réseinek a kitöltésére, így folytonos, homogén hatás érhető el. Tipikus fényáramuk típustól függően 325, 650, 1250 vagy 2400 lm. Az osztás megegyezik a megelőző generációéval, így a meglévő rendszerek

ନ୍ତ

magyarázza *Bertrand Leplay*, a Tridonic világítástechnikai alkatrészekért felelős termékmenedzsere. "Ez lehetővé teszi számukra, hogy változatos, vonzó dizájnokat alkossanak az üzletekben, kiállításokon, szállodákban és múzeumokban."

Az egyedi színhőmérsékletekkel az élelmiszereket a lehető legjobb módon lehet bemutatni. A színek intenzívebben észlelhetők anélkül, hogy elveszítenék természetes karakterüket. A megfelelő fényt a termékek fényvisszaverő képességének megfelelően választják ki. A FOOD (élelmiszer) család Gold (arany), Gold+, Meat (hús), Meat+, Fish (hal) és Fruit (gyümölcs) színváltozatban készül. A Gold és a Gold+ típusokat a barna árnyalatok erősítésére használják a péksütemények friss voltának, ropogósságának és a sajtok frissességének hangsúlyozására; a Gold+ változat a színeket még intenzívebbé, még gazdagabbá varázsolja. A Meat és Meat+ a friss húsok és felvágottak megfelelő bemutatására szolgál. A vörös gazdag árnyalatai kiemelik a finom rózsaszíntől a mély vörösig terjedő színeket, miközben a fehér részek fehérek maradnak. Az igen hideg fény ezzel szemben a halféleségeket és a tenger gyümölcseit láttatja frissnek, míg a gyümölcsök és zöldségek a meleg fehér fényben látszanak különösen étvágygerjesztőeknek. Mivel a LED-ek nem bocsátanak ki UV-fényt, nincs veszély az elszíneződésre.

A divatüzletek a FASION (divat) modul előnyeit élvezik, amely speciális fényspektrumának köszönhetően kellemes, ragyogó, meleg, telített színeket hoz létre s a textíliákat valódi, élénk, természetes szí-

TRIDONIC



könnyen korszerűsíthetők a legmodernebb technikai standardoknak megfelelően. Az LLE ADV 5 családot standard búrákkal lehet felszerelni, lineáris lámpatestekhez alkalmas, 55 mm-es szélességű moduljai SELV (biztonsági törpefeszültségű) üzemelésre alkalmasak. 280 mm-es hoszszúságban készülnek, tipikus fényáramuk 1700, illetve 4000 lm. Átrendezett furataiknak köszönhetően az 55 mm-es modulok sokféle, kereskedelemben kapható búrához alkalmasak, így a LEDIL márkájúakhoz is. A modulokat nagyon könnyű felszerelni, bekötésük a hátoldalon történik Az ötödik generációs LLE ADV modulokra a Tridonic 5 év garanciát kínál.



neikben mutatja be. Az új PURE WHITE fényszín fehér színei gazdag színhatást hoznak létre, ami a Planck-görbe alatti spektrumnak köszönhetően a ruhák élénk megjelenését eredményezi.

A művészet és a kultúra erősen függ a bemutatás módjától, ezért a fény kiemelten fontos tényező. Az ART fényszín középpontba helyezi a kiállítási tárgyakat és kiemeli természetes színeiket. A kiváló színvisszaadást és fényminőséget a Tridonic teljes spektrumú technológiája garantálja – CRI 97-es átlagértékekkel. Garantált a maximális, MacAdam 2-es színkonzisztencia is, és a LED-ek különösen "gyengéden" kezelik a műalkotásokat.

A Tridonic nagy jelentőséget tulajdonít a folyamatos fejlesztésnek és tökéletesítésnek. A hetedik-generációs modulok nagyobb hatékonyságúak a megelőző változatoknál: a chipek továbbfejlesztésének köszönhetően max. 191 lm/W fényhasznosításuk 16%-kal nagyobb a korábbi típusokénál. A fényporréteg felvitelének tökéletesítése optimalizálja a hőelvezetést is. Ez azt jelenti, hogy a modulokat akár 2000 mA-es áramokkal is lehet működtetni a teljes hőméséklettartományban – lecsökkentve ezzel a hűtőbordák használatát.

A modulok lényegesen hosszabb – max. 50 000 órás – élettartamot érhetnek el. Valamennyi modul könnyen és gyorsan beszerelhető a lámpatestekbe, és 5-éves garanciát élvez.

2 A Tridonic Bluetooth-os világításvezérlése igény-

TRIDONIC

szerinti világítási beállításokat szolgáltat a svájci

Lutry-templom számára (Forrás: www.tridonic.com, Press Release, 2019. 07. 18.)

Kezdetei a 11. századra nyúlnak vissza – nemzeti jelentőségű kulturális örökség, ezért mindenkinek szigorú követelményeket kell kielégítenie, aki építészeti munkát végez, vagy technikai eszközöket szerel fel a Lutry város szépkorú templomába, a Temple de Lutry-ba. Így a világítás LED-technológiára történt legutóbbi korszerűsítésekor – amennyire csak lehetett – a meglévő vezetékezést kellett felhasználni. Ennek ellenére – a Tridonic vezeték nélküli technológiájának köszönhetően – sikerült modern világításvezérlő rendszert megvalósítani.

1000 éves architektúra

A Genfi tó partján fekvő svájci Lutry festői kisváros. A szőlőskertekkel övezett településen van egy 14. századi kastély, egy sétány, a végén régi kikötővel és egy örökségvédelem alatt álló városközpont, amely felfedezésre invitálja a turistákat. A régi városközpont egyik "tájmeghatározó" épülete a Temple de Lutry, a Szent Mártonról elnevezett református plébániatemplom. Az eredetileg a 11. században bencés-rendi kolostor számára épült templom 1000 éves múltra tekinthet vissza. Az évszázadok alatt számos változtatást és bővítést hajtottak végre rajta: a sokszögletű kórus az 1260-as években készült, a főhajót fel kellett újítani az 1344-es tűz után, és az északi oldalon lévő kápolnákat a 14. és 15. században építették hozzá.

A reformációt követően további változtatások történtek. A jelenlegi tornyot 1544-ben építették, a reneszánsz bejárat pedig 1569 és 1578 között készült. A reformáció döntő ösztönzést jelentett a főhajó bolthajtásaiban található, a manierizmus és a reneszánsz ihlette dekoratív freskók számára is. Az önkormányzat megígérte, hogy e műalkotások esetében követni fogja a reformációt. Történetileg nincs ugyan dokumentálva, de bebizonyosodott, hogy a freskók eredete a 16. századra tehető, és Humbert Mareschet mester alkotásai.

Középpontban az energiahatékonyság és az intelligens vezérlés

Múlt év őszétől nem csupán az értékes freskók, hanem a templom többi architekturális szempontból érdekes részlete is teljes pompájában látható, mivel a Szent Martin templom modern világítási rendszert kapott.

A Lutry terület- és városfejlesztési szolgálatának felelős vezetői mindenekelőtt



jelentős energiamegtakarítást és kisebb karbantartási költségeket vártak el a meglévő halogénlámpás világítás LED-esre történő lecserélésétől. Ezenkívül egy olyan vezérlőrendszert is kértek, amely megkönnyíti a világításnak a templom különböző alkalmazásaihoz történő beállítását.

A kívánságok valóra váltásához a munka kivitelezésével megbízott Lausanne-i Sanesco világítástervező irodának nehéz kihívásokkal kellett szembenéznie.

"Semmilyen körülmények között sem volt szabad megzavarni a templom történeti struktúráját" – magyarázta Yannick Le Moigne, a Sanesco-tól. "Tilos volt további táp- vagy adatkábelt fektetni, ezért a problémát vezeték nélküli világításvezérlő rendszerrel oldottuk meg." Most minden világítási pont Tridonic basicDIM Wireless vezérlőmodullal van ellátva, amely rács felépítésű Bluetooth-hálózathoz csatlakoztatott csomópontként működik

Kényelmes "all-in-one" megoldás a kivitelezők és a felhasználók számára

Az 50mm x 26mm x 33mm-es *Casambi Ready basicDIM Wireless* moduloknak köszönhetően a világításvezérlő rendszer összeállítása igen egyszerű. Miután csatlakoztattuk a LED-meghajtókat a vezérlendő lámpatestekhez, automatikusan felépítenek egy max. 127 világítási pontból álló hálózatot, amelyben azután közvetítik a kapcsolási és fényszabályozási parancsokat. A modulok konfigurálható 1-10V-os és DALI interfésszel, valamint kapcsolható jelfogó-kontaktussal készülnek. Opcionálisan érzékelők is beépíthetők. Ezenkívül a hálózatba kötött lámpatesteket csoportosítani is lehet, és világítási jelenetek is beállíthatók.

Drámai világítási kiemelések vagy teljes fény az egész térben

A templomban különböző világítási elemek találhatók. A főhajóban nagy, kör alakú lámpatestek vannak külön kapcsolható direkt és indirekt fénykomponensekkel. Az oszloppárkányokra kompakt spotlámpákat szereltek, amelyek széles sugárnyalábokkal világítják meg a bolthajtásokat vagy rajzolják ki keskeny fénynyalábokkal a bordák és boltívek kontúrjait. Az orgona, a kórus, az oltár, az oldalhajók, a szószék és a bejárati terület köré számos egyedi lámpatest került. Nadine Le Moigne, a Snesco termékmenedzsere a következő szavakkal emelte ki az előnyöket: "A világításvezérlő rendszernek köszönhetően valamennyi világítási pont beállítható bármilyen kombinációban és egyedileg meghatározott paraméterekkel különböző világítási jelenetekhez, és pontosan hozzáigazítható az adott alkalmazáshoz."

A konfiguráláshoz Android vagy iOS operációs rendszerrel működő okostelefonra vagy táblagépre telepített Tridonic 4remote BT app applikáció használható. Az intuitív grafikai interfészen egyedi lámpatestek vagy egész lámpatestcsoportok ki/bekapcsolásai vagy dimmelései definiálhatók, és - ha megfelelő LEDmodulok vannak telepítve - az egyes lámpatestek vagy lámpatest-csoportok számára RGB színértékeket vagy fehér színtónusokat lehet beállítani. Ezek a konfigurációk azután egyszerűen elmenthetők világítási jelenetekként. A templomban vannak világítási jelenetek az istentiszteletekhez, a kórusban vagy a főhajóban tartott zenei és irodalmi rendezvényekhez és a népszerű Bach-koncertekhez is. Egyetlen érintés elegendő az applikációban a megfelelő világítási jelenet előhívására. Van telepről üzemeltetett beépített basicDIM Wireless User Interface is. Ez a kapcsoló formájú karcsú eszköz négy világítási jelenet és a lámpatestek fényerősségének tárolására alkalmas.



Világítástervezés: Senseco, Lausanne, Svájc Lámpatestek: ERCO, Lüdenscheid, Csillárok: Lutry önkormányzat Felhasznált Tridonic-termékek: 60 x basicDim Wireless Casambi Ready modul I x basicDIM Wireless User Interface I x DALI RM/S 4x10A 4remote BT app applikáció

Intelligens logikai csatlakoztatás

Igen elegáns megoldás is található egy speciális kapcsoló formájában: ha látogatók jönnek a templomba, saját maguk is bekapcsolhatják a világításokat a bejárat területen elhelyezett nyomógombbal, és megkezdhetik a látogatást. Egy kb. nyolcperces világítási jelenet van beprogramozva, amely megvilágítja a templomot és a mennyezeti freskókat, majd a végén lassan kialszik. Az istentiszteletek vagy rendezvények megzavarásának elkerülésére fontos volt biztosítani, hogy a "templomlátogatás" világítási jelenetét csak akkor lehessen működtetni, ha a templomban más világítási jelenet éppen nincs beállítva. Ezt a Tridonic DALI-RM/S működtető eszközével lehetett megvalósítani, amelyben egy DALI-jel egy jelfogó-kontaktust vezérel. "Egy basicDIM Wireless modult csatlakoztattunk a templom valamennyi világítási jelenetébe beépített működtető DALI bemenetéhez. A látogatói nyomógomb egy másik basicDIM Wireless modulon keresztül csatlakozik a működtető jelfogó-kimenetéhez" - magyarázta a Maurizio Cucciniello, a Tridonic munkatársa. "Ha egy világítási jelenet be van kapcsolva a templomi istentisztelethez, a látogatói nyomógomb basicDIM Wireless modulja DALI RM/S-en keresztül leválasztódik a hálózatról. Így ha most megnyomjuk a gombot, a kapcsolási parancs nem továbbítódik, és nem történik semmi. A bejáratnál lévő nyomógomb segítségével csak akkor lehet ismét működtetni a "templomlátogatási" világítási jelenetet, ha azt a felhasználói interfészen vagy táblagépen ismét aktiváljuk."

Összefoglalás

A basicDIM Wireless felhasználásával egy olyan világításvezérlő rendszert lehetett a Lutry-templomba beépíteni, amely nem zavarja meg a történelmi struktúrát. A Bluetoooth rendszeren keresztül kommunikáló világításvezérlést igen egyszerű módon lehet programozni és működésbe hozni. Mind a lelkipásztor, mind a hívők és a többi felhasználó - koncert- és felolvasásszervezők - örömmel fogadták e jelentős kényelemnövekedést, mivel most egyetlen érintéssel ki lehet választani az egész templomhoz szükséges világítási jeleneteket, vagy be lehet állítani egyes lámpatesteket vagy lámpatest-csoportokat a világítási jelenetek igényeihez. A bejáratnál lévő nyomógombnak köszönhetően a látogatók teljes megvilágításban élvezhetik a templom lenyűgöző mennyezeti freskóit még akkor is, ha a templomban nincsenek rendezvények.

3 A LED-technológián alapuló szilárdtest-

világítás, 1. rész

(Forrás: https://www.researchgate.net/publication/311639127_Solid-State_Lighting_Based_ on_Light_Emitting_Diode_Technology, Dandan Zhu and Colin J. Humphreys, 2016)

ÖSSZEFOGLALÁS, JOGI NYILAT-KOZAT

A LED-alapú szilárdtest-világítás mindennapi életünkhöz kiváló minőségű, energiahatékony fényforrást ígér. A fényhasznosítás és a költségcsökkentés terén tapasztalható folyamatos fejlődés okán a LED-es világítás az otthonok, irodák, városok és a közlekedés meghatározó formájává vált világszerte. A LED-alapú világítás több mint csupán a hagyományos világítás energiahatékony formája, alkalmas a cirkadián ritmushoz igazodó világítás megteremtéséhez is, amely egészségesebbé és hatékonyabbá tehet bennünket. Ezenkívül intelligens is és összekapcsolható épületfelügyeleti rendszerekkel, képes vezeték nélküli adatok nagy sebességű továbbítására, finomhangolhatja a benntartózkodás és a funkciók érzékelését és jövőbeli intelligens otthonaink fontos integrális része.

Szabad hozzáférés

Jelen írás szabadon terjeszthető a Creative Commons Attribution 4.0 nemzetközi szerzői engedély (http://creativecommons. org/licenses/by/4.0/) alapján, amely megengedi az írás felhasználását, másolását, adaptálását és reprodukálását bármilyen médiumban vagy formában, amennyiben megfelelő hivatkozás történik az eredeti szerző(k)re, forrásra és a Creative Commons licencre, illetve jelzik az esetleges módosításokat.

Az anyagban szereplő képek vagy más, harmadik féltől származó anyagok is beleértendők a Creative Commons licencbe, hacsak másként nem történik erre utalás. Ha az ilyen anyagok nem tartoznak a Creative Commons licenc hatálya alá és a vonatkozó műveletet a törvényi szabályozás nem engedélyezi, a felhasználóknak engedélyt kell kérniük a licenctulajdonostól az anyag másolására, adaptálására vagy reprodukálására.

A LED-ek történeti fejlődése

Több mint 100 évvel ezelőtt, 1907-ben az angol származású Henry Joseph Round felfedezte, hogy szervetlen anyagok fényjelenséget produkálnak, ha elektromos áram folyik rajtuk keresztül. A következő évtizedekben Oleg Loszev orosz és Georges Destriau francia fizikus igen részletesen tanulmányozták a jelenséget, és "elektrolumineszcenciának" nevezték el. 1962-ben a General Electric-nek a New-

| 5.1 táblázat – A GaN alapú LED-ek fejlődéstörténetének kulcsfontosságú lépései | | |
|--|---------------------------------------|--|
| 1938 | Juza és Hahn [84] | A legelső polikristályos GaN fénypor szintetizálása ammóniának folyékony Ga- fémmel való reagáltatása révén. |
| 1969 | Maruska és Tietjen [92] | Az első egykristályos GaN réteg növesztése zafir hordozóra történő közvetlen kémiai vákuumos gőzfázisú leválasztással. |
| 1972 | Pankove és munka- társai [102] | Beszámoló az első GaN alapú kék fém-szigetelő-félvezető felépítésű LED-ről. |
| 1986 | Amano és munka- társai. [79] | Jó felületi morfológiával és kristályszerkezettel rendelkező, hajszálrepedés mentes GaN rétegeket sikerült készíteni úgy, hogy a GaN növesztés előtt a zafirra alacsony hőmérsékleten vékony AIN pufferréteget növesztettek. |
| 1989 | Amano és munka- társai [43] | Amano, Akasaki és munkatársai kimutatták, hogy egy letapogató elektronmik- roszkópban történő kis energiájú elektronsugaras besugárzás folytán a korábban igen rezisztív Mg-mal adalékolt GaN réteg határozott p-típusú vezetőképességet mutat, ami lehetővé tette az első GaN alapú pn-átmenetes LED előállítását. |
| 1991 | Nakamura és munka- társai [38, 94] | Nakamura és munkatársai kimutatták, hogy ha a fő GaN 1000 °C körüli hőmér- sékleten történő növesztése előtt alacsony (~500 °C) hőmérsékleten egy kb. 20nm vastagságú GaN pufferréteget választanak le, ez is felhasználható volna egyenletes rétegek zafíron történő növesztésére – beleértve a jó elektromos vezetőképességgel rendelkező p-típusú anyagot is. |
| 1992 | Nakamura és munka- társai [42] | Mg-mal adalékolt GaN termikus aktiválása p-típusú vezetőképesség elérésére. |
| 1993 | Nakamura és munka- társai [97] | Kék és ibolya színt kibocsátó kettős heterostruktúrájú (DH) LED-eket sikerült előállítani. |
| 1993 | Nakamura és munka- társai [2] | Nakamura egy 1993. november 12-én tartott sajtókonferencián bejelentette az első nagy fényű kék LED előállítását. |
| 1995 | Nakamura és munka- társai [95] | InGaN kvantumkutas LED-ek készültek. |
| 1997 | Nakamura és munka- társai [3] | Először mutattak be olyan fehér fényt, amely kék gallium-nitrid (GaN) LED és sárga fényt kibocsátó fénypor kombinációjával jött létre. |

York-állambeli Szirakúzában működő Szilárdtest Eszközök Kutató Laboratóriumában Holonyak és Bevacqua [1] először mutatott be vörös fényt kibocsátó szervetlen anyagokat (GaAsP), jóllehet a kibocsátott fény olyan kicsi volt, hogy sötét szobában is alig lehetett észlelni (összehasonlításul: Edison első izzólámpájának fényhasznosítása tízszer akkora volt). Azóta a GaP és GaAsP fényhasznosítása az 1960as és 70-es években jelentősen megnőtt. Az AlInGaP rendszert később. az 1980-as években fejlesztették ki, és most ez az alapja a vöröstől sárgáig terjedő látható fénytartományban sugárzó legtöbb nagy fényhasznosítású LED-nek. A nitrid anyagokra épülő rendszereknek (GaN, InN, AlN és ötvözeteik) az elmúlt két évtizedben tapasztalt fejlődése lehetővé tette, hogy a hatékony fénykibocsátás a kék és a zöld spektrális tartományokra is kiterjedjen, és ami még fontosabb: lehetővé vált a fehér fény előállítása (a kék a látható spektrum nagy energiájú vége, ezért fénypor felhasználásával alkalmas fehér fény előállítására). A kék LED-ek előállítását egy sor kulcsfontosságú áttörés tette lehetővé (5.1 táblázat), amelyekre a későbbiekben részletesebben is kitérünk majd. A gyakorlatban az első nagy fényű kék

LED-et 1993. nov. 12-én Nakamura jelentette be egy sajtókonferencián [2]. A jó hatásfokú kék LED-ek feltalálása lehetővé tette a világítási célokra szolgáló fehér fényű fényforrások előállítását. Kék galliumnitrid (GaN) LED és sárga fényt kibocsátó fénypor kombinálásával előállított fehér fényt először 1997-ben mutattak be [3]. Az ilyen LED-eket "fehér LED-eknek" nevezték el.

Mára a LED-ekre épülő szilárdtest-világítás már kereskedelmi forgalomba került, és széles körben alkalmazzák – például közlekdési jelzőlámpákban, nagy méretű kültéri megjelenítőkben, repülőgépek, személygépkocsik és autóbuszok beltéri és kültéri világításánál, zseblámpákban, valamint mobiltelefonok és folyadékkristályos kijelzők háttérvilágításához. Az utóbbi évtizedekben a teljesítőképesség és a költségcsökkentés terén bekövetkezett fejlődés hatására a szilárdtest-világítás az izzólámpák és a fénycsövek reális helyettesítőjévé

[**3**] Nakamura S, Pearton S, Fasol G (1997): The blue laser diode, Springer, Berlin

^[1] Holonyak N, Bevacqua SF (1962): Coherent (visible) light emission from Ga(As1-xPx) junctions, Appl Phys Lett 1(4):82–83.

^[2] Nakamura S, Senoh M, Mukai T (1993): High - power InGaN/GaN double - heterostructure violet light emitting diodes, Appl Phys Lett 62:2390-2392.

lépett elő az otthonokban és az irodákban. A többi létező világítástechnológiával összehasonlítva, a szilárdtest-világítás két igen kívánatos tulajdonsággal rendelkezik: (1) igen energiahatékony - óriási energia megtakarítási és CO2-csökkentési lehetőséggel; (2) igen sokoldalú fényforrás számos kontrollálható tulajdonsággal - idetartozik a kibocsátott fény spektruma, iránya, színhőmérséklete, modulációja és polarizációja. A LED-ek által a gazdasági környezetre és életminőségünkre kifejtett előnyös hatás oly nyilvánvaló és jól látható volt, hogy 2014-ben fizikai Nobel-díjjal tüntették ki a hatékony kék fényt kibocsátó LED-ek feltalálóit, Isamu Akasakit, Hiroshi Amanót és Shuji Nakamurát.

5.2 A nitrid anyagok jelentősége

A LED-ekben használt fő félvezető-vegyületek anyagait és tiltott sávjaik energiáit az 5.1 ábrán összegeztük. A legtöbb optoelektronikai eszköz - fényemittáló diódák (LED-ek), lézerdiódák és fénydetektorok számára az eszköz hatékony működéséhez igen fontos a direkt tiltott sáv. Ennek az az oka, hogy az indirekt tiltott sávval rendelkező félvezetőkben az optikai sugárzás folyamatainál az impulzusmegmaradáshoz fononokra van szükség. A fononok jelenléte folytán e sugárzási folyamat fellépése adott időintervallumban kevésbé valószínű, ami lehetővé teszi, hogy sugárzással nem járó folyamatok is hatásos módon létrejöjjenek – hőt állítva elő fény helyett. Ezért az indirekt tiltott sávval rendelkező félvezetők nem alkalmasak energiahatékony LED-ek előállítására.

A hagyományos, III-V. oszlopba tartozó félvezetővegyületek - például az arzenidek és a foszfidok - direktből indirekt tiltott sávokat állítanak elő a nagyobb energiák irányában. Ilyenformán az infravörös és a vörös és sárga közötti spektrális tartományokban nagy hatékonyságú eszközöket lehet előállítani, de a hatékonyság a hagyományos III-V. oszlopba tartozó félvezetőknél drasztikus módon csökken, amint a tiltott sáv indirektté válik. A nitrideknek azonban hexagonális cink-szulfid struktúrájuk van, és a tiltott sáv direkt marad a vegyületek teljes tartományában, az AlNtől az InN-ig - az elektromágneses spektrum mély ultraibolyától infravörösig terjedő széles tartományát lefedő tiltottsávenergiákkal. Ezért a III. oszlopba tartozó nitridek (GaN és Al-mal és In-mal alkotott ötvözetei) különösen alkalmasak LED-ek előállítására.

Az InGaN ötvözet felhasználásával el lehet érni a kék/zöld és az UV-közeli spektrális tartományokat, ezért jelenleg a nitridek fő



5.1 ábra – III-V. oszlopba tartozó félvezető-ötvözetek tiltottsáv-energiái Vurgaftman et al. [4] és Vurgaftman és Meyer [5].közleményei alapján. Nitridek esetén a "hexagonális a" rácsállandót használtuk. A látható fény spektrumának megfelelő energiatartományt is feltüntettük.

alkalmazási területe a kék, zöld és fehér fényt kibocsátó LED-ek, valamint a "kék sugaras DVD-kben" a nagy sűrűségű optikai tároláshoz használt ibolya fényű lézerdiódák [6]. Mivel az InGaN tiltott sávjának energiája átfogja a látható fény spektrumát – a ~0.7 eV-os InN esetén elérve egészen az infravörös tartományt, ez az ötvözet lefedi a napsugárzás majdnem teljes spektrumát, ezért lehetséges rendszernek tekinthető a nagy hatékonyságú, több pn-átmenetes napelemek számára [7].

Az AlGaN ötvözetű rendszer széles tiltott sávja lehetővé fogja tenni az UV-fényt kibocsátó eszközök és a fényérzékelők gyártását. Az UV-fényű optoelektronika lehetséges alkalmazásai közé tartozik a víztisztítás, a légszennyezés monitorozása, az UV-csillagászat, a kémiai/biológiai reagensek detektálása és a lángérzékelés [8, 103].

Az AlGaN/GaN heteroátmenetek alkalmasak különféle elektronikus eszközökhöz, például nagy elektronmobilitású tranzisztorokhoz (HEMT-ekhez), amelyeket a hírközlésben nagyteljesítményű mikrohullámú és rádiófrekvenciás erősítőkben használnak [9]. Az ilyen széles tiltott sávú anyagból készült rendszerek lehetővé teszik a hagyományos Si, GaAs vagy InP alapú eszközöknél nagyobb feszültségeken és hőmérsékleteken történő működtetést [10].

Noha a jelen tanulmány főként a világítási alkalmazásokhoz használható nitrid alapú LED-ekre fókuszál, nem szabad elfelejteni a nitrid alapú anyagok óriási lehetőségeit a fentiekben említett egyéb, izgalmas alkalmazási terület vonatkozásában sem. Egyedi anyagtulajdonságaik és sokféle alkalmazási lehetőségeik okán a III. oszlop nitridjeit széles körben a Si felhasználása óta kifejlesztett legfontosabb félvezetőanyagoknak tekintik.

5.3 LED-alapok

A legegyszerűbb LED-struktúra egy pnátmenet, amely egy n-típusúra adalékolt félvezetőanyaghoz csatlakoztatott p-típusúra adalékolt rétegből előállított, az átmenetnél keskeny aktív tartománnyal rendelkező diódából áll. A pn-átmenetnél keletkező fényemisszió elve az 5.2 ábrán látható. Az n-típusú tartomány negatív töltésű elektronokban, a p-típusú pedig pozitív töltésű lyukakban gazdag.

Ha a pn-átmenetre (nyitó)feszültséget kapcsolunk, az n-típusú tartományból elektronok, a p-típusúból pedig lyukak injektálódnak át a pn-átmeneten. Amikor azután az elektronok és a lyukak találkoznak és sugárzást kiváltó módon rekombinálódnak, a felszabaduló energia az átmenet körüli aktív tartományban lévő anyag tiltott sávjához közeli hullámhosszúságú fény formá-

[6] Saitoh T, Kumagai M, Wang H, Tawara T, Nishida T, Akasaka T, Kobayashi N (2003): Highly reflective distributed Bragg reflectors using a deeply semiconductor/air grating for InGaN/GaN laser diodes, Appl Phys Lett 82:4426–4428.

[7] Wu J, Walukiewicz W, Yu KM, Shan W, Ager JW III, Haller EE, Lu H, Schaff WJ, Metzger WK, Kurtz S (2003): Superior radiation resistance of In1-xGaxN alloys: full-solar-spectrum photovoltaic materials system, J Appl Phys 94:6477–6482.

[8] Munoz E, Monroy E, Pau JL, Calle F, Omnes F, Gibart P (2001): III nitrides and UV detection, J Phys: Condens Matter 13:7115–7137.

[9] Xing H, Keller S, Wu YF, McCarthy L, Smochkova IP, Buttari D, Coffie R, Green DS, Parish G, Heikman S, Shen L, Zhang N, Xu JJ, Keller BP, DenBaars SP, Mishra UK (2001): Gallium nitride based transistors, J Phys: Condens Matter 13:7139– 7157.

[10] Mishra UK, Parikh P, Wu YF (2002): AlGaN/GaN HEMTs – an overview of device operation and applications, Proc IEEE 90:1022-1031.

^[4] Vurgaftman I, Meyer JR, Ram-Mohan LR (2001): Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys, J Appl Phys 89:5815–5875.

^[5] Vurgaftman I, Meyer JR (2003): Band parameters for nitrogen-containing semiconductors, J Appl Phys 94:3675–3696.

jában szabadul fel.

A nagy fényhasznosításhoz a két, különböző tiltott sávval rendelkező félvezetőanyagból álló heteroátmenetet általában előnyben részesítik az egyetlen félvezetőanyagból felépített homoátmenettel szemben a töltéshordozóknak az 5.2c ábrán látható jobb "bezárása" okán, azaz mivel itt az elektronok és a lyukak térben alacsonyabb tiltottsáv-energiával vannak elválasztva az aktív tartományban, ami megnöveli a fény keletkezéséhez szükséges, sugárzással járó rekombináció esélyét.

A legtöbb nagy fényhasznosítású LED-hez szokásos módon kvantumkutakat (QW) használnak az aktív tartományban, amelyek a hordozók további korlátozását jelentik az egyik irányban, megnövelve ezzel a sugárzási hatásfokot, azaz a belső kvantumhatásfokot (IQE). A kvantumkutak egy alacsonyabb tiltott sávú anyagból (pl. InGaN-ből) készült igen vékony (néhány nm vastagságú) réteget tartalmaznak nagyobb tiltott sávú (pl. GaN) potenciálgátak között (l. az 5.3 ábrát). A kvantumkút aktív tartománya az elektron- és lyukinjekcióhoz két vastagabb - n-, illetve ptípusúra adalékolt - GaN réteg között helyezkedik el.

Az elektronoknak és lyukaknak az InGaN kvantumkúton keresztüli rekombinációja egyszínű – pl. zöld vagy kék – fény keletkezését eredményezi. A szín az InGaN kvantumkút összetételének és/vagy vastagságának módosításával változtatható.

5.4 A LED-es lámpatestek gyártása

A LED-ek fentiekben ismertetett struktúrája a fény fontos forrása, de a végső felhasználásnak, például a LED-lámpának vagy a LED-lámpatestnek csak kis részét teszi ki. Az 5.4 ábra egy LED-es lámpatest előállításának gyártási lépéseit mutatja be. Az első lépés a nitrid felépítésű LED leválasztása megfelelő hordozóra, például zafirra, SiC-ra vagy GaN-e. Ezt rendszerint fémorganikus gőzfázisú epitaxiának (MOVPE) nevezett kristálynövesztési eljárással végzik fűtött kamrában vagy reaktorban.

A leválasztás után ezekből az epitaxiális lapkákból készülnek a LED-chip konstrukciójának megfelelően kialakított LEDeszközök. A folyamat rendszerint több lépésből áll – ilyenek a lapka huzalozásának (kötéseinek), valamint az n- és ptípusú kontaktusok mintázatának felvitele, a maratás, fémezés és a felület érdesítése.

Az elkészült LED-lapkát azután hasítással, fűrészeléssel vagy lézeres vágással egyedi chipekké választják szét. Ezeket az egyedi LED-chipeket ezt követően a megcélzott





5.2 ábra – Homo(egy)-pn-átmenetes struktúra a) nyitófeszültség nélkül és b) nyitófeszültség esetén, illetve c) hetero(két)-pn-átmenetes struktúra nyitófeszültség esetén. EC, EF és En a vezetési, a Fermi- és a vegyértéksáv energiája. A kitöltött és az üres körök az elektronokat, illetve a lyukakat reprezentálják. Az egy-pn-átmenetes rendszernél a töltéshordozók általában az Ln és Lp diffúziós hosszak fölött diffundálódnak a rekombináció előtt. Két-pn-átmenetes rendszernél a töltéshordozókat a pn-átmenetek potenciálgátja (a barrier) akadályozza (a [11] sz. közlemény alapján)

felhasználástól függően olyan tokba zárják, amely más elektronikus komponensekhez – pl. meghajtókhoz – is alkalmas. A fehér LED-ekhez fényporokat is behelyeznek a tokba – a legtöbb esetben kék fényt kibocsátó LED-chipekkel együtt. Ezeket a tokozott LED-eszközöket azután be lehet építeni fényforrásként a lámpatestekbe.

A gyártási eljárásból látható, hogy a tokozott LED-eszköz teljes hatásfokához számos komponens hozzájárul. Ezek a következők:

1. belső kvantumhatásfok (ŋIQE)

2. a chipből való fénykivonás hatásfoka (ηLEC)

3. elektromos hatásfok (ηEE)

4. a fénypor átalakítási hatásfoka (ηconv)

5. a LED-csomagból való fénykivonás hatásfoka (ηLEP)

Az IQE belső kvantumhatásfok definíció szerint az aktív tartományból emittált fotonok és az aktív tartományba injektálódott elektronok számának a hányadosa. Főként a LED-struktúra felépítése határozza meg

 az anyagösszetételek megválasztása, a rétegvastagság, az adalékolási profil és az epitaxiális eljárás során használt növesztési feltételekkel összefüggő anyagminőség.



5.3 ábra – InGaN/GaN kvantumkutas LED-struktúra vázlata GaN potenciálgátakkal elválasztott három InGaN kvantumkút nagy felbontású transzmissziós elektronmikroszkóppal készített interferenciasávos képével kiegészítve

A belső kvantumhatásfok függ a LED-en átfolyó áramsűrűségtől is. Nagy áramsűrűség esetén a "hatásfok-esés"-nek nevezett jelenség okán értéke csökken.

A kvantumkút tartományában keletkezett fényt ki kell vonni a félvezetőanyagból: a legtöbb III-V. oszlopba tartozó félvezetőnek nagy az optikai törésmutatója (GaN: n~2.4; InGaP: n~3.5), ezért a kvantumkút tartományában keletkezett hőnek csak kis része tud "megszökni". Ennek az az oka, hogy a fény többsége a teljes belső visszaverődés folytán csapdázódik a LED belsejében. Különféle fejlett chip-konstrukciót fejlesztettek ki és használtak a lapka- és elem-szintű gyártási eljárások alatt a fény LED-chipekből történő kivonási lehetőségének (LEC) növelésére és az elektromos kontaktus- és soros ellenállások okozta elektromos veszteségek minimalizálására. Mára a LED-chipekből történő fénykivonásra a kereskedelemben kapható LEDeszközök esetén már 85%-ot meghaladó értéket sikerült elérni vékony GaN (ThinGaN) struktúráknál, amint ez az 5.2b ábrán látható [12].

A LED-chipeket ezenkívül "tokozni" is kell, mielőtt azokat a valódi alkalmazásokhoz szükséges egyéb elektronikus komponensekkel összeépítenék. A LED tokozása (valójában "becsomagolása", innen származik a "LED-csomag" elnevezés – A Szerk.) kritikus művelet a nagy fényhasznosítás, a LED-chipben keletkezett hő eltávolítása, a megbízhatóság és az élettartam növelése, speciális követelmények esetén a szín szabályozása, valamint a LED-chipeknek az elektrosztatikus töltések kisülésével, a nedvességgel, a magas hőmérsékletekkel és a kémiai oxidációval szembeni védelme szempontjából.

Az 5.5a ábrán egy nagyteljesítményű

^[11] Schubert EF (2006): Light-emitting diodes, 2nd edn., Cambridge University Press, Cambridge

^[12] Laubsch A, Sabathil M, Baur J, Peter M, Hahn B (2010): High-power and high-efficiency InGaN-based light emitters, IEEE Trans Electron Devices 57:79-87.

LED-csomag vázlatos felépítése, az 5.5c ábrán pedig egy kereskedelmi forgalomba került fehér LED-csomag képe látható. A LED-csomag fénykivonási hatásfoka 95%. A fehér fény előállításához egy sárga fényt kibocsátó, cériummal adalékolt ittriumalumínium-garnet (YAG) fénypor-lemezt képeznek ki az n-típusú GaN réteg tetején. A nagy fényporkonverziós hatásfok eléréséhez a fénypor anyagát gondosan úgy választják ki, hogy az optimális gerjesztés érdekében illeszkedjen a LED fénykibocsátásához.

5.4.1 Hatásfok és (fény)hasznosítás

Az egyszínű - kék, zöld és vörös - LEDeknél a teljes hatékonyság mérésére rendszerint a WPE (wall-plug) energiakonverziós hatásfokot használják. A W-ban mért kimeneti fényteljesítményt az ugyancsak W-ban mért bemeneti elektromos teljesítménnyel elosztva kapott energiakonverziós hatásfok dimenzió nélküli mennyiség, és rendszerint százalékban fejezik ki. A fehér LED-eknél a hatékonyságra egy másik kifejezést, a fényhasznosítást használjuk. A fényhasznosítás mértékegysége a lm/W, amelyet úgy kapunk, hogy az emberi szem által észlelt és lumenben mért kimeneti fényteljesítményt elosztjuk a W-ban mért bemeneti elektromos teljesítménnyel. A hatásfokot (efficiency) és a fényhasznosítást (efficacy) széles körben használják a világítástechnikában, ezért ügyelni kell arra, hogy ne keverjük össze őket. A fehér fényforrások fényhasznosítását a későbbiekben még részletesebben tárgyalni fogjuk. A fényhasznosítás kifejezés figyelembe veszi az emberi szemnek a különböző színekkel kapcsolatos érzékenységét: maximuma az 555 nm-es zöld fénynél adódik.

Azt is meg kell jegyezni, hogy egy lámpatest hatásfoka vagy fényhasznosítása az egyéb komponensek – az optika, a hűtőbordák és az elektromos meghajtók – okozta járulékos veszteségek miatt kisebb, mint a LED-csomagoké.

Amikor a LED-es világítás hatásfokáról beszélünk, fontos tisztában lenni a fényforrás formájával, vagyis hogy az csupasz chip, tokozott LED-eszköz vagy lámpatest-e. A LED-ek teljesítőképessége az utóbbi évtizedben drámai módon javult az anyagok minősége, a LED-ek struktúrája, a chipek konstrukciója és a tokozás terén elért fejlesztéseknek köszönhetően. Mielőtt rátérnénk a LED-ek teljesítőképességének és alkalmazásának tárgyalására, azonban érdemes először áttekinteni a nitrid alapú LED-ek történeti fejlődését, különösen a vonatkozó kutatási kihívások tekintetében.



5.4 ábra – A LED-es lámpatestek előállításához tartozó gyártási folyamatok. Feltüntettük az egyes lépésekre jellemző hatásfokokat és veszteségeket is.



5.5 ábra – (a) Jó optikai tulajdonságokkal és a nagyteljesítményű LED-chipekhez szükséges jó hőelvezetéssel rendelkező nagyteljesítményű LED-csomag vázlatos felépítése; (b) Nagyteljesítményű, vékony GaN (ThinGaN) felépítésű LED-chip keresztmetszete, amely jól mutatja a modern, világítási célú fehér LED-ek bonyolult szerkezetét; (c) Az Osram nagyteljesítményű fehér LED-csomagjának képe

5.5 Kutatási kihívások

A nitrid anyagok és a LED-eszközök kutatása igen széles és interdiszciplináris terület, magában foglalja a kristálynövesztés fizikáját, az anyagtudományokat, az eszközök feldolgozását, fizikáját, a lámpatestek tervezését és sok minden mást. Az anyagtudományok szempontjából a nitrid anyagok igen "tökéletlenek" a hagyományos félvezetőanyagokhoz, a Si-hoz és a GaAs-hez képest, ezért a nitrid alapú LEDek jelentős sikere a tudomány és technika területén elért számos nagyszerű eredménynek köszönhető.

5.5.1 Kristálynövesztés

Számos más félvezetőanyaghoz hasonlóan a III. oszlop nitridjei sem léteznek természetes formában, ezért a kristályokat valamilyen kémiai reakcióval növeszteni kell. Legelterjedtebb növesztési módszerük a fémorganikus gőzfázisú epitaxia (MOVPE – fémorganikus kémiai gőzfázisú leválasztásnak (MOCVD) is nevezik) az eszközök – LED-ek és lézerek – kutatása és tömeggyártása tekintetében is.

Meg kell jegyezni, hogy a nitridek és a jelen fejezet korábbi részében említett III-V. oszlopbeli egyéb félvezetővegyületek közötti egyik legfontosabb különbség a GaN heteroepitaxiális növesztéséhez (azaz különböző hordozóanyagokon történő kristálynövesztéséhez) szüksége megfelelő hordozó hiánya. A GaAs, GaP és InP hordozókat fel lehet használni a III-V. és még a II-VI. oszlop legtöbb vegyületének epitaxiális növesztéséhez is. A nitrideknek azonban sajnos igen magas az olvadáspontjuk és a disszociális nyomásuk – GaN esetén ~2800 K és ~40 kbar -, ezért a tömbkristályokat nem lehet sztöchiometrikus olvadékokból növeszteni a szokásos Czochralski vagy Bridgman eljárásokkal [13,14].

^[13] Popovici G, Morkoç H, Noor Mohammed S (1998): Deposition and properties of group III nitrides by molecular beam epitaxy. In: Gil B (ed) Group III nitride semiconductor compounds: physics and applications, Oxford University Press, Oxford, p 19
[14] Porowski S, Grzegory I (1997): Growth of GaN single crystals under high nitrogen pressure. In: Pearton SJ (ed) GaN and related materials. Overseas, Amsterdam, p 295

Nemcsak, hogy nem áll rendelkezésre megfelelő méretben és elfogadható áron GaN szelet, a GaN-hez szorosan illeszkedő rácsszerkezetű egyéb más megfelelő hordozóanyag sincs. A GaN epitaxiális réteg tulajdonságait - a kristályorientációt, a hiba-sűrűséget, a deformációs és felületi morfológiát - nagymértékben a felhasznált hordozók tulajdonságai határozzák meg. A kereskedelemben kapható legtöbb GaN alapú LED-et zafír vagy szilikonkarbid (SiC) hordozón növesztik. A közelmúltban a nagy felületű Si-hordozók használata igen vonzóvá vált, mert a kiváló minőségű Si-lapkák nagy átmérőkben és alacsony áron állnak rendelkezésre [106]. Ráadásul az ilyen lapkák kompatibilisek az elektronikai iparban használt 6 hüvelykes és még nagyobb átmérőjű lapkák meglévő, bonyolult, automatizált feldolgozó gépsoraival.

Az eredeti hordozóanyag a zafir volt és maradt is a napjainkban legáltalánosabban használt hordozóanyag, de 16%-os rács-inkompatibilitást mutat a GaN-del. Ez olyan nagy, hogy a közvetlen epitaxiális növesztés próbálkozásai elkerülhetetlenül durva felületi morfológiákat és nagyon nagy diszlokációnak nevezett hibasűrűséget eredményeznek, amelyek a növekvő réteggel együtt megjelennek: az aktív InGaN kvantumkút-tartományon áthaladó ilyen diszlokációk tipikus sűrűsége 5 milliárd négyzetcentiméterenként (5x10⁹cm⁻²), amint az az 5.6 ábrán látható.

A zafíron a GaN-ben fellépő kiterjedt ("csavar, él, vegyes") TD diszlokációsűrűség csökkentésére irányuló növesztési technikák kifejlesztése jelentős javulásokat eredményezett. Az irodalomban számos olyan módszer található, amelyek többnyire egy alacsony hőmérsékleten kezelt nukleációs ("puffer") rétegre [15], szigetformálásra és az azt követő koaleszcenciára ("összefolyásra") vonatkoznak, amint azt Figge és munkatársai [16], illetve Kappers és munkatársai [17, 18] ismertették. Az 5.7 ábra egy SiNx közbenső réteghez használt TD-csökkentésre mutat be példát. A mechanizmus, amellyel a TD-t csökkenteni lehet, a következő: a vékony SiNx közbenső réteg egy olyan maszkot képez, amely véletlenszerűen eloszlott lyukakat tartalmaz – ezek segítségével kis, fazettált GaN szigetek formálódnak az újranövesztésen; a szigetek ferde oldalai segítségével a TD-k oldalirányban elhajlanak, és reakcióba lépnek más eloszlásokkal, hogy megsemmisüljenek és félhurkokat építsenek fel, ezzel megállítva felfelé irányuló terjedésüket, amint az az 5.7a. ábrán látható.

Transzmissziós elektronmikroszkópos felvétel



5.6 ábra – Zafir hordozón növesztett GaN diszlokációinak transzmissziós elektronmikroszkóppal (TEM) készített – fenyegetően nagy sűrűségét mutató – felvételei. A GaN és a (0001) zafir közötti rácsillesztetlenség 16%, ami tipikusan 5x10⁻⁹ cm² diszlokációsűrűségre növekszik a GaN-ben, ha nem alkalmazunk diszlokációcsökkentési módszereket.



5.7 ábra – (a) GaN magrétegre a GaN szigetek újranövesztését követően leválasztott (nyíllal jelölt) SiNx közbülső réteg transzmissziós elektronmikrószkóppal (TEM) készített képének keresztmetszete. A kép fényes vonalai fenyegető diszlokációk jelenlétére utalnak. (b) Gyenge sugárral készített, sötét mezejű (g = (11– 20) TEM felvétel, amely a szélt és a következő SiNx közbülső rétegekkel kevert fenyegető diszlokációkat, valamint a rétegek között a GaN "lassú" egybeolvadását mutatja.

Azt is megállapították, hogy a SiNx közbenső réteg tetején újranövesztett GaN növekedési feltételei erős hatással vannak a TD csökkenésére. Speciális, "lassú" koaleszcencia-módszer segítségével a magréteg 5x10⁹ cm⁻² TD értéke 5x10⁸ cm⁻²-re csökken, és az egymás után kialakított SiNx közbenső rétegek tovább csökkentik a TD sűrűséget 1x10⁸ cm⁻² értékre, amint az az 5.7b ábrán látható.

A diszlokációk nem sugárzó rekombinációs centrumokként ismertek [19], amelyek erősen elfojtják a fénykibocsátást. S valóban, ha a diszlokációsűrűség más félvezetőknél - például GaAs-nél - meghaladja az 1000/cm² körüli értéket, a fényt emittáló eszközök működése jelentősen romlik. A kereskedelemben kapható InGaN kék és fehér LED-ek nagy teljesítőképességet mutatnak annak ellenére, hogy az ilyen eszközök TD sűrűsége rendszerint a 10x108 cm⁻² tartományba esik. Annak az oka, hogy az InGaN LED-ek toleránsabbak a TD kiterjedt diszlokációsűrűségre mint a többi, III-V. oszlopbeli anyag, valószínűleg a töltéshordozók lokalizációs hatásainak tulajdoníthatók [20-26]. Az első befolyásolási tényező a monoréteg magassági interfész-lépcsői az InGaN kvantumkutakon. Mivel a kvantumkutak feszültségesek és a GaN-ben nagy a piezoelektromos hatás, a monoréteg interfészlépcsője további, körülbelül 2kBT töltéshordozó-csökkentő energiát hoz létre szobahőmérsékleten, ahol kB a Boltzmann-állandó és T a hőmérséklet. Ez elegendő az elektronok lokalizálásához. A legfrissebb háromdimenziós atom-próbavizsgálatok is megerősítették, hogy az InGaN "véletlen struktúrájú" ötvözet. A számítások azt mutatják, hogy a véletlen struktúrájú ötvözet-ingadozások nanométerszinten erősen helyhez kötik a lyukakat szobahőmérsékleten. Ezért a fenti két mechanizmus helyhez kötheti az elektronokat és a lyukakat is, lecsökkentve ezzel a diffúziót olyan fényt nem kibocsátó

[17] Kappers MJ, Datta R, Oliver RA, Rayment FDG, Vickers ME, Humphreys CJ (2007): Threading dislocation reduction in (0001) GaN thin films using SiNx interlayers, J Cryst Growth 300:70–74.

[18] Kappers MJ, Moram MA, Zhang Y, Vickers ME, Barber ZH, Humphreys CJ (2007): Interlayer methods for reducing the dislocation density in gallium nitride, Physica B 401–402:296–301.

[19] Cherns D, Henley SJ, Ponce FA (2001): Edge and screw dislocations as nonradiative centers in InGaN/GaN quantum well luminescence, Appl Phys Lett 78:2691–2693.

[20] Chichibu SF, Uedono A, Onuma T, Haskell BA, Chakraborty A, Koyama T, Fini PT, Keller S, Den-Baars SP, Speck JS, Mishra UK, Nakamura S, Yamaguchi S, Kamiyama S, Amano H, Akasaki I, Han J, Sota T (2006): Origin of defect-insensitive emission probability in In-containing (Al, In, Ga)N alloy semiconductors, Nat Mater 10:810–816.

[21] Graham DM, Soltani-Vala A, Dawson P, Smeeton TM, Barnard JS, Kappers MJ, Humphreys CJ, Thrush EJ (2005): Optical and microstructural studies of InGaN/GaN single-quantumwell structures, J Appl Phys 97:103508.

[22] Hammersley S, Badcock TJ, Watson-Parris D, Godfrey MJ, Dawson P, Kappers MJ, Humphreys CJ (2011): Study of efficiency droop and carrier localization in an InGaN/GaN quantum well structure. Phys Status Solidi C 8:2194–2196.

[23] Humphreys CJ (2007): Does in form in-rich clusters in InGaN quantum wells?, Philos Mag 87:1971–1982.

[24] Oliver RA, Bennett SE, Zhu T, Beesley DJ, Kappers MJ, Saxey DW, Cerezo A, Humphreys CJ (2010): Microstructural origins of localisation in InGaN quantum wells, J Phys D Appl Phys 43:354003.

[25] Smeeton TM, Kappers MJ, Barnard JS, Vickers ME, Humphreys CJ (2003): Electron-beaminduced strain within InGaN quantum wells: False indium "cluster" detection in the transmission electron micro-scope, Appl Phys Lett 83:5419–5421.

[26] Watson-Parris D, Godfrey MJ, Oliver RA, Dawson P, Galtrey MJ, Kappers MJ, Humphreys CJ (2010): Energy landscape and carrier wave-functions in InGaN/GaN quantum wells, Phys Status Solidi C 7:2255–2258.

^[15] Koleske DD, Coltrin ME, Cross KC, Mitchell CC, Allerman AA (2004): Understanding GaN nucleation layer evolution on sapphire, J Cryst Growth 273:86–99.

^[16] Figge S, Bottcher T, Einfeldt S, Hommel D (2000): In situ and ex situ evaluation of the film coalescence for GaN growth on GaN nucleation layers, J Cryst Growth 221:262–266.

hibákra, mint a kiterjedt diszlokációk. Érdemes megjegyezni, hogy az elektronokat és a lyukakat különböző mechanizmusok lokalizálják az InGaN kvantumkutakban. Noha a TD diszlokációsűrűség nem tűnik túlságosan károsnak az InGaN LED-eknél, a lézerdiódák és az AlGaN-alapú UV-sugárzók élettartama erős függést mutat a diszlokációk sűrűségétől. Ezenkívül a növesztési körülmények a nitrid anyagok számos mikrostrukturális tulajdonságaira, valamint a szennyezettségi szintekre és így a végső eszköztulajdonságokra is hatással vannak. Mindezek okán a kristálynövesztéssel kapcsolatos kutatás továbbra is releváns és fontos terület marad a nagy teljesítőképességű eszközök számára.

5.5.2 Belső elektromos erőtér

A nitridek általában hexagonális wurtzit (cink-szulfid) struktúrában kristályosodnak, amely nem centrálisan szimmetrikus, és bizonyos irányban (a c-tengely mentén) van egy egyedi vagy poláros tengelye. Mivel a kötés a II. és V. oszlop atomjai elektronegativitásának eltérése miatt részlegesen ionos, a kristályban a szimmetria hiánya miatt spontán polarizáció jön létre. Ráadásul a legtöbb nitrid eszköz feszített heteroátmenetet használ, például InGaN/ GaN struktúrát. Mivel az InGaN síkbeli rácsállandója nagyobb, mint a GaN-é, az InGaN réteg a GaN rétegre történő epitaxiális növesztése folyamán a c-tengelyre merőleges nyomófeszültségnek és vele párhuzamos húzófeszültségnek lesz kitéve. A c tengely mentén vagy arra merőlegesen alkalmazott feszültség a fém alrács belső eltolódásához vezet a nitrogén fém alrácsához képest, hatékonyan megváltoztatva ezzel az anyag polarizációját. Ez a feszültséghatás további hozzájárulást jelent az anyag polarizációjához. amit piezoelektromos komponensnek nevezünk és amely különösen fontos a feszített heterostruktúrák esetén.

Gyakorlatilag minden kereskedelmi GaNalapú LED-et a kristály c-tengelye mentén növesztenek. Mivel ez poláros irány, az InGaN kvantumkúton keresztül elektromos erőtér jön létre, amely a kvantumkút és a gát-anyag polarizációjának különbségéből adódik. Az elektromos erőtér megdönti a kvantumkút vezetési és vegyérték sávjait, ezzel elkülöníti az elektronokat és a lyukakat, és eltolja a kvantumkút emissziós hullámhosszát az alacsonyabb energiák irányába, amint azt az 5.8 ábra mutatja. Ezt kvantum-korlátozott Stark-hatásnak (QCSE) nevezzük.

Van néhány általános észrevétel a nitrid kvantumkutakkal kapcsolatos QCSE jelen-



5.8 ábra – Az InGaN / GaN kvantumkutakon kialakuló kvantum-korlátozott Stark-hatás (QCSE) vázlatos ábrája – fekete: QWI kvantumkút elektromos erőtér nélkül; kék: QWI kvantumkút elektromos erőtér esetén; piros: vastagabb QW2 kvantumkút elektromos erőtér esetén (Stark-effektus = az atom spektrumvonalainak felhasadása erős elektromos térben – A Szerk.)



5.9 ábra – A GaN alapvető poláros, nem poláros és félig poláros síkjainak vázlata. A QCSE hatást el kell kerülni nem poláros irány – pl. az [1–100] és [11–20] – mentén, vagy minimalizálni egy félig poláros – pl. a [11–22] – irány mentén történő növesztéssel

séggel kapcsolatosan: Elektromos erőtér jelenlétében az átmeneti energia alacsonyabb értékek felé tolódik el (ΔEg, QW-től ΔEg1 felé), és ez az eltolódás durván megegyezik az első elektron $\Delta Ee1$ és lyuk ΔEh1 szinteltolódásának összegével, ez az a lyuk-állapot, amely a legjobban hozzájárul a nagyobb tényleges tömege folytán; az elektronokat és a lyukakat a kvantumkúton keresztül kialakult elektromos erőtér elválasztja egymástól, ami az elektronok és lyukak hullámfüggvényeinek kisebb átlapolódását és ezzel hosszabb sugárzási élettartamot eredményez; a szélesebb kvantumkutak (QW2) a QCSE nyilvánvalóbb hatásait és a kvantumkúton keresztüli nagyobb potenciálesést ($\Delta EE2$) is mutatják. Elegendően széles kvantumkút esetén az emisszió kisebb energiájú lehet, mint magának a kvantumkút anyagának a tiltott sávja.

A belső elektromos erőtérnek – különösen a piezoelektromos erőtérnek – a kvantumkút rekombinációs viselkedésére a mechanikai feszültség folytán kifejtett hatását kísérletileg is megerősítették, és erről különböző III. oszlopbeli nitrid alapú heteroátmenetek esetén be is számoltak [27– 32]. A III. oszlopbeli nitrideken alapuló feszített kvantumkutaknál az emissziós energia vörös eltolódását és kisebb emiszsziós intenzitást találtak, ami a feszültség által indukált piezoelektromos erőtér jelentős befolyását erősíti meg. A töltéshordozó-injektálódás növekedésével azonban az emissziós csúcsnak a kék irányba történő eltolódását figyelte meg néhány kutató [33,34], valamint a QCSE csökkenéséhez való hozzájárulást is a töltéshordozóknak a kvantumkút erőtere általi szűrése folytán.

[27] Aumer ME, LeBoeuf SF, Bedair SM, Smith M, Lin JY, Jiang HX (2000): Effects of tensile and compressive strain on the luminescence properties of AlInGaN/InGaN quantum well structures, Appl Phys Lett 77:821-823.

[28] Aumer ME, LeBoeuf SF, Moody BF, Bedair SM, Nam K, Lin JY, Jiang HX (2002): Effects of tensile, compressive, and zero strain on localized states in AlInGaN/InGaN quantum-well structures, Appl Phys Lett 80:3099-3101.

[29] Aumer ME, LeBoeuf SF, Moody BF, Bedair SM (2001): Strain-induced piezoelectric field effects on light emission energy and intensity from AlInGaN/InGaN quantum wells. Appl Phys Lett 79:3803–3805.

[**30**] Leroux M, Grandjean N, Massies J, Gil B, Lefebvre P, Bigenwald P (1999): Barrier-width dependence of group-III nitrides quantum-well transition energies, Phys Rev B 60:1496-1499.

[31] McAleese C, Costa PMFJ, Graham DM, Xiu H, Barnard JS, Kappers MJ, Dawson P, Godfrey MJ, Humpherys CJ (2006): Electric fields in AlGaN/GaN quantum well structures, Phys Status Solidi B 243:1551-1559.

[**32**] Wetzel C, Takeuchi T, Amano H, Akasaki I (1999): Piezoelectric Franz–Keldysh effect in strained GaInN/GaN heterostructures. J Appl Phys 85:3786-3791.

Ezért a LED-struktúrákban a kvantumkutakon keresztül kialakuló elektromos erőteret nemcsak a polarizációs erőtér határozza meg, hanem a kvantumkút-tartományban kialakuló töltéshordozó-sűrűség és -eloszlás is befolyásolja. A töltéshordozók származhatnak (optikai vagy elektromos) töltéshordozó-injektálásból, valamint adalékolásból is – akár szándékolt dopolás, akár nem szándékos szennyeződések formájában.

A fenti fejtegetésből nyilvánvaló, hogy a QCSE nemkívánatos a nagy fényhasznosítású és jó színkonzisztenciájú LED-ek esetén. Az 5.9 ábrán láthatók a GaN fő poláros, nem-poláros és félig-poláros síkjai. A QCSE-nek elméletileg meg kellene szűnnie valamelyik nem-poláros - pl. az [1-100] és [11-20] - irányban történő növesztésnél, vagy minimalizálódnia kellene például a [11-22] félig-poláros irányú növesztés folytán. Ezért a nem-poláros és félig-poláros fényt emittáló struktúrák hatásfoka várhatóan nagyobb, mint a polárosoké. Azt találták azonban. hogy a hibasűrűség jelenleg sokkal nagyobb az ilyen irányokban növesztett GaN struktúráknál [35], hacsak drága, különálló nem-poláros vagy félig-poláros GaN struktúrákat nem használunk [36]. Ezenkívül az indium bevitele folytán az InGaN többszörös kvantum-kutak (MQW) nem-poláros irányban történő növesztése 2-3-szor lassúbb, mint a c-sík irányában ugyanolyan növesztési feltétel mellett [37]. A nempoláros LED-ek kimeneti teljesítménye is drámai módon csökkent, amikor az emissziós hullámhossz nagyobb volt 400 nm-nél. Ezért a kéknél nagyobb hullámhosszúságú LED-ek esetén a nem-poláros sík alkalmatlannak tekinthető, és a kék, sárga és vörös LED-ekhez a félig-poláros síkokat részesítik előnyben csökkentett belső elektromos erőtér mellett, de ismét csak a nagy hibasűrűség jelenti a problémát. A csökkentett belső elektromos erőtér potenciális előnyei ellenére a nem-poláros és a félig-poláros LED-ek még nincsenek kereskedelmi forgalomban alacsony általános teljesítőképességük és a drága különálló GaN hordozók igénye miatt.

5.5.3 p-típusú adalékolás

A III. oszlopba tartozó nitridek p-típusú adalékolása problematikus, ezért a p-típusú vezetőképesség megvalósítása egy másik nagy áttörés volt a nitrid alapú LED-ek fejlődéstörténetében. A szándékolt dopolás nélküli GaN rendszerint n-típusú vezetőképességet mutat; a kristálynövesztési módszerek fejlődésével azonban jelentősen sikerült csökkenteni ezt a háttér-szennye-



5.10 ábra – Lyuksűrűség GaN:Mg rétegekben – a Hall-effektust szekunder ion tömegspektrométerrel (SIMS) mérve a rétegek Mg-koncentrációjának függvényében (adatok: Obloh et al. [44])

zettségi szintet, ami lehetővé tette a kontrollálható p-típusú adalékolást [38]. Sokféle potenciális p-típusú adalékanyagot kipróbáltak, de ez idáig a magnézium tűnik a legsikeresebb adalékanyagnak a kis Al- és In-moltartalmú GaN, AlGaN és InGaN számára.

A magnézium-adalékolásnál két fontos probléma merül fel: (1) a fémorganikus gőzfázisú epitaxiás (MOVPE) és a hidrid gőzfázisú epitaxiás (HVPE) növesztési környezetekben a hidrogén jelenléte elektromosan inaktív Mg-H komplexek kialakulásával passzíválja a magnéziumot; (2) a magnézium a vegyértéksáv felett ~160-200 meV-tal, viszonylag mély akceptor-állapotokat alakít ki [39], így szobahőmérsékleten csak viszonylag kis részük aktiválódik, ezért a p-típusú GaN-nek kicsi lesz a vezetőképessége. Ebből az következik, hogy a lyukkoncentráció mindig több mint egy nagyságrenddel kisebb lesz a Mg koncentrációnál. Ezenkívül a magnéziummal erősen adalékolt GaN a donorszerű strukturális hibák kialakulása folytán önkompenzáció hatásának lesz kitéve [40].

Az első problémát 700°C feletti hőmérsékleten, N atmoszférában végzett hőkezeléssel [41,42], vagy elektronsugaras gerjesztéssel [43] – a passzivált Mg aktiválásával – lehet megoldani. Az adalékanyag aktiválására a hőkezelési módszer terjedt el, mivel egyszerű, megbízható és in-situ alkalmazható a MOVPE növesztő reaktorban. Ezzel szemben a második probléma, a mély akceptorszint és az önkompenzáció "veleszületett" tulajdonság, és ez a fő oka a lyukkoncentráció korlátozódásának.

Az 5.10 ábra a szabad lyukak koncentrációját mutatja szobahőmérsékleten MOVPE eljárással készült, Mg-mal adalékolt GaN esetén [44]. A lyukkoncentráció 3x10¹⁹ cm⁻³ Mg-koncentráció esetén eléri a 10¹⁸ cm⁻³ körüli maximális értékét, azután pedig a magnézium-adalékanyag további növelésével csökkeni kezd.

Nagyobb akceptoraktiválódás és kisebb elektromos ellenállás elérésére ígéretes

módszer az AlGaN/GaN szuperrácsok használata, ami periodikus oszcillációt idéz elő a vegyértéksáv szélén, lehetővé téve, hogy az akceptorok ionizálódjanak az AlGaN rétegek széles tiltott sávjában, ami a szomszédos GaN rétegekben lyuk-felhalmozódáshoz vezet, s ezzel általánosságban megnöveli a lyukkoncentrációt [45]. Az elvet az 5.11 ábra mutatja be, ahol látható, hogy a nitridekben a polarizációs mezők megnövelik a modulációt a sáv szélén, ami magas koncentrációjú szabad töltéshordozók párhuzamos síkjait eredményezi ott, ahol a Fermi-szint metszi a vegyértéksávot [46]. Ez az ilyen szuperrácsoknál 10¹⁸ cm⁻³ nagyságrendű átlagos térbeli lyukkoncentrációt eredményezhet [47,48]. Ugyanezt a módszert használva beszámoltak

[34] Riblet P, Hirayama H, Kinoshita A, Hirata A, Sugano T, Aoyagi Y (1999): Determination of photoluminescence mechanism in InGaN quantum wells, Appl Phys Lett 75:2241-2243.

[35] Johnston CF, Kappers MJ, Humphreys CJ (2009): Microstructural evolution of nonpolar (11–20) GaN grown on (1–102) sapphire using a 3D-2D method, J Appl Phys 105:073102.

[**36**] Zhong H, Tyagi A, Fellows N, Wu F, Chung RB, Saito M, Fujito K, Speck JS, DenBaars SP, Nakamura S (2007): High power and high efficiency blue light emitting diode on freestanding semipolar (10-1-1) bulk GaN substrate, Appl Phys Lett 90:233504.

[37] Yamada H, Iso K, Saito M, Masui H, Fujito K, DenBaars SP, Nakamura S (2008): Compositional dependence of nonpolar m-plane InxGa1-xN/GaN light emitting diodes, Appl Phys Express 1:041101.

[38] Nakamura S, Senoh M, Mukai T (1991): Highly P-typed Mg-doped GaN films grown with GaN buffer layers, Jpn J Appl Phys 30:L1708–L1711.

[39] Doverspike K, Pankove JI (1998): Doping in the III-nitrides, SEM SEMIMET 50:259–277

[40] Kaufmann U, Kunzer M, Maier M, Obloh H, Ramakrishnan A, Santic B, Schlotter P (1998): Nature of the 2.8 eV photoluminescence band in Mg doped GaN, Appl Phys Lett 72:1326–1328.

[41] Nakamura S, Iwasa N, Senoh M, Mukai T (1992): Hole compensation mechanism of P-type GaN films, Jpn J Appl Phys 31:1258–1266.

[42] Nakamura S, Mukai T, Senoh M, Isawa N (1992): Thermal annealing effects on P-type Mg-doped GaN films, Jpn J Appl Phys 31:L139–L142.

[43] Amano H, Kito M, Hiramatsu K, Akasaki I (1989): P-type conduction in Mg-doped GaN treated with low-energy electron beam irradiation (LEEBI), Jpn J Appl Phys 28:L2112–L2114.

[44]. Obloh H, Bachem KH, Kaufmann U, Kunzer M, Maier M, Ramakrishnan A, Schlotter P (1998): Selfcompensation in Mg doped p-type GaN grown by MOCVD, J Cryst Growth 195:270–273.

[45] Schubert EF, Greishaber W, Goepfert ID (1996): Enhancement of deep acceptor activation in semiconductors by superlattice doping, Appl Phys Lett 69:3737–3739.

[46] Kozodoy P, Hansen M, DenBaars SP, Mishra UK (1999): Enhanced Mg doping efficiency in Al0.2Ga0.8N/GaN superlattices, Appl Phys Lett 74:3681–3683.

^[33] Kuroda T, Tackeuchi A (2002): Influence of free carrier screening on the luminescence energy shift and carrier lifetime of InGaN quantum wells, J Appl Phys 92:3071-3074.

Al0.17Ga0.83N/Al0.36Ga0.64N szuperrácsban p-típusú vezetőképesség előállításáról is [49], és ez lesz kétségtelenül az általános módszer a mély UV-t sugárzó LED-eknél, ahol p-típusú AlGaN előállítása a szélesebb tiltott sávok miatt még problematikusabb.

Bár a p-típusú adalékolás fejlődése lehetővé tette a nagy hatásfokú félvezetőeszközök létrehozását, a GaN-alapú LED-eszközök lyukhordozó-koncentrációja még mindig körülbelül két nagyságrenddel kisebb, mint az elektronkoncentráció, ami nagy aszimmetrikus hordozóeloszlást eredményez az aktív tartományban. A GaN-nél és InN-del és AlN-del alkotott ötvözeteinél a p-típusú adalékolás az érdeklődés középpontjában maradt mind az alapkutatás, mind a technológiai aspektusok szintjén.

5.5.4 Zöld rés és hatásfok-esés

A fent említett kihívások ellenére a nitrid LED-ek teljesítőképessége tovább fejlődött, és az ibolyától zöldig terjedő spektrális tartományban emittáló eszközök már kereskedelmi forgalomba is kerültek. A legnagyobb hatásfokokat még mindig a kék és ibolya hullámhosszakon érték el, és a jelentős (mind akadémiai, mind ipari szintű) kutatási erőfeszítések ellenére a mély zöld irányában - "zöld rés"-nek nevezett - és az UV hullámhosszaknál jelentkező hirtelen teljesítőképesség-esés megmaradt (5.12 ábra). Egy másik fontos probléma az, hogy az InGaN alapú LED-ek hatásfoka csökken az áramsűrűség növelésével a "hatásfok-esés"-nek nevezett jelenség okán (5.13 ábra). A +zöld rés" és a "hatásfok-esés" megoldása jelenleg kulcsfontosságú téma mind az akadémiai, mind az ipari kutatás területén [12,50-56].

Az AlGaInP LED-eknél a 600 nm-nél rövidebb hullámhosszaknál fellépő kisebb hatásfok oka a direkt tiltott sávról indirektre való áttérés, amint azt az 5.1 ábra mutatja. A nitrid alapú LED-ek belső kvantumhatásfokát korlátozó tényezők összetettek és még nem eléggé ismertek. InGaN esetén a zöld spektrális tartományban adódó kisebb hatásfok oka a GaN és az InN közötti elegyíthetőségi résnek [57] és a nagyobb InN molfrakciók által kiváltott növekvő feszültség hatására létrejövő nagy polarizációs erőtereknek tulajdonítható.

A "hatásfok-esés" vélt lehetséges mechanizmusai az Auger-rekombináció [52,56], a nagy hibasűrűség [54,58], a töltéshordozó-szivárgás [59], a heterointerfészeknél a polarizáció folytán beépült elektromos erőterek [60,61], az elégtelen p-típusú vezetőképesség [62,63] és a nagy áramsű-



5. 11 ábra – Mg-mal adalékolt Al0.2Ga0.8N/GaN szuperrácsnak a spontán és a piezoelektromos polarizációs mezők figyelembevételével számított valenciasáv-diagramja. A szaggatott vonal a Fermienergiát mutatja, az üres körök a Mg-akceptor energiáját reprezentálják, a kitöltött körök pedig az ionizált formát. A növesztés iránya normál Gapolaritású anyag esetén balról jobbra értendő. (Adatok: Kozodoy et al. [46])



5.12 ábra – Kereskedelmi LED-eszközök"zöld rés" jelenséget mutató külső kvantumhatásfoka EL-lel 350 mA-en mérve (elektrolumineszcencia)



5.13 ábra – Kereskedelmi kék és zöld fényt kibocsátó LED-eszközök külső kvantumhatásfoka (EQE) és fényének színe EL-lel mérve különböző nyitóirányú áramok mellett. amely jól mutatja a nagyobb áramsűrűségeknél fellépő "hatásfok-esést".

rűségeknél fellépő töltéshordozó-eltolódás [64]. Az áramsűrűség – és ezzel a hatásfok-esés - csökkentésére egyetlen vastagabb kvantumkutat javasoltak a vékony kvantumkutak helyett aktív tartománynak [12]. Azt találták azonban, hogy a vastagabb InGaN kvantumkutak csak a 400 nm körüli hullámhossz-tartományban valósíthatók meg. A nagyobb hullámhosszakon emittáló LED-eknél az anyagminőség az alacsonyabb hőmérsékleteken történő növesztés és a nagyobb In-tartalom következtében gyorsan növekvő belső erőtér folytán romlik. Ezért a legtöbb kereskedelmi kék és zöld LED még mindig több vékony kvantumkutat használ aktív tartománynak.

[47] Kozodoy P, Smorchkova YP, Hansen M, Xing H, DenBaars SP, Mishra UK, Saxler AW, Perrin R, Mitchel WC (1999): Polarization-enhanced Mg doping of AlGaN/GaN superlattices, Appl Phys Lett 75:2444–2446.

[48] Yasan A, McClintock R, Darvish SR, Lin Z, Mi K, Kung P, Razeghi M (2002): Characteristics of high-quality p-type AlxGa1 xN/GaN superlattices. Appl Phys Lett 80:2108–2110.

[49] Kim JK, Waldron EL, Li YL, Gessmann T, Schubert EF, Jang HW, Lee JL (2004): P-type conductivity in bulk AlxGa1xN and AlxGa1xN/ AlyGa1yN superlattices with average Al mole fraction >20%, Appl Phys Lett 84:3310–3312

[50] Cho J, Schubert EF, Kim JK (2013): Efficiency droop in light-emitting diodes: challenges and countermeasures, Laser Photonics Rev 7(3):408–421.
[51] Galler B, Lugauer HJ, Binder M, Hollweck R, Folwill Y, Nirschl A, Gomez-Iglesias A, Hahn B, Wagner J, Sabathil M (2013): Experimental determination of the dominant type of Auger recombination in InGaN quantum wells, Appl Phys Express

6:112101. [52] Kioupakis E, Rinke P, Delaney KT, Van de Walle CG (2011): Indirect Auger recombination as a cause of efficiency droop in nitride light-emitting

diodes, Appl Phys Lett 98:161107. [53] Meyaard DS, Lin GB, Cho J, Schubert EF, Shim H, Han SH, Kim MH, Sone C, Kim YS (2013): Identifying the cause of the efficiency droop in GaInN light-emitting diodes by correlating the onset of high injection with the onset of the efficiency droop, Appl Phys Lett 102:251114.

[54] Monemar B, Sernelius BE (2007): Defect related issues in the "current roll-off" in InGaN based light emitting diodes, Appl Phys Lett 91:181103.

[55] Rozhansky IV, Zakheim DA (2006): Analysis of the causes of the decrease in the electroluminescence efficiency of AlGaInN light-emitting-diode heterostructures at high pumping density, Semiconductors 40:839–845.

[56] Shen YC, Mueller GO, Watanabe S, Gardner NF, Munkholm A, Krames MR (2007): Auger recombination in InGaN measured by photoluminescence, Appl Phys Lett 91:141101.

[57] El-Masry NA, Piner EL, Liu SX, Bedair SM (1998): Phase separation in InGaN grown by metalorganic chemical vapor deposition, Appl Phys Lett 72:40-42.

[58] Yang Y, Cao XA, Yan CH (2009): Rapid efficiency roll-off in high-quality green lightemitting diodes on freestanding GaN substrates, Appl Phys Lett 94:041117.

[59] Schubert MF, Xu JR, Kim JK, Schubert EF, Kim MH, Yoon SK, Lee SM, Sone CL, Sakong T, Park YJ (2008): Polarization-matched GaInN/AlGaInN multiquantum-well light-emitting diodes with reduced efficiency droop, Appl Phys Lett 93:041102.

[60] Iso K, Yamada H, Hirasawa H, Fellows N, Saito M, Fujito K, DenBaars SP, Speck JS, Nakamura S (2007): High brightness blue InGaN/GaN light emitting diode on nonpolar m-plane bulk GaN substrate, Jpn J Appl Phys 46:L960–L962.

[61] Xu JR, Schubert MF, Noemaun AN, Zhu D, Kim JK, Schubert EF, Kim MH, Chung HJ, Yoon S, Sone C, Park Y (2009): Reduction in efficiency droop, forward voltage, ideality factor, and wavelength shift in polarization-matched GaInN/GaInN multi-quantum-well lightemitting diodes, Appl Phys Lett 94: 011113.

[62] Kim MH, Schubert MF, Dai Q, Kim JK, Schubert EF, Piprek J, Park Y (2007): Origin of efficiency droop in GaN-based light-emitting diodes, Appl Phys Lett 91:183507.

[63] Xie JQ, Ni XF, Fan Q, Shimada R, Özgür Ü, Morkoç H (2008): On the efficiency droop in InGaN multiple quantum well blue light emitting diodes and its reduction with p-doped quantum well barriers, Appl Phys Lett 93:121107.

5.5.5 Chip-konstrukció

A kristálynövesztéssel, p-típusú adalékolással, belső erőterekkel és a hatásfokeséssel kapcsolatos fenti fejtegetések főként arra koncentráltak, hogy hogyan lehet a GaN-alapú LED-ek belső hatásfokát az anyagnövesztés és a struktúrakialakítás optimalizálásával növelni. A fénykeltés növelése az aktív tartományban azonban nem elég a hatékony LED-eszközök előállításához, mivel teljes hatásfokukat számos összetevő határozza meg, amint arról a korábbiakban már szóltunk. A chip-konstrukció fontos kutatási terület, amely a nagyobb fénykivonáshoz a belső visszaverődések csökkentésére és az egyforma áram-(főként lyuk-)injektálás biztosítására irányul. Az évek során kidolgozott néhány chip-konstrukció vázlatos rajzát az 5.24 ábra mutatja.

A p-típusú tartomány az n-típusúhoz képest nagy ellenállású és korlátozott vastagságú. Az áram-szétterülési probléma leküzdésére eredetileg egy félig-áteresztő NiAu kontaktust választottak le a hagyományos alakú, p-típusú GaN LED-chip fölé [66]. Ez a módszer azonban jelentős veszteséggel járt, amikor az emittált fény áthaladt a p-kontaktuson. Később kidolgozták a "flip-chip" (FC) megoldást, ahol a LED-chipet megfordították, és a fény így a GaN n-típusú oldalán távozik. Ennél a módszernél a NiAu kontaktust egy rendszerint ezüstöt tartalmazó, vastag és reflektáló tulajdonsággal rendelkező kontaktussal helyettesítették a kibocsátott fénynek a p-típusú réteg oldalára történő visszatükrözéséhez [67]. A belső tükröződési probléma leküzdésére a vékonyrétegű flip-chip (TFFC) LED-konstrukciónál a zafír hordozót lézerrel lépcsőzetesre alakították ki és durvították az n-típusú GaN réteget -2006-ra 80%-os fénykivonási hatásfokot érve így el [68]. Kifejlesztettek egy hasonló, függőleges vékonyrétegű (VTF) eszközt, amely 75%-os becsült fénykivonási hatásfokot ért el [69]. Az elmúlt években igen népszerűek lettek a mintázott zafír hordozók a jobb anyagminőség és a könnyű fénykivonás okán. A mintázott zafír hordozókat indium-ón-oxid (ITO) áramterítő réteggel kombinálva e PSS-ITO módszerre 88%-os fénykivonási hatásfokot becsültek [70].

A fenti módszerek mindegyike főként a LED-chip tetejéről vagy aljáról vonja ki az emittált fényt. Ha tömb GaN hordozót használunk, a LED-ek oldalfalai is felhasználhatók a fény egy részének kivonására a geometriai kialakítású elemen keresztül, amint azt az 5.15 ábra mutatja.



5.14 ábra – Különböző GaN alapú LED-chipkonstrukciók vázlatos keresztmetszete: (a) Hagyományos chip; (b) Flip-chip (FC); (c) Függőleges vékonyréteg (VTF); (d) Vékonyrétegű flip-chip (TFFC); (e) Mintázott zafir hordozó ITO kontaktussal kombinálva (PSS-ITO); (f) GaN hordozós nagy kiterjedésű LED-chipek (Forrás: Nakamura és Krames [65])

Ezekkel a nagy térfogatú LED-ekkel potenciálisan még nagyobb fénykivonási hatásfok érhető el, mint a modellezésen alapuló vékonyrétegű LED-ekkel [71]. Napjainkban a nagyteljesítményű InGaN alapú TFFC LED-ekkel 85%-ot meghaladó fénykivonási hatásfokot képesek elérni [12]. Ha hordozóként GaNet használunk, a fénykivonási hatásfok a 90%-ot is elérheti.

5.5.6 Fehér fény előállítása LED-ekkel

Amíg a LED-ek egyetlen szűk hullámhossz-tartományba eső fényt bocsátanak ki, az alkalmazások óriási többségéhez fehér fényre van szükség – ideértve a nagy LCD megjelenítők LED-es háttérvilágítását és az általános otthoni és irodavilágítást is. A fehér fény sok szín (hullámhossz) keveréke. LED-ekkel történő előállításához két fő módszer létezik, a fényporos és az RGB, amint az az 5.16 ábrán látható.

Az első kereskedelmi forgalomban kapható LED 460 nm-es kék fényt emittáló InGaN chipen alapult, amely cériummal adalékolt ittrium-alumínium-garnet (YAG) fényporréteggel volt bevonva a kék fény egy részének sárgává történő átalakításához [72]. Majdnem valamennyi ma eladott fehér LED ezzel a módszerrel készül. **[64]** Hammersley S, Watson-Parris D, Dawson P, Godfrey MJ, Badcock TJ, Kappers MJ, McAleese C, Oliver RA, Humphreys CJ (2012): The consequences of high injected carrier densities on carrier localization and efficiency droop in InGaN/GaN quantum well structures, J Appl Phys 111:083512.

[65] Nakamura S, Krames MR (2013): History of gallium-nitride-based light-emitting diodes for illumination, Proc IEEE 101(10):2211–2220.

[66] Nakamura S, Mukai T, Senoh M (1994): Candela-class high-brightness InGaN/AlGaN doubleheterostructure blue-light-emitting diodes, Appl Phys Lett 64:1687-1689.

[67] Steigerwald DA, Bhat JC, Collins D, Fletcher RM, Holcomb MO, Ludowise MJ, Martin PS, Rudaz SL (2002): Illumination with solid state lighting technology, IEEE J Sel Top Quantum Electron 8(2):310-320.

[68] Krames MR, Shchekin OB, Mueller-Mach R, Mueller GO, Zhou L, Harbers G, Craford MG (2007) Status and future of high-power light-emitting diodes for solid-state lighting. IEEE J Disp Technol 3(2):160–175.

[69] Fujii T, Gao Y, Sharma R, Hu EL, DenBaars SP, Nakamura S (2004) Increase in the extraction efficiency of GaN-based light-emitting diodes via surface roughening. Appl Phys Lett 84:855–857.

[70] Narukawa Y, Ichikawa M, Sanga D, Sano M, Mukai T (2010) White light emitting diodes with super-high luminous efficacy. J Phys D Appl Phys 43:354002.

[71] David A, Hurni CA, Aldaz RI, Cich MJ, Ellis B, Huang K, Steranka FM, Krames MR (2014) High light extraction efficiency in bulk-GaN based volumetric violet light-emitting diodes. Appl Phys Lett 105:231111.



5.15 ábra – (a) Gallium-nitriden kialakított, háromszög alakú, durvított felületű és oldalú gallium-nitrid (GaN-on-GaN) LED-chip pásztázó elektronmikroszkóppal készített felvétele; (b) Megfelelő eszközgeometria. A kockaszerű alakokkal szemben ennél a geometriánál a fény nem csapdázódik a chip belsejében a teljes belső visszaverődések hatására. (Utánnyomás David et al. [71] engedélyével, Copyright 2014, AIP

A fényporréteg elegendően vékony ahhoz, hogy a kék fény egy része képes legyen áthaladni rajta, így a kék és sárga fény "hideg fehér" fényt állít elő.

Ez tökéletes sokféle alkalmazás számára (megjelenítőkhöz, személygépkocsikhoz, autóbuszokhoz, jachtokhoz és mobiltelefonok háttérvilágításához), de a fény minősége valószínűleg nem elég jó lakásvilágításhoz, ahová némi vöröset tartalmazó, melegebb fehér fényre van szükség. "Meleg fehér" fény előállításához általában vörös fényporokat adalékolnak a LED-ekbe [73].

Mivel a kék fény felhasználásával gerjesztett meglévő vörös fényporokkal elérhető hatásfok sokkal kisebb, mint UV-hez közeli fény alkalmazása esetén, a "meleg fehér" fény előállításához jobb módszer UV-hez közeli fényt emittáló, valamint vörös, zöld és kék LED, vagy több színes fénypor használata. Vastag fényporrétegeket lehetne használni úgy, hogy a LED-ből az UV-hez közeli fény ne továbbítódjon nagyon hasonlóan ahhoz, ahogy a lineáris és kompakt fénycsövek fényporbevonata akadályozza meg az UV-fény átjutását. E módszer hátránya az UV-hez közeli foton kisebb energiájú, látható fotonná való átalakításánál fellépő nagy belső energiaveszteség.

A fehér fény előállításának alternatív módszere a vörös, zöld és kék (RGB) LED-ek fényének összekeverése anélkül, hogy fényporokat használnánk, ami potenciálisan a leghatékonyabb. Ehhez a módszerhez azonban három lapvető probléma kapcsolódik. Az első az, hogy a zöld LED-ek hatásfoka jóval kisebb, mint a vörös és kék LED-eké olyan okok miatt, amelyeket még nem sikerült tisztázni (ezt nevezik a korábbiakban ismertetett "zöld rés" problémának). Ezért e módszer teljes hatásfokát a zöld alacsony hatásfoka korlátozza. A második az, hogy a vörös, zöld és kék LED-ek hatásfoka különböző mértékben változik az idő múlásával. Ezért, ha



5.16 ábra – Fehér fény fényporos módszerrel (kék / UV LED-ek + fényporok), illetve RGB módszerrel (vörös + zöld + kék LED-ekkel) történő előállítása



5.17 ábra – A nagyteljesítményű LED-csomagokra kifejlesztett megoldások széles választéka (Képek forrása: Philips Lumileds, Osram, Cree és Luminus)

kezdetben igen jó minőségű fehér fényt is sikerül előállítani, annak minősége idővel észrevehetően romolhat. Ez a folyamat azonban lassú, és automatikus visszacsatolással elektronikusan korrigálható. A harmadik probléma pedig az, hogy a LEDek emissziós csúcsai keskenyebbek a legtöbb fényporénál, ezért a vörös + zöld + kék LED-ek gyengébb színvisszaadást produkálnak a fényporok használatával elérhetőnél. Ezt a problémát minimalizálni lehet a LED emissziós hullámhosszainak gondos megválasztásával, és természetesen háromnál több színes LED-et lehet felhasználni a látható spektrum jobb lefedése érdekében. A gyakorlatban négyféle - vörös, sárga, zöld és kék – LED használata jó színvisszaadást eredményezhet - bár megnövekedett bonyolultság ellenében.

5.5.7 A LED-ek tokozása (csomagolása)

A LED-ek "tokozása" biztosítja és védi a LED-chipeket az elektrosztatikus kisülések, a nedvesség, a magas hőmérsékletek és a kémiai oxidáció okozta károsodásokkal szemben. A LED-csomag tervezésekor az optikai kontrollal, a hűtéssel, a megbízhatósággal és a költséggel kapcsolatos kérdéseket egyaránt számításba kell venni. A tokozás fő komponensei a következők: a LED-chip/elem, az elektródák (anód és katód), a LED-chipet az elektródákkal összekötő (bondoló)huzal, a LED-elem által keltett hő eltávolítására szolgáló hűtőborda, a fehér fény előállításához szükséges fénypor-bevonat és a fénynyaláb irányítását végző primer lencse.

Az évek során számos megoldást fejlesztettek ki a nagyteljesítményű LED-csomagokhoz, amint azt az 5.17 ábra mutatja – az 1-2W bemeneti teljesítményű egyetlen nagy elemet tartalmazótól, a közvetlenül a hordozón kialakított (COB) megoldáson keresztül a "Jumbo-elem"-ig, amely max. 94W bemeneti teljesítménnyel 10 000 lmnél nagyobb fényáramot szolgáltat egyetlen LED-csomagból.

Az alkalmazástól függően különböző méretű és teljesítményű LED-csomagokra lehet szükség. A LED-tokozás egyik érdekes irányzata a chip-alapú tokozástól a lapkaszintűre való áttérés, amelynek nagyobb a csomagolási sűrűsége, könnyen beépíthető áramköri panelekbe, nagyobb az áramsűrűsége és nagyobb a megbízhatósága.

^[72] Schlotter P, Schmidt R, Schneider J (1997) Luminescence conversion of blue light emitting diodes. Appl Phys A 64(4):417–418.

^[73] Mueller-Mach R, Mueller GO, Krames MR, Trottier T (2002) High-power phosphorconverted light-emitting diodes based on III-nitrides. IEEE J Sel Top Quantum Electron 8(2):339-345.

4 A 2019. évi Lumen világítástechnikai díjjal



kitüntetett alkotások

(Forrás: https://iesnyc.org, 2019.jún.14.)

2019. június 13-án a Világítástervezők Egyesületének New Yorki Szekciója (IESNYC) a Chelsea Piers 60-ban megrendezett 51. Lumen-gálán bejelentette a 2019. évi Lumen világítástechnikai díjak nyerteseit. Az IESNYC a Lumen világítástechnikai versenyét 1968-ban indította el. Célja: nyilvános elismerést nyújtani azoknak a világítástechnikával foglalkozó szakembereknek, akiknek kivételes szakértelme, ötletessége és eredetisége a világítástervezés terén kiemelkedik a világ leginnovatívabb világítási projektjei közül.

"Kiválósági díj"-ban (Award of Excellence) részesült alkotások

A Louvre Abu Dhabi világítása, Abu Dhabi, Egyesült Arab Emirátusok Világítástervezés: Chris Coulter, Gabe Guilliams, és David Smith – BuroHappold Engineering Fotó: Thomas Drouault, Roland Halbe, Creative Family Shutterstock.com, Chris Coulter, Danica O. Kus, Mohamed Somji

(A projekt a 2019. évi Angliai Világítástervezési Versenyen "Az év legjobb napfény-világítási projektje" címet nyerte el. Részletesen lásd a HOLUX Hírek 191. számában. – A Szerk.)

A Gateway Arch-i Múzeum világítása, St. Louis, Missouri

Világítástervezés: Suzan Tillotson, Ellen Sears és Katherine Lindsay – Tillotson Design Associates Tájképvilágítás-tervező: Randy Burkett Lighting Design; Fotó: Nic Lehoux, Sam Fentress

A tervezőcsapat nehéz feladatot kapott a zavartalan napfényben fürdő *Gateway Arch park* és az új múzeumi toldalék föld alatti szintjei közötti átmenet zavartalan kialakításának igényével.

A rendkívül jól megvilágított belső felületek csökkentik a napfény kontrasztját, és a látogatókat fokozatosan csábítják utazásra a múzeum belseje felé. Éjszaka az új bejárati fények egymásutánja központi jelzőfényként hat – az ívelt homlokzat fénycsíkjai szinte vonzzák a látogatókat a ragyogó fényben úszó múzeumba. Az ívelt, "háromsodronyos" fal gyűrűbe fogja a külső plázát, és folytatódik a belső, előtetős bejárat felé, amelyet lágyan világítanak meg a süllyesztett vályúba szerelt LED-es falmosók felfelé irányított fényei és orientálják este a múzeumot látogatókat és az onnan távozókat.

(A Gateway Arch egy 192 méter magas, rozsdamentes acélból készült, ív alakú emlékmű a Missouri-beli St. Louisban, amelyet az Egyesült Államok nyugati terjeszkedésének emlékére emeltek 1965-ben, s azóta a város egyfajta szimbóluma lett. – A Szerk.)







Belül indirekt megvilágítást biztosító alumíniumcsöveket tartalmazó mennyezeti panelt alakítottak ki. Egyes csövekben gondosan pozícionált és irányított LED-es fénycsíkok akadályozzák meg, hogy sötét zónák alakuljanak ki a mennyezeti struktúrában. A fehérre festett függőleges felületek és a gerendázat alsó oldalai a csöveken keresztül lefelé verik vissza a fényt, ami az egész mennyezeti síknak állandó ragyogást kölcsönöz. Az eredmény: igazi felemelő élmény az egész előcsarnokban és a kétszeres magasságú kiállítási terekben - látható fényforrások nélkül. Az állítható fehér fényű LED-ek és a gondos vezérlés a nappal és az éjszaka között csodaszép ármenetet tesznek lehetővé.

A Claus Porto New York világítása,

New York, NY Világítástervezés: Alina Ainza, Ruben Gonzalez és Ryoko Nakamura – LOOP Lighting Fotó: Eric Petschek

A 131 éves portugál szappan- és parfűmház első nemzetközi butikjaként ez az áruház a vállalat gazdag múltját és "élénk jövő"-jét ünnepli. A portugál parafából készült, bonyolult, 12,8 m hosszú, szabadon álló, ívelt árkád a portugál építészet és a finom kivitelezés előtt tiszteleg. A boltozat megvilágítása merész, de kiegyensúlyozott megoldást igényelt a márka ikonikus csomagolásának és az 1500 db burkoló parafa fazettának a kiemeléséhez. Ragyogó fény-gerinc fut végig a boltív közepén: egyfajta moduláris függeszték, háromszög alakú profillal, amely a parafa gyémánt-mintázatára utal. A felfüggesztési pontok tökéletesen rejtettek. A kirakati fülkéket felülről egyedi, élvilágítós akril panelek világítják meg, amelyek látható szerelvények nélküli, mágneses rögzítésűek. A hátsó fal függőleges mélyedéseibe rejtett lineáris lámpatestek "fény az alagút végén" hatást keltenek, szemünket végigvezetve az egész téren. A beépített világítási elemek animálják az architektúra összetett, de a forma, a szerkezet és a funkció őszinte kifejezését - áthidalva ezzel az üzlet és a szobor fogalma közötti szakadékot. A sikerhez egyaránt fontos volt a sok egyedi lámpatest - amelyek precízen illeszkednek az előre gyártott parafa elemekbe - és a teljes csapat összehangolt munkája.



"Tehetség és érthető büszkeség tükröződött a csapat minden tagjában – az építésztől és a szerkezet legyártóitól kezdve, a parafából készült anyagok készítőin keresztül a villanyszerelőkig –, akik miatt öröm és siker volt részt venni ebben a projektben Igazi megtiszteltetés volt munkálkodni ebben a kicsiny, de hatásos térben." – Alina Ainza, LOOP Lighting.

HOLUX Kft. 1135 Budapest, Béke u. 51-55.HOLUX Központ és Mérnökiroda Tel.: (06 1) 450 2700 Fax: (06 1) 450 2710HOLUX Vevőszolgálat Tel.: (06 1) 450 2727 Fax: (06 1) 450 2710HOLUX Üzletház Tel.: (06 1) 450 2718 Fax: (06 1) 320 3258HOLUX Fényszaküzlet Körmend Tel.: (06 694) 594 315 Fax: (06 94) 594 316HOLUX Fényszaküzlet Nyíregyháza Tel.: (06 42) 438 345 Fax: (06 42) 596 479HOLUX Fényszaküzlet Szeged Tel.: (06 62) 426 819 Fax: (06 62) 426 702www.holux.huwww.fenyaruhaz.hue-mail: hoso@holux.hu





A MEE Világítástechnikai Társaság

tagja

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.