

# LED-technológián alapuló szilárdtest-világítás

(Forrás: [https://www.researchgate.net/publication/311639127\\_Solid-State\\_Lighting\\_Based\\_on\\_Light\\_Emitting\\_Diode\\_Technology](https://www.researchgate.net/publication/311639127_Solid-State_Lighting_Based_on_Light_Emitting_Diode_Technology), Dandan Zhu and Colin J. Humphreys, 2016; Fordította és szerkesztette: Surguta László)

Jelen tanulmány a szerzők *Optics in Our Time* című könyve szabadon felhasználható – a világítástechnika szempontjából legfontosabbnak tűnő – 5. fejezetének lényegében változtatás nélküli magyar nyelvű feldolgozása, az ábrák és táblázatok számozásán sem változtattuk. – A Szerk.

## ÖSSZEFOGLALÁS, JOGI NYILATKOZAT

A LED-alapú szilárdtest-világítás mindennapi életünkhöz kiváló minőségű, energiahatékony fényforrást ígér. A fényhasznosítás és a költségsökkentés 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 egészségesebb és hatékonyabbá tehet bennünket. Ezenkívül intelligens is és összekapcsolható épületfelületi 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 licencre, 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 szervesetlen 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-

Év	Szerzők	Leírás
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 munkatársai [102]	Beszámoló az első GaN alapú kék fém-szigetelő-félvezető felépítésű LED-ről.
1986	Amano és munkatársai [79]	Jó felületi morfológiával és kristályszerkezettel rendelkező, hajszállrepedésmentes GaN rétegeket sikerült készíteni úgy, hogy a GaN növesztés előtt a zafirra alacsony hőmérsékleten vékony AlN pufferréteget növesztettek.
1989	Amano és munkatársai [43]	Amano, Akasaki és munkatársai kimutatták, hogy egy letapogató elektronmikroszkópban 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 munkatársai [38, 94]	Nakamura és munkatársai kimutatták, hogy ha a fő GaN 1000 °C körüli hőmérsékleten történő növesztése előtt alacsony (~500 °C) hőmérsékleten egy kb. 20nm vastagságú GaN pufferréteget választanak le, ez is felhasználható volna egyenletes rétegek zafirra történő növesztésére – beleértve a jó elektromos vezetőképességgel rendelkező p-típusú anyagot is.
1992	Nakamura és munkatársai [42]	Mg-mal adalékolt GaN termikus aktiválása p-típusú vezetőképesség elérésére.
1993	Nakamura és munkatársai [97]	Kék és ibolya szint kibocsátó kettős heterostrukturájú (DH) LED-eket sikerült előállítani.
1993	Nakamura és munkatársai [2]	Nakamura egy 1993. november 12-én tartott sajtókonferencián bejelentette az első nagy fényű kék LED előállítását.
1995	Nakamura és munkatársai [95]	InGaN kvantumkutas LED-ek készültek.
1997	Nakamura és munkatársai [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 szervesetlen anyagokat (GaAsP), jóllehet a kibocsátott fény olyan kicsi volt, hogy sötét szobában is alig lehetett észlelni (összehasonlításként: Edison első izzólámpájának fényhasznosítása tízszer akkora volt). Azóta a GaP és GaAsP fényhasznosítása az 1960-as 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 gallium-nitrid (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 közlekedési jelzőlámpákban, nagy méretű kültéri megjelenítőknél, repülőgépek, személygépkocsik és autóbuszok beltéri és kültéri világításánál, zseblámpákban, valamint mobiltelefonok és folyadékkristályos kijelzők háttérvilágításához. Az utóbbi évtizedekben a teljesítményképesség és a költségcsökkentés terén bekövetkezett fejlődés hatására a szilárdtest-világítás az izzólámpák és a fénycsövek reális helyettesítőjévé

[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.

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

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 CO<sub>2</sub>-csökkentési lehetőséggel; (2) igen sokoldalú fényforrás számos kontrollálható tulajdonsággal – ide tartozik 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 feltalálói, Isamu Akasaki, 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), lézerdiodák 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 a sugárzási folyamat fellépése adott időintervallumban kevésbé valószínű, ami lehetővé teszi, hogy sugárzással nem járó folyamatok is hatáson 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 arsenidek 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 AlN-től az InN-ig – az elektromágneses spektrum mély ultrabolyától infravörösig terjedő széles tartományát lefedő tiltottsáv-energiákkal. Ezért a III. oszlopba tartozó nitridek (GaN és Al-mal és In-mal alkotott ötvözei) különösen alkalmasak LED-ek előállítására.

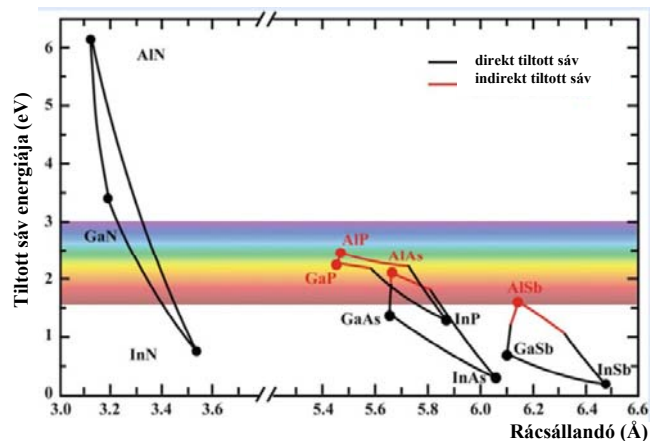
Az InGaN ötvözet felhasználásával el lehet érni a kék/zöld és az UV-közeli spektrális tartományokat, ezért jelenleg a nitridek fő

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 lézerdiodák [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 fényérzékeny 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 alkalmaznak 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.



5.1 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 energiatarományt is feltüntettük.

## 5.3 LED-alapok

A legegyszerűbb LED-struktúra egy pn-átmenet, amely egy n-típusú adalékolt félvezetőanyaghoz csatlakoztatott p-típusú 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-

[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.

[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 In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>N 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.

jában szabadul fel.

A nagy fényhasznosításhoz a két, különböző tiltott sávval rendelkező félvezető-anyagból álló heteroátmenetet általában előnyben részesítik az egyetlen félvezető-anyagból felépített homoátmenettel szemben a töltéshordozóknak az 5.2c ábrán látható jobb „bezárasa” 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 kvantumkutat egy alacsonyabb tiltott sávú anyagból (pl. InGaN-ből) készült igen vékony (néhány nm vastagságú) réteget tartalmaznak nagyobb tiltott sávú (pl. GaN) potenciálgáták között (l. az 5.3 ábrát). A kvantumkút aktív tartománya az elektron- és lyukinjekcióhoz két vastagabb – n-, illetve p-típusú 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.

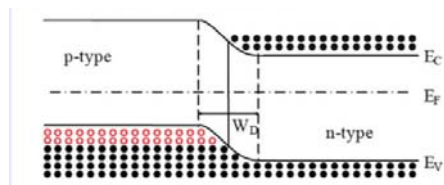
#### 5.4 A LED-es lámpatestek gyártása

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 zafírra, SiC-ra vagy GaN-e. Ezt rendszerint fémorganikus gőzfázisú epitaxiának (MOVPE) nevezett kristálynövesztési eljárással végzik fűtött kamrában vagy reaktorban.

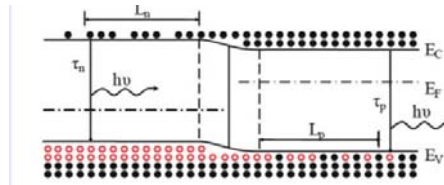
A leválasztás után ezekből az epitaxiális lapkákból készülnek a LED-chip konstrukciójának megfelelően kialakított LED-eszközök. A folyamat rendszerint több lépésből áll – ilyenek a lapka huzalozásának (kötéseinek), valamint az n- és p-típusú kontaktusok mintázatának felvétele, a maratás, fémezés és a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

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

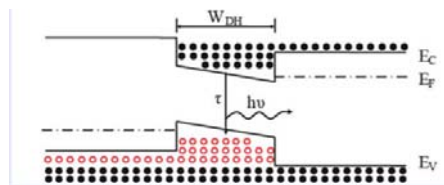
a) Egy-átmenetes struktúra nulla feszültség esetén



b) Egy-átmenetes struktúra nyitófeszültség esetén



c) Két-átmenetes struktúra nyitófeszültség esetén



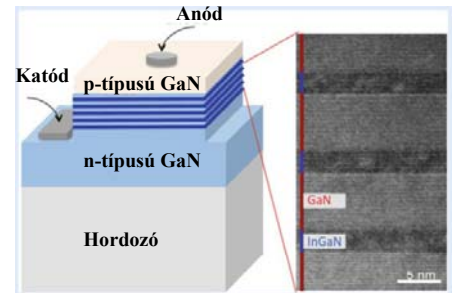
5.2 ábra – Homo(egy)-pn-átmenetes struktúra a) nyitófeszültség nélkül és b) nyitófeszültség esetén, illetve c) hetero(két)-pn-átmenetes struktúra nyitófeszültség esetén.  $E_C$ ,  $E_F$  és  $E_n$  a vezetési, a Fermi- és a vegyértéksáv energiája. A kitöltött és az üres körök az elektronokat, illetve a lyukakat reprezentálják. Az egy-pn-átmenetes rendszernél a töltéshordozók általában az  $L_n$  és  $L_p$  diffúziós hosszak fölött diffundálnak 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 ( $\eta_{IQE}$ )
2. a chipből való fénykivonás hatásfoka ( $\eta_{LEC}$ )
3. elektromos hatásfok ( $\eta_{EE}$ )
4. a fénypor átalakítási hatásfoka ( $\eta_{conv}$ )
5. a LED-csomagból való fénykivonás hatásfoka ( $\eta_{LEP}$ )

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 vázlatja GaN potenciálgátakkal elválasztott három InGaN kvantumkút nagy felbontású transzmissziós elektronmikroszkóppal készített interferenciasávok 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:  $n \sim 2.4$ ; InGaP:  $n \sim 3.5$ ), 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. Különböző 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 LED-eszközök 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 kislülésével, 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.



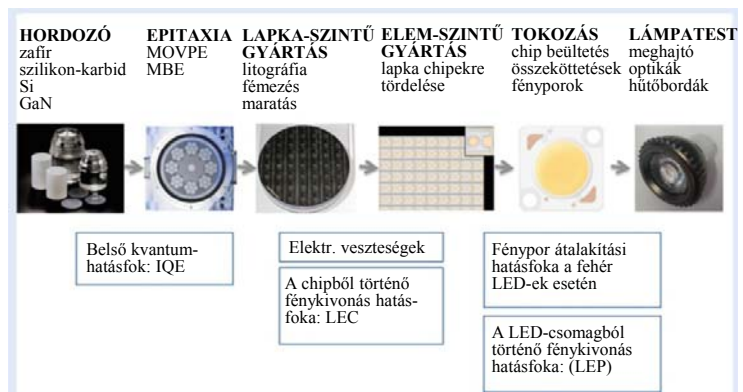
LED-csomag vázlatos felépítése, az 5.5c ábrán pedig egy kereskedelmi forgalomba került fehér LED-csomag képe látható. A LED-csomag fénykivonási hatásfoka 95%. A fehér fény előállításához egy sárga fényt kibocsátó, cériummal adalékolt itrium-alumínium-garnet (YAG) fénypor-lemezt képeznek ki az n-típusú 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

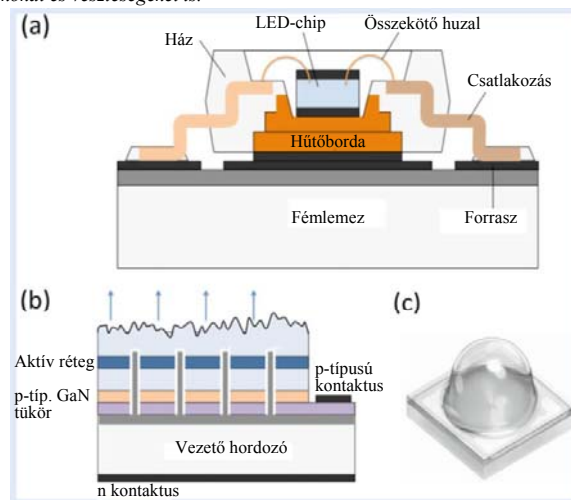
Az egyszínű – kék, zöld és vörös – LED-eknél a teljes hatékonyság mérésére rendszerint a WPE (wall-plug) energiakonverziós hatásfokot használják. A W-ban mért kimeneti fényteljesítményt az ugyancsak W-ban mért bemeneti elektromos teljesítménnyel elosztva kapott energiakonverziós hatásfok dimenzió nélküli 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 fénynek 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. Feltüntetjük 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 LED-ek 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 növesztetni 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 olvadákokból növesztetni 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

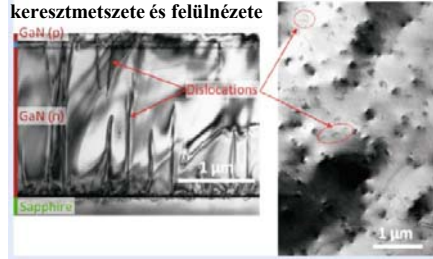
[14] Porowski S, Grzegory I (1997): Growth of GaN single crystals under high nitrogen pressure. In: Pearton SJ (ed) GaN and related materials. Overseas, Amsterdam, p 295

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-lapok nagy átmérőkben és alacsony áron állnak rendelkezésre [106]. Ráadásul az ilyen lapok kompatibilisek az elektronikai iparban használt 6 hüvelykes és még nagyobb átmérőjű lapok meglévő, bonyolult, automatizált feldolgozó gépsoraival.

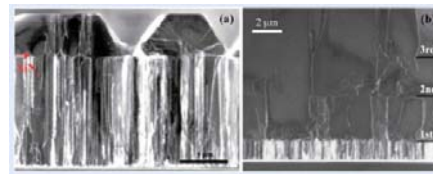
Az eredeti hordozóanyag a zafír volt és maradt is a napjainkban legáltalánosabban használt hordozóanyag, de 16%-os rácsincompatibilitást mutat a GaN-del. Ez olyan nagy, hogy a közvetlen epitaxiális növesztés próbálkozásai elkerülhetetlenül durva felületi morfológiákat és nagyon nagy diszlokációnak nevezett hibásűrűséget eredményeznek, amelyek a növekvő réteggel együtt megjelennek: az aktív InGaN kvantumkút-tartományon áthaladó ilyen diszlokációk tipikus sűrűsége 5 milliárd négyzetcentiméterenként ( $5 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ ), 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 réteghoz használt TD-csökkentésre mutat példát. A mechanizmus, amellyel a TD-t csökkenteni lehet, a következő: a vékony SiNx közbenső réteg egy olyan maszkot képez, amely véletlenszerűen elszórt 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 eloszásokkal, hogy megsemmisüljenek és félhurkokat építsenek fel, ezzel megállítva felfelé irányuló terjedésüket, amint az az 5.7a. ábrán látható.

#### Transzmissziós elektronmikroszkópos felvétel keresztmetszete és felülnézete



5.6 ábra – Zafír hordozón növesztett GaN diszlokációinak transzmissziós elektronmikroszkóppal (TEM) készített – fenyegetően nagy sűrűségét mutató – felvételei. A GaN és a (0001) zafír közötti rácsilleszhetőség 16%, ami tipikusan  $5 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$  diszlokációsűrűsége növekszik a GaN-ben, ha nem alkalmazunk diszlokációcsökkentési módszereket.



5.7 ábra – (a) GaN magrétegre a GaN szigetek újranövesztését követően leválasztott (nyílal jelölt) SiNx közbülső réteg transzmissziós elektronmikroszkóppal (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 szél 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  $5 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$  TD értéke  $5 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ -re csökken, és az egymás után kialakított SiNx közbenső rétegek tovább csökkentik a TD sűrűséget  $1 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$  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  $1000/\text{cm}^2$  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  $10 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$  tartományba esik. Annak az oka, hogy az InGaN LED-ek toleránsabbak a TD kiterjedt diszlokációsűrűsége 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-próba vizsgálatok is megerősítették, hogy az InGaN „véletlen struktúrájú” ötvözet. A számítások azt mutatják, hogy a véletlen struktúrájú ötvözet-ingadozások nanométer szinten 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

[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.

[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, DenBaars 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-beam-induced strain within InGaN quantum wells: False indium “cluster” detection in the transmission electron microscope, *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.

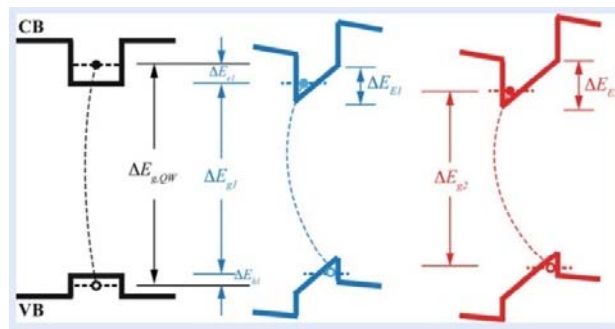
hibákra, mint a kiterjedt diszlokációk. Érdemes megjegyezni, hogy az elektronokat és a lyukakat különböző mechanizmusok lokalizálják az InGaN kvantumkutakban. Noha a TD diszlokációsűrűség nem tűnik túlságosan károsnak az InGaN LED-eknél, a lézerdiodák és az AlGaIn-alapú UV-sugárzók élettartama erős függést 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

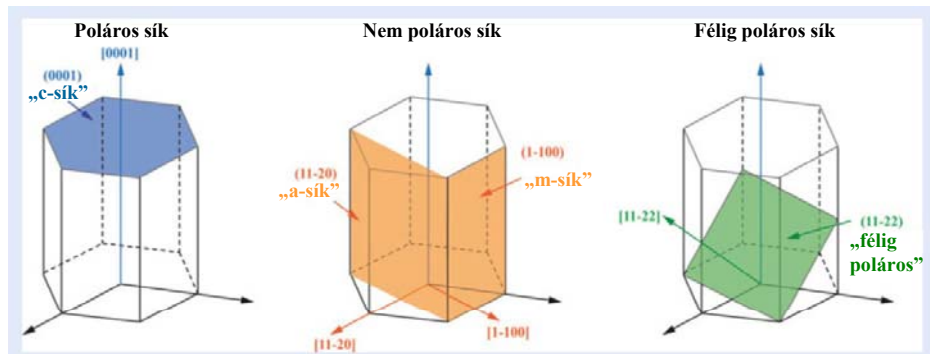
A nitridek általában hexagonális wurtzit (cink-szulfid) struktúrában kristályosodnak, amely nem centrálisan szimmetrikus, és bizonyos irányban (a c-tengely mentén) van egy egyedi vagy poláros tengelye. Mivel a kötés a II. és V. oszlop atomjai elektronegativitásának eltérése miatt részlegesen ionos, a 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 mérőleges nyomófeszültségnek és vele párhuzamos húzófeszültségnek lesz kitéve. A c tengely mentén vagy arra mérőlegesen alkalmazott feszültség a fém alrács belső eltolódásához vezet a nitrogén fém alrácsához képest, hatékonyan megváltoztatva ezzel az anyag polarizációját. Ez a feszültség hatás további hozzájárulást jelent az anyag polarizációjához, amit piezoelektromos komponensnek nevezünk és amely különösen fontos a feszített heterostrukturák esetén.

Gyakorlatilag minden kereskedelmi GaN-alapú 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: QW1 kvantumkút elektromos erőtér nélkül; kék: QW1 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 félpoláros síkjainak vázlata. A QCSE hatást el kell kerülni nem poláros irány – pl. az  $[1-100]$  és  $[11-20]$  – mentén, vagy minimalizálni egy félpoláros – pl. a  $[11-22]$  – irány mentén történő növesztéssel

séggel kapcsolatosan: Elektromos erőtér jelenlétében az átmeneti energia alacsonyabb értékek felé tolódik el ( $\Delta E_g$ , QW-től  $\Delta E_{g1}$  felé), és ez az eltolódás durván megegyezik az első elektron  $\Delta E_{e1}$  és lyuk  $\Delta E_{h1}$  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 potenciálést ( $\Delta E_{e2}$ ) 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 emissziós intenzitást találtak, ami a feszültség

által indukált piezoelektromos erőtér jelentős befolyását erősíti meg. A töltéshordozó-injektálás növekedésével azonban az emissziós csúcson 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 AlGaIn/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.

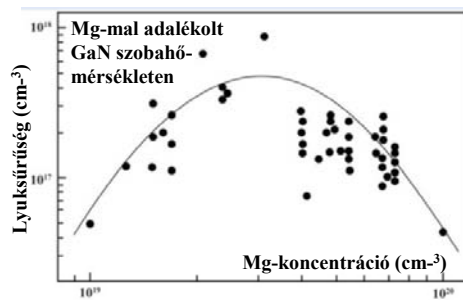


Ezért a LED-struktúrákban a kvantumkutakon keresztül kialakuló elektromos erőteret nemcsak a polarizációs erőter határozza meg, hanem a kvantumkút-tartományban kialakuló töltéshordozó-sűrűség és -eloszlás is befolyásolja. A töltéshordozók származhatnak (optikai vagy elektromos) töltéshordozó-injektálásból,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

A fenti fejtegetésből nyilvánvaló, hogy a QCSE nemkívánatos a nagy fényhasznosítású és jó szinkonzisztenciájú LED-ek esetén. Az 5.9 ábrán láthatók a GaN fő poláros, nem-poláros és félig-poláros síkjai. A QCSE-nek elméletileg meg kellene szűnie valamelyik nem-poláros – pl. az [1–100] és [11–20] – irányban történő növesztésnél, vagy minimalizálnia 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 hibásűrűség 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 nem-poláros 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 erőter mellett, de ismét csak a nagy hibásűrűség jelenti a problémát. A csökkentett belső elektromos erőter 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 szándékos 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])

zetségi szintet, ami lehetővé tette a kontrollálható p-típusú adalékolást [38]. Sokféle potenciális p-típusú adalékanyagot kipróbáltak, de ez ideig a magnézium tűnik a legsikeresebb adalékanyagnak a kis Al- és In-moltartalmú GaN, AlGaIn és InGaIn 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 passziválja 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 lyukkonzentráció mindig több mint egy nagyságrenddel kisebb lesz a Mg koncentrációnál. Ezenkívül a magnéziummal erősen adalékolt GaN a donorszerű strukturális hibák kialakulása folytán önkompensáció hatásának lesz kitéve [40].

Az első problémát 700°C feletti hőmérsékleten, N atmoszférában végzett hőkezeléssel [41,42], vagy elektronsugaras gerjesztéssel [43] – a passzívált 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 önkompensáció „veleszületett” tulajdonság, és ez a fő oka a lyukkonzentráció korlátozódásának.

Az 5.10 ábra a szabad lyukak koncentrációját mutatja szobahőmérsékleten MOVPE eljárással készült, Mg-mal adalékolt GaN esetén [44]. A lyukkonzentráció  $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  Mg-koncentráció esetén eléri a  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  körüli maximális értékét, azután pedig a magnézium-adalékanyag további növelésével csökkeni kezd.

Nagyobb akceptoraktiválás és kisebb elektromos ellenállás elérésére ígértes

módszer az AlGaIn/GaN szuperrácsok használata, ami periodikus oszcillációt idéz elő a vegyértéksáv szélén, lehetővé téve, hogy az akceptorok ionizálódjanak az AlGaIn rétegek széles tiltott sávjában, ami a szomszédos GaN rétegekben lyuk-felhalmozódáshoz vezet, s ezzel általánosságban megnöveli a lyukkonzentrációt [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  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  nagyságrendű átlagos térbeli lyukkonzentrációt eredményezhet [47,48]. Ugyanezt a módszert használva beszámoltak

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

[34] Riblet P, Hirayama H, Kinoshita A, Hirata A, Sugano T, Aoyagi Y (1999): Determination of photoluminescence mechanism in InGaIn 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, Iwasa 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): Self-compensation 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 Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>N/GaN superlattices, *Appl Phys Lett* 74:3681–3683.

$\text{Al}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{N}/\text{Al}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{N}$  szuper-rácsban p-típusú vezetőképesség előállításáról is [49], és ez lesz kétségtelenül az általános módszer a mély UV-t sugárzó LED-eknél, ahol p-típusú AlGaIn előállítás a szélesebb tiltott sávok miatt még problematikusabb.

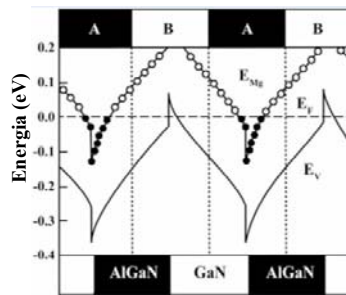
Bár a p-típusú adalékolás fejlődése lehetővé tette a nagy hatásfokú félvezetőeszközök létrehozását, a GaN-alapú LED-eszközök lyukhordozó-koncentrációja még mindig körülbelül két nagyságrenddel kisebb, mint az elektronkoncentráció, ami nagy aszimmetrikus hordozóeloszlást eredményez az aktív tartományban.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

#### 5.5.4 Zöld rés és hatásfok-esés

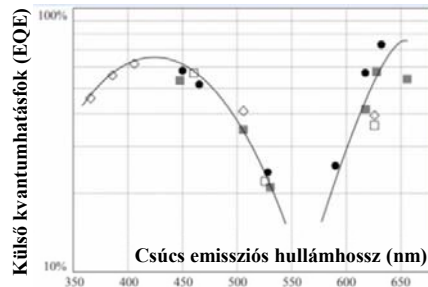
A fent említett kihívások ellenére a nitrid LED-ek teljesítőképessége tovább fejlődött, és az ibolyától zöldig terjedő spektrális tartományban emittáló eszközök már kereskedelmi forgalomba is kerültek. A legnagyobb hatásfokokat még mindig a kék és ibolya hullámhosszakon érték el, és a jelentős (mind 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 InGaIn 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 sávra való áttérés, amint azt az 5.1 ábra mutatja. A nitrid alapú LED-ek belső kvantumhatásfokát korlátozó tényezők összetettek és még nem eléggé ismertek. InGaIn 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 erőknek tulajdonítható.

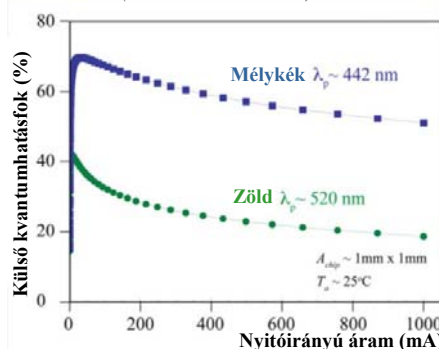
A „hatásfok-esés” vélt lehetséges mechanizmusai az Auger-rekombináció [52,56], a nagy hibásűrűség [54,58], a töltéshordozó-szivárgás [59], a heterointerfészeknél a polarizáció folytán beépült elektromos erők [60,61], az elégtelen p-típusú vezetőképesség [62,63] és a nagy áramsűrű-



5.11 ábra – Mg-mal adalékolt  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$  szuperrácsnak a spontán és a piezoelektromos polarizációs mezők figyelembevételével számított valenciasáv-diagramja. A szaggatott vonal a Fermi-energiát mutatja, az üres körök a Mg-akceptor energiáját reprezentálják, a kitöltött körök pedig az ionizált formát. A növesztés iránya normál Ga-polaritású 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 nyitótárányú áramok mellett, amely jól mutatja a nagyobb áramsűrűségeknél fellépő „hatásfok-esést”.

rűsegeknél fellépő töltéshordozó-eltolódás [64]. Az áramsűrűség – és ezzel a hatásfok-esés – csökkentésére egyetlen vastagabb kvantumkutató javasoltak a vékony kvantumkutatók helyett aktív tartománynak [12]. Azt találták azonban, hogy a vastagabb InGaIn kvantumkutatók 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 erőteré folytán romlik. Ezért a legtöbb kereskedelmi kék és zöld LED még mindig több vékony kvantumkutatót 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 AlGaIn/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  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  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  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  and  $\text{AlGa}_{1-x}\text{N}/\text{AlGa}_y\text{N}$  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 InGaIn 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 InGaIn 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 InGaIn measured by photoluminescence, Appl Phys Lett 91:141101.

[57] El-Masry NA, Piner EL, Liu SX, Bedair SM (1998): Phase separation in InGaIn grown by metal-organic 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 multi-quantum-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 InGaIn/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/GaN 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 InGaIn multiple quantum well blue light emitting diodes and its reduction with p-doped quantum well barriers, Appl Phys Lett 93:121107.

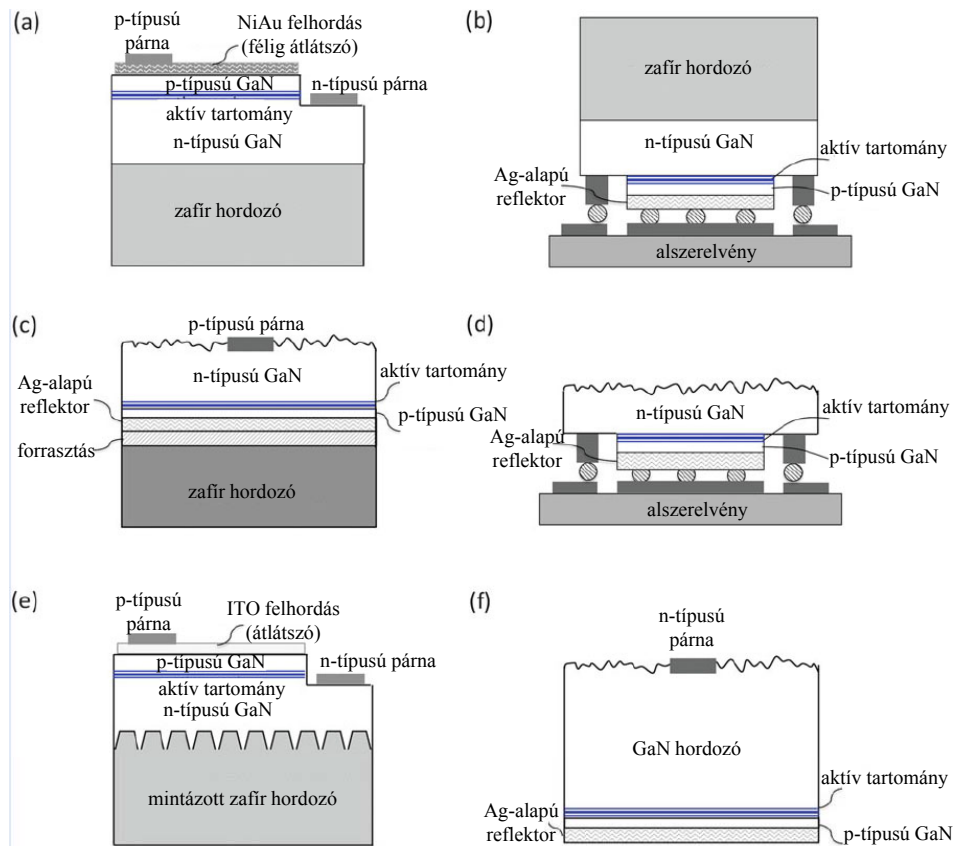


### 5.5.5 Chip-konstrukció

A kristálynövesztéssel, p-típusú adalékolással, belső erőterekkel és a hatásfokesséssel kapcsolatos fenti fejtegetések főként arra koncentráltak, hogy hogyan lehet a GaN-alapú LED-ek belső hatásfokát az anyagnövesztés és a struktúraalakítás 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 lézerekkel lépcsőzetesen 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 a PSS-ITO módszerrel 88%-os fénykivonási hatásfokot becsültek [70].

A fenti módszerek mindegyike főként a LED-chip tetejéről vagy aljáról vonja ki az emittált fényt. Ha több 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) Hagományos chip; (b) Flip-chip (FC); (c) Függőleges vékonyréteg (VTF); (d) Vékonyrétegű flip-chip (TFFC); (e) Mintázott zafír 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 cérummal adalékolt itrium-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/AlGaIn double-heterostructure blue-light-emitting diodes, *Appl Phys Lett* 64:1687–1689.

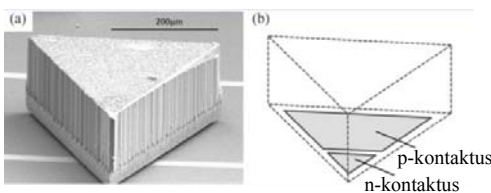
[67] Steigerwald DA, Bhat JC, Collins D, Fletcher RM, Holcomb MO, Ludowise MJ, Martin PS, Rudaz SL (2002): Illumination with solid state lighting technology, *IEEE J Sel Top Quantum Electron* 8(2):310–320.

[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, Humi 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 oldali gallium-nitrid (GaN-on-GaN) LED-chip pásztázó elektronmikroszkóppal készített felvétele; (b) Megfelelő eszközeometria. 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 eleendően 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 fényporréteget lehetne használni úgy, hogy a LED-ből az UV-hez közeli fény ne továbbítódjon – nagyon hasonlóan ahhoz, ahogy a lineáris és kompakt fénycsővek fényporbevonata akadályozza meg az UV-fény átjutását. E módszer hátránya az UV-hez közeli foton kisebb energiájú, látható fotonná való átalakításánál fellépő nagy belső energia-vesztés.

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

Közepes teljesítményű	Egyetlen nagy elem	Több nagy elem	Kis/közepes Chip-on-Board	Egyetlen/több „Jumbo elem”
1-2 elem; tipikus méret: 0,3...0,8 mm	1 elem; tipikus méret: 0,5...1,5 mm	3-25 elem; tipikus méret: 0,5...1,5 mm	4-100 elem; tipikus méret: 0,5...1 mm elemenként	1-6 elem; tipikus méret: 2...5 mm elemenként



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 LED-ek 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 kislülések, 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 lm-nél nagyobb fénnyáramot 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.



## 5.6 Világítási célú LED-ek

Az elmúlt évtizedben az anyagminőségben, a LED-ek struktúrájában, a chippek felépítésében és a LED-csomagok kialakításában bekövetkezett fejlesztések drámai javulást hoztak a LED-ek teljesítőképességében a fényminőség, a hatásfok/fényhasznosítás, az élettartam és a költségek terén, ami lehetővé tette, hogy valódi helyettesítői legyenek a hagyományos fényforrásoknak – például az izzólámpáknak és a fénycsőveknek.

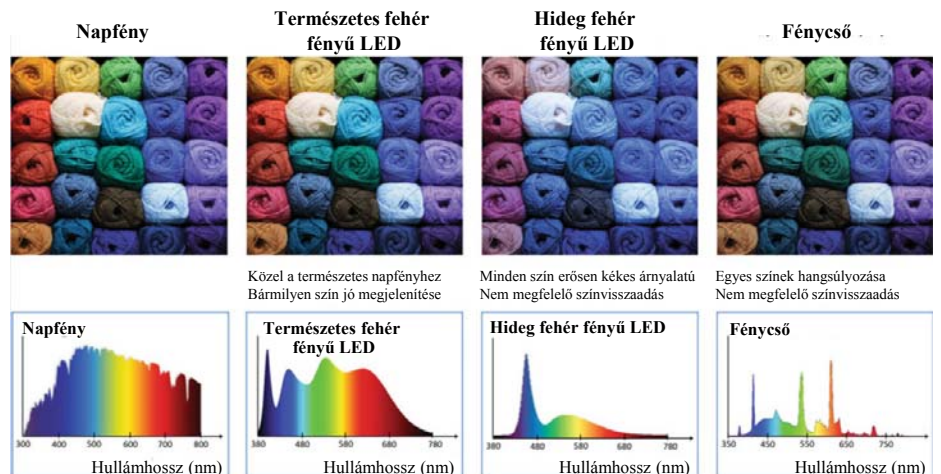
### 5.6.1 A LED-es világítás minősége

Az emberek hozzászoktak a hagyományos fényforrások – különösen az otthonokban használt izzólámpák és halogénlámpák – által szolgáltatott jó minőségű világításhoz. A fehér fényforrások minőségének értékelésénél a színhőmérséklet, a CRI színvisszaadási index és a színkonzisztencia a legfontosabb tényezők.

A fehér fényhez standardként a fekete test Planck-féle sugárzási spektrumát használják, mivel annak spektruma egyetlen paraméter – nevezetesen a színhőmérséklet – felhasználásával leírható. A fehér fényforrások Kelvinben megadott CT színhőmérséklete, vagy CCT korrelált színhőmérséklete definíció szerint annak a Planck-féle feketetest-sugárzónak a hőmérséklete, amelynek színe a legközelebb esik a fehér fényforráséhoz. A hőmérsékletek növekedésével a Planck-féle feketetest-sugárzó színe a vörös, narancssárga, sárgásfehér, fehér és végül kékesfehér felé tolódik el. Ezért egy fehér fényforrás színhőmérsékletét fel lehet használni megjelenésének leírására. A hagyományos világítástechnológiákban a CCT korrelált színhőmérséklet a 2700K-től 6500K-ig terjedő széles tartományra terjed ki.

A „meleg fehér” fénynek – mint amilyen az izzólámpáké – alacsonyabb (2700-3500K) színhőmérséklete van, míg a „hideg fehér” fényforrásoknak – amelyeknek kékesebb fehér a színük – magasabb (3500-5500K). A „meleg fehér” a lakásvilágításhoz legáltalánosabban használt lámpaszín az Egyesült Államokban és Európában.

A fehér fényforrások másik fontos jellemzője az, hogy milyen pontosan jelenítik meg az általuk megvilágított tárgy különböző színeit. Ezt a CRI színvisszaadási indexszel mérik. Az 5.18 ábra különböző fényforrásokra és megfelelő spektrumukra mutat be példákat.



5.18 ábra – Különböző fényforrások és megfelelő spektrumai. A szélesebb spektrumú fényforrás jobban visszaadja a megvilágított tárgyak valódi színeit (on-line forrásokból származó képek)

Egy ideális fényforrás – mint amilyen a Nap – a színeket tökéletesen adja vissza, így CRI színvisszaadási indexe 100. A semleges fehér LED-lámpák, vagy a teljes spektrumúak – pl. az UV-hez közeli LED-lámpából és RGB fényporokból előállított típusok [107] – CRI értéke akár 95 is lehet. Ezért a teljes spektrumú LED-lámpákkal megvilágított tárgyak színei is gazdagoknak és élénkebbnek látszanak, mint a napfény esetén. A „meleg fehér” LED-ek színvisszaadási indexe rendszerint nagyobb 80-nál, ami a legtöbb esetben elfogadható a hagyományos fényforrások lecserélésére, ugyanakkor a hagyományos „hideg fehér” LED-ek színvisszaadása elégtelen, akárcsak a fénycsőké.

Meg kell jegyezni, hogy az IEC-nek a fényforrások CRI értéke meghatározására szolgáló jelenlegi nyolc tesztzsin színvisszaadási rendszerét hagyományos fényforrás-technológiákhoz dolgozták ki, ezért LED-ekhez nem megfelelő. A LED fényforrásokra alkalmas új és jobb színvisszaadás mérési és kiértékelési módszere jelenleg kidolgozás alatt van. A világítás-technikai szakemberek számára egy adott fényforrás spektruma vagy színpontjainak elhelyezkedése a feketetest diagramon pontosabb módszer a színvisszaadás értékének meghatározásához.

A hagyományos fényforrásoknak – izzólámpáknak és halogénlámpáknak – jó a színkonzisztenciája egész élettartamuk során. LED-es világításnál jó színkonzisztenciát elérni kihívást jelent. A kék LED-ek és a fényporok színeloszlása zöldes, kékes és rózsaszínes fehér fényt eredményezhet. Ezenkívül a LED-ek színe a hőmérsékletváltozással és az idő múlásával eltölődhet. A LED-gyártóknak kemény

erőfeszítésbe kerül a LED-ek színeltolódásának megértése és kontrollálása.

Az epitaxia egyformasága, a feldolgozási és fénypor-technológia folyamatosan tökéletesedik, ami lehetővé teszi a LED-ek kisebb gyártási szórását. A LED-ipar bevezetett egy szigorúbb válogatási rendszert a LED-ek közötti színkonzisztencia biztosítására. Időközben ipari szabványokat és szabályzatokat is kidolgoztak a LED-ekre. Pl. az EU-1194/2012 EU irányelvben az egyik funkcionális követelmény a színkonzisztenciára vonatkozik, miszerint a színkoordináták variációinak egy hatlépcsős MacAdam-ellipszisbe kell esniük, vagy annál jobbnak kell lenniük [87]. Néhány gyártó kifejlesztett olyan LED-es világítási terméket, amelyek háromlépcsős MacAdam ellipszisbe esnek elkerülendő, hogy két fényforrás között színeltérést lehessen észlelni [74, 90].

Mivel a LED-eknek különböző hőmérsékleteken különböző színűk van, a LED-gyártók most LED-jeiket az adatlapokon a valós alkalmazásnak megfelelő, 85°C-os hőmérsékleten specifikálják a 25°C-os üzemi hőmérséklet helyett annak érdekében, hogy biztosítsák a vevőket arról, hogy valóban a szükséges színt kapják. Noha a LED-világítás színkonzisztenciája sokat javult, a hosszú élettartama alatti színeltolódás aggodalomra okot adó terület maradt. A megoldások a LED-chipek és más komponensek idővel bekövetkező degradációs mechanizmusának jobb megértésén alapulnak. Figyelembe véve azt a gyors fejlődést, ami a LED-ek rövid története alatt eddig végbement, minden okunk

[74] MacAdam DL (1943). Specification of small chromaticity differences. J Opt Soc Am 33:18-26

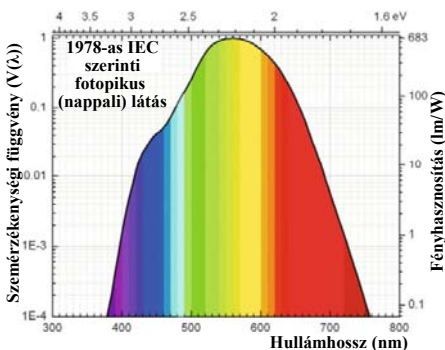


megvan azt feltételezni, hogy a LED-es világítástechnológia rövid belül teljesen meg fogja haladni a hagyományos fényforrásokat mind minőség, mind mennyiség tekintetében.

### 5.6.2 Fényhasznosítás

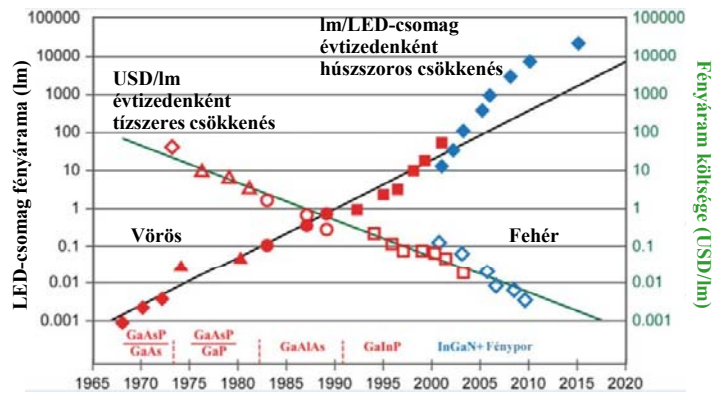
A fény fizikai mennyiségekkel való jellemzésére radiometrikus mértékegységeket – pl. wattban (W) kifejezett optikai teljesítményt – használnak. Az emberi szem azonban a fénynek csak a 400nm körüli ibolyától a 700nm körüli vörösig terjedő, látható spektrumba eső részére érzékeny – és a különböző hullámhosszaknál különböző módon, amint ez az 5.19 ábrán látható. Az emberi szem maximális érzékenysége az 555nm-es hullámhosszúságú zöld fényenél mérhető. Ezért ha egy optikai forrás által kibocsátott fényt az emberi szem általi érzékelés szempontjából akarunk reprezentálni, akkor fotometriai mértékegységeket – például lument (lm) – kell használni radiometrikus mértékegységek helyett.

A fényforrások fényhasznosítása úgy veszi figyelembe az emberi látás érzékenységét, hogy a zöld fény nagyobb mértékben járul hozzá a fényhasznosításhoz, mint a kék vagy a vörös, és az ultraibolya és az infravörös hullámhosszakat egyáltalán nem veszik számításba. A fényhasznosítás mértékegysége lm/W, azaz az emberi szem által érzékelt és lumenben mért kimeneti fényteljesítményt el kell osztani a wattban mért bemeneti elektromos teljesítménnyel.



5.19 ábra – A  $V(\lambda)$  szemérzékenységi függvény és a  $\text{lm/W}$ -ban kifejezett fényhasznosítás. Az emberi szem maximális érzékenysége az 555 nm-es zöld színnél adódik (az IEC 1978-as adatai szerint [81]). Megjegyzendő, hogy itt a fényhasznosítás definíció szerint a lumenben kifejezett kimeneti fényerősség és a  $W$ -ban mért optikai teljesítmény, nem pedig a bemeneti elektromos teljesítmény hányadosa.

Meg kell jegyezni, hogy a fényhasznosítás és a színvisszaadás között alapvető kompromisszum áll fenn [75]. A különböző fehér fényforrások fényhasznosításának összehasonlításakor a megfelelő színhőmérsékletet is figyelembe kell venni. Általában egy nagy színvisszaadási indexű,



5.20 ábra – Haltz törvénye azt mutatja, hogy a lumenenkénti költség 10-szeres, az elkészült LED-csomag által keltett fény mennyisége pedig 20-szoros tényezővel növekszik évente

„meleg fehér” LED-fényforrásnak kisebb a fényhasznosítása, mint a kisebb színvisszaadási indexű, „hideg fehéré”. A LED-csomagokra legnagyobb értékűként eddig 303  $\text{lm/W}$  fényhasznosításról számoltak be 350 mA-es meghajtóáram és 5150K korrelált színhőmérséklet esetén [76].

### 5.6.3 Élettartam

A LED-es világítás egyik legnagyobb előnye a hosszú élettartam, ami elérheti az 50 000, sőt a 100 000 órát is. A LED-fényforrások által kibocsátott fény – valamennyi elektromos fényforráshoz hasonlóan – idővel a fényáram-csökkenési folyamatként ismert jelenség folytán csökken. Általános világítási felhasználás esetén a LED-ek hasznos élettartamának azt a pontot tekintjük, ahol a kezdeti fényáram 70%-ra csökken. A LED-ek fényáram-csökkenésének fő oka a LED-ek pn-átmeneténél keletkező hő, amely befolyásolja a LED-csomag kulcsfontosságú komponenseinek és anyagainak teljesítmőképességét. [77]. Ezért a hőelvezetés fontos tényező a LED-ek tényleges hasznos élettartamának meghatározásánál. A kereskedelemben kapható retrofit LED-lámpáknak már 15 000 – egyeseknek 25 000 – órát meghaladó élettartamuk van. Mivel a LED-ek egyre hatékonyabbá válnak, a hőelvezetés problémája nagyrészt meg fog szűnni, és a LED-es világítás élettartama várhatóan növekedni fog. A LED-lámpák élettartamát a felhasznált vezérlő elektronika rövidebb élettartama is korlátozza. Ezért nagy figyelmet fordítanak a LED-es világításhoz szükséges bonyolult vezérlő elektronika fejlesztésére.

### 5.6.4 Költség

Valószínűleg az ár a legfontosabb akadály a fehér LED-eknek a lakás- és irodavilágításban való széleskörű elterjedése előtt. A GaN-alapú retrofit LED-lámpák lényegesen drágábbak, mint az izzólámpák vagy a kompakt fénycsövek. A lumenenkénti ár

azonban a Haltz-törvényt követve folyamatosan csökken (l. az 5.20 ábrát).

Meg kell jegyezni, hogy a világítás teljes tulajdonosi költségébe beletartozik az energiamegtakarítás és a csere költsége is, ami a LED-eket még versenyképesebbé teszi a hagyományos világítástechnológiákhoz képest. Mindenesetre ahhoz, hogy jelentős piaci behatolást lehessen elérni, a LED-ek kezdeti (beszerzési) költségét (USD/klm) tizedére kell csökkenteni ahhoz, hogy összehasonlítható legyen a kompakt fénycsövek árával. A kívánt költségcsökkentés eléréséhez a gyártási folyamat számos aspektusát párhuzamosan fejleszteni kell, amint ez az 5.21 ábrán látható. Az ábra azt mutatja, hogy a költségcsökkentés fejében nem kell feláldozni a LED-ek három fő hatékonysági tényezőjét, a hatásfokot, a megbízhatóságot és a vevői élményt. Ahhoz, hogy a LED-ek jó minőségű fényforrások maradjanak, számos szempontot – a LED-anyagokat, a chipek konstrukcióját, a fehér fény előállítását, a komponensek kialakítását, a tápáramkört, a lámpatest optikai és termikus konstrukcióját – figyelembe kell venni.

[75] Murphy TW (2012): Maximum spectral luminous efficacy of white light, *J Appl Phys* 111:104909

[76] Cree (2014): <http://www.cree.com/News-and-Events/Cree-News/Press-Releases/2014/March/300-LPW-LED-barrier>

[77] Zhao LX, Thrush EJ, Humphreys CJ, Phillips WA (2008): Degradation of GaN-based quantum well light-emitting diodes, *J Appl Phys* 103:024501

[78] Amano H, Sawaki N, Akasaki I, Toyoda Y (1986): Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer, *Appl Phys Lett* 48:353-355

[79] CIE data of 1931 and 1978 (1978): <http://cvision.ucsd.edu> és <http://www.cvl.org>

[80] Juza R, Hahn H (1938): Über die Kristallstrukturen von  $\text{Cu}_3\text{N}$ , GaN und InN Metallamide und Metallnitride, *Z Anorg Allgem Chem* 239:282-287

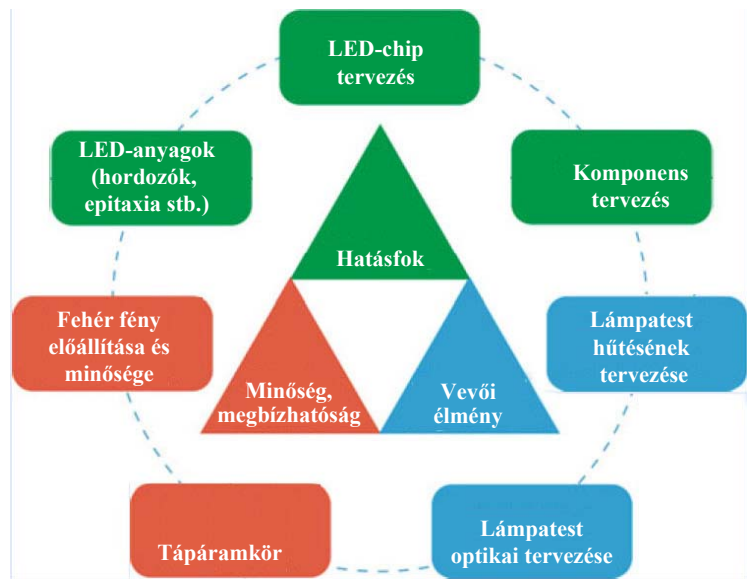
[81] Lighting Europe (2013): Guide for the application of the commission regulation (EU) No.1194/2012 setting ecodesign requirements for directional lamps, light emitting diode lamps and related equipment. [http://www.lightingeurope.org/uploads/files/LightingEurope\\_Guide\\_Regulation\\_1194\\_2012\\_ECOCODESIGN\\_Version\\_1\\_17\\_July\\_2013.pdf](http://www.lightingeurope.org/uploads/files/LightingEurope_Guide_Regulation_1194_2012_ECOCODESIGN_Version_1_17_July_2013.pdf)

## 5.7 LED-es világítási alkalmazások – a jelen és a jövő

Noha jelentős tökéletesítések még várhatók, a nitrid-alapú LED-ek számos tekintetben máris felülmúlják a hagyományos világítást. Kis méretűek, hatékonyak, hosszú élettartamúak és már széles körben elterjedtek, például – amint az 5.22 ábrán látható – a közlekedési jelzőlámpák, a nagy kültéri megjelenítők, a repülőgépek, személygépkocsik és buszok kül- és beltéri világítása, a jelzőfények és az LCD televíziók, mobiltelefonok és kijelzők háttérvilágítása terén. Hosszú élettartamuknak köszönhetően a LED-ek alkalmasak repülőterek kifutópályáinak megvilágítására is, ahol az üzemeltetési költségeket jelentősen lecsökkentették: a hagyományos világítás élettartama a kifutópályákon kb. 6 hónap, és a cseréjük idejére a kifutópályákat le kell zárni, ami jelentős költséggel jár. A LED-ek teljesítőképessége alacsonyabb hőmérsékleteken javul, ezért tökéletesen alkalmazhatók szupermarketek hűtőpultjainak megvilágítására, ahol a kompakt fénycsöveknek gyenge a teljesítőképessége, mivel hatásfokuk hidegben igen alacsony. Az architekturális világításhoz is előnyös LED-eket használni, amelyek a művészi élményt a LED-ek használatának rugalmassága folytán ötvözik az energiamegtakarítással és a környezetvédelemmel.

A LED-es világítás kutatása és alkalmazása a kertészetekben (5.23 ábra) ugyancsak nagy figyelmet kapott [108] a növények növekedésének jobb szabályozása, a nagyobb termés, a korábbi virágzás, a gyorsabb gyökérnövekedés és a jobb helykihasználás okán. A kisebb villamosenergia-fogyasztás és a szabályozható fény spektrumú konstrukció különösen vonzó tulajdonsága a LED-es világításnak a kertészetekben.

Az optogenetika a neurológia tudományának új területe, amely a fényt az agy célzott idegpályáinak stimulálására használja annak kiderítésére, hogyan kommunikálnak az idegsejtek és hogyan alakulnak ki az összetettebb agyi funkciók. Az optogenetika egyik fontos technikai kihívása egy megbízható, beültethető eszköz megvalósítása, amivel pontosan el lehet juttatni a fényt a megcélzott neuronokhoz és regisztrálni is lehet az egyes neuronokról érkező elektromos jeleket. Egy ilyen idegszonda megköveteli a fényforrások, érzékelők és más komponensek sikeres beépítését az ultravékony, sejt méretű injekciós tűbe, amelyet mélyen be lehet ültetni az agyba – a szövetek minimális károsítása nélkül. Kis méretű és szabályozható emissziós hul-



5.11 ábra – A szilárdtest-világítás gyártási lépéseinek integrált rendszerei (Forrás: Mark McClear, Cree, Inc., SSL manufacturing workshop, Vancouver, OR, 2009. június)



5.22 ábra – Példák a LED-ek különböző alkalmazásaira: üzletek világítása, LCD TV-k háttérvilágítása, kültéri úvilágítás, kerékpárlámpák, gépkocsik kültéri világítása, architekturális világítás, repülőterek kifutópályáinak fényei (Forrás: az Osram engedélyével)



5.23 ábra – Kertészetekhez a gyors növekedéshez alkalmas, Philips-gyártmányú LED-es világítás (Forrás: a Philips engedélyével)

lámhosszúságuk folytán az ilyen alkalmazásokhoz a mikro-LED-ek ideális fényforrások.

A látható fényvel történő kommunikációs (VLC) technológia – amelyre újabban Li-Fi-ként hivatkoznak (Light Fidelity = fényhűség) – az adatokat olyan fényforrások segítségével továbbítja, amelyek a fényerősséget gyorsabban modulálják, minthogy azt az emberi szem érzékelni tudja. Noha még gyermekcipőben jár, úgy vélik, hogy a VLC a jövő technológiája lesz a vezeték nélküli kommunikáció területén. A LED-ek különösen alkalmasak az ilyen alkalmazáshoz, mivel gyorsan ki/bekapcsolhatók és hosszú az élettartamuk. A hagyományos LED-ek helyett mikro-LED-tömbök használatával az adatátviteli sebesség több mint 10 Gb/s-ra növelhető. E technológia még nagyobb távlatokban alkalmas lesz arra, hogy az információs kijelzőket, a világítást és a nagy sávzélességű kommunikációt egyetlen rendszerbe ötvözzék, ami forradalmian új megoldásokat fog jelenteni a gépek közötti kommunikáció, az intelligens otthonok, a gépjárművek, a mobil kommunikáció, a képalkotó rendszerek, a személyi biztonság, az egészségügy stb. területén.

[82] MacAam DL (ed) (1993): Colorimetry – fundamentals. SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, WA

[83] Maruska HP, Tietjen JJ (1969): The preparation and properties of vapor-deposited singlecrystal GaN. Appl Phys Lett 15:327-329.

[84] Nakamura S (1991): GaN growth using GaN buffer layer. Jpn J Appl Phys 30:L1705-L1707.

[85] Nakamura S, Senoh M, Iwasa N, Nagahama S (1995): High-brightness InGaN-GaN double-heterostructure blue and yellow light-emitting diodes with quantum well structures. Jpn J Appl Phys 34:L797-L799.

[86] Nakamura S, Senoh M, Mukai T (1993): P-GaN/N-InGaN/N-GaN double-heterostructure blue-light-emitting diodes. Jpn J Appl Phys 32:L8-L11.

[87] Pankove JI, Miller EA, Berkeyheiser JE (1972): GaN blue light-emitting diodes. J Lumin 5:84-86

[88] Rازهgi M (2002): Short-wavelength solar-blind detectors – status, prospects, and markets. Proc IEEE 90(6):1006-1014.

[89] Zhu D, Wallis DJ, Humphreys CJ (2013): Prospects of III-nitride optoelectronics grown on Si. Rep Prog Phys 76:106501.

[90] Soraa (2015): <https://www.soraa.com/news-releases/32>

[91] Philips (2014): <http://www.philips.com/a-w/about/news/archive/standard/news/press/2014/20140509-Philips-and-Green-Sense-Farms-usher-in-new-era-of-indoor-farming.html>

[92] [https://en.wikipedia.org/wiki/Phase-out\\_of\\_incandescent\\_light\\_bulbs](https://en.wikipedia.org/wiki/Phase-out_of_incandescent_light_bulbs)



## 5.7.1 Általános világítás és energiamegtakarítás

A LED-es világítás mindezen izgalmas alkalmazása közül mindennapi életünk számára a legfontosabbak és a legnagyobb energiamegtakarítási potenciállal rendelkeznek az általános világítással kapcsolatosak – lakások, irodák, üzletek, egészségügyi intézmények, ipari létesítmények világítása, kültéri és architekturális világítás. Általános világításra mind a klasszikus lámpákat helyettesítő retrofit LED-lámpákat, mind LED-es lámpatesteket használnak. Az 5.2 táblázatban a beltéri LED-lámpák más, hagyományos fényforrásokkal történő összehasonlítása jól mutatja a LED-es világítás előnyeit az energiamegtakarítás terén – anélkül, hogy ennek fejében fel kellene áldozni a teljesítőképességet. A magas ár miatt a LED-es világítás jelenlegi piaci behatolása még igen kicsi. Ha azonban a LED-ek árának jelenlegi csökkenési és a teljesítőképesség növekedési tendenciája folytatódik, a LED-es világítás jelentős piaci behatolást fog elérni – 2020-ra az általános világítás piacának 48%-át, 2030-ra 84%-át érve el az Egyesült Államokban.

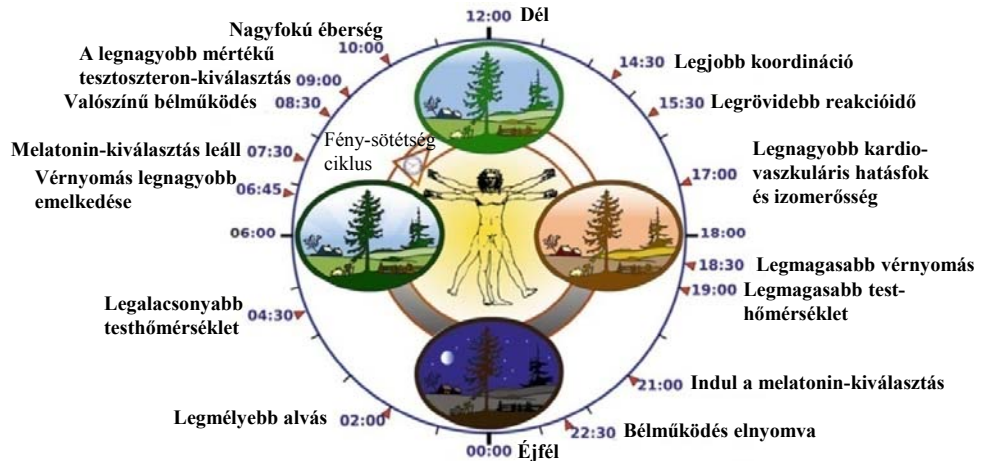
A világ népességének és az urbanizációnak a növekedése folytán növekszik az általános kereslet a világítástechnikai termékek és a világítás kapcsán elérhető energiamegtakarítás iránt. Az Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériuma (DOE) egyik jelentése szerint 2013-ban az Egyesült Államok teljes energia-felhasználásának kb. 18%-át fordították világításra, ami kb. 609 TWh villamos energiának és kb. 6,9 kvadrillió Btu forrásenergiának felel meg. Az előrejelzés szerint a LED-ek 2020-ra 15%-kal, 2030-ra 40%-kal fogják lecsökkenteni a világítás energiafelhasználását, 2030-ra 3,0 kvadrillió Btu energiát takarítva meg. Az erőművek jelenlegi összetételét feltételezve ezek az energiamegtakarítások kb. 180 millió tonnával csökkentik a szén-dioxid-kibocsátást. A világ népességének növekedésére, a természeti erőforrások szűkösségére és a klímaváltozásra tekintettel a LED-technológia fejlesztése és alkalmazása stratégiaileg fontos a fenntartható társadalom szempontjából.

## 5.7.2 Cirkadián ritmuson alapuló világítás

A LED-alapú világítás nem csupán a hagyományos világítások leváltására alkalmas, hanem olyan multifunkcionális eszköz, amelyet hangulatunk, egészségünk, termelékenységünk jobbítására és még sok minden másra is fel lehet használni.

	Izzólámpák	Halogén-izzólámpák	Kompakt fénycsövek	LED-lámpák
Fényáram (lm)	1100	1200	970	1055
Teljesítmény (W)	75	70	15	13
Fényhasznosítás (lm/W)	15	17	65	81
Színhőmérséklet (K)	2700	2800	2700	2700
Színvisszaadási index	100	100	81	80
Névleges élettartam (óra)	750-2000	2000	10 000	15 000
Higanytartalom (mg)	0	0	≤2	0
Felmelegedési idő 60%-os fény eléréséhez	azonnal teljes fény	azonnal teljes fény	5-40 s	azonnal teljes fény
Eladási ár (€)	betiltva [109]	2	5	10

5.2 táblázat – A LED-lámpák és a hagyományos, klasszikus fényforrások összehasonlítása



5.24 ábra – Az emberi 24-órás (cirkadián) biológiai óra néhány jellegzetessége. (Forrás: Yassine Mrabet, Wikipedia-ra feltöltötte: Addicted04 a CC BY-SA 3.0 szabadfelhasználásra vonatkozó engedélye alapján)

Mivel színtónusa könnyen módosítható és fényerőssége is változtatható, a LED-es világítás ideális a cirkadián ritmuson alapuló világításhoz, amely a leghatékonyabb és legmegfelelőbb módon illeszkedik az emberi test biológiai ciklusainak szükségleteihez, azaz a cirkadián ritmushoz.

Az emberi testet bizonyos fokig egyfajta – cirkadián ritmusnak nevezett – belső biológiai óra irányítja (5.24 ábra). A fény az emberi test biológiai órájának leghatékonyabb ingere, ezért a fénynek való napközbeni kitettség felelős azért, hogy a cirkadián ritmus hogyan szinkronizálódik a környezettel. Például a cirkadián ritmus zavara folytán előálló gyors időzóna-túllépés („jet-lag”) állapot egyik legjobb kezelési módja, ha kimegyünk a napfényre a biológiai óra visszaállítás érdekében.

A modern, iparosodott társadalom erősen támaszkodik a mesterséges világításra. A kutatások szerint a cirkadián ritmusnak a mesterséges világítás okozta zavara számos fizikai és mentális egészségügyi problémát okoz: a fáradtság, a rák, az elhízás, a cukorbetegség, a depresszió, a hangulat- és alvási zavarok, a csökkent fizikai és men-

tális teljesítőképesség és termelékenység – valamennyi valamilyen formában kapcsolódik a nem megfelelő módon működő cirkadián rendszerhez

A legtermészetesebb fény a Nap fénye, amely dinamikus és napközben változik az erőssége, színhőmérséklete és spektrális eloszlása. A napfény kora reggel élénk, kétkben gazdag, hogy riasztási jelet adjon az ébredéshez, a kora esti órákban pedig meleg, visszafogott erősségű testünk pihenésre való előkészítése érdekében. A LED-es világítás dinamikus tulajdonságai és spektrumának rugalmas kialakítása lehetővé teszi – jobban, mint valaha – a személyre szabott világítás kialakítását a cirkadián ritmus zavarainak enyhítésére, a hangulat, a vizuális élmény és a jó közérzet optimalizására. Intelligens épületvezérlési rendszerekkel kombinálva a cirkadián ritmuson alapuló LED-es világítás programozható a színhőmérséklet és a fényerősség automatikus módosítására, lehetővé téve a természetes kültéri fényviszonyok beltéri reprodukálását.