

## AZ CÉLTUDATOSSÁG JUTALMA

Bársony István  
MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet

A fizikai Nobel-díjat 2014-ben három japán születésű kutató, *Isamu Akasaki* (83) és *Hiroshi Amano* (54) a Meijo University és a Nagoya University, Japán, valamint *Shunji Nakamura* (60) a University of California, Santa Barbara, CA, USA professzora kapta a „hatékony kék fényt kibocsátó diódák felfedezéséért, ami lehetővé tette az energiatakarékos és környezetbarát

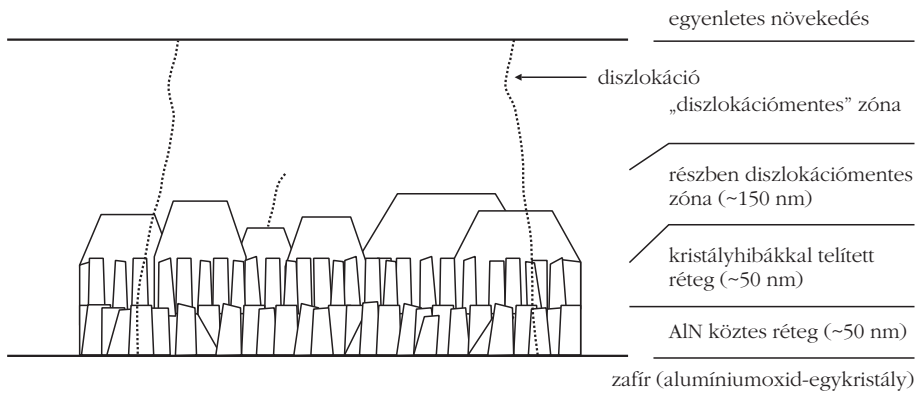
fényforrás” kifejlesztését (1. ábra). A Svéd Királyi Tudományos Akadémia hangsúlyozta, hogy a teljesen új elven működő fehérfényforrás ugyan még csak 20 éves, de előnyeit máris élvezzük [1].

Már a 20. század elején amerikai kutatók kimutatták, hogy a félvezető kristályok fénykibocsátásra képesek. Az elektrolumineszcencia kedvelt kutatási téma

1. ábra. Isamu Akasaki (balra), Hiroshi Amano (középen) és Shunji Nakamura 2014. december 10-én, Stockholmban a Nobel-díj átadó ceremónia után (forrás: KYODO).



lett az akkori Szovjetunióban is, viszont csak a tranzisztor 1947-es felfedezését követően (*Shockley, Bardeen, Brattain* – Nobel-díj 1956) vált világossá, hogy a p-n átmenetet szilárdtest fényemittáló szerkezetként lehet használni. Fényemissziót az ötvenes évek közepén Ge és Si p-n átmenetektől is kimutattak, de értékelhető hatásfokkal csak az úgynevezett direkt-sávú félvezetőkben várható fénykibocsátás. Ezekben ugyanis egylépéses, a vezetési-sávból a vegyérték-sávba való elektronátmenettel, fononok nélkül valósul meg az injektált elektronok sugárzásos rekombinációja. A fotonemisszió hullámhossza a tilossáv-szélesség által meghatározott energiából következik. Az első kísérletek vegyület-félvezető SiC, majd



2. ábra. A diszlokációmentes GaN epitaxiás növesztés első gyakorlati megoldása [3].

III–V kristályokkal folytak, csak hogy a kísérlet mindig kisebb energiát mutatott, mint a tilos sáv energiájából következett volna. A viszonylag hibamentes GaAs egykristályon sikerült először az 1,4 eV tilos-sávnak megfelelő infravörös sugárzást kimutatni 1961-ben, majd pár hónappal később több laboratóriumban (GE, IBM, MIT, Lincoln Lab.) 77 K hőmérsékleten lézereffektust is igazoltak. A szobahőmérsékleti működést csak a heteroátmenetes, a kvantumbezártságot hasznosító lézerdiodák 1967-es felfedezése (Alferov és Kroemer – Nobel-díj 2000) tette lehetővé.

Nick Holonyak Jr., a GE kutatója tudott először látható vörös LED fénykibocsátást igazolni és 710 nm-en sugárzó lézert építeni kevert  $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$  kristályokkal [2]. Holonyak szülei Magyarországról kivándorolt ruszinok voltak, ő maga is tud magyarul. Az idei Nobel-díj odaítélése kapcsán sérelmezte, hogy a látható fénykibocsátás úttörőjeként nem szerepel a díjazottak közt.

Már az ötvenes években komolyan felvetették a Philipsnél (Grimmeis) a világítástechnikai alkalmazás lehetőségét GaN szerkezetekkel. Kék fényvel gerjesztett fotolumineszcenciával ugyanis valamennyi hosszabb hullámhossz generálható a látható spektrumban, ahogy a fénycsövek falát borító fényporokból kevert „fehér fény” keletkezik. De a sugárzásos rekombinációt támogató, hibamentes GaN egykristály előállítás és hatékony p-adalékolása megfelelő akceptorral még sokáig váratott magára. Miközben világszerte sokan feladták a reményt a mechanikailag feszültségmentes GaN előállítására, Akasaki figyelmét felkeltették a 70-es években megjelent új kristálynövesztési technikák (MBE – molekulásugaras epitaxia és MOCVD – fémorganikus kémiai gőzfázisú lecsapatás), amelyek a rácsillesztett epitaxiás növesztés (SiC-on, vagy  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -on) lehetőségével kecsegtettek. Akasakinak a Matsushita kutatóintézetében,

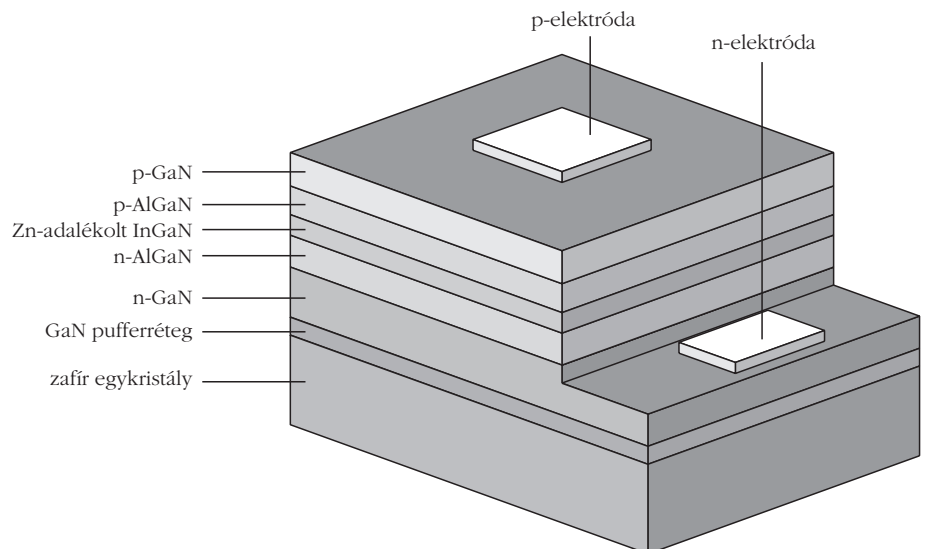
majd később Amanóval közösen a Nagoyai Egyetemen évekig tartó optimalizációs kísérletsorozat eredményeként sikerült MOVPE – fémorganikus gőzfázisú epitaxiával, a rácsillesztetlenség minimalizálásával  $\text{Al}_2\text{O}_3$  szubsztráton optikai minőségű GaN réteget előállítani (2. ábra). Ehhez 500 °C-on 30 nm-es polikristályos AlN réteget nukleáltattak a zafír egykristályra, amiből a GaN növesztési hőmérsékletére (1000 °C) történő

felfűtés alatt kristályos szigetek képződtek a GaN epitaxiás növesztésének megfelelő preferált orientációval. A diszlokációsűrűség a növekvő GaN kristályban a kezdeti magas értékről néhány nm-en belül drasztikusan csökkent.

A módszer 1986-ban eredményezett a LED heteroszerkezet növesztéséhez egykristályos GaN szubsztrátot [3]. Ezidőtájt Nakamura, a fényporgyártó Nichia vegyipari cég kutatásvezetője az AlN-et alacsony hőmérsékletű GaN-del helyettesítette, így alacsonyabb n-típusú háttérkoncentrációval készített alapréteget [4].

A GaN elektronmikroszkópos vizsgálata során figyelték meg, hogy mind a Zn-adalékolt n, mind a Mg-mal adalékolt p-GaN szennyezésének határfoka, azaz koncentrációja megnőtt. Erre pár év múlva Nakamura adott magyarázatot. A Zn és Mg hidrogénatomokkal komplexeket alkot, így a beépülés után nem viselkedik aktív szennyezőként. Az elektronbesugárzás viszont szétbontja a komplexeket és megemeli az adalékkoncentrációt. Így a 90-es évek elején mind Akasaki, mind Nakamura csoportjában már AlGaIn, InGaIn LED heteroszerkezeteket (3. ábra) fejlesztettek [5], ahol minimális veszteséggel történik meg a kvantumgödörbe zárt (kvantumfogság) injektált elektronok rekombinációja. Nakamura a kettős heteroátmenetes

3. ábra. A GaN/AlGaIn/InGaIn kék LED heteroszerkezet [5].



szerkezetével 1994-ben már 2,7%-os kvantumhatásfokot ért el [5], majd mindkét csoportban kéklézer-emissziót is kimutattak.

Meg kell említenünk néhány hazai vonatkozást is. Az MTA Műszaki Fizikai Kutatóintézetében *Szigeti György* igazgató kezdeményezésére *Lendvay Ödön* vezetésével a vegyület-félvezető kutatás számos sikert ért el. Legjelentősebb, máig ható eredménye talán a parazitaveszteséges rekombináció visszaszorítását célzó mérési eljárás, a *mélynívó-spektroszkópia* kidolgozása volt *Ferenczi György* vezetésével. Ipari elterjesztése az intézet korai spin-off vállalkozásának, a mára multinacionális céggé nőtt Semilab Rt. érdeme. Az intézet kutatói nemzetközi együttműködések révén már korán bekapcsolódtak a LED-lézerdióda fejlesztésekbe. Pár éve így jelenhetett meg a jogutód MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet fiatal munkatársának közös elektronmikroszkópos cikke a két Nobel-díjjal is – igaz, Linköpingből [6].

A látható fénykibocsátás fejlődése a vörös-zöld-kék-fehér sorrendben egy sor GaN alapú kutatási áttörés, felismerés és technológiai apró-munka eredménye, amiben *döntő tényező volt a japán kutatók kitalálása, céltudatossága*. Az alkalmazások nyitotta távlatok ma még beláthatatlanok. A fehér fényt kibocsátó LED-ek a becsült *100 000 óras élettartam* mellett ma *300 lm/W* teljesítménnyel az Edison-féle izzólámpák körülbelül *16 lm/W*-jával szemben csaknem *50%-os hatásfokú elektromos-fény energiakonverziót* valósítanak meg. Mivel a globálisan felhasznált villamos energia csaknem 20%-át fordítjuk világításra, ez gigantikus

megetakarítást jelent a fenntartható fejlődés érdekében. Már bizonyos, hogy a vákuumtechnikai fényforrások rövid időn belül felváltják a LED alapú világítótestek, hiszen a kijelzők, TV képernyők, mobiltelefonok már ma is általánosan LED-eket használnak. Az elektronikusan vezérelhető világítástechnikai eszközök egyben hamarosan a szélessávú adatátvitel és kommunikáció eszközeiként is hasznosulnak (Li-Fi), az ultraibolya-tartományban sugárzó LED-ek antibakteriális, fertőtlenítő hatása is számos új alkalmazást nyit majd meg.

*Alfred Nobel* végrendelete szerint a díj azok elismerését kell, hogy szolgálja, akik tudományterületükön az emberiség számára legnagyobb hasznot hajtó teljesítményt érték el. Ahogy a Nobel-bizottság elnöke megállapította: az idei díj valóban az alapító szándéka szerinti kitüntetés!

## Irodalom

1. Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2014, [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2014/advanced-physicsprize2014.pdf](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/advanced-physicsprize2014.pdf)
2. N. Holonyak, S. F. Bevacqua, *Appl. Phys. Lett.* **1** (1962). 82
3. H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki, Y. Toyoda, *Appl. Phys. Lett.* **48** (1986) 353.
4. S. Nakamura, M. Senoh, T. Mukai, *Jpn. J. Appl. Phys.* **30** (1991) L1998.
5. S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh, *Appl. Phys. Lett.* **64** (1994) 1687.
6. E. Valcheva, T. Paskova, G. Z. Radnoczi, L. Hultman, B. Mone-mar, H. Amano, I. Akasaki: Growth-induced defects in AlN/GaN superlattices with different periods. *Physica B* **340–342** (2003) 1129–1132.