

# NOBELOVA NAGRADA ZA FIZIKO 2014 IN REVOLUCIJA V OSVETLJEVANJU

MARKO ZGONIK

Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani  
Institut »Jožef Stefan«

PACS: 01.75.+m, 85.60.Jb, 42.72.-g

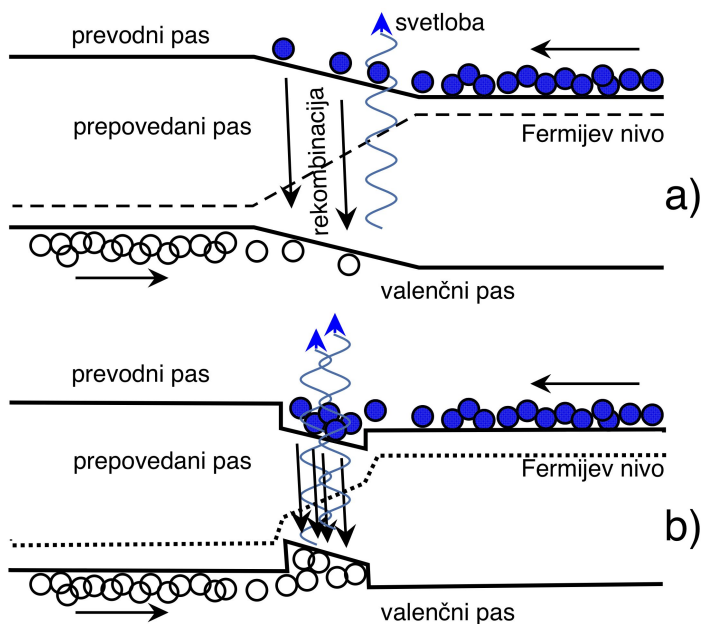
Isamu Akasaki in Hiroshi Amano z Univerze v Nagoji ter Shuji Nakamura, ki je deloval v podjetju Nichia Chemicals na Japonskem, sedaj pa je profesor v ZDA, so letošnji Nobelovi nagrajenci za fiziko. Članek opiše pot do izdelave modre LED na osnovi GaN. Posebej uporabna pa je modra LED v kombinaciji s fluorescenčno pretvorbo v belo svetlobo. Tako smo dobili izvor bele svetlobe, ki je učinkovit, ima dolgo življenjsko dobo in je okolju prijazen.

## NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2014 AND LIGHTING REVOLUTION

Isamu Akasaki and Hiroshi Amano from Nagoya University and Shuji Nakamura, formerly from a Japanese company Nichia Chemicals, at present a professor in the U.S.A., were awarded the 2014 Nobel Prize in Physics. The article describes the pathway to the invention of blue LED based on GaN. Fluorescent conversion of the blue emission into the white light makes blue LEDs especially versatile. The new white light source is efficient, durable and environmentally friendly.

Letošnja nagrada za fiziko je bila podeljena za široko uporaben izdelek, to je modro svetlečo diodo, ki je omogočila izdelavo novih, energijsko varčnih izvorov bele svetlobe, ki so tudi prijazni do okolja in imajo dolgo življenjsko dobo. Nagrado so si razdelili trije raziskovalci, Isamu Akasaki in Hiroshi Amano z Univerze v Nagoji ter Shuji Nakamura, ki je deloval v podjetju Nichia Chemicals na Japonskem, sedaj pa je profesor v ZDA [8].

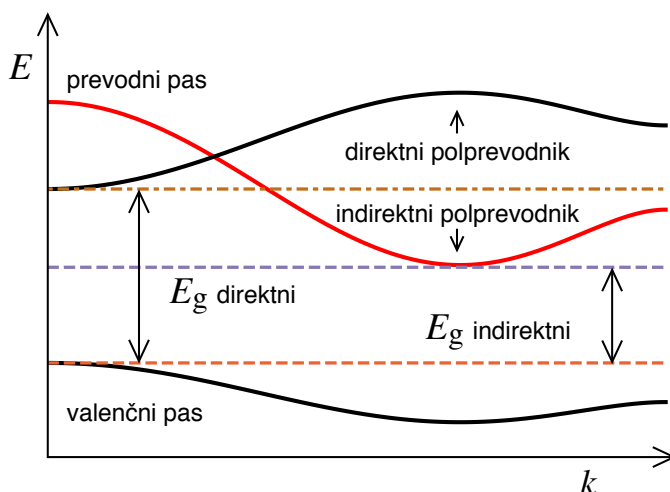
Nagrajeno odkritje je izrazito tehnične narave in še en primer, kako uporabni so polprevodniki in kako daleč je mogoče izpopolnjevati njihovo tehnologijo. Podobno, kot velja za silicij Mooreov zakon – podvojitev gostote tranzistorjev vsaki dve leti – naj bi za svetleče diode veljal Haitzev zakon [9]. Ta predvideva, da se cena enega lumna (lm) svetlobne energije zniža na eno desetino vsakih deset let. V Evropi porabimo za razsvetljavo približno 20 % vse proizvedene električne energije. Razmerje med učinkovitostjo modernih izvorov in klasičnih žarnic je več kot 4, in tako ni presenetljivo, da je Evropska komisija leta 2009 [10] začela uvajati ukrepe, ki postopno prepovedujejo prodajo klasičnih žarnic, ki naj jih delno nadomeščajo halogene žarnice, predvsem pa varčne fluorescenčne in LED sijalke. Neposredna prednost LED pred fluorescentnimi sijalkami je njihov izsev v polprostor in večja svetlost. S tem je povezana možnost usmerjanja in doseganje svetilnosti,



**Slika 1.** V  $pn$  spoju, skozi katerega teče tok v prevodni smeri, se rekombinirajo elektroni in vrzeli, pri tem pa lahko dobimo fotone z energijo, približno enako širini energijske reže. a) enojni  $pn$  spoj, b) dvojni spoj (heterostruktura) z vmesnim polprevodnikom z manjšo energijsko režo, ki deluje kot enodimenzionalna kvantna jama, v kateri se močno poveča koncentracija nosilcev naboja.

kakršno sicer dosegamo s halogenimi reflektorskimi žarnicami z desetkrat večjo porabo električne energije.

Raziskave polprevodniških izvorov svetlobe so se začele že kmalu po odkritju tranzistorja. Rekombinacija elektrona in vrzeli, pri čemer se izseva foton, je idealni mehanizem pretvorbe električne energije v svetlobo. Tako rekombinacijo lahko preprosto dosežemo v polprevodniški diodi, ki jo napajamo v prevodni smeri, kar shematično prikazuje slika 1. V  $pn$  spoju je treba poskrbeti, da so drugi mehanizmi rekombinacije manj verjetni. Hitro so ugotovili, da so za ta namen potrebni direktni polprevodniki, to so tisti, pri katerih imata elektron z najnižjo energijo v prevodnem pasu in vrzel z najvišjo energijo v valenčnem pasu enaki gibalni količini. Razlog je v zanemarljivi gibalni količini fotona, pri procesu rekombinacije pa se ohranjata tako energija kot gibalna količina. Odvisnost energije elektronov od valovnega vektorja je shematično prikazana na sliki 2. Tehnologija silicija je izredno razvita, vendar je Si indirektni polprevodnik in torej ne ustreza temu pogoju. Kljub temu raziskovalci še danes poskušajo vse mogoče, da bi izdelali svetlobni izvor na tej osnovi.



**Slika 2.** Shema energije elektronov v odvisnosti od velikosti valovnega vektorja v določeni smeri. Za prevodni pas sta prikazani dve odvisnosti, ki ponazarjata direktne in indirektne polprevodnike. V  $pn$  spoju se srečajo elektroni z minimalno in vrzeli z maksimalno energijo. V direktnih polprevodnikih je možna rekombinacija z izsevanjem fotona, v indirektnih pa je potrebna še ena ekscitacija, npr. fonon, da je v procesu zadoščeno ohranitvi gibalne količine.

Med direktne polprevodnike sodijo mešani kristali iz 3. in 5. skupine elementov, ki jim pravimo III–V polprevodniki. GaAs z energijsko režo 1,4 eV je bil prvi med njimi, katerega tehnologija se je začela hitro razvijati v šestdesetih letih predvsem zaradi obljub o hitrejši elektroniki. Leta 1962 so prvič izmerili emisijo infrardeče svetlobe iz  $pn$  spoja v GaAs [5]. III–V kristali, v katerih sta V elementa As in P, so postali osnova LED diod vse od infrardečega do zelenega dela spektra. Z mešanjem As in P ter kovin Al, Ga in In je namreč mogoče poljubno izbrati energijsko režo in s tem valovno dolžino LED. V letu 1962 so izdelali tudi prvi laser na tej osnovi, ki je najprej deloval le pri temperaturi tekočega dušika (77 K). Razvoj polprevodniških heterostruktur, za katere sta leta 2000 Z. I. Alferov in H. Kroemer dobila Nobelovo nagrado, je omogočil boljšo kontrolo prostora, v katerem se rekombinirajo elektroni in vrzeli. S tem so zmanjšali izgube in prag laserskega delovanja. Laserske diode na osnovi mešanih kristalov GaAsP, ki delujejo pri sobni temperaturi, pa so postale široko uporabne.

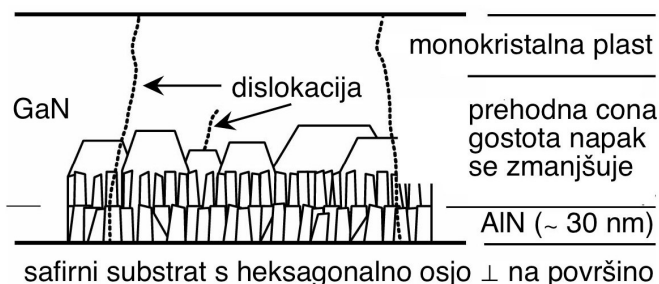
Iskanje materialov s širšo energijsko režo, ki jih je mogoče dopirati, se je nadaljevalo. Izkazalo se je, da je ta naloga precej zapletena. Možnost  $p$  in  $n$  dopiranja je postala osnova za razlikovanje med polprevodniki in izolatorji. Kandidata za izdelavo modre LED sta bila v začetku kristala ZnSe in SiC, oba indirektna polprevodnika in zato z nizkimi izkoristki. Dušikovi spojini

GaN in AlN sta direktna polprevodnika z energijskima režama 3,4 in 6,5 eV in so zato njune zlitine primerne za LED z valovnimi dolžinami od 400 do 200 nm. Material tudi ni strupen, kar ga loči od mnogih drugih III–V in II–VI polprevodnikov.

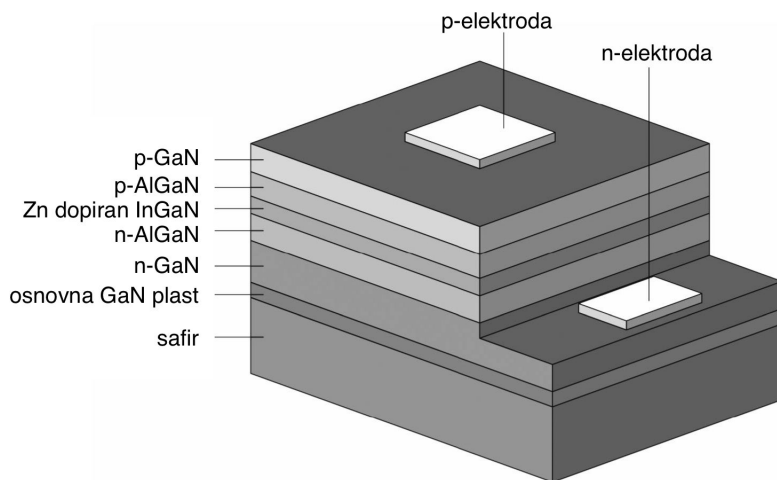
Gojenje tankih kvalitetnih kristalnih plasti GaN na substratu iz safirja je prvič uspelo Akasakiju in sodelavcem leta 1986 [1]. Tehnologija rasti je bila tako imenovana MOVPE (metalorganic vapour phase epitaxy). Safir je relativno poceni v primerjavi s SiC, ki je sicer boljši substrat, saj se njegova mrežna konstanta bolj sklada z mrežno konstanto GaN. Uspešno rast na safirju so dosegli v več korakih, prikazanih na sliki 3. Najprej so nanесли tanko (30 nm) polikristalno plast AlN pri temperaturi 500 °C in jo potem segreti na 1000 °C. Pri tem se je plast prekristalizirala tako, da so se kristalčkom uredile heksagonalne osi. Na tej plasti je uspešno rasel GaN, sprva sicer z mnogimi dislokacijami, po nekaj  $\mu\text{m}$  rasti pa se je gostota napak zelo zmanjšala in dobili so kvalitetno kristalno površino, na katero so lahko naprej nanašali večplastne strukture ustrezno dopiranega GaN, kakršne so potrebne za izdelavo LED.

Tudi probleme z dopiranjem so rešili po mnogih poskusih. Izdelava *p*-tipa polprevodnika s široko režo je vedno težavna naloga, saj se poleg namernega dopiranja v prepovedanem pasu pojavi še vrsta drugih elektronskih nivojev, ki so posledica napak v strukturi in nenamernega onesnaženja kristalov. Prve plasti *p*-GaN so uspešno naredili Amano, Akasaki in sodelavci z Mg dopiranjem, plast pa so dodatno obsevali z nizkoenergijskimi elektroni [2]. Nakamura je kasneje razložil mehanizem aktivacije donorjev Mg in Zn, ki pri nizkih temperaturah tvorijo nevtralne komplekse z vodikom. Elektroni, UV osvetljevanje in v primeru GaN tudi popuščanje pri visoki temperaturi pa te komplekse disociirajo in aktivirajo akceptorje [3].

Tehnologijo heterostruktur *p*-dopiranih zlitin AlGaN in InGaN, kakršne so potrebne za izdelavo učinkovitih svetlobnih izvorov, sta obe skupini



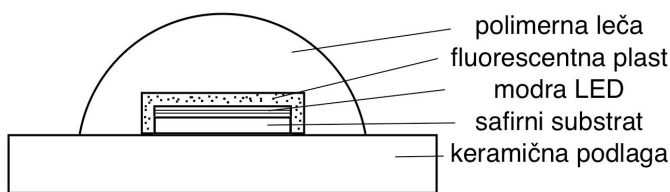
Slika 3. Priprava podlage za izdelavo GaN LED.



**Slika 4.** Struktura modre LED z dvojno heterostrukturo na osnovi InGaIn-AlGaIn.

potem hitro izboljševali. Pri tem so se Nakamura in sodelavci osredotočili na kombinaciji InGaIn/GaN in InGaIn/AlN, s katerima so izdelovali heterostrukture in kvantne jame. S strukturo, prikazano na sliki 4, so v letu 1994 dosegli kvantni izkoristek 2,7 % [2]. Ta dosežek je nakazal nadaljnjo pot in v naslednjih dveh letih sta obe skupini izdelali prototipe modrih laserskih diod. LED in laserske diode z valovnimi dolžinami v modro vijoličnem delu spektra so postopoma postajale vse dostopnejše. Naslednji korak v razvoju pa bodo polprevodniški izvori v UV področju, kjer se je z AlN mogoče približati valovni dolžini 200 nm [7].

LED diode so tehnološko manj zahtevne od laserjev, saj nimajo praga delovanja in so koristni že spontano izsevani fotoni. Težava z izkoristkom LED pa je v tem, da je spontano sevanje izotropno porazdeljeno in je v zrak izsevan le majhen delež, preostala svetloba pa se odbije na meji polprevodnik/zrak. Ta omejitev je posebej huda zaradi velikega lomnega količnika polprevodniških materialov, npr. 3,5 v GaAs pri valovni dolžini 1  $\mu\text{m}$  oziroma 2,5 v GaN pri 450 nm. Iz kvadra GaN tako lahko pobegne v zrak le svetloba znotraj stožcev, ki jih omejuje kot totalnega odboja 22 stopinj, pa še ta svetloba se delno odbije na meji. Skozi eno ravno golo ploskev tako preide le 3 % svetlobe. Ker je geometrija *pn* spoja vedno planarna, je treba stranske dimenzije LED zmanjšati in omogočiti izsev v ravnini spoja, vse skupaj prekriti s polimerom z visokim lomnim količnikom in ga oblikovati v ustrezno lečo. Še večji izkoristek pa doseže modra LED dioda v kombinaciji s fluorescenčno pretvorbo v belo svetlobo. Na sliki 5 je prikazana shema bele LED diode z visokim izkoristkom. Kot totalnega odboja na meji med polprevodnikom in polimerom z razpršenim fluorescentnim prahom je pove-



**Slika 5.** Shema bele LED s povečanim izkoristkom in tehnologijo COB (Chip On Board). Tipično je na podlago nameščenih več takih elementov

čan zaradi velikega lomnega količnika polimera, zmanjša se odbojnost meje in tudi totalni odboj ni več »totalen«, ampak zmanjšan zaradi absorpcije evanescentnega vala v fluorescentnem prahu. Dodatna polimerna leča nato še poveča prehodnost svetlobe na mejah s fluorescentno plastjo in zrakom ter usmeri svetlobo.

Ker je bila nagrada podeljena s poudarkom na široki uporabnosti modrih LED za osvetljevanje, ponovimo nekaj podatkov o tem. Za osvetljevanje je pomemben fiziološki odziv oči. Zvezni spekter bele svetlobe lahko za osvetljevanje dovolj dobro nadomestimo z ustrezno mešanico ožjih spektralnih pasov. Dobro znano je aditivno mešanje rdeče, zelene in modre barve, s katerim lahko dosežemo zelo širok nabor barvnih odtenkov. Zamik maksimuma spektra od rdeče proti modri barvi merimo z barvno temperaturo (CCT, Correlated Color Temperature), ki enači zaznavo barve svetila z barvo črnega telesa pri ustrezni temperaturi [11]. Kvaliteto bele mešanice pa meri indeks barvne reprodukcije (CRI, Color Rendering Index) [12]. Ta primerja pravilnost vidne zaznave za različne barvne ploskve, osvetljene s testnim svetilom in z referenčnim izvorom, ki je standardno halogena žarnica s temperaturo nitke 3200 K in z vrednostjo CRI = 100. Dobre fluorescentne in LED sijalke dosegajo vrednosti CRI do 90.

Poleg barvne zaznave je zelo pomembna tudi svetlost in s tem izkoristek svetila. Oko je najbolj občutljivo za rumenozelena svetlobo pri valovni dolžini 555 nm, kjer je relativna občutljivost največja in je iz zgodovinskih razlogov dogovorjeno razmerje 683 lm/W [6]. Običajna žarnica, ki dobro ustreza črnemu telesu pri temperaturi 2800 K, oddaja približno 15 lm/W, pri soncu pa je razmerje 94 lm/W. Učinkovitost fluorescenčnih sijalk je okoli 60 lm/W, medtem ko so tipične vrednosti LED sijalk še višje, to je okoli 90 lm/W. Za obe vrsti velja, da je učinkovitost višja pri barvni temperaturi okoli 6000 K.

Učinkovitost LED sijalk se je v zadnjem času hitro povečevala in v laboratoriju so že dosegli vrednosti 300 lm/W. Ta vrednost je blizu teoretičnega maksimuma 348 lm/W za osvetljevanje z idealnim svetlobnim izvorom. Tak izvor bi seval spekter črnega telesa pri temperaturi 5800 K v omejenem ob-

močju od 450 nm do 660 nm, kjer občutljivost očesa ne pade pod 5 % najvišje vrednosti [13].

Z nadaljnjim razvojem tehnologije se bo uporabnost belih svetlobnih izvorov, osnovanih na GaN, širila na nova področja. Za osvetljevanje tekočerkristalnih prikazovanikov v televizorjih in računalniških monitorjih so se LED diode že izkazale, osvetljevanje prostorov osvaja ta tehnologija z velikimi koraki, avtomobilska industrija pa bo kmalu zamenjala vse izvore svetlobe s polprevodniškimi. Vse to upravičuje odločitev za podelitev letošnje Nobelove nagrade za fiziko.

## LITERATURA

- [1] H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki in Y. Toyoda, *Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer*, Appl. Phys. Lett. **48** (1986), 353.
- [2] H. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu in I. Akasaki, *p-type conduction in Mg-doped GaN treated with low-energy electron beam Irradiation (LEEBI)*, Jpn. J. Appl. Phys. **28** (1989), L2112.
- [3] S. Nakamura, N. Iwasa, M. Senoh in T. Mukai, *Hole compensation mechanism of p-type GaN films*, Jpn. J. Appl. Phys. **31** (1992), 1258.
- [4] S. Nakamura, T. Mukai in M. Senoh, *Candela – class high – brightness InGaN/AlGaIn double – heterostructure blue – light – emitting diodes*, Appl. Phys. Lett. **64** (1994), 1687.
- [5] J. I. Pankove, *Tunneling-assisted photon emission in gallium arsenide pn junctions*, Phys. Rev. Lett. **9** (1962), 283–285.
- [6] J. Strnad, *Uvod v fiziko, II. del*, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 1971.
- [7] J. Xie, S. Mita, Z. Bryan, W. Guo, L. Hussey, B. Moody, R. Schlessler, R. Kirste, M. Gerhold, R. Collazo in Z. Sitar, *Lasing and longitudinal cavity modes in photo-pumped deep ultraviolet AlGaIn heterostructures*, Appl. Phys. Lett. **102** (2013), 171102.
- [8] The Nobel prize in physics, [http://www.nobelprize.org/nobel\\\_prizes/physics/](http://www.nobelprize.org/nobel\_prizes/physics/), ogled 24. 10. 2014.
- [9] Tha Haitz's Law, <http://www.nature.com/nphoton/journal/v1/n1/full/nphoton.2006.78.html>, ogled 24. 10. 2014.
- [10] Več svetlobe z manj energije, [http://ec.europa.eu/energy/lumen/index\\\_sl.htm](http://ec.europa.eu/energy/lumen/index\_sl.htm), ogled 10. 12. 2014.
- [11] What is correlated color temperature, <http://www.lrc.rpi.edu/programs/nlpip/lightinganswers/lightsources/whatisCCT.asp>, ogled 12. 12. 2014.
- [12] Color rendering index, [http://en.wikipedia.org/wiki/Color\\\_rendering\\\_index](http://en.wikipedia.org/wiki/Color\_rendering\_index), ogled 28. 10. 2014.
- [13] Luminous efficacy, [http://en.wikipedia.org/wiki/Luminous\\\_efficacy](http://en.wikipedia.org/wiki/Luminous\_efficacy), ogled 10. 12. 2014.

<http://www.dmfa-zaloznistvo.si/>