

Nobelove nagrade za fiziko za leto 2014

Janez Strnad

Letošnjo Nobelovo nagrado so dobili Asamu Akasaki, Hiroši Amano in Šudži Nakamura »za iznajdbo učinkovitih modro svetlečih diod, ki omogočajo močna in učinkovita svetila z belo svetlobo«.

Brez polprevodnikov si ne bi mogli več zamisliti vsakdanjega življenja. Ne bi bilo zmogljivih računalnikov, spleta in številnih elektronskih naprav. Poskusimo pojasniti nekaj osnov o delovanju svetlečih diod. *Proteus* je o njih že pisal: *Nova svetila: svetleče diode*, 68 (2005/2006): 402-406.

Atomi imajo *ostra energijska stanja*. Pri prehodu elektrona iz takega stanja v stanje z manjšo energijo razliko energij prevzame *fo-*

ton svetlobe. Atom seva svetlobo z določeno valovno dolžino, po domače z določeno barvo. O tem pričajo izrazite barve svetlobnih reklam, v katerih sevajo atomi v plinih pri zmanjšanem tlaku. V kristalih, v katerih so atomi urejeno razporejeni po prostoru, atomi motijo drug drugega. Stanja sestavljajo *energijske pasove*, v katerih se energija elektrona zvezno spreminja. Med energijskimi pasovi so območja brez stanj, *prepovedani pasovi*. Pomembno je število stanj v pasu, ker vsako stanje lahko zasede kvečjemu en elektron. Razporeditev pasov in njihova zasedenost z elektroni določa, ali je kristal izolator, polprevodnik ali dober prevodnik. V izolatorju so vsa stanja v najvišjem pasu, ki je zaseden z elektroni, *valenčnem pasu*,

Isamu Akasaki je bil rojen leta 1929 v Čiranu na Japonskem. Doktorat je opravil leta 1964 na univerzi v Nagoji. Delal je na raziskovalnem inštitutu Macušita v Tokiu. Leta 1981 je postal profesor na univerzi Nagoja. Zdaj je zaslužni profesor na tej univerzi in profesor na univerzi Meidžo v Nagoji.

Hiroši Amano je bil rojen leta 1960 v Hamamacuju na Japonskem. Doktorat je opravil leta 1989 na univerzi v Nagoji. Zdaj je profesor na tej univerzi.

Šudži Nakamura je bil rojen leta 1954 v Ikati na Japonskem. Doktorat je opravil leta 1994 na univerzi v Tokušimi. Delal je pri majhni japonski kemijski družbi Ničia (Nichia). Zdaj je profesor na kalifornijski univerzi v Santa Barbari in je ameriški državljan.



zasedena. Naslednji višji pas, *prevodni pas*, pa je popolnoma nezaseden. Med prevodnim in valenčnim pasom je prepovedani pas, *energijska špranja*. Ta špranja je tako široka, da elektroni v kristalu nimajo dovolj energije, da bi jo prešli. Zato izolator ne prevaja elektrike.

Polprevodnik ima energijske pasove razporejene enako kot izolator, le da je energijska špranja precej ožja. Zato polprevodnik ne prevaja le, dokler je temperatura zelo nizka. Pri sobni temperaturi zaradi nihanja atomov v kristalu nekaj elektronov z vrha valenčnega pasu preide v prevodni pas. Tam se skoraj prosto gibljejo kot *prevodniški elektroni* z negativnim električnim nabojem. V valenčnem pasu se izpraznjena stanja v množici zasedenih stanj vedejo kot primanjkljaj negativnega naboja, kot pozitivne *vrzeli*. V polprevodniku je razmeroma malo prevodniških elektronov in vrzeli, zato polprevodnik slabo prevaja. V dobrem prevodniku se prevodni in valenčni pas prekrivata. Neposredno ob zasedenih stanjih so nezasedena stanja, v katera preidejo elektroni in prispevajo k prevajanju, ko se gibljejo po prevodniku.

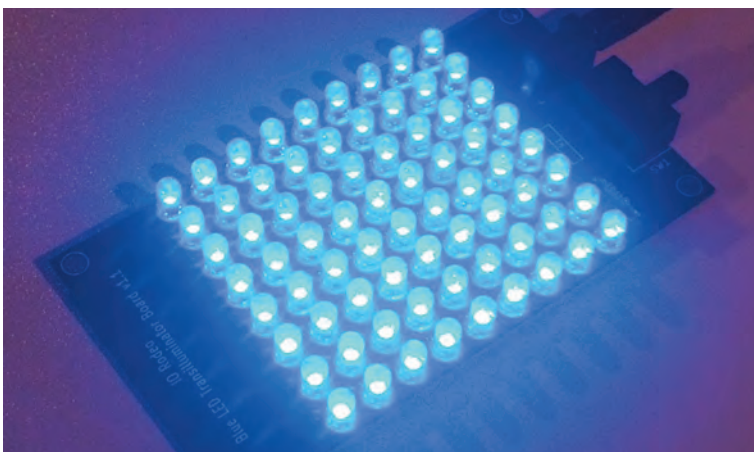
V prečiščenem polprevodniku je toliko vrzeli kot prevodniških elektronov. To je mo-

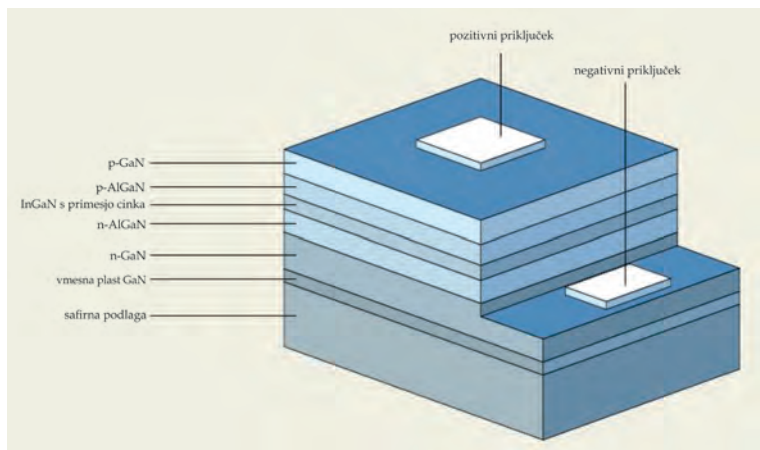
goče spremeniti. Polprevodniku dodamo kot *primes* sled elementa - *donorja*, katerega atom odda elektron, ko se vgradi v kristal. Oddani elektron postane prevodniški elektron. Tako nastane *polprevodnik n*, v katerem naboj prenašajo negativni elektroni. Polprevodniku lahko dodamo kot primes sled elementa - *akceptorja*, katerega atom zajame elektron, ko se vgradi v kristal. Ti atomi vežejo elektrone in s tem naredijo vrzeli. Tako nastane *polprevodnik p*, v katerem naboj prenašajo pozitivne vrzeli. Kristal polprevodnika z območjem n in z območjem p je *polprevodniška dioda*.

Dioda prevaja samo, če je na območje n priključen negativni priključek in na območje p pozitivni priključek. Tedaj proti *stiku n-p* od negativnega priključka potujejo prevodniški elektroni in od pozitivnega priključka vrzeli. Ob stiku elektroni zasedejo vrzeli in je tok sklenjen. To je *rekombinacija*. Prva naloga diod je bila usmerjanje.

V nekaterih polprevodnikih energijo, ki se sprosti pri rekombinaciji, prevzame nihanje atomov in se kristal greje. V drugih polprevodnikih pa ne pride do nihanja atomov in sproščeno energijo prevzame foton svetlobe, ki se izseva. To je osnova delovanja *svetečih*

Modra sveteča dioda in skupina takih diod, kot jih rabijo za razsvetljavo.





Zgradba modre sveteče diode. Vir: Nobelova ustanova.

diod (LED, Light Emitting Diodes). Sliko energijskih stanj polprevodnika s primesjo dobimo, ko sestavimo sliko stanj polprevodnika brez primesi in sliko stanj primesi. Atomov donorja na območju n in atomov akceptorja na območju p je zelo malo. Zato so stanja primesi ostra kot pri atomih v plinu. Vendar je razlika. V plinu so atomi v praznem prostoru, v polprevodniku pa v kristalu. Zato so energijske razlike med stanji primesi v kristalu polprevodnika veliko manjše kot v atomih v plinu.

Stanjem v prevodnem pasu in valenčnem pasu polprevodnika brez primesi se torej v polprevodniku s primesjo pridružijo ostra stanja primesi. V polprevodniku n je stanje primesi tik pod dnom prevodnega pasu, v polprevodniku p pa je stanje primesi tik nad vrhom valenčnega pasu. V sveteči diodi prevodniški elektron iz stanja tik pod dnom prevodnega pasu pri rekombinaciji izpolni vrzel tik nad vrhom valenčnega pasu in razliko energij prevzame izsevani foton. Izsevane svetlobe ima določeno valovno dolžino. Z izbiro kristala in primesi je mogoče vplivati na razliko energij in s tem na valovno dolžino izsevane svetlobe.

V najbolj razširjenih polprevodnikih siliciju in germaniju pri rekombinaciji sproščeno energijo prevzame nihanje atomov, zato ni-

sta uporabna za sveteče diode. Prve sveteče diode so izdelali iz galijevega arzenida (GaAs) leta 1962. Morali so jih hladiti s tekočim dušikom in so oddajale infrardečo svetlobo. V teh diodah sta bili območji n in p iz istega kristala, le da sta vsebovali različni primesi. V naslednjem koraku so naredili *heterostrukture*. Sestavili so ozki območji iz različnih snovi s podobnimi kristalografskimi lastnostmi tako, da se je ohranila enotna kristalna zgradba. To so dosegli z *epitaksijo*. Na kristalu iz kake snovi so vzgojili tanko plast druge snovi s podobno kristalno zgradbo tako, da se je nadaljevala zgradba prvega kristala.

Misel sta uresničila Žores Alfjorov in Herbert Kroemer po letu 1963. Kristalografske lastnosti nekaterih spojin je mogoče spremeniti z majhnim dodatkom druge spojine, na primer lastnosti galijevega fosfida (GaP) lahko prilagodimo lastnostim aluminijevega fosfida (AlP) s tem, da dodamo malo galijevega arzenida (GaAs). Alfjorov je sodelavci opisal vrsto heterostruktur v letih od 1967 do 1971. On in Kroemer sta si leta 2000 razdelila polovico Nobelove nagrade »za razvoj polprevodniških heterostruktur, ki jih uporabljajo v hitri in optični elektroniki«.

Proti koncu šestdesetih let prejšnjega stoletja je uspelo gojiti kristale galijevega fosfida z *epitaksijo hidridov v pari*. Pri višji temperaturi so delovali z vodikovim kloridom na galij in iz plinastega galijevega klorida potem z amonijakom dobili galijev nitrid. S tem se je ukvarjalo več laboratorijev, med njimi tudi japonskih. Pojavile so se težave z nečistočami in pri dodajanju primesi akceptorja.

Od sedemdesetih let prejšnjega stoletja je v rabi *epitaksija z molekulskimi curki*. V visokem vakuumu skozi šobe, ki jih nadzoruje računalnik, spuščajo proti segretemu kristalu curke atomov. Atomi se uredijo v zelo tanko kristalno plast z zeleno sestavo tako, da nadaljujejo zgradbo kristala.

Uporabili so tudi *epitaksijo metalorganskih par*. V posodo uvedejo zelo čisto plinasto organsko spojino galija in zelo čist plinast amonijak. Atomi galija in dušika se nalagajo na kristal v pravem redu, metan pa kot stranski produkt odvedejo.

Z galijevim fosfidom (GaP) in pozneje z galijevim arzenovim fosfidom (GaAsP) in drugimi polprevodniki je uspelo narediti sveteče diode, ki jih ni bilo treba hladiti in ki so oddajale rdečo in zeleno svetlobo. Teže je bilo z modro svetlobo, ki ima manjšo valovno dolžino in zahteva večjo energijsko razliko. Že ob koncu petdesetih let so v tej zvezi pomislili na galijev nitrid (GaN). V enem od velikih raziskovalnih laboratorijev so že prijaviili patent. Toda pojavile so se hude težave pri gojenju njegovih kristalov. V večini raziskovalnih laboratorijev so obupali in prešli na druge kristale. Dve japonski raziskovalni skupini pa sta vztrajali. Skupina Asamuja Akasakija na raziskovalnem inštitutu Macušita v Tokiu je začela raziskovati galijev nitrid leta 1974. Leta 1981 je Akasaki prešel na univerzo Nagoja in je tam skupaj s Hirošijem Amanom nadaljeval raziskovanje. Osnovne težave pri gojenju kristalnih plasti galijevega nitrida so premagali šele leta 1986. Najprej so vzgojili zelo tanko plast aluminijevega nitrida na safirju, to je na aluminijevem oksidu, pri temperaturi 500 °C. Na tej plasti so potem pri višji temperaturi 1000 °C vzgojili plasti galijevega nitrida. Kristalne plasti galijevega nitrida je uspelo vzgojiti tudi Šudžiju Nakamuri pri japonski kemijski družbi Nichia. Gojil jih je kar na tanki plasti galijevega nitrida, ki jo je vzgojil pri nizki temperaturi.

Pojavila se je nova težava. Ko so poskušali dobiti galijev nitrid p, je primes poslabšala lastnosti kristala. Akasaki, Amano in sodelavci so opazili, da se izboljšajo lastnosti kristalov galijevega nitrida s primesjo cinka kot akceptorja, ko so jih opazovali s tipalnim elektronskim mikroskopom. Pri tem je curek elektronov postopno otipal kristal. Zato so lastnosti kristalov galijevega nitrida s primesjo cinka ali magnezija izboljšali z obsevanjem z elektroni z majhno energijo. To so pojasnili Nakamura in sodelavci leta 1992. Atomi primesi cinka ali magnezija so se spojili z atomi vodika iz nečistoč v spojin, ki so pokvarile lastnosti kristala. Curek elektronov pa je neželene spojine razgradil. Nakamura in sodelavci so enak učinek dosegli tako, da so kristal segreli.

V letih 1991 in 1992 je obema raziskovalnima skupinama uspelo narediti heterostrukture. Akasakijeva skupina je stavila na aluminijev galijev nitrid (AlGaN) in galijev nitrid (GaN), Nakamurova pa na indijev galijev nitrid (InGaN) in galijev nitrid (GaN). Nakamurova skupina je delala z indijevim galijevim nitridom (InGaN) in aluminijevim nitridom (AlN). Leta 1994 so izdelali sveteče diode z modro svetlobo z ugodnim izkoristkom. S takimi svetlečimi diodami je mogoče dobiti belo svetlobo. V dodatni plasti del modre svetlobe iz diode

s fluorescenco povzroči, da nastane rumena, oranžna in rdeča ter zelena svetloba, ki skupaj s preostankom modre da belo svetlobo. Belo svetlobo je mogoče dobiti tudi s tremi svetlečimi diodami za rdečo, zeleno in modro svetlobo. Naprava je nekoliko bolj zapletena, a omogoča, da spreminjamo barvo razsvetljave.

Letošnja nagrada zadeva tehniške podrobnosti, v katere se nismo mogli spuščati. Nekateri izdelovalci diod jih celo obdržijo zase. Zato smo se svetlečih diod lotili bolj na široko. Zagotovo se belim svetlečim diodam obeta pomembna vloga. Majhne na veliko že uporabljajo v elektronskih napravah. Več belih svetlečih diod skupaj uporabijo za razsvetljavo. Pri tem bodo kmalu postale nepogrešljive. So 19-krat učinkovitejše kot žarnice in štirikrat učinkovitejše kot fluorescentne svetilke (in »varčne sijalke«). 20 do 30 odstotkov energije porabimo

za razsvetljavo. Bele svetleče diode bodo tako prihranile precej energije. Zdaj razvijajo diode z vse boljšim izkoristkom in z večjo močjo. Neki družbi je že uspelo podvojiti izkoristek. Poleg tega žarnica z nitko traja v povprečju po oceni tisoč ur, fluorescentna cev deset tisoč ur, dioda pa sto tisoč ur. Zaradi tega bo razsvetljava z diodami tudi prihranila nekaj materiala. V območjih, kjer nimajo električne napeljave, bodo svetleče diode zelo koristne. Sončne celice bodo čez dan zbirale energijo, ki jo bodo ponoči uporabile za napajanje belih svetlečih diod.

Literatura:

Blue LEDs - Filling the world with new light. Popular science background. The Royal Swedish Academy of Sciences.

Efficient blue light-emitting diodes leading to bright and energy-saving white light sources. Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2014. The Royal Swedish Academy of Sciences.

Pajek s šotorom

Matija Gogala

Lansko leto sem bil z ženo Nado in vnukinjo Katjo v Braziliji, kjer sem se udeležil mednarodnega bioakustičnega kongresa. Po kongresu nas je prof. Maria Luisa da Silva, ena izmed organizatorjev kongresa, povabila v svojo hišo blizu Belema nedaleč od izliva Amazonke. Ta hiša ni le bivališče, temveč tudi raziskovalni biološki laboratorij. Stoji ob robu zavarovanega pragozda Gunma, kamor smo hodili spoznavat tamkajšnjo živalstvo in rastlinstvo. In tam sem na robu pragozda na listih nekega grma opazil zanimive bele tvorbe, ki so se razkrile za prav posebna zavetja drobnih pajkov. Ti pajkci vrste *Fritzia muelleri* sodijo med pajke skakalce iz poddružine Dendryphantinae. Mene

je ta struktura spomnila na nekak cirkuški šotor, ki ima tri obokane odprtine in neverjetno »premišljene« povezave med mesti, kjer so pajčje niti pritrjene na podlago. Tu so diagonalne, prečne in tudi vzdolžne pajčevinaste niti, nato polkrožne opore okoli odprtin, na zgornjem oziroma zadnjem delu tvorbe pa odprtine ni, saj bi drugače voda vdiral v pajčje bivališče. Najprej smo razmišljali, če ta »šotor« v sredini potrebuje tudi eno ali več podpor, da kot pri naših šotorih poveča pokriti prostor. Toda ob natančnem pregledu naših fotografij se je pokazalo, da to sploh ni potrebno, saj pajkci ob gradnji šotora izkoristi nagubanost listov. Jarek vzdolž večjih listnih žil naredi