

PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik **27** (1999/2000)

Številka 2

Strani 72-77

Janez Strnad:

ELEKTRONI IN VERZELI V POLPREVODNIKU BREZ PRIMESI

Ključne besede: fizika, električni tok, elektroni, izolatorji, polprevodniki, energijska špranja, silicij, germanij.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/27/1393-Strnad.pdf>

© 1999 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

© 2010 DMFA - založništvo

Vse pravice pridržane. Razmnoževanje ali reproduciranje celote ali posameznih delov brez poprejšnjega dovoljenja založnika ni dovoljeno.

ELEKTRONI IN VRZELI V POLPREVODNIKU BREZ PRIMESI

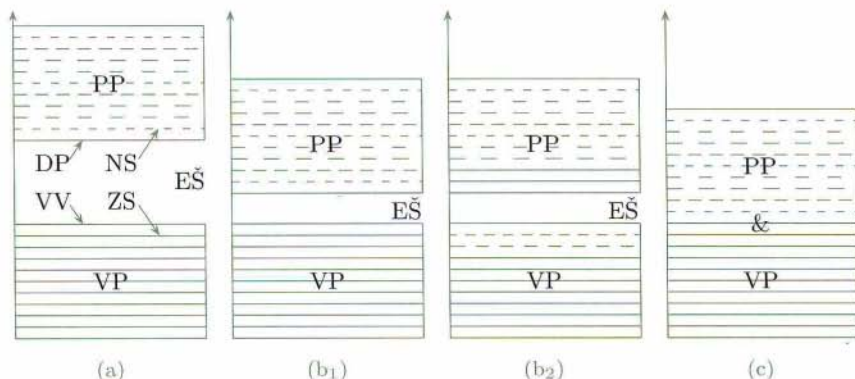
V prvi številki tega letnika smo pojasnili pozitivni Hallov koeficient nekaterih kovin. V ta namen smo se morali precej potruditi in vključiti v razpravo spoznanje, da gibanja elektronov ne moremo opisati, kot opišemo gibanje žog in drugih teles, vidnih s prostim očesom. V okviru kvantne mehanike smo elektronu v kristalu priredili enoelektronsko stanje z določeno energijo. Tako stanje je po Paulijevi prepovedi nezasedeno ali ga zasede kvečjemu en elektron. Enoelektronska stanja sestavljajo energijske pasove. Med energijskimi pasovi so prepovedani pasovi, na katerih ni enoelektronskih stanj. Privzeti smemo, da se v energijskem pasu energija elektrona spreminja v poljubno majhnih korakih, ker so tam enoelektronska stanja gosta. Elektron v kristalu ima lahko, podobno kot elektron v katodni cevi, poljubno energijo, če le ni nižja kot *dno pasu* in ne višja kot *vrh pasu*. V kristalu pa moramo upoštevati, da je na voljo le določeno število enoelektronskih stanj. V energijskem pasu, v katerem so vsa enoelektronska stanja zasedena, elektroni nimajo nobene svobode. Ni namreč nezasedenih enoelektronskih stanj, ki bi jih lahko dosegli z majhno spremembo energije. Vsa enoelektronska stanja v nižjih pasovih so zasedena, za prehod v nezasedena enoelektronska stanja v višjem energijskem pasu pa elektron nima od kod dobiti potrebne energije. V kristalu z zasedenimi energijskimi pasovi ni nosilcev naboja, ki bi lahko potovali in prenašali naboj. Četudi priključimo na kristal elektrodi pod napetostjo, po kristalu ni toka.

Opis zadeva kristal *izolatorja*. Najvišji energijski pas, v katerem so zasedena enoelektronska stanja, *valenčni pas*, je do vrha zaseden. Ime je pas dobil po valenčnih elektronih, ki so v atomu najšibkeje vezani in ki sodelujejo pri kemijskih reakcijah. V naslednjem višjem energijskem pasu, *prevodnem pasu*, pa so vsa enoelektronska stanja nezasedena. Med prevodnim in valenčnim pasom je prepovedani pas, ki mu v tem primeru pravimo *energijska špranja*. Izolator, na primer diamant, ne prevaja elektrike, ker je njegova energijska špranja široka več kot $8 \cdot 10^{-19}$ joula ali 5 elektronvoltov.¹ Elektron v valenčnem pasu v kristalu nima od kod dobiti energije, da bi prešel špranjo. Energijo atomov, ki v kristalu nihajo okoli ravnovesne lege, cenimo pri sobni temperaturi v povprečju na

¹ Elektronvolt, eV, je enota za merjenje energije v svetu atomov in delcev. Delcu z osnovnim nabojem e_0 se v praznem prostoru kinetična energija spremeni za $e_0 \cdot 1 \text{ V} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 1 \text{ V} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ joula, ko preleti napetost 1 V.

$4 \cdot 10^{-21}$ joula ali 0,03 elektronvolta. Dno prevodnega pasu je pri 170-krat večji energiji (slika 1a).²

Polprevodnik se od izolatorja razlikuje po širini energijske špranje. Silicij ima špranjo s širino približno 1 elektronvolt, germanij pa $\frac{2}{3}$ elektronvolta. Pri zelo nizki temperaturi polprevodnik, na katerega priključimo električno napetost, enako kot izolator ne prevaja (slika 1b).

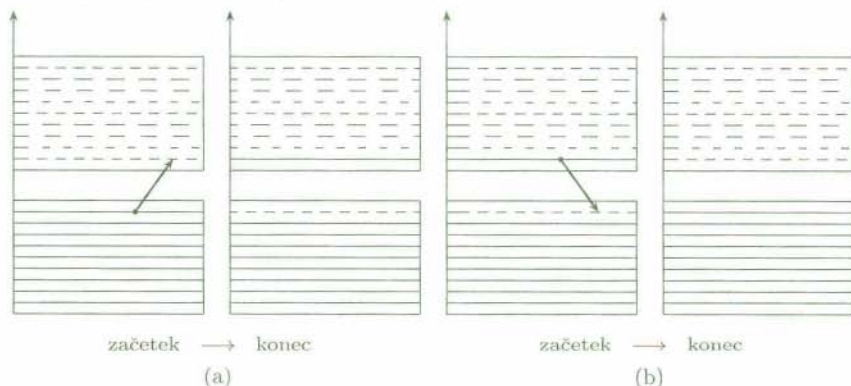


Slika 1. Za izolator je značilna široka energijska špranja (EŠ) med dnom (DP) prevodnega pasu (PP) in vrhom (VV) valenčnega pasu (VP). Na navpično os je nanesena energija elektrona. V valenčnem pasu so vsa enoelektronska stanja zasedena (ZS), v prevodnem pasu pa so vsa enoelektronska stanja nezasedena (NS). Izolator ne prevaja elektrike ne glede na temperaturo. Le pri zelo visoki napetosti lahko v izolatorju pride do preboja, podobno kot, na primer, v zraku, ko preskoči iskra (a). Za polprevodnik je značilna precej ožja energijska špranja. Pri zelo nizki temperaturi je tako kot pri izolatorju prevodni pas nezaseden in valenčni pas do vrha zaseden. V tem primeru polprevodnik ne prevaja (b₁). Pri sobni temperaturi majhno število elektronov z vrha valenčnega pasu preide v prevodni pas in zasede enoelektronska stanja ob njegovem dnu. Pod vrhom sicer zasedenega valenčnega pasu preostanejo nezasedena enoelektronska stanja, ki jih opišemo kot vrzeli. Kar je dno prevodnega pasu za prevodniške elektrone, je vrh valenčnega pasu za vrzeli. Pri lastnem prevajanju je v polprevodniku pri sobni temperaturi prav toliko vrzeli kot prevodniških elektronov (b₂). V kovini, ki je dober prevodnik, se prevodni pas pokriva z valenčnim pasom: pas je delno zaseden, na primer do polovice, tako da je v neposredni bližini zasedenih enoelektronskih stanj dovolj nezasedenih enoelektronskih stanj (c).

² Elektrone z vrha valenčnega pasu lahko spravimo do dna prevodnega pasu in v višja enoelektronska stanja čez 5 elektronvoltov široko energijsko špranjo, če kristal obsevamo z ultravijolično svetlobo z valovno dolžino, manjšo od 240 nanometrov. Izolator, na katerega je priključena napetost, začne ne glede na temperaturo šibko prevajati, če ga obsevamo z dovolj kratkovalovno svetlobo.

Pri sobni temperaturi pa šibko prevaja. Pri siliciju je širina špranje sicer 33-krat in pri germaniju 22-krat večja kot energija, ki smo jo priredili termičnemu gibanju atomov. A to je povprečna energija in nihajoči atomi ob redkih priložnostih lahko oddajo večjo energijo. Na njen račun zelo redki elektroni z vrha valenčnega pasu preidejo v prevodni pas. Tam lahko kot prevodniški elektroni potujejo po kristalu in prispevajo k toku. Ob dnu prevodnega pasu je namreč veliko nezasedenih enoelektronskih stanj, v katera elektron iz stanja na dnu prevodnega pasu lahko preide zaradi električne sile, če je na kristal priključena napetost.

Za elektroni, ki preidejo v prevodni pas, na vrhu valenčnega pasu ostanejo nezasedna enoelektronska stanja. Posamična nezasedena stanja, v sicer do vrha zasedenem energijskem pasu, smo opisali z vrzelmi. Vrzeli smo uvedli kot namišljeni delec v nezasedenem valenčnem pasu in mu priredili pozitivni naboj. Vsak elektron, ki preide v prevodni pas, zapusti v valenčnem pasu vrzel. Zato je število vrzeli enako številu prevodniških elektronov. Vselej nastaneta skupaj prevodniški elektron in vrzel, in to imenujemo *nastanek para* (slika 2a). Par preneha obstajati, ko elektron iz enoelektronskega stanja prevodnega pasu zasede nezasedeno enoelektronsko stanje pod vrhom valenčnega pasu, pri čemer se sprosti energija, ki jo je prej terjal nastanek para. Ta pojav imenujemo *rekombinacija* (slika 2b). V toplotnem ravnovesju v polprevodniku nastane v določenem času toliko parov, kolikor se jih v tem času rekombinira.



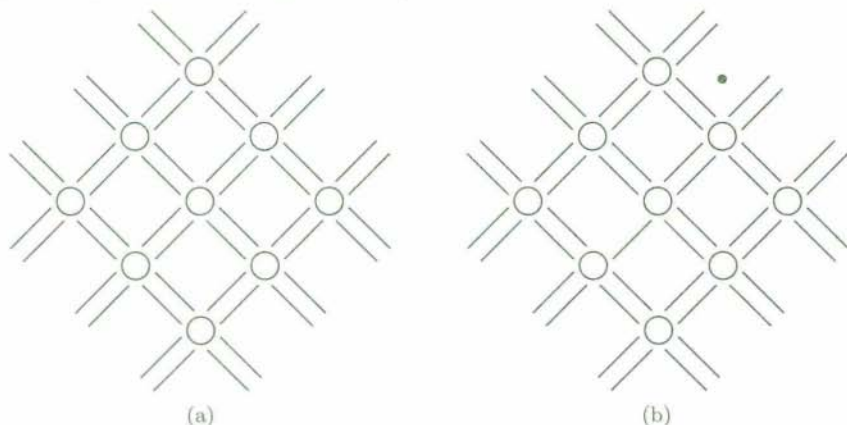
Slika 2. Vrzeli nastane skupaj s prevodniškim elektronom ob nastanku para (a). Vrzeli preneha obstajati skupaj s prevodniškim elektronom ob rekombinaciji (b).

Vrzeli enako kot prevodniški elektroni prispevajo k toku. V kristalu, na katerega priključimo napetost, prenašajo pozitivni naboj v nasprotni smeri kot prevodniški elektroni prenašajo negativnega. Podobno v

kapljevini naboj prenašajo pozitivni in negativni ioni. Za polprevodnik uporabimo malo predelano enačbo, ki smo jo srečali pri toku v kapljevini. Prevodnost $1/\zeta$ sestavimo iz prispevka prevodniških elektronov in vrzeli:

$$\frac{1}{\zeta} = e_0(\beta + \beta_v) \frac{N}{V}.$$

Elektron nosi naboj $-e_0$ in vrzel naboj e_0 . Gibljivost negativnih ionov smo nadomestili z gibljivostjo prevodniških elektronov β , gibljivost pozitivnih ionov z gibljivostjo vrzeli β_v ter upoštevali, da se gostota vrzeli ujema z gostoto prevodniških elektronov N/V .



Slika 3. Atom silicija ali germanija ima štiri valenčne elektrone. Atom je v kristalu polprevodnika vezan na vsakega od štirih sosednjih atomov, ki so okoli njega razvrščeni kot oglišča tetraedra okoli središča. Zato je risba v ravini lahko le shematična. K vezi prispevata dva valenčna elektrona, lahko si mislimo, da od vsakega atoma po eden, ki se gibljeta pretežno v bližini zveznice atomov. Krožec zaznamuje silicijev ali germanijev ion s štirimi pozitivnimi osnovnimi naboji, črtica elektron v valenčnem pasu in točka prevodniški elektron (a). Ta prostorska ponazoritev ustreza ponazoritvi z enoelektronskimi stanji (b_1) na sliki 1. – Pri sobni temperaturi se pri maloštevilnih atomih eden od valenčnih elektronov sprosti iz vezi in zapusti v njej vrzel. Prej smo rekli, da preide iz valenčnega pasu v prevodni pas. Postane prevodniški elektron, ki potuje po kristalu proti pozitivni elektrodi. Vrzel potuje proti negativni elektrodi tako, da jo po vrsti izpolnjujejo elektroni iz drugih vezi (b). Ta prostorska ponazoritev ustreza ponazoritvi z enoelektronskimi stanji (b_2) na sliki 1.

Gostota nosilcev naboja, to je gostota prevodniških elektronov ali gostota vrzeli N/V , je v germaniju pri sobni temperaturi kakih 10^{10} -krat manjša od gostote prevodniških elektronov v bakru, skupna gibljivost nosilcev naboja v germaniju $\beta_v + \beta$ pa kakih stokrat večja kot gibljivost

prevodniških elektronov v bakru. Zato je prevodnost germanija pri sobni temperaturi $0,5 \text{ } (\Omega\text{m})^{-1}$ približno stot milijonkrat manjša kot prevodnost bakra $5,9 \cdot 10^7 \text{ } (\Omega\text{m})^{-1}$. Z naraščajočo temperaturo elektroni vse uspešneje prehajajo preko energijske špranje, zato v polprevodniku z naraščajočo temperaturo izrazito naraščata gostota nosilcev naboja in prevodnost. Tudi po tem se polprevodnik razlikuje od kovine, v kateri z naraščajočo temperaturo prevodnost pojema.

Dodajmo še nekaj pripomb. Prva zadeva vprašanje o čistoči polprevodnika. Ne pri kovinah ne pri plinih in ne pri kapljevinah to vprašanje ni bilo tako pomembno. Pri polprevodnikih pa so nečistoče zelo pomembne. S posebnim prijemom so sicer uspeli dobiti zelo čist germanij, vsekoli je bila v njem gostota tujih atomov 10^{18} m^{-3} , ob tem ko je velikostna stopnja gostote atomov germanija 10^{28} m^{-3} . V najčistejšem germaniju pride tedaj tuj atom na približno 10^{10} atomov germanija. V takem kristalu v določeni smeri v povprečju na poti $(10^{10})^{1/3} \approx 2000$ razdalj med sosednjima atomoma germanija naletimo na tuj atom. Razmislek nam vzame voljo, da bi govorili o "čistem" polprevodniku. Raje govorimo o *lastnem* ali *notranjem prevajanju*. S tem mislimo na prevajanje, ki ga določajo samo lastnosti polprevodnika in ni odvisno od tujih atomov. Zapisana enačba zadeva samo lastno prevajanje polprevodnika. Podatek za lastno prevodnost smo navedli le za germanij. Silicija za zdaj ni mogoče dobiti tako čistega, da bi lahko pri njem pri sobni temperaturi opazovali lastno prevajanje.

Ustavimo se tudi ob trditvi, da je vrzel namišljen delec. Na elektron v katodni cevi delujeta elektrodi s silo, ki povzroči pospešek. Električno silo poveže s pospeškom masa elektrona $9,1 \cdot 10^{-31}$ kilograma. Na elektron, ki se giblje po kristalu, deluje poleg električne sile zaradi napetosti v prostoru med elektrodama še električna sila po kristalu periodično razporejenih atomov. Slednji se v kristalu ni mogoče izogniti. Zato elektrona v kristalu ne moremo opisati tako, kot opišemo elektron v katodni cevi. Vseeno električno silo zaradi napetosti povežemo s pospeškom elektrona, ne da bi se ozirali na periodično silo atomov. Potezo moramo plačati s tem, da elektronu priredimo *efektivno maso*, ki se razlikuje od mase prostega elektrona v katodni cevi in ki upošteva periodično silo atomov. V tem primeru ni vseeno, v kateri smeri se elektron giblje po kristalu, zato je efektivna masa elektrona v kristalu odvisna od smeri. Efektivna masa prevodniškega elektrona v siliciju je petkrat manjša od mase prostega elektrona in v germaniju desetkrat manjša, če se zadovoljimo z okvirno oceno. Poleg tega je za prevodniški elektron treba uporabiti drugačno enačbo za gibalno količino in za kinetično energijo kot za prost elektron. Do enakega sklepa pridemo tudi pri vrzeli. Vrzeli priredimo efektivno

maso, za katero navadno privzamemo, da se približno ujema z efektivno maso prevodniškega elektrona v istem kristalu. Zaradi vsega tega na kratko rečemo, da sta elektron in vrzel *kvazi delca*.

Efektivno maso elektrona v kristalu ponazorimo s kroglico, ki jo potiskamo po vodi. Kroglica deluje na vodo in del vode vleče za seboj. Zato moramo kroglici prirediti "efektivno" maso, če bi njeno gibanje v vodi radi opisali podobno kot gibanje proste kroglice. "Efektivna" masa se razlikuje od mase proste kroglice in zajame tudi maso gibajočega se dela vode. Nekateri namesto kroglice v vodi pomislijo na krta, ki rije po zemlji in jo odriva. Prispodoba je manj posrečena, saj elektron v kristalu nič ne "dela".

Na začetku (v 5. številki 25. letnika Preseka) se pri toku po kovini še nismo ozirali na zgradbo snovi ter smo kovino opisali z negativno tekočino in pozitivno trdnino. Ali je mogoče v tem duhu opisati lastno prevajanje v polprevodniku? Vzemimo, da tudi polprevodnik sestavlja pozitivna trdnina. Proti pozitivni elektrodi se giblje negativna tekočina, katere naboj v vsakem delu polprevodnika izravna naboj trdnine. A kaj potuje proti negativni elektrodi? Pozitivni naboji ne morejo potovati. Ugotovili smo tudi, da vrzeli ne moremo imeti za primanjkljaj elektronov in da jih ne gre primerjati z mehurčki. Po tem sklepamo, da lastnega prevajanja v polprevodniku ne moremo dosledno opisati s starimi predstavami, ki so se spočetka obnesle pri toku po kovini.

Polprevodniki niso postali nenadomestljivi zaradi lastnega prevajanja. Veliko pomembnejše je *primesno prevajanje*, to je prevajanje polprevodnika, ki mu dodamo želeni delež zelene *primesi*. O tem pa drugič.

polprevodnik	β	β_v	$\beta + \beta_v$
silicij	0,19 m ² /Vs	0,05 m ² /Vs	0,24 m ² /Vs
germanij	0,38 m ² /Vs	0,18 m ² /Vs	0,56 m ² /Vs

Gibljivost elektronov β , gibljivost vrzeli β_v in skupna gibljivost $\beta + \beta_v$ v siliciju in germaniju.