

PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik 27 (1999/2000)

Številka 5

Strani 276-282

Janez Strnad:

ELEKTRONI IN VRZELI V POLPREVODNIKU S PRIMESJO

Ključne besede: fizika, električni tok, elektroni, izolatorji, polprevodniki, energijska špranja, vrzeli, dopiranje, germanij, arzen.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/27/1416-Strnad.pdf>

© 2000 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 S PRIMESJO

Sestavek v 2. številki Preseka je govoril o polprevodniku, ko je električni tok, ki teče po njem, odvisen samo od lastnosti polprevodnika in nič od tujih atomov v polprevodniku. V kristalu polprevodnika je med prevodnim in valenčnim pasom energijska špranja z razmeroma majhno širino, npr. $\frac{2}{3}$ elektronvolta pri germaniju. Pri zelo nizki temperaturi je valenčni pas zaseden in prevodni pas nezaseden. Ni nosilcev, ki bi lahko potovali po kristalu, in ni toka, ko na kristal pritismo napetost. Pri zelo nizki temperaturi se polprevodnik vede kot izolator. Pri sobni temperaturi pa maloštevilni elektroni od atomov, ki nihajo v kristalu okoli ravnovesnih leg, dobijo dovolj energije, da preidejo iz valenčnega pasu preko špranje v prevodni pas. V valenčnem pasu ti elektroni zapustijo nezasedena enoelektronska stanja, ki jih opišemo kot vrzeli. Prevodniški elektroni in vrzeli prispevajo k toku, če na kristal pritismo napetost. Pri sobni temperaturi polprevodnik prevaja veliko slabše kot kovina, a veliko bolje kot izolator. Gostota prevodniških elektronov je v takem polprevodniku enaka gostoti vrzeli. Toda polprevodniki ne zmorejo samo tega, kar smo opisali kot lastno prevajanje.

Zdaj je čas, da opišemo druge posebnosti polprevodnikov. Mislimo si, da talini zelo čistega germanija dodamo kot *primes* malo arzena, desnega sosedu v periodni preglednici elementov. S tujo besedo rečemo, da germanij *dopiramo* z arzenom (dope v angleščini pomeni lak ali mamilo). Pripravni slovenski besedi "začimba" in "začiniti", ki ju je predlagal profesor Ivan Kuščer, se še nista prijeli.

Atom germanija ima štiri valenčne elektrone, ki so na jedro šibkeje vezani kot preostalih 28 elektronov v krogelno simetrični sredici. Elektroni v sredici skupaj z jedrom atoma sestavljajo ion germanija s štirimi pozitivnimi osnovnimi naboji Ge^{IV} . V kristalu germanija so ti ioni urejeni v prostorsko mrežo, v kateri vsak ion obdajajo štirje sosednji ioni, kot oglišča tetraedra obdajajo njegovo središče. Po dva in dva valenčna elektrona, lahko si mislimo, da po eden od vsakega sosedu, se gibljeta v bližini zveznice sosedov in prispevata k vezi atomov v kristalu. Od nihajočega iona Ge^{IV} dobi kateri od valenčnih elektronov dovolj energije, da zapusti vez in odtava po kristalu. V vezi zapusti vrzel, ki jo po vrsti zasedejo drugi elektroni, in tako vrzel tudi odtava po kristalu. Ta ponazoritev dopolni prejšnjo ponazoritev z enoelektronskimi stanji.

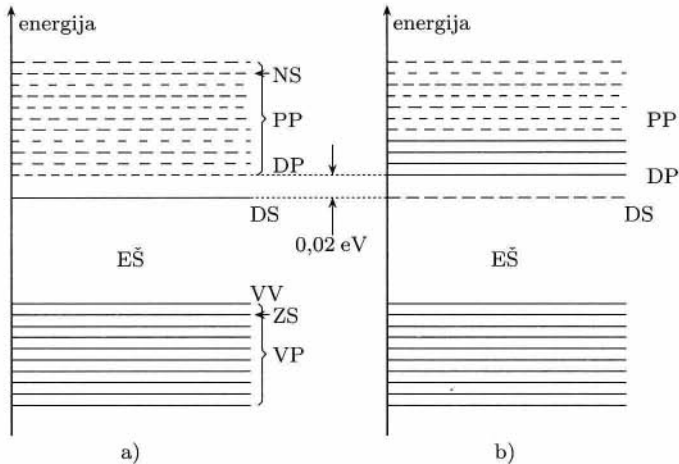
Atomi arzena, ki ga dodamo talini germanija, se navzven le malo razlikujejo od atomov germanija in ob strjevanju v kristalu zasedejo mesta, ki bi jih v čistem germaniju zasedli atomi germanija. Atomov arzena je v

kristalu veliko manj kot atomov germanija in mesta med atomi germanija zasedejo po naključju. Tu jih je več, tam manj, tako da niso urejeno razporejeni po prostoru. Elektroni v njih imajo, podobno kot v atomih v plinu, enoelektronska stanja z ostro določeno energijo.

Atom arzena ima pet valenčnih elektronov. V kristalu germanija se štirje od njih vgradijo v vezi s štirimi sosednjimi ioni Ge^{IV} . Peti valenčni elektron je nekakšno "peto kolo". Okoli arzenovega iona in štirih valenčnih elektronov se giblje podobno kot elektron okoli jedra v vodikovem atomu. Razlika je v tem, da se giblje elektron v vodikovem atomu po praznem prostoru, peti valenčni elektron v atomu arzena pa po kristalu germanija. To približno opišemo tako, da upoštevamo manjšo silo med naelektrenima delcema v kristalu (v kristalu $e_0^2/4\pi\epsilon_0 r^2$ namesto $e_0^2/4\pi\epsilon_0 r^2$ v vakuumu, če je e_0 osnovni naboj, ϵ_0 influenčna konstanta, r razdalja med delcema in $\epsilon = 16$ dielektričnost germanija). Poleg tega elektronu priredimo efektivno maso, ki je manjša od mase prostega elektrona. Zaradi tega je peti valenčni elektron v kristalu germanija veliko šibkeje vezan na atom arzena kot elektron na atom vodika. Elektronu v vodikovem atomu moramo dovesti vsaj ionizacijsko energijo 13,6 elektronvolta, da ga odtrgamo od atoma, za peti valenčni elektron v atomu arzena v kristalu germanija pa zadostujeta 0,02 elektronvolta.

Pri zelo nizki temperaturi so peti valenčni elektroni v kristalu germanija vezani vsak na svoj atom arzena in ne prispevajo k prevajanju (slika 1a). Pri sobni temperaturi pa se odtrgajo od atomov in preostanejo pozitivni ioni As^+ , ki ostanejo vezani na svoja mesta v kristalu. Peti valenčni elektroni pa zasedejo enoelektronska stanja ob dnu prevodnega pasu in kot prevodniški elektroni sodelujejo pri prevajanju (slika 4a). Pri sobni temperaturi so ti prevodniški elektroni v prevodni pas prešli iz enoelektronskih stanj v atomih arzena, tako imenovanih *primesnih stanj*. V valenčnem pasu niso zapustili nezasedenih enoelektronskih stanj, zato v tem primeru v kristalu ni vrzeli (slika 1b). Gostota prevodniških elektronov ni enaka gostoti vrzeli kot pri lastnem prevajanju. Prevodniški elektroni so *večinski nosilci naboja* in kristal je *polprevodnik n*, ker so večinski nosilci negativni. Stanja primesi imenujemo *donorska stanja*, ker "darujejo" elektrone v prevodni pas. Ta stanja imajo ostro določeno energijo, kar priča, da zadevajo posamične atome na njihovih mestih v kristalu.

Ne bi bilo prav, ko bi zamolčali, da se kot pri lastnem prevajanju tudi v polprevodniku n pojavijo vrzeli in prevodniški elektroni. Toda gostota vrzeli in njej enaka gostota dodatnih prevodniških elektronov je veliko manjša kot gostota prevodniških elektronov iz stanj primesi. Vrzeli so v tem primeru *manjšinski nosilci naboja*.



Slika 1. Enoelektronska stanja v polprevodniku n pri zelo nizki temperaturi (a) in pri sobni temperaturi (b). DP dno prevodnega pasu PP, VV vrh valenčnega pasu VP, EŠ energijska špranja. Pri zelo nizki temperaturi so v valenčnem pasu vsa enoelektronska stanja zasedena (ZS) in v prevodnem pasu nezasedena (NS). Enoelektronska stanja primesi, v tem primeru donorska stanja DS 0,02 elektronvolta pod dnom prevodnega pasu, so pri zelo nizki temperaturi zasedena, pri sobni temperaturi pa nezasedena. Donorskih stanj je toliko kot atomov donorja, njihova energija pa je ostro določena.

Ni težko izračunati prevodnosti polprevodnika n. V približku smemo vzeti, da pri sobni temperaturi vsak atom arzena v kristalu germanija prispeva svoj peti valenčni elektron v prevodni pas, in zanemariti prispevek manjšinskih nosilcev. Po zgledu kovin je

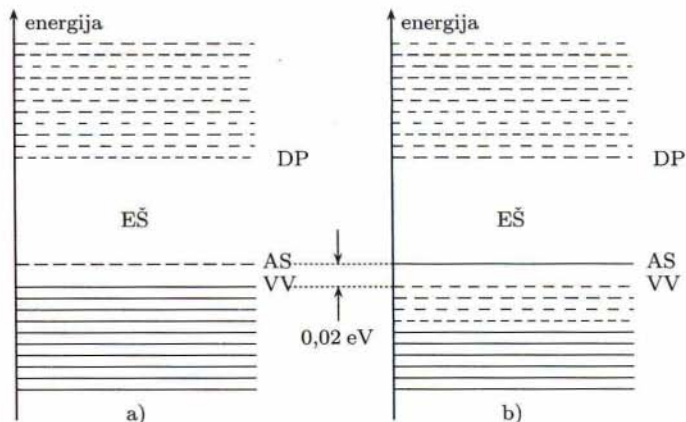
$$\frac{1}{\zeta_n} = e_0 \beta \frac{N_d}{V},$$

pri čemer je N_d/V gostota atomov arzena v kristalu germanija, enaka gostoti prevodniških elektronov N/V , β je gibljivost prevodniških elektronov. Prevodnost polprevodnika n lahko spreminjamo na širokem območju s tem, da spreminjamo gostoto primesi. Prevodnost se bolj ali manj poveča, če germaniju ali siliciju dodamo več ali manj arzena oz. kakega kemijsko sorodnega petvalentnega elementa, npr. fosfora ali antimona.

Navedimo zgled. V kubičnem decimetru germanija z maso 5,5 kg naj bo $1,6 \cdot 10^{18}$ atomov arzena s skupno maso 0,2 miligrama. Po enačbi je prevodnost tega polprevodnika n približno $100 (\Omega \text{ m})^{-1}$. Kilogramu germanija moramo v tem primeru dodati samo 0,037 miligrama arzena. To je malo v primeri z masami, s katerimi imajo opraviti v lekarni.

Na začetku smo nekatere pojave pri prevajanju kovin opisali s pozitivno trdnino in negativno tekočino. Tak opis lahko uporabimo tudi za polprevodnik n pri sobni temperaturi. Pozitivno trdnino tvorijo pozitivni ioni petvalentne primesi v kristalu polprevodnika, negativno tekočino pa elektroni v prevodnem pasu.

To je prvi del zgodbe. V drugem delu nastopi namesto desnega soseda v periodni preglednici elementov levi sosed. Germaniju v talini dodamo majhno primes galija. Atom galija se navzven le malo razlikuje od atoma germanija. Kar smo prej ugotovili za atome arzena v kristalu germanija, velja tudi za atome galija. Za razliko od atoma arzena pa ima atom galija tri valenčne elektrone, ki se v kristalu germanija vgradijo v vezi s sosednjimi ioni Ge^{IV} . V treh vezeh sta po dva elektrona, v četrti vezi pa je namesto dveh elektronov en sam. Nepopolni vezi ustreza enoelektronsko stanje primesi z ostro določeno energijo 0,02 elektronvolta nad vrhom valenčnega pasu. Pri zelo nizki temperaturi to stanje primesi ni zasedeno. Tedaj so vsa enoelektronska stanja valenčnega pasu zasedena, vsa enoelektronska stanja prevodnega pasu in stanja primesi pa nezasedena (slika 2a). V tem primeru polprevodnik ne prevaja. Pri sobni temperaturi pa elektroni v enoelektronskih stanjih pod vrhom valenčnega pasu dobijo dovolj energije, da zasedejo enoelektronska stanja primesi (slika 2b). Pri tem enoelektronska stanja pod vrhom valenčnega pasu, ki jih izprazniijo, opišemo z vrzelmi.



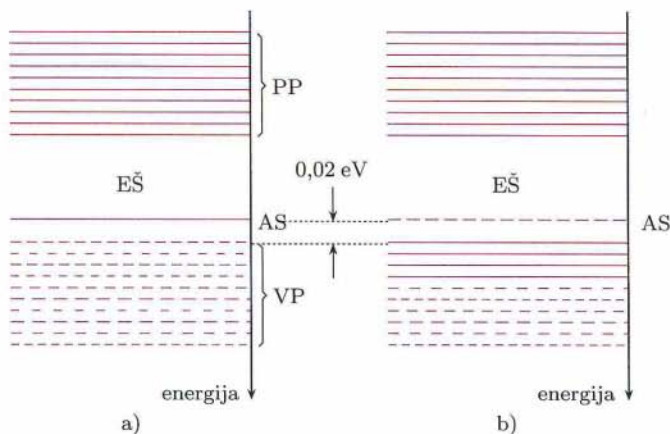
Slika 2. Enoelektronska stanja v polprevodniku p pri zelo nizki temperaturi (a) in pri sobni temperaturi (b). Znaki imajo enak pomen kot enaki znaki na sliki 1. Enoelektronska stanja primesi, v tem primeru akceptorska stanja AS 0,02 elektronvolta nad vrhom valenčnega pasu, so pri zelo nizki temperaturi nezasedena, pri sobni temperaturi pa zasedena. Akceptorskih stanj je toliko kot atomov akceptorjev, njihova energija pa je ostro določena.

Poglejmo zdaj to še s stališča vrzeli. Pri zelo nizki temperaturi je na atom galija vezana vrzel, ki se giblje okoli njega podobno kot peti valenčni elektron v atomu arzena (slika 3a). Vezana vrzel ne more sodelovati pri prevajanju. Pri sobni temperaturi pa vrzel preide pod dno valenčnega pasu, postane prosta in iz atoma galija nastane ion Ga' z enim negativnim osnovnim nabojem. Za prehod potrebna energija meri okoli 0,02 elektronvolta (slika 3b). Pri sobni temperaturi so vrzeli pri atomih galija zasedene. Atomi galija so spremenjeni v ione Ga' in ne zapustijo svojega mesta v kristalu (slika 4b).

V prejšnjem zapisu smo poudarili, da so prevodniški elektroni in vrzeli kvazi delci. V prejšnjem odstavku pa smo spoznali, da velikokrat izhajamo od opisa z elektroni in vrzeli zapostavimo ter jih poskušamo obravnavati zgolj kot primanjkljaj elektronov. Vrzeli bi morali v vseh pogledih opisati na enaki podlagi kot elektrone. Morali bi vpeljati *enovrzelska stanja*, ki so zaradi Paulijeve prepovedi nezasedena ali zasedena z eno vrzeljo. Enovrzelska stanja so razporejena na energijske pasove in na prepovedane pasove. V vseh pogledih bi morali vrzeli obravnavati podobno, kot obravnavamo elektrone, le da energijo vrzeli vzamemo za pozitivno v drugi smeri kot energijo elektronov. Kar je prevodniškim elektronom dno prevodnega pasu, je vrzelim vrh valenčnega pasu. Ta prijem, ki ni v navadi, si v Preseku z drugo barvo lahko privoščimo.

Vrzeli pod vrhom valenčnega pasu nastanejo, ne da bi elektroni prešli v prevodni pas, zato v tem primeru v kristalu ni prevodniških elektronov. Gostota vrzeli ni enaka gostoti prevodniških elektronov kot pri lastnem prevajanju. Vrzeli so večinski nosilci naboja in kristal je *polprevodnik p*, ker so večinski nosilci pozitivni. Enoelektronska stanja primesi imenujemo *akceptorska stanja*, ker "sprejmejo" elektrone iz valenčnega pasu. Ta stanja imajo ostro določeno energijo, kar priča da zadevajo posamične atome na njihovih mestih v kristalu.

Ne bi bilo prav, ko bi zamolčali, da se tudi v polprevodniku p pojavijo prevodniški elektroni in vrzeli kot pri lastnem prevajanju. Toda gostota prevodniških elektronov in njej enaka gostota dodatnih vrzeli je veliko manjša kot gostota vrzeli iz stanj primesi. V tem primeru so prevodniški elektroni manjšinski nosilci naboja.



Slika 3. Enovrzelna stanja v polprevodniku p pri zelo nizki temperaturi (a) in pri sobni temperaturi (b). Ta slika je samo v opis z vrzelmi prevedena slika 2. Pri zelo nizki temperaturi so v prevodnem pasu vsa enovrzelna stanja zasedena (ZS') in v valenčnem pasu vsa enovrzelna stanja nezasedena (NS'). Enovrzelna stanja so narisana v barvi za razliko od enoelektronskih stanj, ki so narisana črno. Enovrzelna stanja smo vpeljali samo v opozorilo, da prevladujoči opis zapostavlja vrzeli, ki so enako kot prevodniški elektroni kvazi delci.

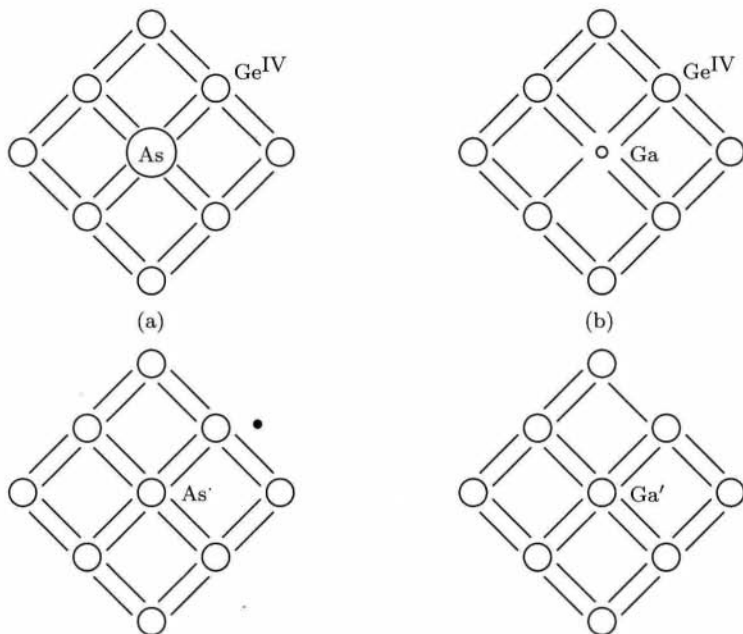
Prevodnost polprevodnika p je pri sobni temperaturi v približku, v katerem vsak atom galija v kristalu germanija sprejme en elektron in če zanemarimo prispevek manjšinskih nosilcev:

$$\frac{1}{\zeta_p} = e_0 \beta_v \frac{N_a}{V},$$

pri čemer je N_a/V gostota atomov galija v kristalu germanija, enaka gostoti vrzeli N/V , β_v je gibljivost vrzeli.

Tudi pri polprevodniku p lahko prevodnost spreminjamo na širokem območju s tem, da spreminjamo gostoto primesi. Prevodnost se poveča bolj ali manj, če germaniju ali siliciju dodamo več ali manj galija oz. kakega drugega podobnega trivalentnega elementa, npr. bora ali indija.

Tudi tu navedimo zgled. V kubičnem decimetru germanija z maso 5,5 kg naj bo $1,6 \cdot 10^{18}$ atomov galija s skupno maso 0,19 miligrama. Po enačbi je prevodnost tega polprevodnika p $46 (\Omega \text{ m})^{-1}$. Kilogramu germanija je treba v tem primeru dodati samo 0,034 miligrama galija. Za bralce Preseka, ki bi želeli račun ponoviti, navedimo po vrsti relativne atomske mase galija, germanija in arzena: 69,7; 72,6; 74,9. V germaniju meri gibljivost elektronov $0,38 \text{ m}^2/\text{Vs}$ in gibljivost vrzeli $0,18 \text{ m}^2/\text{Vs}$.



Slika 4. Nazorna slika polprevodnika n (a) in polprevodnika p (b) pri zelo nizki temperaturi (zgoraj) in pri sobni temperaturi (spodaj). Pri zelo nizki temperaturi so v kristalu polprevodnika vezani atomi petvalentnega elementa (As) ali atomi trivalentnega elementa (Ga). Pri sobni temperaturi atomi petvalentnega elementa oddajo elektrone v prevodni pas in kot pozitivni ioni (As') ostanejo vezani na svoja mesta v kristalu polprevodnika, atomi trivalentnega elementa pa sprejmejo elektrone in kot negativni ioni (Ga') ostanejo vezani na svoja mesta v kristalu polprevodnika. Prevodniški elektroni v polprevodniku n in vrzeli v polprevodniku p se gibljejo po kristalu in sodelujejo pri prevajanju.

Nekatere pojave pri polprevodniku p pri sobni temperaturi lahko za silo opišemo z negativno trdnino in pozitivno tekočino. Negativno trdnino tvorijo negativni ioni trivalentne primesi v kristalu polprevodnika, pozitivno tekočino pa vrzeli.

V naslednjem prispevku bomo govorili o najpreprostejših *polprevodniških elementih*, v katerih je del kristala polprevodnik n in drugi del polprevodnik p. Taki polprevodniški elementi so korenito vplivali na naše življenje. Dandanes bi si ga namreč težko zamislili brez računalnikov, mobilnih telefonov, radijskih in televizijskih sprejemnikov, kasetofonov in podobnih naprav.