

PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik 27 (1999/2000)

Številka 6

Strani 330-337

Janez Strnad:

O TRANZISTORJIH

Ključne besede: fizika, polprevodniški elementi, polprevodniške diode, tranzistorji.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/27/1423-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.

O TRANZISTORJIH

V prejšnji številki Preseka smo obdelali polprevodnik s primesjo. Polprevodniku germaniju ali siliciju dodamo majhno primes petvalentnega elementa, na primer fosfora ali arzena. Pri sobni temperaturi se najšibkeje vezani elektron odtrga od petvalentnega atoma in kot prevodniški elektron sodeluje pri prevajanju, pozitivni ion pa ostane vezan na svoje mesto v kristalu. Tako dobimo polprevodnik n. V njem se sicer pojavijo tudi vrzeli, njihova gostota pa je veliko manjša kot gostota prevodniških elektronov.

Polprevodniku lahko dodamo majhno primes trivalentnega elementa, na primer bora ali galija. Pri sobni temperaturi atom trivalentnega elementa veže elektron in nastala vrzel sodeluje pri prevajanju, negativni ion pa ostane vezan na svoje mesto v kristalu. Tako dobimo polprevodnik p. V njem se sicer pojavijo tudi prevodniški elektroni, njihova gostota pa je veliko manjša kot gostota vrzeli.

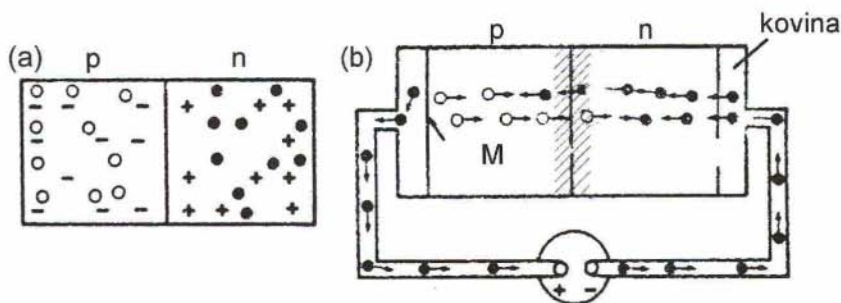
Po tem povzetku iz prejšnjih prispevkov se lotimo *polprevodniških elementov*. Najpreprostejši element je *polprevodniška dioda*, kristal polprevodnika z območjem n in z območjem p. Obravnavajmo le nosilce naboja, ki prevladujejo, to je prevodniške elektrone v območju n in vrzeli v območju p. Po območju n potujejo prevodniški elektroni in njihov naboj izravnavajo pozitivni ioni petvalentne primesi, ki ostanejo vezani na svoja mesta v kristalu. Po območju p potujejo vrzeli in njihov naboj izravnavajo negativni ioni trivalentne primesi, ki ostanejo vezani na svoja mesta v kristalu.

Ob *stiku n-p* na meji obeh območij posamezni prevodniški elektroni iz območja n odtavajo v območje p in tam zasedejo vrzeli. Posamezne vrzeli iz območja p odtavajo v območje n in jih tam zasedejo prevodniški elektroni. V obeh primerih prenehajo obstajati pari prevodniških elektronov in vrzeli. Zaradi tega na meji območja n primanjkuje prevodniških elektronov in prevlada pozitiven naboj ionov petvalentne primesi, na meji območja p pa primanjkuje vrzeli in prevlada negativen naboj ionov trivalentne primesi (slika 1a). Ob stiku nastaneta zelo tanki plasti: plast v območju n je naelektrena pozitivno in plast v območju p negativno. Plasti s svojima nabojema preprečujeta, da bi prehajali dodatni prevodniški elektroni iz območja n v območje p in dodatne vrzeli iz območja p v območje n.

Povežimo z območjem n pozitivni priključek in z območjem p negativni priključek zunanega izvira napetosti. Nekaj dodatnih prevodniških elektronov preide iz območja n v območje p in nekaj dodatnih vrzeli iz območja p v območje n. Nekoliko se povečata pozitiven naboj ionov petvalentne primesi na meji območja n in negativen naboj ionov trivalentne

primesi na meji območja p, nič drugega. V *zaporni smeri*, ko je območje n povezano s pozitivnim priključkom in območje p z negativnim, dioda ne prepušča toka.

Drugače je, če območje n povežemo z negativnim priključkom in območje p s pozitivnim priključkom zunanjšega izvira. Prevodniški elektroni potujejo po območju n do meje in vrzeli po območju p v drugi smeri do meje. V območju na eni in drugi strani meje prevodniški elektroni zasedajo vrzeli in tam prenehajo obstajati pari prevodniških elektronov in vrzeli. Pri tem se sprošča energija, ki jo del kristala navadno oddaja kot toploto. Na priključku na meji med kovino in območjem p pa nastajajo pari prevodniških elektronov in vrzeli. Prevodniški elektroni potujejo po kovini in vrzeli v nasprotni smeri po območju p, tako da je tok sklenjen (slika 1b). Dioda prepušča tok v *prepustni smeri*, ko je območje n povezano z negativnim priključkom in območje p s pozitivnim. Dioda *usmerja*.

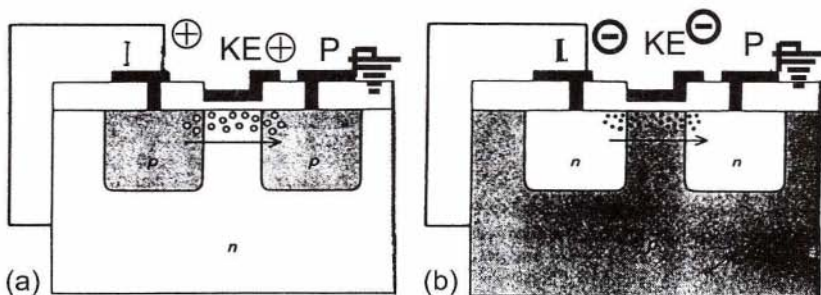


Slika 1. Polprevodniška dioda, ko nanjo ni priključen zunanji izvir napetosti (a), in sklenjeni tok, ko je priključen zunanji izvir v prepustni smeri (b). • kažejo prevodniške elektrone, o vrzeli, + pozitivne ione petvalentne primesi in - negativne ione trivalentne primesi, ki ostanejo vezani na svoja mesta v kristalu. Plast na stiku n-p, v kateri prevladata naboja tega in drugega znaka, sta debeli le kako tisočino milimetra. Na osenčenem območju ob meji, ki je precej širše od omenjene plasti, prenehajo obstajati pari prevodniških elektronov in vrzeli, na meji M med kovino in območjem p pa pari nastajajo.

Bolj zapleten polprevodniški element sestavimo iz dveh diod n-p in p-n ali p-n in n-p. Tako dobimo *tranzistor n-p-n* ali *tranzistor p-n-p*. Ta *bipolarna tranzistorja* bomo preskočili. Ime opozarja, da sodelujejo pri njunem delovanju prevodniški elektroni in vrzeli. Opisali bomo le preprostejše *unipolarne tranzistorje*, v katerih sodelujejo samo prevodniški elektroni ali samo vrzeli.

V kristalu silicija p naj bosta otočka n, ki ju imenujemo *izvir* in *ponor* (slika 2a). Nad območjem med njima, *kanalom*, je tanka plast izolatorja – silicijevega dioksida – in nad tem drobna kovinska elektroda – *krmilna elektroda*. Ponor je proti izviru na pozitivni napetosti. V takih razmerah potuje le malo prevodniških elektronov iz izvira po kanalu z množico vrzeli do ponora. Razmere se spremenijo, ko priključimo na krmilno elektrodo pozitivno napetost proti izviru. Pozitivni naboj na krmilni elektrodi privlači prevodniške elektrone in nekaj prevodniških elektronov pritegne v zelo tanko plast na površju. Ti elektroni po površju lahko potujejo proti ponoru, ne da bi jih motile vrzeli pod površjem kanala. Čim višja je napetost na krmilni elektrodi, tem bolj krmilna elektroda privlači prevodniške elektrone, tem več jih pritegne v zelo tanko plast na površju in tem večji je tok teh prevodniških elektronov. Z napetostjo na krmilni elektrodi uravnavamo tok prevodniških elektronov od izvira do ponora. Tako lahko ojačimo signal na krmilni elektrodi ali ga kako drugače preoblikujemo. Med krmilno elektrodo in polprevodnikom je izolatorska plast, tako da med elektrodo in polprevodnikom ni toka. To pomeni, da ni treba dovajati električnega dela, ko preoblikujemo signal. Zelo malo električnega dela se porabi le za to, da na krmilni elektrodi pozitivni naboj povečamo ali zmanjšamo.

Zamislimo si napravo, v kateri vse pozitivne priključke in naboje zamenjamo z negativnimi in obratno, ne da bi spremenili kaj drugega. V kristalu silicija n sta otočka p izvir in ponor, ki je proti izviru na negativni napetosti (slika 2b). Čim večja je negativna napetost krmilne elektrode proti ponoru, tem več vrzeli potuje po zelo tanki plasti na površju proti ponoru. Tako z napetostjo na krmilni elektrodi uravnavamo tok vrzeli od izvira do ponora in ojačimo ali kako drugače preoblikujemo signal.



Slika 2. n MOSFET (a) in p MOSFET (b). I izvir, P ponor, KE krmilna elektroda, ● prevodniški elektroni in ○ vrzeli.

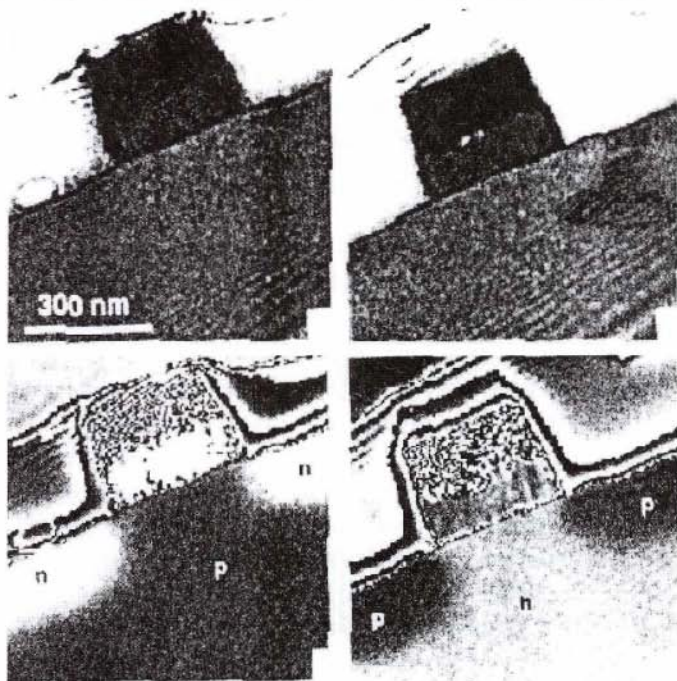
Opisali smo n MOSFET in p MOSFET, “delovna konja” v današnjih silicijevih ploščicah ali “čipih”. V prvem so pomembni le prevodniški elektroni in v drugem le vrzeli. Nekoliko dolga kratica pomeni kovina – oksid – učinek polja – tranzistor (**metal oxide semiconductor field effect transistor**). Med krmilno elektrodo in izviro ali ponorom ni toka in na prevodniške elektrone ali vrzeli v kanalu vpliva le naboj na krmilni elektrodi s svojim električnim poljem.

Uporabljajo tudi bipolarne tranzistorje, ki imajo svojo prednost – so, na primer, hitrejši. Vendar so unipolarni tranzistorji manjši in zato pripravljeni za uporabo na silicijevi ploščici. Silicijev kristal n ali p s premerom dobrih deset centimetrov vzgojijo iz taline in ga narežejo na tanke režnje. Na vsakem režnju naredijo več enakih ploščic, od katerih ima vsaka ploščino od enega do dveh kvadratnih centimetrov in vsebuje do več milijonov tranzistorjev in drugih elementov. Ploščice izdelujejo tako, da površje režnja v vakuumu na določenih delih prekrijejo z zaščitno snovjo in preostale dele obdelajo. Postopek večkrat ponovijo in pri tem z zaščitno snovjo prekrijejo različne dele režnja. V vodni pari pri višji temperaturi površje silicija prevleče tanka plast silicijevega dioksida. Na silicij naparijo trivalentno ali petvalentno primes in kristal segrejejo, da nastanejo območja p ali n. Na silicij naparijo tanko plast aluminija, da nastanejo kovinske elektrode.

Na najmanjši sedanji tranzistor v silicijevi ploščici odpade le nekaj sto milijonin milimetra, to je nekaj sto nanometrov, nm. V skrajnem primeru mu po dolžini ustreza stopetdeset in po globini petdeset atomov (slika 3). Polprevodniški elementi postajajo vse manjši in rabijo vse manj energije. Izkušnje kažejo, da se v poldrugem letu podvoji njihova zmogljivost (slika 4).

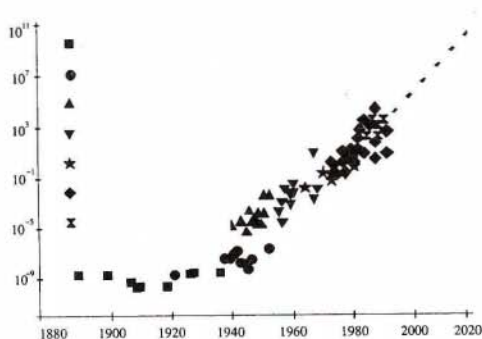
Odkritje tranzistorja leta 1947 “je imelo na raziskovanje v fiziki večji vpliv kot katero koli drugo odkritje.” William Shockley, John Bardeen in Walter H. Brattain so leta 1956 dobili Nobelovo nagrado za “raziskovanja polprevodnikov in odkritje tranzistorskega pojava.”¹

¹ John Bardeen je edini dobil dve Nobelovi nagradi za fiziko. Leta 1972 je delil z Leonom N. Cooperjem in Johnom R. Schriefferjem nagrado za teorijo superprevodnosti. Dve Nobelovi nagradi sta dobila le še Marie Curie za fiziko skupaj s Henrijem Becquerelom in Pierrom Curiejem in za kemijo ter Linus Pauling za kemijo in za mir.



Slika 3. S posebnim prijemom so določili gostoto nosilcev naboja v tankem prečnem režnju n MOSFET (levo) in p MOSFET (desno). Med otočkoma, ki ustrežata izviri in ponoru, je dobro vidna krmilna elektroda. Sliko so dobili z elektronsko holografijo. Del curka elektronov so vodili skozi reženj na slikovno napravo in drugi del curka naravnost na napravo. Spodnja slika podaja gostoto nosilcev naboja. W. D. Rau in drugi, *Two-dimensional mapping of the electrostatic potential in transistors by electron holography*, *Physical Review Letters* **82** (1999) 2614.

Slika 4. Po Moorovem "zakonu" se v poldrugem letu podvoji ali v dvajsetih letih desetstičkrat poveča zmogljivost polprevodniških elementov. Na navpično os je naneseno število bitov, ki jih element na 1 britanski funt (iz leta 1990) obdela na sekundo. S črticami je nakazana napoved. Znamenja od zgoraj navzdol ustrezajo: mehaničnim elementom, elektromehaničnim elementom, elektronkam, tranzistorjem, silicijevim ploščicam, mikroprocesorjem in ploščicam iz galijevega arzenida.

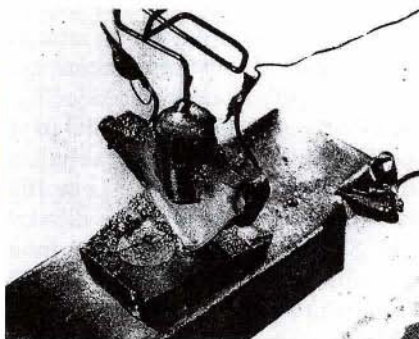
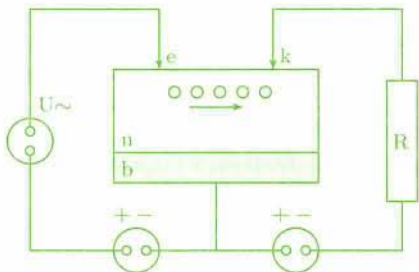


Že leta 1874 je oče katodne cevi, Ferdinand Braun, ugotovil, da kristal cinkove svetlice ZnS med dvema točkastima priključkoma v eni smeri bolje prevaja kot v drugi. Arthur Schuster je krog s stikom med starima bakrenima žicama priključil na izmenično napetost. Ampermeter v krogu je kazal odklon v konstantni smeri, ker je usmerjala tanka plast dibakrovega oksida Cu_2O na površju stikajočih se žic. Leta 1906 so priznali patenta za usmerjanje s karborundom SiC in silicijem. Okoli leta 1915 so v radijskih sprejemnikih na veliko uporabljali usmernik ali *detektor* s cinkovo svetlico in točkastim priključkom. Leta 1925 so uporabili usmernik s selenom in naslednjega leta usmernik z dibakrovim oksidom, ki je zmožel precejšen tok. Začeli so delati poskuse z monokristali in so spoznali, da električna prevodnost polprevodnikov z naraščajočo temperaturo narašča kot $e^{-\alpha/T}$ s konstanto α od 2300 do 4600 K. Izid so pojasnili z energijsko špranjo med vrhom valenčnega in dnom prevodnega pasu s širino od 0,2 do 0,4 eV.

Pred drugo svetovno vojno so pri družbi Bell Telephones v ZDA spoznali, da mehanično preklapljanje stikal močno zmanjšuje hitrost pri telefoniranju. V njenem raziskovalnem laboratoriju so se ponovno začeli zanimati za dibakrov oksid in pozneje za silicij, da bi morebiti prišli do hitrejših stikal. S taljenjem v vakuumu so si prizadevali dobiti kolikor mogoče čist silicij. Pri tem so ugotovili, da so nekateri kristali usmerjali tako, nekateri drugače. Ene so imenovali n, druge p. Spočetka niso mogli vplivati na to, ali so dobili kristal n ali kristal p. Po naključju so dobili kristal, ki je imel na enem delu območje n in na drugem delu območje p. Iz njega so izrezali prvo polprevodniško diodo. Potem so ugotovili, da je mogoče vplivati na izid pri čiščenju kristala z neznatno primesjo petvalentnega ali trivalentnega elementa. Primesi tedaj še ni bilo mogoče določiti ne s kemijsko analizo ne spektroskopsko po izsevani svetlobi.

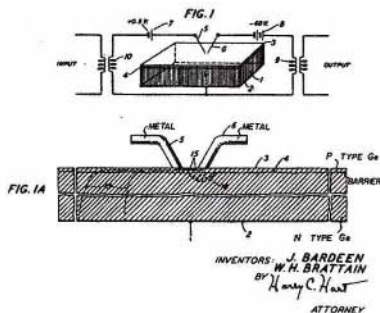
Leta 1946 so osnovali skupino, ki naj bi raziskala delovanje polprevodnikov in ugotovila, ali bi bilo mogoče z njimi izdelati ojačevalnik. V skupini pod vodstvom Williama Shockleya je bilo poleg nagrajencev še nekaj drugih raziskovalcev iz Bellovih laboratorijev, ki so sodelovali tudi z raziskovalci iz nekaterih drugih laboratorijev. Tedaj so že znali izdelati kristal silicija ali germanija z želeno prevodnostjo. Poskusi pa so dajali nepričakovane rezultate. Pojasnil jih je John Bardeen s *površinskimi stanji*. Elektroni se lahko gibljejo po površju polprevodnika v dveh razsežnostih, medtem ko je po prostornini polprevodnika porazdeljen enako velik naboj nasprotnega znaka. Po zgledu detektorja so sestavili *tranzistor s točkastima stikoma*, ki je bil uporaben kot stikalo ali ojačevalnik (slika 5). Današnji unipolarni tranzistor p MOSFET (slika 2b) je njegov bližji sorodnik. Ime za novo napravo si je izmislil J. R. Pierce. V pogovoru je Bardeena in Brattaina opozoril na količino, ki je pomembna za elektronke,

strmino, agleško tranconductance, in njeno obratno vrednost, angleško transresistance, ter tvoril besedo tranzistor. Ime se je prijelo.



Oct. 3, 1950 J. BARDEEN ET AL. 2,524,035
THREE-ELECTRODE CIRCULAR ELEMENTS UTILIZING SEMICONDUCTIVE MATERIALS
Filed June 17, 1948 3 Sheets-Sheet 1

Slika 5. Prvi tranzistor s točkastima stikoma iz leta 1947 in prijava patenta, ki sta jo 17. junija 1948 vložila J. Bardeen in W. H. Brattain. V vezju pomeni U izmenični signal in R delovni upornik, točkasta stika sta emitor e , ki oddaja vrzeli v polprevodnik n , in kolektor k , ki jih zbira, b je baza. Vloga emitorja v tranzistorju pogosto primerjajo z vlogo katode v triodi, vlogo kolektorja z vlogo anode in vlogo baze z vlogo mrežice.



Leta 1949 je Shockley pojasnil delovanje diode, predložil tranzistor p-n-p in dve leti pozneje tranzistor n-p-n ter še leto pozneje obdelal učinek polja. Vzporedno z razlago so se razvijali tehniški prijemi. Do leta 1952 so dobivali polprevodnike n in p samo s kristalizacijo iz taline. Tega leta so začeli izkoriščati nov postopek. Spojino petvaletnega ali trivalentnega elementa so nanесли na kristal polprevodnika in kristal za dalj časa segreli, da so se atomi primesi vgradili v kristal. Unipolarni tranzistorji so se razvili po letu 1960, posebno še po letu 1965, ko so se navadili na kristalu izdelovati zelo tanke izolatorske plasti silicijevega dioksida. Uspeh so prinesla *integrirana vezja* in splošna miniaturizacija. Nekaj časa je bil v ospredju germanij, ker ga je bilo mogoče bolje prečistiti, potem pa je prevladal silicij, ki je omogočil miniaturizacijo. V novjšem času vse več uporabljajo galijev arzenid GaAs.

Kot se je širila uporaba polprevodniških elementov, so vakuumske elektronke postopno prihajale iz rabe. Leta 1904 je John Fleming uporabil prvo vakuumsko diodo, elektronko z dvema elektrodama, od katerih so katodo segrevali, da so iz nje izhlapevali elektroni. Take diode so uporabljali za usmerjanje. Dve leti pozneje je Lee de Forest sestavil triodo, v kateri je med katodo in anodo vstavil tretjo elektrodo, mrežico. Čim višja negativna napetost proti katodi je na mrežici, tem manjši je tok elektronov s katode na anodo. Triodo so uporabljali za ojačevanje. Do tridestih let so prevladale elektronke in z detektorjem so se zadovoljili le najskromnejši radioamaterji. Danes so elektronke tako rekoč pozabljene. So razmeroma velike, v njih je treba segrevati katodo, zaradi česar porabijo veliko električnega dela in se kvarijo. Za razliko od njih so polprevodniški elementi majhni, odporni in obstojni in zase ne porabijo skoraj nobenega električnega dela.

Janez Strnad
