

Petdesetletnica tranzistorja (I. del)

Stanislav Južnič*

50th anniversary of the transistor

ABSTRACT

We deal with the discoveries and the early research of the semiconductors. Special concern is put on the development of the basic ideas of the transistors. First part of the article ends with the discovery of the point-contact transistor.

POVZETEK

Opisujemo odkritja in zgodnja raziskovanja polprevodnikov. Posebno pozornost posvečamo razvoju osnovnih idej tranzistorja. Prvi del razprave se sklone z odkritjem tranzistorja s točkastima stikoma.

1 UVOD

Konec lanskega leta (1997) je tranzistor "srečal Abrahama". Ne vemo, zakaj Abrahama srečujemo ravno pri petdesetih, je pa prav, da se spomnimo pomembne obletnice.

Morda ni nobeno fizikalno odkritje tako hitro vplivalo na življenje ljudi kot ravno tranzistor. Zato so njegovi odkritelji že leta 1956 dobili Nobelovo nagrado, po petdesetih letih prvo za inženirsko napravo.

Tranzistor ni bil rezultat načrtno postavljenega poskusa, temveč širokega programa sočasno raziskujočih znanstvenikov. Poleg fizikov so odkritju botrovali tudi strokovnjaki za elektroniko, fizikalno kemijo in metalurgijo.

2 Odkritje silicija in germanija

Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850) in Louis Jacques Tenar (1777-1857) sta leta 1811 prva dobila čisti silicij. Njegovo elementarno naravo pa je ugotovil šele Jöns Jakob Berzelius (1779-1848) leta 1823, ki ga je dobil iz silicijevega fluorida.

Dmitrij Ivanovič Mendelejev (1834-1907) je 17.2.1869 uvrstil silicij v periodni sistem. Ob njem je predvidel tudi "ekasilicij", katerega domnevne lastnosti je opisal 3.12.1870 na seji ruskega fizikalnega društva. Nov element je skušal izločiti iz spojin titana in cirkonija med začetkom decembra 1870 in sredo decembra 1871. O tem je oktobra 1871 poročal nemškemu kemiku Emilu Erlenmeyerju (1825-1909). Podoben element je zaslučil že Anglež John Alexander Reina Newlands (1838-1898) v svoji periodni tabeli iz leta 1864, ki pa ni imela pravega odmeva.

"Ekasilicij" je leta 1886 odkril profesor tehnične kemije kraljevske akademije v Freiburgu na Saškem Clemens Winkler (1838-1904). Dobil ga je z analizo minerala argirodita, ki ga je profesor mineralogije na isti akade-

miji Albin Weissbach (1833-1901) našel v rudniku blizu Freiburga. Februarja 1886 je o novem elementu, ki ga je imenoval germanij, poročal pred Nemško kemijsko družbo. 26.2.1886 je o odkritju obvestil Mendelejeva /1/.

3 Zgodnja raziskovanja polprevodnikov

Lastnosti polprevodnikov so vzbudile Faradayevo pozornost 15.4.1833. V nasprotju s prevodnostjo kovin, kot jo je opisal Davy leta 1821, je prevodnost srebrovega sulfida naraščala z naraščajočo temperaturo: "Ko kos srebrovega sulfida debeline 1 cm postavimo na površino platine na koncu polov voltne baterije z dvajsetimi pari plošč širokih po 10 cm, se bo igla galvanometra v tokokrogu le malo odklonila zaradi majhne prevodnosti. Ko pola platine in sulfid stisnemo skupaj s prsti, se bo prevodnost povečala zaradi segregiranja. Če pod sulfid med poloma postavimo svetilko, bo prevodnost hitro narasla zaradi toplote, končno pa bo igla galvanometra skočila v stalno lego in srebrov sulfid bo prevajal prav tako kot kovina. Ko svetilko odmaknemo, si bodo pojavi sledili v nasprotnem vrstnem redu ... Razen vročega srebrovega sulfida ne poznam drugih snovi, ki bi se lahko pri prevajanju elektrike nizke napetosti primerjali s kovinami, pri ohlajanju pa izgubile to sposobnost, medtem ko jo kovine, nasprotno, pridobivajo. Verjetno bomo našli še mnogo takšnih snovi, ko jih bomo iskali ..."

Decembra 1838 je Faraday uresničil svojo napoved in nadaljeval meritve na drugih polprevodnikih, predvsem na svinčevem fluoridu. S sodobnega stališča je napačno domneval, da vse snovi prevajajo elektriko na enak način, vendar v različni meri /2/.

Do konca 19. stoletja so ugotovili še druge lastnosti polprevodnikov:

- 1) Alexandre Edmond Becquerel (1820-1891) je v Parizu leta 1839 prvi opazil, da svetloba povzroča električni tok v nekaterih elektrolitih. Pojav je dobrih trideset let pozneje uporabil Ernst Werner von Siemens (1816-1896) pri iznajdbi prve selenske fotocelice, ki jo je po dobrih dveh letih dela sestavil leta 1876. ¹
- 2) Naraščanje prevodnosti polprevodnika pri osvetlitvi
- 3) "Tranzistorski efekt" je omogočil tudi uporabo tretje metode, ki je omogočala uravnavanje prevodnosti s tokom.

¹ Berzelius je odkril selen (Se) leta 1817, leta 1837 pa je Becquerel odkril fototok ob osvetlitvi Se. Leta 1851 je Hittorf raziskal prevodnost Se, potem ko je raziskal vpliv toplote na njegovo električno prevodnost. Leta 1873 sta Willoughby Smith in njegov pomočnik, brzojavni uradnik May, po naključju odkrila še svetlobno odvisnost električne prevodnosti Se med preizkušanjem podmorskih kablov na Irskem.

* Stanislav Južnič je profesor fizike in računalništva na srednji šoli v Kočevju. Leta 1980 je diplomiral iz tehnične fizike na Fakulteti za naravoslovje in tehnologijo, magistriral pa leta 1984 iz zgodovine fizike na Filozofski fakulteti v Ljubljani.

4 Odkritje potencialne ovire v kristalni diodi (detektorju)

Stefan je leta 1865 odkril močne termoelektrične napetosti med kršči in sijajniki. V kratkem obvestilu o poteku raziskav je opisal kombinacije nekaterih žvepljenih rud z neprimerno večjo termično napetostjo od kombinacij čistih kovin. Navedel je tudi nekaj termoelementov, ki močno prekašajo termoelement antimon-bizmut /3/.

Stefanove meritve je nadaljeval šele Braun, ki je raziskoval usmerjanje v polprevodniških kristalih in odkril nastanek potencialne ovire /4/. Z meritvami je gotovo začel že kot asistent Hermanna Georga Quincka (1834-1924) v Würzburgu, saj je prvo razpravo objavil 23.11.1874, le dva meseca po preselitvi na gimnazijo St.Thomas v Leipzigu. Končni poskusi so bili lahko opravljeni v Leipzigu na kristalih iz gimnazijske zbirke ali celo v sobah na Weststrasse št. 89, nedaleč proč. Braun je meril na stiku med vodnikom iz srebra in polprevodniškim kristalom. Zavedal se je, da je prav takšen poskus z vsaj eno majhno elektrodo najprimernejši za opazovanje.

Že prva izmed šestih Braunovih objav v Ann. Phys. o električni prevodnosti polprevodnikov je pokazala omejeno veljavo Ohmovega zakona. Vendar brez prepričljive teorije raziskovanja 24-letnega Brauna niso dobila zasluženega odmeva. Tehnika poskusa je bila tako zahtevna, da je francoski mineralog Henri Dufet po neuspešnih poskusih na piritu objavil, da se je Braun zmotil. W.G. Adams in R.E. Day v Angliji ter W. Siemens v Nemčiji so pri raziskovanju svetlobne občutljivosti električnih lastnosti selena prav tako težko dobili nedvoumne, ponovljive rezultate.

Braun je odkritje leta 1875 predstavil pred Naturforschende Gesellschaft v Leipzigu, kjer sta ga poslušala tudi nekdanji Magnusov študent, profesor fizikalne kemije Gustav Wiedemann in Wilhelm Hankel, profesor fizike in raziskovalec električnih lastnosti kristalov. Braun je na koncu predavanja petkrat uspešno demonstriral odklon od Ohmovega zakona pri meritvah na rjavemu manganu, ki ni bil sulfid, in na galenitu (PbS). Odklon galvanometra je bil odvisen od smeri toka. Pojasnil je, da Dufet ni dobil pričakovanih rezultatov, ker je uporabljal stika enake velikosti. Eden od stikov bi moral biti oblikovan v tanko koničo, kar v svoji prvi razpravi leta 1874 Braun ni poudaril.

Braun ni znal postaviti splošne teorije, temveč je ponudil le nekaj bistroumnihih ugibanj. Domneval je, da tanka površinska plast usmerja električni tok na točkasto elektrodo. Tok je namreč ostajal enak, če je tekel čez kristal na eno samo elektrodo ali na par elektrod. Če bi pojav zadeval celotno prostornino kristala, bi moral biti pri poskusu z dvema elektrodama tok pol manjši.

Braun je pokazal, da pride do usmerjanja tudi, ko tok teče le 1/500 s. To je bilo premalo za segrevanje, ki naj bi po W. Siemensu povzročilo Braunove rezultate. Tako je že Braunu mogoče pripisati odkritje dveh temeljnih lastnosti poznejšega tranzistorja, v katerem se spremembe zgodijo v površinski plasti z veliko hitrostjo /5/.

V svoji zadnji razpravi o polprevodnikih je Braun leta 1878 uporabil ploščo dimenzije 8 x 35 x 20 mm³ iz psilomelana. Za stik je dal izdelati kovinsko prižemo in

jo trdo privil k plošči psilomelana, ki jo je izoliral s papirjem. Le špica prižeme iz Pt dolžine 3 mm in debeline 2 mm se je s polkrožno konico dotikala minerala. Pt je mehkejša od psilomelana, zato je pri privijanju povzročila madež velikosti 1/3 mm², ki ga je opazoval pod mikroskopom. Madež ni bilo mogoče oddrgniti proč s papirjem ali gladkim jeklom, temveč ga je lahko odstranil le skupaj s sosednjimi delci psilomelana. Tlak okoliškega zraka ni vplival na meritev, pa tudi elektrolitski vplivi niso povzročali spremembe upornosti /6/.

Braun je iskal analogijo med polprevodniki in prevajanjem skozi pline, ki je bilo pod nekaterimi pogoji prav tako odvisno od smeri toka /7/. Odvisnost upornosti od toka je meril z diferencialnim galvanometrom na plošči s petimi kontaktnimi vijaki. Upor pri psilomelanu je bil različen v nasprotnih si smereh, podobno kot pri Geisslerjevih ceveh z lijakastimi zaklopkami /8/.

Braun je meril tudi odvisnost porazdelitve tokov v psilomelanu od magnetne sile. Spraševal se je, ali je upornost lastnost toka nabojev ali pa morda molekul snovi? Ali spremenljivi indukcijski tok skozi snov obenem spremeni upornost glede na vrednost pri konstantnem toku, ali pa način praznjenja nima vpliva? Braun je s poskusi potrdil drugo trditev. Schuster, 23-letni Maxwellov asistent v Cavendish Laboratory v Cambridgeu, je dobil Braunovim podobne rezultate pri stiku med očiščenimi in nato oksidiranimi bakrenimi vodniki in sulfidi /9/.

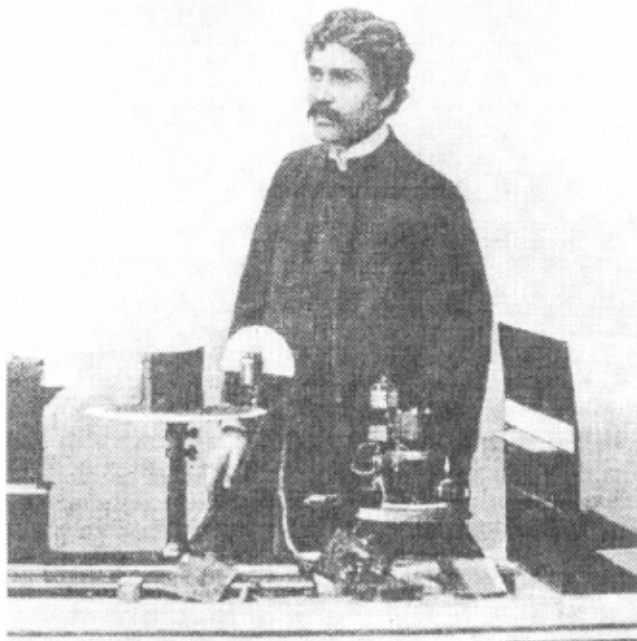
Anglež **Arthur Schuster** (1851-1934) je študiral v Manchesteru, doktoriral pa v Heidelbergu leta 1873. Leta 1874 je pomagal Wilhelmu Webru v Göttingenu pri preskusu Ohmovega zakona za izmenične tokove visokih frekvenc, znanem kot "unilateralna" prevodnost. Pri "Schusterjevem pojavu" je tok iz vrtečega se magneta stalno višal povprečni odklon kazala galvanometra. Zato je na srečanju British Association v Belfastu leta 1874 objavil, da upornost žice pada pri višjih tokovih. Trditev je zanimala Jamesa Clerka Maxwella (1831-1879), saj ni imel močne teoretične utemeljitve za Ohmov zakon, ki so ga Schusterjevi poskusi spodbijali. Vendar so spomladi 1876 v Cavendishovem laboratoriju dognali, da je bil "Schusterjev pojav" le posledica neenakomerne magnetizacije v magnetu in v tuljavi (Stuart M. Feffer, Arthur Schuster, J.J. Thomson, and the discovery of the electron, HSPS, 20/1 (1989) str. 35-36)

5 Raziskovanja polprevodnikov pred drugo svetovno vojno

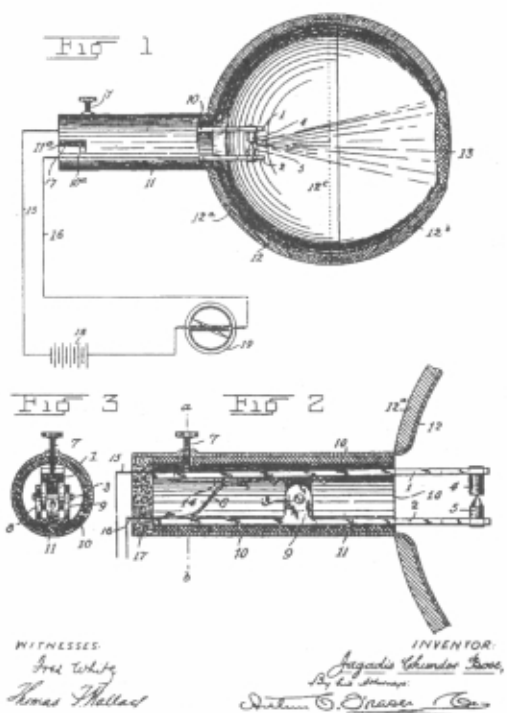
Z Braunovim odkritjem kristalne diode leta 1874 se je začelo raziskovanje potencialnih ovir pri stiku, v katerem še niso uporabljali germanija /10/. Šele 30 let po Braunovem odkritju so leta 1904 uporabili stike kovin in kristalov za "detektorje" radijskih signalov. Ti kristalni ojačevalniki zgodnjih radijskih aparatov so bili v uporabi še v petdesetih letih /11/.

Indijec Jagadish Chandra Bose (1858-1937) je v ZDA 30.9.1901 prijavil prvi patent za kristalni detektor, ki ga je izumil že poldrugo leto pred tem /12/.

Indijec **Jagdish Chandra Bose** (1858-1937) je med letoma 1880-1884 študiral v Cambridgu pri Lordu Rayleighu (1842-1919), direktorju Cavendishovih laboratorijev. Od leta 1885 je bil Bose profesor v Kalkuti, kjer je raziskoval detektorje in o njih ob Rayleighovi podpori predaval tudi pred Royal Instituion v Londonu. Bosejev Hg detektor, o katerem je Rayleigh 6.3.1899 poročal pred Royal Society, je Marconi 12.12.1901 uporabil za sprejem prvega prekooceanskega radijskega signala.



No. 755,840. PATENTED MAR. 20, 1904.
J. C. BOSE.
DETECTOR FOR ELECTRICAL DISTURBANCES.
APPLICATION FILED SEPT. 26, 1901.
NO MODEL.



Slika 1 Bose in skica iz prvega patenta polprevodniške naprave na svetu, 30.9.1901 /11/

Leta 1906 so kristalni detektor neodvisno patentirali Američana H.H.C. Dunwoody in G.W. Pickard, ter berlinski Telefunken. Kovinsko ost ali kristal so pritrjevali ob kristale karaborunda, galenita, piritita itd.

Braunovo elektrodo z vodnikom je kot "Detektor za radijske aparate" B.F. Miessner patentiral v ZDA 5.10.1910 /13/.

Po prvi svetovni vojni so triode in druge katodne elektronke izrivale kristalne detektorje s tržišča. Le malo raziskovalcev se je ukvarjalo s polprevodniki, med njimi O.V.Losev, ki je med leti 1919-1923 s prednapetostjo sestavil oscilator s cinkitom, predhodnik poznejše tunelske diode. Leta 1928 je J.Lilienfeld iz bakrovega sulfida izdelal prednika MOSFET² in ga leta 1930 tudi patentiral. Leta 1935 je O. Hell z različnimi polprevodniki izdelal predhodnika sodobnega FET, C. Zener pa je zasnoval po njem imenovano diodo. Okoli leta 1935 so razvili električne "ventile" z bakrovim ali selenovim oksidom, ki so jih v ZDA imenovali "Westector", v Nemčiji pa "Sirutor".

Izkazalo se je, da so posebnosti polprevodnikov pri osvetlitvi in pri usmernikih površinski pojavi, medtem ko sta fotoprevodnost in negativni temperaturni koeficient upornosti povezana s prostornino. Konec dvajsetih let so dognali, da je polprevodnost odvisna tako od števila nosilcev naboja v enoti prostornine kot od njihove gibljivosti, določene z razmerjem med hitrostjo nosilca v električnem polju in velikostjo tega polja. Meritve Hallovega efekta³ v začetku tridesetih let so pokazale, da se ti količini pri polprevodnikih močno razlikujeta od vrednosti pri kovinah. Gostota števila nosilcev naboja je v kovini skoraj konstantna; ne le pri prehodu od ene kovine k drugi v stiku, temveč tudi pri spremembah temperature. V polprevodnikih pa se gostota nosilcev naboja spreminja od enega primera k drugemu in je za nekaj redov velikosti manjša kot v kovinah.

Šele razvoj radarja je s prehodom na višje frekvence, pri katerih katodne elektronke niso bile uporabne, ponovno vzbudil raziskovanje kristalnih diod. Okoli leta 1938 so bili sestavljeni stabilni detektorji z zataljevanjem kovinske osti na ploščico Ge kristala.

Z razvojem kvantnomehanskih predstav o vedenju elektronov v trdninah se je Alanu Harrisu Wilsonu (r.1906) v Cambridgu leta 1931 posrečilo pojasniti mnoge lastnosti polprevodnika. Model je temeljil na diskretnih energijskih pasovih v trdninah. Že Yakov Ilich Frenkel (1894-1952) s petrograjske univerze je leta 1917 v Phil. Mag. kvalitativno pojasnil obstoj dvojne naelektrene (zaporne) plasti /14/. V poznejši Bardeenovi inačici je ideja dobila močno eksperimentalno podporo. Leta 1932 je Frenkel med prvimi uporabil idejo o kvantnomehanskem tuneliranju pri obravnavi stika kovina-polprevodnik, podobno kot A.H. Wilson.

Leta 1927 je ameriški inženir Grondal ugotovil, da iz Cu₂O pri visokih temperaturah lahko dobimo plošče, ki dobro prevajajo tok v eni smeri, imajo pa visok upor v nasprotni. Na ta način je bilo mogoče iz izmeničnega toka dobiti enosmernega.

2 Metal Oxyde Semiconductor Field Effect Transistor

3 Edwin Hilbert Hall (1855-1938) je pojav odkril že leta 1879 v ZDA. Pozneje je med letoma 1881-1921 poučeval na Harvardski univerzi.

Prvo fotocelico z izolacijsko plastjo med Cu in Cu₂O je patentiral P.H. Geiger 14.11.192 /15/. Napravo sta izboljšala Schottky⁴ in Duhme v laboratoriju Siemens & Halske ter samostojno B.Lange leta 1930 v Nemčiji. Schottky je opisal delovanje submikroskopske tanke plasti med površino Cu in Cu₂O⁵.

Po Bardeenovem mnenju bi že Schottky lahko odkril tranzistor, če bi podrobneje raziskal vedenje vrzeli n-tipa polprevodnika blizu stika /16/. Schottkyjevi podobno teorijo delovanja ovire debeline okoli 1 mikrometra na meji med polprevodnikom in kovino sta pred 2. svetovno vojno objavila tudi profesor v Bristolu Neville Francis Mott (r. 1903) in B. Davidov v SZ /17/.

6 Tranzistor s točkastima stikoma

Polprevodnostne diode s točkastim stikom so bile med vojno nepogrešljive za radarje in druge elektronske naprave. Russel S. Ohl je v Bell Labs leta 1940 zaprosil kemike in metalurge za bolj homogen material, ki bi imel stabilnejše lastnosti od silicija. Raziskovalcem se ni le posrečilo dobiti veliko bolj čiste materiale kot doslej, temveč tudi kontrolirati tip defektov in primesi. Ugotovili so, da prevodnost povzroča majhna količina teh primesi. Ohl je tedaj upeljal naziva n-tip in p-tip /18/.

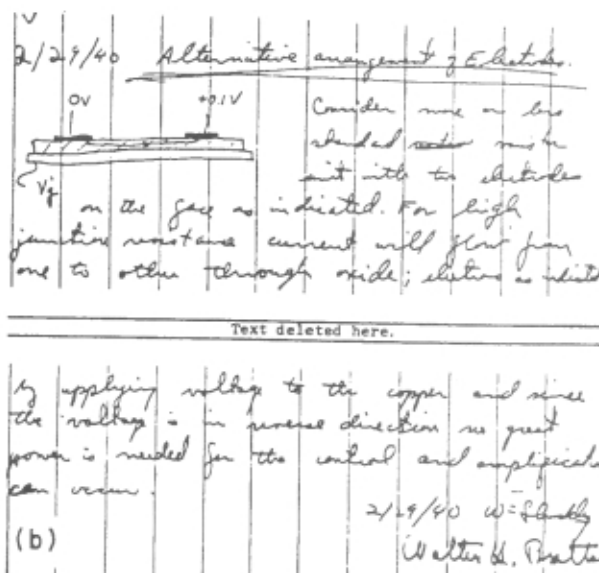
Shockley si je že 29.12.1939 zapisal, kakšen naj bi bil bodoči "tranzistor". Idejo je izboljšal 29.2.1940 z opisom poznejšega MOSFET-a. Po vojni /19/ je postal vodja skupine raziskovalcev Ge in Si pri Bell Labs. Z elementarnimi snovmi je bilo namreč lažje delati in tudi tehnologija zanje je bila že razvita, čeprav so tiste čase bolj uporabljali okside bakra in cinka.

Poleg tehnoloških se je skupina lotila tudi teorijskih problemov. Po Schottkyju naj bi zaporno plast sestavljalo prostorsko nabito področje polprevodnika debeline 10⁻⁶ do 10⁻⁴ cm in inducirani naboj na površini kovine. Prostorsko porazdeljen naboj dvigne elektrostatsko potencialno energijo na površini polprevodnika. Elektroni so izčrpani iz področja s prostorskim nabojem, kar da plasti visoko upornost. Če je potencial polprevodnika negativen glede na kovino, se energijski nivoji v polprevodniku dvignejo in lahko elektroni lažje prehajajo čez višji potencial v kovino. To je prevodna smer. Po drugi strani pa so v pozitivnem polprevodniku nivoji znižani, kar dvigne nivo ovire, tako da elektroni težje prehajajo iz polprevodnika v kovino. To je zaporna smer.

Po Schottkyjevi teoriji je bila ravnovesna višina potencialne ovire in z njo stopnja usmerjanja odvisna od izstopnega dela kovine /20/, kar ni bilo v skladu s poskusi. Napačno je predvidevala tudi razlike med stiki n- in p-tipa v Si in ni pojasnjevala rezultatov poskusov Shockleya in G.L.Parsonsa /21/. Druga raziskovanja pa so podpirala Schottkyjeve domneve, med njimi H. Schweickertove meritve soodvisnosti med uporom Se usmernikov in izstopnim delom v kovini /22/. Brattain in

4 Nemeč Walter Schottky (1886-1976) je bil rojen v Švici, študiral pa je pri Arnoldu Sommerfeldu (1868-1951). Med letoma 1916-1919 in po letu 1927 je raziskoval pri Siemens & Halskeju.

5 Kljub odkritelju Braunu je pojav dobil naziv "Schottky-efekt" (Trigg, n.d., str.177; Đurić, n.d., str.26; Schottky, Zeit. Physik 118 (1942) str.539 in Phys.Z. 31 (1930) str.913-925; Schrötter, 1932, str.165-166 in 175-176). Leta 1931 je L.Bergman izdelal precej boljše fotoelemente iz Se (Ioffe, str.88 in 90; Schrötter, 1932, str.176).



Slika 2 Shockleyeva skica tranzistorja iz leta 1940 z Brattainovim podpisom (Kramer, Phys. Bl. 53, 12 (1997), st. 1203)

J.N. Shive sta pod vodstvom J.A. Beckerja v Bell Labs leta 1940 izmerila dobro korelacijo med stopnjo usmerjanja in izstopnim delom kovinskih stikov, neparjenih na bakrovemu oksidu ter na Si n- in p-tipa. Shive je dobil tudi Schweickertovim podobne rezultate pri raziskovanju stikov različnih kovin, neparjenih na Se. Joffejeve meritve pa niso podpirale teorij Schottkyja in Davydova⁶.

Zaradi neskladja s poskusi je član Shockleyeve skupine Bardeen 13.2.1947 podrobno raziskal naravo stika med kovino in polprevodnikom. Zanimal ga je vpliv elektronskih stanj s površine polprevodnika na ravnovesno vrednost potencialne ovire in presenetljiva odsotnost vpliva kovine v stiku. Vendar je imel še premalo eksperimentalnih potrditev obstoja površinskih stanj⁷, ki jih je že leta 1939 Shockley uporabil v enodimenzionalnem modelu. Bardeen je domneval, da elektroni na površini polprevodnika pridejo v ravnovesje v vsakem električnem stiku, tako da je za ravnovesje nujna izmenjava elektrostatskega potenciala med notranjostjo polprevodnika in njegovo površino. Dogajanje znotraj polprevodnika ni odvisno od stika s kovino, kar je pojasnilo rezultate Meyerhoffovih meritev zveze med razliko kontaktnih potencialov in ojačitvijo /23/. Analizo dogajanja na površini kovine in polprevodnika med stikanjem je pokazala, da površinski naboj le malo spremeni izstopno delo v

6 Bardeen, n.d., 1947, str.718; Joffe, J.Phys. USSR 10 (1946) str.49; B.Davydov, J.Phys.USSR 4 (1941) str.355. Bardeen je bil z Joffejem pozneje v prijateljskih stikih in ga je v Leningradu tudi obiskoval (Abram Fedorovič Joffe (1880-1960), Vstreci s fizikami, Leningrad, Nauka, 1983, str.222-223)

7 Lokalizirana stanja imenovana "Tammovi nivoji" je Igor Evgenjevič Tamm (1895-1971) prvič opisal v Physik.Zeits.Sowietunion 1 (1932) str.733, za njim pa Shockley v Phys.Rev. 56 (1939) str.317 (Bardeen, n.d., 1947, str.717 in 719). Leta 1958 je Tamm dobil Nobelovo nagrado za raziskovanje elektromagnetnega valovanja, ki ga oddajajo delci pri hitrem gibanju v snovi.

kovini, precej več pa v polprevodniku. Izstopno delo Si n-tipa se za okoli 0,25 eV razlikuje od izstopnega dela p-tipa, kar je bilo precej manj od energijske vrzeli od okoli 1,1 eV. Pri stiku s kovino se potencialna razlika v točki stika nadomesti predvsem s pravim površinskim nabojem in ne s prostorninskim nabojem, zato naj bi bila višina potencialne ovire večinoma neodvisna od kovine.

Bardeen se je zavedal pomanjkljivosti modela pri tesnem stiku med kovino in polprevodnikom, ki onemogoča ločevanje obeh izstopnih del. V dodatku je podrobno obdelal primer enakomerne Schottkyeve zaporne plasti. Opisal je naslednje zaporne plasti /24/:

- (1) plast atomov na površini kovine
- (2) plast atomov na površini polprevodnika
- (3) plast površinskih nabojev na kovinah in
- (4) plast, sestavljena iz površinskega naboja velikosti atomske plasti in prostorskega naboja, ki sega od 10^{-6} do 10^{-4} cm globoko v polprevodnik.

Ojačenja v zapornih plasti je po Bardeenu mogoče oceniti na različne načine:

- (a) Pri gostoti površinskih nivojev nad 10^{13} cm⁻² bo dvojna zaporna plast (4) neodvisna od kovine in enaka kot na prosti površini polprevodnika. Sposobnost usmerjanja bo potem v glavnem neodvisna od izstopnega dela kovine. Razlika v kontaktnih potencialih je kompenzirana z zaporno plastjo (3).
- (b) Pri gostoti površinskih nivojev, manjši od 10^{13} cm⁻², bo dvojna zaporna plast (3) majhna in bo zaporna plast (4) približno določena z razliko izstopnih del.
- (c) Ob zelo tesnem stiku med kovino in polprevodnikom ni mogoče ločiti med dvojnimi zapornimi plastmi (1), (2) in (3). Če je širjenje površinskih nivojev kovine majhno v primerjavi z energijsko vrzeljo, bo ugotovitev (a) še vedno veljavna.
- (d) Pri velikem širjenju površinskih nivojev ni mogoče opisati površinskega naboja na osnovi merjenj razlike potencialov na mestu stika.

Bardeenovo teorijo so podprli poskusi Brattaina in Shockleya /25/. Med lastnostmi površine sta upoštevala tudi fotoelektrični efekt, ki spremeni kontaktni potencial pri osvetlitvi. Neposredno za njunim pismom je Brattain opisal dvojno zaporno plast na površini polprevodnika. Pri sobni temperaturi naj bi sistem dosegel ravnovesje v nekaj sekundah.

Naslednja stopnja raziskovanja je bila meritev sprememb potenciala na površini Si ali Ge pri različnih temperaturah. Poskus je ovirala kondenzacija par vode in zraka na hladni površini polprevodnika, zato so sistem namočili v neprevodno kapljevino. Merili so kontaktne napetosti in ugotovili spremembe fotonapetosti pri namakanju. Brattain je opozoril sodelavca R.B.Gibneya, da nekatere uporabljene kapljevine, med njimi voda, niso bile dobri dielektriki, temveč elektroliti. Zato so predpostavili, da se potencial spreminja med površino polprevodnika in primerjalno elektrodo.

Z rezultati poskusa je bila seznanjena vsa raziskovalna skupina v Bell Labs. Nekaj dni pozneje je Bardeen

zjutraj prišel v Brattainov kabinet in opisal napravo, s katero bi bilo mogoče dobiti želeno ojačitev. Brattain je predložil poskus v laboratoriju, kjer so kovinski okov prekrili s tanko plastjo voska in ga pritrdili k Si p-tipa. Površina je bila tako obdelana, da je nastal prehod v n-tip. Stik so ovlažili s kapljo vode in podstavili elektrodo. Točko stika so s plastjo voska izolirali od vode. Po pričakovanju so odkrili, da potencial med vodo in Si spreminja tok, ki teče čez kovinsko ost v Si /26/.

To je bilo odkritje ojačevalnika, ki je omogočilo napredek elektronike v naslednji polovici stoletja. Potem ko je bilo že dolgo znano, da dvig temperature polprevodnika poveča število elektronov in vrzeli, osvetlitev pa poveča število nosilcev naboja, sta Bardeen in Brattain električni tok uporabila za spremembo porazdelitve nosilcev z vbrizgavanjem vrzeli. Pozitivna kovinska elektroda (emitor) v stiku s površino polprevodnika n-tipa (bazo) je povzročila tok (manjšinskih nosilcev naboja) vrzeli vanj /27/.

Naziv **tranzistor** je iz angl. "transfer resistor" skoval John Robinson Pierce (r.1910), ki je sočasno s Shockleyem doktoriral in prišel v Bell Labs. Kot inženir je raziskoval predvsem vakuumске elektronke za mikrovalovne naprave, vendar je poznal tudi bistvo polprevodniških raziskav svojih kolegov. Ko so skupaj iskali primerno ime za novo napravo po analogiji s podobnimi rezistorji, termistorji in varistorji, je na Brattainovo pobudo vrstil predloge "Trans-prevodnik... transupornik... tranzistor". In pri tem je ostalo (Herring, n.d., str.31).

Sredi decembra 1947 je po vrnitvi domov Bardeen z značilnim tihim glasom sporočil ženi, medtem ko je pripravljala večerjo v kuhinji: "Danes smo nekaj odkrili" /28/.

Bardeen je predložil podoben poskus na Ge n-tipa, ki bi dal še boljši rezultat. Po razpravi z Bardeenom je Brattainova skupina sestavila elektronsko napravo z emitorjem, kolektorjem in razsežnim stikom nizke upornosti na bazi iz Ge, ki jo je bilo mogoče uporabljati kot ojačevalnik, oscilator in še drugače namesto vakuumskih elektronk. Na površini sta naredila dva točkasta stika drugega ob drugem na razdalji 0,25 do 0,05 mm /29/. Iz polistirena so izrezali trikotno plast z majhnim ozkimi in ravnimi koncem in nanj pritrdili tanek zlat list. Brattain je z nožem razrezal list po polih do višine trikotnika in ga pritrdil na Ge. Eden del zlatega lista je bil uporabljen kot emitor, drugi pa kot kolektor. Točkasti stiki so bili iz volframa in tudi iz fosforne bronzne.

Ko sta točkasta stika približala drug drugemu in pritisnila enosmerno napetost, sta dobila medsebojno influenco, ki je omogočila ojačenje signalov izmeničnega toka. Majhna pozitivna napetost na emitorju je povzročila tok nekaj miliamperov. Na kolektor so pritisnili dovolj visoko nasprotno napetost, da so dobili kolektorski tok enakega ali večjega reda velikosti od toka emitorja. Kolektorska napetost je imela takšen predznak, da je privlačila vrzeli z emitorja, tako da je velik del emitorskega toka tekel proti kolektorju. Kolektor je zaviral tok elektronov v polprevodnik, tok vrzeli v točki stika pa je bil le malo oviran. Če sta potem spreminjala emitorski tok s signalno napetostjo, sta dobivala ustrezne spremembe v kolektorskem toku.

Tok vrzeli z emitorja na kolektor je lahko spreminjal normalni tok od baze na kolektor tako, da je bila sprememba kolektorskega toka večja od spremembe toka emitorja.

Naravo dodatne prevodnosti tranzistorja sta Bardeen in Brattain raziskovala z merjenjem potenciala v bližini stika na ravni površini debele Ge baze n-tipa, ki je bila pripravljena na enak način kot za uporabo v visokonapetostnih usmernikih. Pri preskusih so površino najprej brusili in jedkali, nato pa eno uro oksidirali na zraku pri 500°C. Pri drugih preskusih je bila zgornja površina podvržena dodatni anodni oksidaciji v raztopini glikol borata, nato pa je bila ozemljena in jedkana na navaden način. Oksid je bil spran in ni neposredno vplival na rezultate. Pozneje so dognali, da je mogoče površine pripraviti tudi drugače.

Spreminjanje prevodnosti s tokom je kazalo, da poleg ohmske prevodnosti nastopa še drugačna komponenta dodatne prevodnosti, ki narašča z naraščajočim tokom. Pripisala sta jo naraščanju koncentracije nosilcev (vrzeli in elektronov) v bližini točke z naraščajočim tokom. Domnevala sta, da lahko prevodna plast p-tipa nastane zaradi nadštevilnosti nečistoč v sprejemniku blizu površine ali zaradi zaporne plasti v prostorskem naboju, ki zadostuje za dvig nasičenega pasu blizu Fermijevega nivoja. S. Benzer z univerze Purdue je že 31.12.1945 objavil meritve temperaturne odvisnosti Ge ojačevalnika, ki so potrjevale domnevno prevodnost p-tipa na površini /30/.

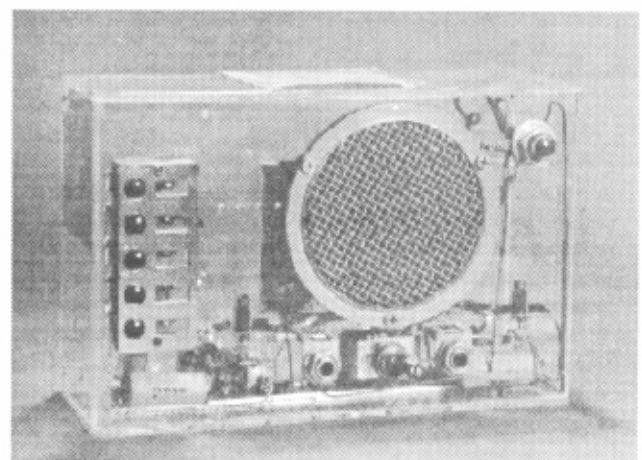
23.12.1947 so s pomočjo tranzistorja dobili stokratno ojačitev v vsem spektru frekvenc zvoka. 17.6.1948 sta Bardeen in Brattain družno patentirala iznajdbo. /31/ Osem dni pozneje sta opisala odkritje v dveh pismih, ki sta bila objavljena julija 1948. Njuna odkritja so dopolnile še sočasno poslana meritve njunega predstojnika Shockleyja in Pearsona iz Bell Labs, New Jersey. Uporabila sta kondenzator površine 1 x 2 cm² iz zlata in polprevodnika, naparjenega na nasprotni

strani Si plošče debeline 0,006 cm. Za merjenje sprememb prevodnosti so uporabili tok med dvema dodatnima zlatima elektrodama, naparjenima na dva konca polprevodnika. Meritve na Ge so dale rezultate, primerljive z leto starejšimi Brattainovi in Shockleyevimi na Si /32/.

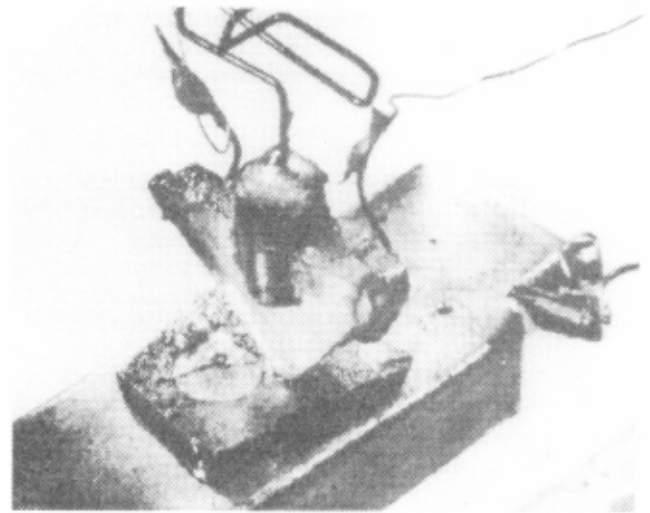
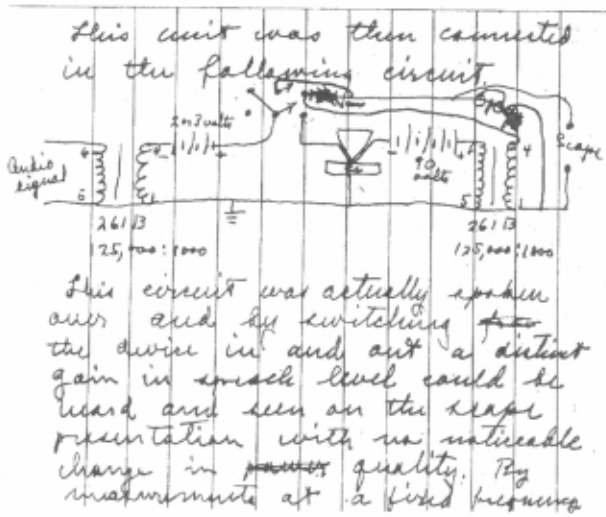
Le **John Bardeen** (1908-1991) je dvakrat prejel Nobelovo nagrado v isti stroki: leta 1956 za raziskovanje polprevodnikov, leta 1972 pa za mikroskopsko teorijo polprevodnosti. Rodil se je v Madisonu, Wisconsin, kjer je tudi študiral na univerzi in med drugim poslušal tudi predavanja o kvantni mehaniki gostujočega profesorja Petra Debyja (1884-1966), ki je leta 1936 za dosežke pri raziskovanju dipolnih momentov ter difrakcijo elektronov in rentgenske svetlobe, dobil Nobelovo nagrado iz kemije. Med letoma 1930-1933 je kot geofizik sodeloval pri raziskovanju zaliva pri Development Corporation v Pittsburgu. Nato se je vrnil k študiju ker je želel doktorirati pri Einsteinu na Princetonu. Ko to ni bilo mogoče, je tam leta 1936 doktoriral iz matematične fizike kot drugi ameriški doktorand pri 6 let starejšemu Mađaru Eugenu Paulu Wignerju. Leta 1933 in 1934 sta skupaj objavila kvantnomehanski račun lastnosti elektronskih struktur Na. Med letoma 1935-1938 je sodeloval z John van Vleckom in P.W.Bridgmanom v Society of Fellows harvardske univerze. Nato je postal izredni profesor na univerzi v Minnesoti. Med vojno je delal v Naval Ordnance Laboratory v Washingtonu DC. in ni sodeloval pri Manhattan Project. Pomladi 1945 se je pridružil novi skupini raziskovalcev fizike trdnin v Bell Labs. Začasno je dobil prostor v sobi, ki sta jo zasedala eksperimentalna fizika Brattain in Pearson. Sodelovanje je bilo zelo plodovito, ne le zaradi znanstvenih uspehov, temveč tudi zaradi skupnega navdušenja nad golfom, ki so ga družno igrali po predmestjih New Jerseya. Leta 1951 je Bardeen zapustil Bell in postal profesor elektronike in fizike na univerzi Illinois, kjer je ostal do smrti. Na harvardu so leta 1951 prvič v ZDA izpeljali tečaj predavanj o polprevodnikih, spomladi 1952 pa je imel Bardeen cikel predavanj o polprevodnikih in tranzistorjih, za katere se je zanimal še pozneje, med drugim na srečanju o polprevodnikih v Pragi leta 1959 (Lubkin, str.23-24; Herring, str. 26 in 29-30; Holonyak, str. 37; David Pines, An extraordinary man: reflections on John Bardeen, Physics Today (april 1992) str.65 in 69; Janez Strnad, Nobelovec za tranzistor in teoriji superprevodnosti, Delo, št.42 (20.2.1991)).



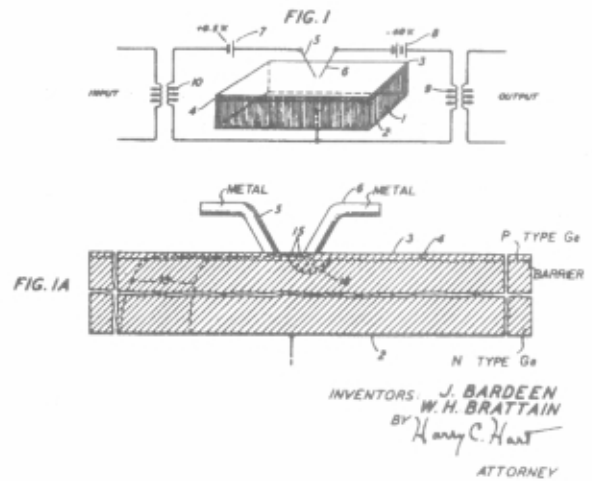
Slika 3 Le John Bardeen (1908-1991)



Slika 4 Slika "Bardeenove škatle" iz leta 1949, najstarejšega delujočega tranzistorja (Nick Holonyak Jr., John Bardeen and the point-contact transistor, Physics Today 45 (april 1992) str.37)



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



Slika 6 Fotografija patentiranega tranzistorja in skica na prvi strani patentnega spisa (N. Holonyak, John Bardeen and the point-contact transistor, Physics Today, 45 (1992) st. 38)

Slika 5 Laboratorijski zapisnik (z dne 24.12.1947) demonstracije ojačitve zvoka s tranzistorjem s točkastima stikoma (Herring, n.d., str. 33)

A device called a transistor, which has several applications in radio where a vacuum tube ordinarily is employed, was demonstrated for the first time yesterday at Bell Telephone Laboratories, 463 West Street, where it was invented.

The device was demonstrated in a radio receiver, which contained none of the conventional tubes. It also was shown in a telephone system and in a television unit controlled by a receiver on a lower

Slika 7 Kopija članka iz New York Timesa, ponatisnjena v Theodore H. Geballe, This golden age of solid-state physics, Physics Today 34 (November 1981) 132

Walter Houser Brattain je bil leta 1902 rojen ameriškim staršem na Kitajskem. Doktoriral je na univerzi v Minnesoti leta 1929 in se pridružil Bell Labs. Med vojno je raziskoval magnetno detekcijo podmornic.

7 SKLEP

1.7.1948 je New York Times poročal o odkritju tranzistorja med radijskimi novicami. Nekaj mesecev pozneje so v Bell Labs objavili še podrobnejše fizikalne principe in električne lastnosti naprave.

Prvi uspešno delujoči tranzistorji so se pojavili aprila 1950. Poleti 1952 pa smo Slovenci že brali: "...da se je s tranzistorjem rodil elektroniki tekmeč, ki mu bo morala v mnogih pogledih prej ali slej podleči." /33/

8 LITERATURA

- /1/ Diogenov, str. 111 in 114-115
- /2/ Michael Faraday (1791-1867), Experimental researches in electricity, Encyclopaedia Britannica, USA, 1952, pogl. 434, 439 in 1340-1341.
- /3/ Stefan, Über einige Thermolemente von grosser elektromotorischer Kraft, Vorläufige Mitteilung, Wien. Ber. 51 (1865) str.260-262 in Ann. Phys. 124 (1865) str. 632; Miroslav Adlešič, Od mehanike do elektronike, MK, Ljubljana, 1952, str. 453; Lavo Čermelj, Jožef Stefan, MK, Ljubljana, 1976, str. 76
- /4/ Branislav Đurič, Tranzistorski prijemnici, VI. izdaja, Beograd, 1984, str.26
- /5/ Friderich Kurylo in Charles Susskind, Ferdinand Braun. A Life of the Nobel Prizewinner and Inventor of the Cathode-Ray Oscilloscope, The MIT Press, 1981, str. 28-34
- /6/ Pojav je pri srebrovem sulfidu raziskoval tudi Hittorf (Karl Ferdinand Braun (1850-1918), Über unipolare Electricitätsleitung, Ann. Phys.(3) 4 (1978) str. 479)
- /7/ Braun, Bemerkungen über die unipolare Leitung der Flamme, Ann. Phys. (3) 3 (1978) str. 436-447
- /8/ Braun, Über unipolare Electricitätsleitung, Ann. Phys. (3) 4 (1978) str. 480. Enakega mnenja je bil tricetr stoletja pozneje Shockley, nasprotnega pa Bardeen.
- /9/ Braun, Über unipolare Electricitätsleitung, Ann. Phys. (3) 4 (1978) str. 481-482 in 484.
- /10/ Joop Schopman, Industrious science: Semiconductor research at the N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken, 1930-1957, HSPS 19:1 (1988) str. 170
- /11/ Adlešič, n.d., str. 453
- /12/ P.K. Bondyopadhyay, Under Glare of a Thousand Suns - The Pioneering Works of Sir J.C. Bose, Proc. IEEE 86/1 (jan. 1998) st. 221
- /13/ US patent št. 1104065
- /14/ George L.Trigg, Landmark Experiments in Twentieth Century Physics, New York, London 1975, ruski prevod, Mir, Moskva 1978, str. 175
- /15/ Britanski patent št. 277610 za The Westinghouse Brake and Saxby Signal Co. (Fritz Schröter, Handbuch der Bildtelegraphie und des Fernsehens, Berlin, Julius Springer, 1932, str. 175)
- /16/ Nick Holonyak Jr., John Bardeen and the point-contact transistor, Physics Today 45 (april 1992) str. 38, str. 37. Holonyak je leta 1962 izdelal svojo inačico LED diode
- /17/ Trigg, str. 177; N.F. Mott, Proc. Camb. Phil. Soc. 34 (1938) str. 568; N.F. Mott in R.W. Gurney, Electronic Process in Ionic Crystals, Oxford University Press, London, 1940, 5. poglavje
- /18/ Trigg, n.d., str. 178; Bernhard Kramer, Der Transistor wird fünfzig, Phys. Bl. 53 (1997) št. 12. str. 1205
- /19/ leta 1946 (Kramer, n.d., str. 1204) ali 1945 (Trigg, n.d., str. 178).
- /20/ John Bardeen, Surface States and Rectification at a Metal Semi-Conductor Contact, Phys.Rev. 71 (sprejeto 13.2.1947, objavljeno 15.5.1947) str. 717-718
- /21/ Trigg, n.d., str. 179; Shockley in Gerald Pearsons, Modulation of Conductors of Thin Films of Semi-Conductors by Surface Charges, Phys. Rev. Lett. Phys. Rev. 74 (25.6.1948) str. 232-233
- /22/ Schottky, Physik Zeits. 41 (1940) str. 570; Bardeen, n.d., 1947, str. 718
- /23/ Bardeen, n.d., 1947, str. 717 in 719; Walter E. Meyerhof, Contact Potential Difference in Silicon Crystal Rectifiers, disertacija na univerzi Pennsylvania, katere povzetek je bil objavljen v Phys. Rev. 71 (1947) neposredno za Bardeenovo razpravo.
- /24/ Bardeen, n.d., 1947, str. 720 in 724-726
- /25/ objavljeni v naslednjem zvezku Phys. Rev. 72 (1947) str. 345-
- /26/ Trigg, n.d., str.183 in 185-186
- /27/ Holonyak, n.d., str. 39; Hering, n.d., str. 31;
- /28/ Gloria B. Lubkin, Special issue: John Bardeen, Physics Today 45 (april 1992) str. 23. Kramer (n.d., str. 1205) je odkritje datiral 16.12.1947, podobno tudi Holonyak, n.d., str. 39
- /29/ Bardeen in Brattain, The Transistor, A Semi-Conductor Triode, Phys. Rev. Lett. (25.6.1948) str. 230-231; Trigg, n.d., str. 187. Dve diodi so torej postavili tako blizu skupaj, da je dogajanje v eni vplivalo na sosedo
- /30/ Bardeen in Brattain, Nature of the Forward Current in Germanium Point Contacts, Phys. Rev. Lett. (25.6.1948) str. 231-232
- /31/ J. Bardeen et al., Three-electrode circuit element utilizing semiconductive materials, US patent 2524035, potrjen 3.10.1950.
- /32/ Shockley in Pearsons, n.d., 1948, str. 232-233
- /33/ Adlešič, n.d., str. 468

KOLEDAR POMEMBNIH DOGODKOV v 1998

16. april - 5. slovenska konferenca z mednarodno udeležbo o uporabi sodobnih neporušitvenih preiskovalnih metod v tehniki, kraj posv. Železama Ravne, organizator: Slovensko društvo za neporušitvene pre-iskave, Fak. za stroj., Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, inf.: prof. Janez Grum, tel.: 061 1771203, 061 1771204, faks.: 061 218 567, e-pošta: janez.grum@fs.uni-lj.si

20. maj - 5. srečanje slovenskih in hrvaških vakuumistov, Inst. Rudjer Bošković (ob 9h), Bijenička 54, Zagreb, inf.: dr. Nikola Radić, Inst. R.B.- Zavod za fiziku materiala, Bijenička 54, 10001 Zagreb, POB 1016, tel.: ++385 1/46 80 224, faks.: ++385 1/46 80 114, e-pošta: radić@rudjer.irb.hr

26.-29. maj - 7. evropska konferenca o neporušitvenih raziskavah, 7thECNDT, Kopenhagen, ni podatkov o organizatorju in naslovu za informacije; konferenca med mnogimi postopki vključuje tudi problematiko iskanja netesnosti

25.-30. maj - Kongres poljskega vakuumskega društva, Krakov. Inf.: Renata Dobrowolska, Uniwersytet Jagielloński, Ul. Golebia 24, pokoj 7, PL 31-007 Krakow, tel.: (012) 422-6875, faks.: (012) 422-1757, e-pošta: ptp-kong@adm.uj.edu.pl

14.-19. junij - 4. mednarodna konferenca o nano-strukturiranih materialih, NANO'98, Stockholm. Inf.: NANO'98, c/o Royal Institute of Technology, S-100 44 Stockholm, Sweden tel&faks.: 0046 8 7909072, e-pošta nano98@kth.se

6.-10. julij - 9. mednarodna konferenca o trdih plasteh in površinah, Kopenhagen, Danska, inf.: Eva Hansen-Stavnsbjerg, ICSFS-9, H.C.Oersted Institute, Dept. of Chemistry, Univ. of Copenhagen, 5 Universitetsparken, DK-2100, Copenhagen, Denmark, tel.:0045-3532 0263, faks.: 0045-3532 0299, icfs9@kiku.dk

7.-10. julij - 2. mednarodna konferenca o vakuumskih elektronskih izvirih (IVESC'98), Tsukuba, Japonska. Inf.: Masahito Yoshikawa, Tsukuba Information Lab, INC., 4th floor, 3rd-Yoshimura Building, 2-10-9 Takezono, Tsukuba 305, Japan, tel.: 81-298-58-1111, faks.: 81-298-52-0844

31. avg-4. sept. - 14. mednarodni vakuumski kongres (IVC-14), 10. mednarodna konferenca o površinah trdnih snovi (ICSS-10), 5. mednarodna konferenca o znanosti in tehnologijah nanometričnih dimenzij (NANO-5), 10. mednarodna konferenca o kvantitativni analizi površin (QSA-10), Birmingham, Anglija. Inf.: Sekretariat kongresov IVC-14/ICSS-10/NANO-5/QSA-10, The Institute of Physics, 76 Portland Place, London, W1N 4AA, UK, tel.: +44 171 470 4800, faks.: +44 171 470 4900, e-pošta: ivc98@iop.org, http://www.iop.org/IOP/Confs/IVC, http://www.vacuum.org/iuvsta.html

2.-5. sept. - Površine v biomaterialih '98, Loews Ventana Canyon Resort, Tuscon, AZ, ZDA. Inf.: Surfaces in Biomaterials Foundation, 6518 Walker Street, Suite 150, Minneapolis, MN, tel.: 001-612-915-1011, faks.: 001-612-927-8127

6.-10. sept. - 2. mednarodna konferenca o prekritjih na steklu, ICCG '98. Inf.: Mrs. H. Schmidt, Institut Für Neue Materialien, Im Stadtwald, Bldg 43a, D-66123 Saarbrücken, Germany, faks.: 0049-681-302-5223

2.-6. nov. - 45. nacionalni simpozij ameriškega vakuumskega društva (z vrhunskimi konferencami, s tehničnim programom, z izobraževalnimi tečaji in z razstavo), Baltimore, MD, ZDA. Organizator in inf.: AVS, 120 Wall Street, 32 Fl., New York, NY10005, tel.: 001-212 248 0200, faks.: 001-212 248 02045, avsnyc@vacuum.org, www.vacuum.org

A. P.