

## POLUVODIČKI DETEKTORI IONIZANTNOG ZRAČENJA

P. GUGIĆ

*Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada JAZU, Zagreb*

*(Primljeno 30. I 1969)*

Uz uvodno iznešeni kratki ali strmi razvojni put dan je osnovni princip rada i pregled najvažnijih osobina diodnih i tranzistorskih poluvodičkih detektora s osvrtom na njihovo vrlo dobro energetske razlučivanje i potencijalnu pozicijsku osjetljivost. K tome je učinjena usporedba s plinskim i scintilacijskim detektorima; spomenuti su neki namjenski tehnički kompromisi pri izradi i na kraju su dane najznačajnije mogućnosti njihove primjene.

Uz plinske i scintilacijske brojače poluvodički detektori zauzimaju posljednjih godina sve značajnije mjesto u porodici ionizacijskih mernih uređaja. Naročita maha zauzimaju u onim područjima, gdje su energetske razlučivanje i ograničenost prostora od presudnog značenja. Iako su istraživanja još uvijek u toku, već i sada se pouzdano može reći da su postignuti rezultati dali značajan doprinos razvoju ionizacijskih mjerenja s posebnim naglaskom na unapređenju energetske analize.

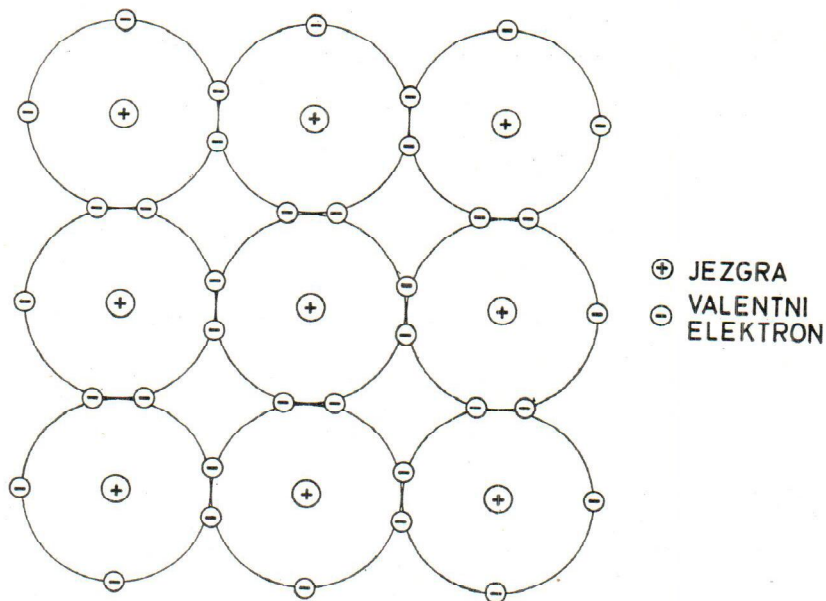
Ideja da se ionizacija proizvedena ionizantnim zračenjem u *čvrstom materijalu* direktno mjeri nije nova, ali je za realizaciju te ideje bilo potrebno naći materijal koji posjeduje odgovarajuće karakteristike. Među ostalim da ima malu energiju ionizacije, da mu je vrijeme sakupljanja naboja znatno kraće od vremena rekombinacije i da ima dovoljno visoki ohmski otpor radi uspostavljanja električnog polja potrebnog za sakupljanje naboja.

*Van Heerden* je već 1945. eksperimentirao s dijamantom i alkalno-haloidnim kristalima (1), ali bez značajnijih praktičnih rezultata. Tek upotrebom poluvodičke diode s tačkastim kontaktom odškrinuo je *McKay* (2) 1949. vrata velikih mogućnosti poluvodičkih detektora. 1956. *Mayer* i *Gossik* čine velik korak dalje uvođenjem slojnih germanijevih detektora (3), a 1959. u SAD se već eksperimentira i sa silicijevim slojnim detektorima. Posebno značajan napredak u razvoju poluvodičkih detektora učinio je *Pell* 1960. godine (4) otkrićem metode za kompenzaciju silicija pomakom litijevih iona u električnom polju. Taj je postupak

omogućio znatno povećanje osjetljivog sloja detektora, a time proširio područje primjene na više energije alfa i beta-čestica i na gama zračenje.

#### Struktura poluvodiča

Poluvodiči poput mnogih drugih čvrstih supstancija imaju kristaličnu strukturu s kovalentnim međuatomskim vezama. To su međusobne veze atoma preko elektrona vanjske ljuske ili tzv. valentnih elektrona. U slučaju atoma IV grupe, u koju spadaju germanij i silicij, u vanjskoj ljusci nalaze se četiri valentna elektrona, kojih se kovalentna veza može prikazati shemom na sl. 1. U toj kovalentnoj vezi svaki atom dijeli svoja



Sl. 1. Struktura kovalentne veze germanija i silicija u kojoj svaki atom dijeli svoja četiri valentna elektrona s četiri susjedna atoma

četiri valentna elektrona s četiri susjedna atoma, pa stoga u takvoj strukturi nema slobodnih nosilaca električnog naboja. Takvo stanje je međutim samo jedan specijalni slučaj održiv na temperaturi apsolutne nule. I zaista na toj temperaturi poluvodički materijali pokazuju osobine idealnih izolatora. Povećanjem temperature neki od valentnih elektrona bivaju do te mjere termički uzbuđeni da uspiju raskinuti vezu s atomom i tako postati slobodni nosioci naboja. Gledajući pojedinačno oni se poslije nekog vremena ponovno vraćaju na ispražnjena mjesta u kovalentnim vezama, ali se drugi raskidanjem veze oslobađaju, pa će stoga broj slobodnih nosilaca na konstantnoj temperaturi biti, u okviru statističkih



varijacija, konstantan. Na sobnoj temperaturi tih je nosilaca toliko da je vrijednost električne vodljivosti negdje između vodiča i izolatora, odakle im i ime poluvodiči. Budući da se porastom temperature povećava broj slobodnih nosilaca odnosno smanjuje električna otpornost, temperaturni koeficijent poluvodiča je negativan za razliku od metala kod kojih je pozitivan.

Kad se termički uzbuđen elektron otrgne od atoma, ostavlja iza sebe mjesto s pomanjkanjem jednog negativnog električnog naboja; tom je mjestu dano ime *šupljina*. Pod utjecajem električnog polja svi će elektroni, uključivši i one vezane, težiti prema pozitivnom električnom polu. U idealnoj kristalnoj rešetki takvo stanje neće izazvati nikakav poremećaj, ali u slučaju defekta, npr. manjka jednog elektrona, susjedni će se elektron pod utjecajem polja pomaknuti na mjesto šupljine. Novo pomaknuti elektron je popunio prijašnju šupljinu, ali je iza sebe ostavio novu šupljinu; ili promatrajući šupljinu može se reći da se ona pomiče u smjeru suprotnom od kretanja elektrona. Zbog takvog njenog ponašanja šupljina se u poluvodičima uzima kao nosilac pozitivnog električnog naboja. Kada postoji isti broj pozitivnih i negativnih nosilaca naboja, kao što je pokazano u slučaju termičke uzbude inače savršenih kristala, onda se takvi materijali nazivaju *čisti* ili *intrinzični* poluvodiči.

Unese li se u čisti kristal germanija ili silicija vrlo mala primjesa pete grupe, dobiva se jedan suvišni elektron u kristalnoj rešetki, koji doprinosi vodljivosti materijala. Postupak se naziva dopiranje, a dobiveni materijal je n-tip poluvodiča. Atomi peterovalentne primjese koji unose vodljivi elektron nazivaju se donori.

Ako se dopiranje vrši s atomima treće grupe nastat će šupljine u kristalnoj rešetki, odnosno doći će do pomanjkanja jednog elektrona. Takav se materijal naziva p-tip poluvodiča, a dodatne trovalentne primjese akseptori. Ako u materijalu dominiraju nosioci jednog predznaka, kao što je to u slučaju dopiranja, onda se takvi materijali nazivaju *dopirani* ili *ekstrinzični* poluvodiči; nosioci naboja koji su u većini nazivaju se majoritetni nosioci (elektroni u n-tipu i šupljine u p-tipu), a oni koji su u manjini nazivaju se minoritetni nosioci (šupljine u n-tipu i elektroni u p-tipu).

#### *Uvrste poluvodičkih detektora*

Narine li se na intrinzični poluvodič na temperaturi apsolutne nule stanoviti električni napon, u električnom krugu neće teći nikakva električna struja, jer poluvodič u takvu stanju ne posjeduje slobodne nosioce naboja. Pusti li se da u poluvodič pod tim okolnostima prodre stanovita ionizantna čestica ili zraka, u materijalu će doći do ionizacije odnosno do stvaranja stanovitog broja slobodnih nosilaca naboja. Pod utjecajem polja oni će biti odvedeni na odgovarajuće elektrode i u vanjskom krugu će doći do kratkotrajnog protoka električne struje, koja će biti proporcionalna energiji koju je ionizantna čestica ostavila u poluvodiču. Takav uređaj djeluje poput plinske ionizacijske komore; i kad rad na temperaturi apsolutne nule ne bi predstavljao poteškoću, moglo



bi ga se upotrijebiti kao vrlo dobri detektor ionizantnog zračenja. Međutim, rad na tako niskim temperaturama iz više je razloga neprihvatljiv; a na sobnoj temperaturi, gdje bi bilo najprikkladnije raditi, u poluvodiču dolazi do tako velike struje šuma da kao detektor dolazi u obzir samo u izuzetnim slučajevima.

Toj štetnoj struji šuma može se doskočiti korištenjem osobina p-n slojne izvedbe, tj. n-tipa poluvodiča na kojem je formiran sloj p-tipa ili obrnuto. Granična veza slojeva realizirana je homogenom kristalnom strukturom. To se može izvesti na dva načina. Jedan je da se spontanom oksidacijom na sobnoj temperaturi na n-tipu poluvodiča formira vrlo tanki sloj p-tipa, a drugi da se pusti da na temperaturi od oko 800°C u osnovni p ili n-tip materijala difundiraju primjese suprotnog tipa. U prvom slučaju dobivaju se *detektori s površinskom barijerom*, a u drugom *difuzioni slojni detektori*. Zbog različite gustoće elektrona s jedne strane i šupljina s druge strane granične plohe, dolazi do obostrane difuzije slobodnih nosilaca naboja; elektrona iz n-tipa u p-tip, a šupljina iz p-tipa u n-tip poluvodiča. Prešavši graničnu plohu i jedni i drugi se ubrzo rekombiniraju s viškom nosilaca naboja suprotnog predznaka, pa se tako s jedne i s druge strane plohe stvori sloj bez slobodnih nosilaca ili tzv. *osiromašeni sloj*. Daljnje difundiranje nosilaca naboja onemogućuje potencijalna barijera formirana na n-strani od ioniziranih donora, a na p-strani od ioniziranih akceptora.

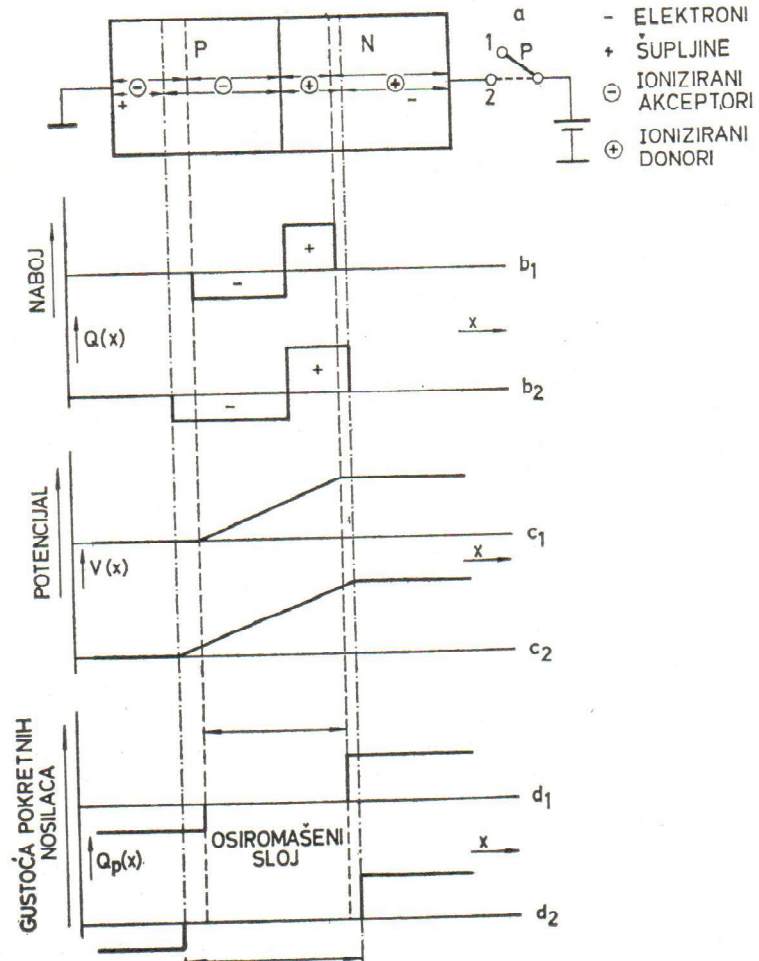
Na sl. 2. dana je shema i raspored električnih veličina jedne poluvodičke diode. S preklopkom P u položaju 1 dioda je bez vanjskog napona. Kad se preklopka P prebaci u položaj 2, n-tip diode vezuje se na pozitivni pol baterije B i tako se dioda zaporno polarizira. Crtkana linija označava granicu osiromašenog sloja s preklopkom P u položaju 1, tj. kad na diodi nema vanjskog napona, a linija crta-tačka označava granicu osiromašenog sloja onda kad je na diodi narinut vanjski zaporni napon. Diagrami »b« na istoj slici prikazuju gustoću prostornog naboja, »c« potencijalnu barijeru i »d« širinu osiromašenog sloja. Indeksi 1 i 2 označavaju položaj preklopke P, tj. režim bez vanjskog napona i režim s narinutim vanjskim zapornim naponom. Iz dijagrama se vidi da se priključenjem zapornog napona prostorni naboj i potencijalna barijera povećavaju, a osiromašeni sloj proširuje. U tako aranžiranom električnom krugu ne teče električna struja osim relativno male struje minoritetnih nosilaca, koja međutim za suštinsko poimanje detekcije nije od osobita značenja, pa će stoga u ovom razmatranju biti zanemarena.

Prodre li ionizantna zraka u osiromašeni sloj izazvat će u njemu isto ono što bi se teoretski trebalo dogoditi u intrinzičnom poluvodiču na apsolutnoj nuli. Na taj način došlo se do realizacije poluvodičkog detektora ionizantnog zračenja koji funkcionira i na normalnoj sobnoj temperaturi. Amplituda izlaznog signala bit će proporcionalna energiji oslobođenoj od ionizantne zrake u osiromašenom sloju. Ako je taj sloj dovoljno debeo da apsorbira čitavu energiju onda takav detektor predstavlja linearni pretvarač koji energiju ionizantnog zračenja pretvara u impulse električne struje. Amplitude tih impulsa linearno su proporcio-



nalne energijama zraka koje su ih proizvele. Proizlazi da je osiromašeni sloj najvažniji dio detektora i da je njegova debljina od presudnog značenja. Njegovim povećanjem ne samo što se povećava apsorpcijska moć ionizantnih zraka, već se ujedno i smanjuje štetni kapacitet detektora.

Širina osiromašenog sloja kod p-n detektora direktno je proporcionalna specifičnom otporu i narinutom električnom naponu. S naponom



Sl. 2. Shema poluvodičkog diodnog detektora s rasporedom električnih veličina u njemu. Crtkana linija označava granice osiromašenog sloja bez vanjskog napona, a linija crta-tačka označava granice osiromašenog sloja s narinutim vanjskim zaopornim naponom. Dijagrami »b« prikazuju gustoću prostornog naboja, »c« potencijalnu barijeru i »d« širinu osiromašenog sloja. Indeksi 1 i 2 označavaju položaj preklopke P, tj. režim bez vanjskog napona i režim s vanjskim zaopornim naponom

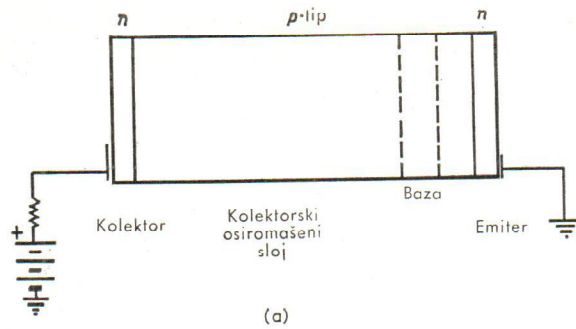
se može utjecati samo do jedne određene vrijednosti, koja je ograničena jakošću električnog polja; jer polja jača od  $2 \cdot 10^4$  V/cm mogu proizročiti sekundarnu ionizaciju (5). Dapače i naponi manji od probojnog izazivaju znatno pogoršanje energetskog razlučivanja, pa se stoga bez štetnih posljedica debljina osjetljivog sloja može s naponom povećati za svega 2–3 puta (6). Zbog toga se raznim načinima pokušava povećati specifični otpor, od kojih je najuspjeliji onaj *Pellov* (4) s pomakom litijevih iona u električnom polju. U tom slučaju se između p i n-tipa poluvodiča određenim postupkom formira intrinzični sloj u kojem su akceptorski ioni kompenzirani litijem i u kojem stoga postoje samo termički stvoreni nosioci naboja. Nazivaju se p-i-n detektori i ističu se relativno vrlo debelim osjetljivim slojem, koji je za čitav red veličine veći od osjetljivog sloja kod p-n detektora. Dobra im je osobina i to da im je kapacitivnost neovisna o narinutom naponu (6).

Makar su signali u opisanim detektorima za oko jedan red veličine veći nego u ionizacijskim komorama, oni su još uvijek maleni za svrhe mjerenja, pa su stoga neki istraživači pokušali u njima izazvati pojačanje po uzoru na plinske proporcionalne brojače. Prvu primjenjivu izvedbu takvog detektora objavio je *Huth* sa suradnicima (7), a sastoji se od posebno formirane poluvodičke diode kojoj je napon proboja podignut do na oko 1850 V. Do pojačanja dolazi ubrzanjem nosilaca naboja u osiromašenom sloju do te mjere da uspijevaju i sami proizvoditi daljnje ionizacije. Pojava multiplikacije naboja počinje već na oko 1300 V, a na 1840 V faktor pojačanja za npr. beta čestice od 50 keV iznosi oko 50. Pri tome vrijeme porasta impulsa ostaje isto, ali se energetska rezolucija pogoršava u odnosu na rad bez pojačanja.

U svrhu dobivanja jačeg signala izvedeni su i tranzistorski detektori (8, str. 156). Na sl. 3. shematski je prikazan jedan takav n-p-n tip. Vanjski napon je priključen samo između kolektora i emitera, pa budući da baza nema naponskog priključka, struja emitera je u potpunosti ovisna o struji kolektora. Osiromašeni sloj kolektora u području baze seže do u samu blizinu emitera čiji je osiromašeni sloj vrlo uzak. Na uskom graničnom području između jednog i drugog osiromašenog sloja dolazi stoga do potencijalne doline i doslijedno tome do slabog električnog polja. Kada ionizantna zraka proдре u osiromašeni sloj stvori tamo izvjesni broj ionskih parova, koje polje usmjerava prema odgovarajućim polovima. Šupljine na svom putu prema emiteru u jednom trenutku dospiju do potencijalne doline i tu bivaju neutralizirane od viška elektrona koje one privuku iz emitera. Jedan dio tih privučenih elektrona uspijeva prošetjeti potencijalnu dolinu i dospjevši u osiromašeni sloj kolektora proizvesti u njemu daljnju ionizaciju. Na taj način dolazi do multiplikiranja naboja, odnosno do pojačanja. Na žalost i ovdje kao i kod diodnog pojačanja dolazi do pogoršanja energetskog razlučivanja, pa im je stoga primjena ograničena na one rijetke slučajeve kad je veliki izlazni signal od presudnog značenja.

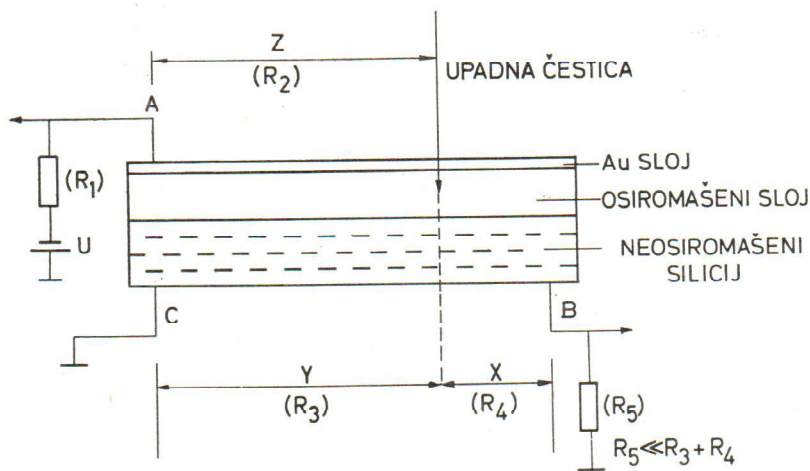
Nastavljajući ideju *Parkinsona* koji je s dvadeset detektora ostvario poziciono osjetljivi detektor (9), uspjelo je danas postići to isto s jednim





Sl. 3. Shematski prikaz tranzistorskog detektora *n-p-n* tipa. Kolektor je zaporno polariziran, a emiter propusno. Crtkano je označeno efektivno područje baze (8 str. 157)

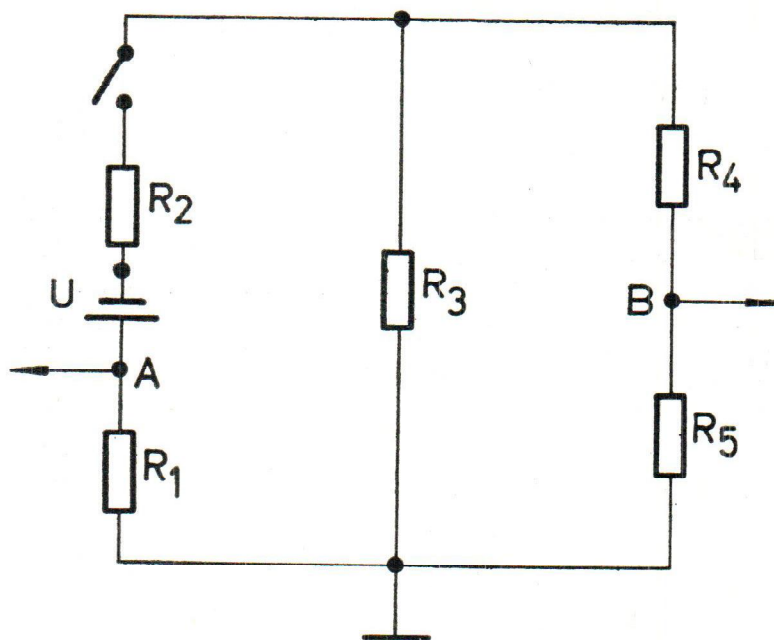
jedinim detektorom (10, 11). U jednoj od izvedaba to je slojni detektor koji s jedne strane ima vodljivi sloj zlata, a s druge otporni sloj silicija (sl. 4) (12). Nadomjesna električna shema dana je na sl. 5. Strujni sig-



Sl. 4. Shematski prikaz amplitudnog tipa poziciono osjetljivog detektora. S jedne strane osiromašenog sloja nalazi se zlatni sloj vrlo dobre vodljivosti, a s druge strane sloj silicija vrlo visokog omskog otpora. Iz veličine strujnih signala u tačkama A i B može se izračunati mjesto na kojem je ionizantna čestica prodrla u detektor (12)

nali se odvode s tačkaka A i B (sl. 4). Onaj signal koji se odvodi s vodljivog sloja, tj. s tačke A proporcionalan je energiji upadne čestice bez obzira na kom je mjestu došlo do ionizacije. Drugi signal koji se odvodi s tačke B ovisan je, osim o energiji, još i o mjestu ionizacije jer na putu

do tačke B dolazi do pada napona na otpornom sloju a time i do smanjenja signala. Budući da je to smanjenje proporcionalno udaljenosti X, može se pomoću nadomjesne sheme na sl. 5. pokazati da će signal u tački B biti



Sl. 5. Nadomjesna shema poziciono osjetljivog detektora sa sl. 4.;  
 $Y : X = R_3 : R_4$ ;  $R_2 \ll R_1$  i  $R_5 \ll R_3 + R_4$

$$S_B = \frac{Y}{X + Y} S_A$$

gdje su  $S_A$  i  $S_B$  jakosti strujnih signala u tačkama A i B, a X i Y su dužine označene na sl. 4.

Pozicioni detektori općenito su naišli na veliku primjenu u raznim područjima fizikalnih istraživanja, a naročito u proučavanju kutne raspodjele raspršenog zračenja (12, 13) i u magnetskoj spektrometriji (14).

Osim opisanih ispravljačkih tipova poluvodičkih detektora postoje i homogeni detektori koji nemaju ni izdaleka tako dobro razlučivanje, ali se zahvaljujući posebnom postupku formiranja kristala s njima može postići pojačanje naboja od  $10^3$  do  $10^6$ . Zbog tako velikog unutarnjeg pojačanja mogu se direktno priključiti na odgovarajući instrument za mjerenje struje i tako dobiti jednostavni i robustni dozimetri (8, str. 340).



Najbolji detektori tog tipa jesu kristali kadmijeva sulfida (15) koji uz veliko unutarnje pojačanje imaju i visoki atomski broj ( $Z = 48$  i 16), pa se uspješno primjenjuju i u gama-dozimetriji.

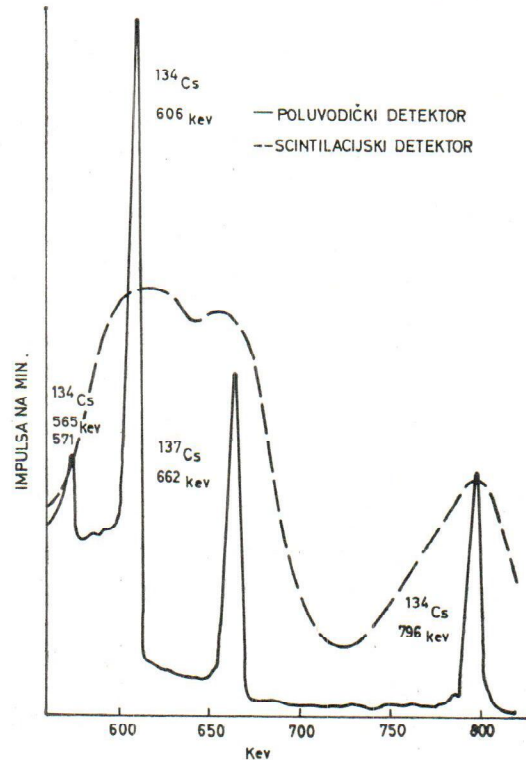
#### *Komparativne osobine i područje primjene*

Poluvodički detektori imaju svojih prednosti i mana u odnosu na plinske i scintilacijske detektore. Prednosti su im:

- relativno mala energija ionizacije (oko 3,5 eV) u odnosu na plinske detektore (oko 35 eV) i fotokatode scintilacijskih detektora (iznad 350 eV);
- relativno velika gustoća u odnosu na plinske detektore pa stoga i odgovarajuć veća moć zaustavljanja: odnosno u daljoj liniji mogućnost izrade malenih detektora velike osjetljivosti;
- izrazito dobro energetske razlučivanje, koje je za diodne detektore oko jedan red veličine bolje od ionizacijskih komora i oko dva reda veličine bolje nego kod scintilacijskih brojača (16) (sl. 6);
- linearna ovisnost amplituda strujnih signala o energiji ionizantnih zraka, unutar svake pojedine vrste ionizantnog zračenja;
- malo vrijeme porasta impulsa (oko  $10^{-8}$ s) u odnosu na plinske detektore (oko  $10^{-6}$ s);
- jednostavnija mogućnost realizacije pozicijske osjetljivosti;
- da se mogu izraditi praktički bez prozora i
- da rade na relativno niskim naponima s malim potroškom energije, a mane su im:
  - relativno velika podložnost utjecaju vlage i temperature;
  - ograničenost u pogledu izrade dovoljno velikog osjetljivog sloja za detekciju gama zraka;
  - ograničeni vijek trajanja zbog oštećenja koja vremenom nastaju u kristalnoj rešetki (17);
  - mali izlazni signal i zbog toga potreba za (skupim) niskošumnim ulaznim pojačalima;
  - u slučaju germanijeva detektora potreba primjene niskih temperatura (oko 150°K) (18) i
  - za sada još nedovoljno tačno poznata energija za stvaranje jednog ionskog para i neizvjesnost u pogledu ovisnosti te energije o različitim vrstama zračenja (19).

Glavna prednost poluvodičkih uređaja da imaju izvrsnu energetske rezoluciju, može biti uspješno iskorištena jedino kada je cjelokupna energija upadnog ionizantnog zračenja apsorbirana u osjetljivom sloju detektora. Za alfa-čestice nema većih problema jer već debljina od oko 200  $\mu$  silicija može zaustaviti alfa-čestice do oko 20 MeV (20, 21). Slična

je situacija i s beta-česticama, jer će npr. beta-čestice od oko 0,5 MeV biti zaustavljene od sloja debljine oko  $500 \mu$ . Za spektrometriju gama-zraka bili su doskora poluvodički detektori primijenjivani isključivo za niže energije (22); sada su, međutim, u laboratorijima već izrađeni detektori germanija i do  $85 \text{ cm}^3$  osjetljivog sloja s energetske razlučivanjem od svega 0,32% (za energiju  $\text{Co}^{60}$  od 1,332 MeV), a potpuno apsorbiraju i gama-zrake od oko 10 MeV (23). Odvojeno istražujući s koaksijalnim germanijevim detektorima *Lalović et al.* (24) i *Malm* (25) poka-



Sl. 6. Gama-spektri  $\text{Cs}^{134}$  i  $\text{Cs}^{137}$ . Puna linija prikazuje spektar snimljen s poluvodičkim detektorom, a crkana linija prikazuje isti spektar snimljen na scintilacijskim detektorom (42)

zali su da se s nekoliko takvih diodnih detektora vezanih paralelno i zajedno smještenih u kriostat dobiva veća izdašnost od zbroja izdašnosti pojedinih detektora. (Pod izdašnošću se ovdje misli na odnos između apsorbirane energije u osjetljivom sloju i amplitude odgovarajućeg strujnog signala). Nažalost, to je poboljšanje popraćeno smanjenjem energetske razlučivanja, koje za npr. četiri paralelno vezana detektora s pojedinačnim energetske razlučivanjem, od oko 9 keV skače na oko 24 keV (24).



Praktični problemi su, kako se iz izloženog može i naslutiti, proizvodnju poluvodičkih detektora usmjerili u nekoliko različitih pravaca radi zadovoljenja određenih specifičnih zahtjeva. Za spektrometriju vrlo bliskih energija preferira se energetska razlučivanje pred svim drugim osobinama (26, 27, 28, 29). Za mjerenje niskih aktivnosti grade se detektori s velikom izdašnosti a energetska razlučivanje se mora žrtvovati (7, 24), dok se kod detektora predviđenih za rad u širokom temperaturnom području mora tolerirati i pogoršanje razlučivanja i pogoršanje izdašnosti (30). U takvim toplinski teškim uvjetima rada silicij i pogotovo germanij gube relativno mnogo na svojim osnovnim odlikama, a naročito na razlučivanju, pa se stoga vrše intenzivna istraživanja da se za takve režime rada nađu bolji i prikladniji materijali (31).

Zahvaljujući vrlo jednostavnoj konstrukciji u odnosu na scintilacijske brojače i velikoj moći zaustavljanja u odnosu na plinske brojače, s poluvodičima je moguće ostvariti vrlo malene detektore ionizantnog zračenja s relativno vrlo velikom izdašnošću. Zbog tih osobina su poluvodički detektori posebno zanimljivi u izvjesnim dozimetrijskim mjerenjima (32, 33). Naročito su prikladni tamo gdje je veličina od presudnog značenja, npr. za mjerenje raspodjele intenziteta doze po površini presjeka ionizantnog snopa ili za mjerenje raspodjele doze u organizmu. Promjer takvog malog valjkastog detektora danas već ne mora biti veći od 0,1 cm, a duljina svega 0,22 cm (34). Važan doprinos unapređenju bioloških mjerenja je i činjenica da silicijski detektori omogućuju najbolju simulaciju koščanog medija, a po tome i najuspješnije mjerenje ionizantne doze u kostima.

Poluvodički detektori tipični su visoko razvijeni tehnički proizvod sa svim, u takvim slučajevima, pripadnim osobitostima. Imaju izvanredne osobine u određenom uskom području primjene, jednostavni su za rukovanje, a postupak izrade i teoretske osnove su im vrlo složene. Iz tih razloga još ni danas sva zbivanja u poluvodičkim detektorima nisu u potpunosti objašnjena (35, 36, 37, 38), a istraživanja u pogledu njihovih mogućnosti (28, 39) i načina izrade (29, 40, 41) još su uvijek u punom zamahu. Čitaocu koji bi se htio detaljnije upoznati s problematikom poluvodičkih detektora u prvom redu skreće se pažnja na vrlo dobru knjigu G. Dearnaleya i D. C. Northropa (8) u kojoj je čitava materija vrlo temeljito i vrlo pregledno iznešena.

#### Literatura

1. *Van Heerden, P. J.*: The Crystal Counter, N. V. Noordhollandsche Uitgevers Mattschappij, Amsterdam, 1945.
2. *Mc Kay, K. G.*: A Germanium Alpha Counter, *Phys. Rev.*, 76 (1949) 1537.
3. *Mayer, J. W., Gossick, B. R.*: Use of Gold Germanium Broad Area Barriers as Alpha Particle Spectrometers, *Rev. Scin. Instr.*, 27 (1956) 407.
4. *Pell, E. M.*: Ion Drift in an N-P Junction, *J. Appl. Phys.*, 31 (1960) 291.
5. *Goulding, J. F. S.*: Semiconductor Detectors for Nuclear Spectrometry, *Nucl. Instr. Meth.*, 43 (1966) 1.

6. *Rendić, D.*: Poluvodički brojači nabijenih čestica dobiveni pokretanjem litijevih iona u električnom polju, *Tehnika* 12 (1963) RI 169.
7. *Huth, G. C., Trice, J. B., Mc Kinney, R. A.*: Internal Pulse Amplification in Silicon p-n Junction Radiation Detection Junctions, *Rev. Sci. Instr.*, 35 (1964) 9, 1220.
8. *Dearnaley, G., Northrop, D. C.*: Semiconductor Counters for Nuclear Radiations, E. & F. N. Spon Ltd, II izd., London, 1963.
9. *Parkinson, W. C.*: Solid-State Detectors for High Resolution Nuclear Spectroscopy, *Rev. Sci. Instr.*, 32 (1961) 1136.
10. *Laesgsgaard, E.*: Position-sensitive Semiconductor Particle Detectors Fabricated by Ion Implantation, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* NS-15, 3, (1968) 239.
11. *Borkowski, C. J., Kopp, M. K.*: New Type of Position-sensitive Detectors of Ionizing Radiation Using Rise Time Measurement, *Rev. Sci. Instr.*, 39 (1968) 1515.
12. *Clegg, T. B., Barnard, A. C. L., Swint, J. B.*: A Nuclear Reaction Polarimeter Using Position Sensitive Detectors, *Nucl. Instr. Meth.*, 40 (1966) 45.
13. *Broude, C., Ollerhead, R. W.*: Use of Position Sensitive Surface Barrier Particle Detector for Kinematic Compensation in Heavy Ion Reactions, *Nucl. Instr. Meth.*, 41 (1966) 135.
14. *Elliott, R. U., Carter, K. W., Spear, R. H.*: The Use of a Position-Sensitive Solid State Detector to Measure Properties of a Magnetic Spectrometer, *Nucl. Instr. Meth.*, 59 (1968) 29.
15. *Smith, G. D., Aliaga-Kelly, D.*: Recent Developments in Health Physics Monitoring Instrument, Proceedings of the Fifth International Instruments and Measurements Conference, vol. 2, Stockholm, 1960, kd. H. von Koch and G. Ljungberg, Academic Press Publishers, London, 1961.
16. *Gugić, P.*: Spektralni analizatori s proporcionalnim brojačima, *Arh. hig. rada*, 14 (1963) 223.
17. *Parker, R. P., Morley, B. J.*: Silicon p-n Junction Surface Barrier Detectors and Their Application to the Dosimetry of X- and Gamma-ray Beams, Solid State and Chemical Radiation Dosimetry in Medicine and Biology, IAEA Vienna, Vienna, 1967.
18. *Dearnaley, G.*: Nuclear Radiation Detection by Solid State Devices, *J. Sci. Instr.*, 43 (1966) 869.
19. *Parker, R. P.*: Semiconductor Electrical Conductivity Detectors, kao pod 17.
20. *Paić, G., Rendić, D.*: Poluvodički detektori u nuklearnoj fizici, *Elektrotehnika*, 2 (1963) 3.
21. *Chaplin, G. B. B.*: Semiconductor in Nuclear Instrumentation, Instruments and Measurements, kao pod 15.
22. *Hollander, J. M.*: The Impact of Semiconductor Detectors on Gamma-Ray and Electron Spectroscopy, *Nucl. Instr. Meth.*, 43 (1966) 65.
23. *Henck, R., Siffert, P., Coche, A.*: Characteristics of a 85 cm<sup>3</sup> Ge (Li) Gamma Ray Detector, *Nucl. Instr. Meth.*, 60 (1968) 343.
24. *Lalović, B., Azuma, R. F., Petrović, B.*: Large, Multiple Element Germanium Spectrometers, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* NS-14 1 (1967) 514.
25. *Malm, H. L.*: Encapsulated Coaxial Ge(Li) Detectors Operated in Paralel, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* N-14 1 (1967), 521.
26. *Elad, E., Nakamura, M.*: High-resolution Beta- and Gamma-ray Spectrometer, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* NS-14 1 (1967), 523.
27. *Orphan, U. J., Rasmussen, N. C.*: A Pair Spectrometer Using a Large Coaxial Lithium-Drifted Germanium Detector, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* NS-14 1 (1967), 544.
28. *Palms, J. M., Venugopala Rao, P., Wood, R. E.*: An Ultrahigh Resolution Ge(Li) Spectrometer for Singles and Coincidence X-ray and Gamma-Ray Studies, *Nucl. Instr. Meth.*, 64 (1968) 310.
29. *Tomlinson, F. K., Coffy, D. L., Wylie, K. F.*: Large Area Silicon Surface-Barrier Detector for Beta-Ray Spectroscopy, *Nucl. Instr. Meth.*, 65 (1968) 101.
30. *Wilburn, C. D., Mallamo, R.*: P-N Semiconductor Detectors for Severe Environmental Conditions, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, N-14 1 (1967) 569.



31. Price, M. B., Polishuk, P.: Survey of Materials for Radiation Detection at Elevated Temperatures, IEEE Trans. Nucl. Sci. N-14 1 (1967) 537.
32. Baily, N. A., Hilbert, J. W.: The Response of p-i-n Junctions to Low-Energy Beta-Ray Emitters, Health Physics, 12 (1966) 705.
33. Scharf, K.: Exposure Rate Measurements of X- and Gamma-Rays with Silicon Radiation Detectors, Health Physics, 13 (1967) 575.
34. Raju, M. R.: The Use of the Miniature Silicon Diode as a Radiation Dosimeter, Phys. Med. Biol., 11 (1966) 371.
35. Bussolati, C., Bertolaccini, M., Cova, S.: On the Behavior of High Resistivity Si Surface Barrier Detectors, Nucl. Instr. Meth., 33 (1965) 293.
36. Papadakis, A. C.: Charge Collection in Certain Types of Semiconductor Radiation Detectors, Nucl. Instr. Meth., 40 (1966) 177.
37. Antman, S. O. W., Landis, D. A., Pehl, R. H.: Measurement of the Fano Factor and the Energy per Hole-Electron Pair in Germanium, Nucl. Instr. Meth., 40 (1966) 272.
38. Walford, G., Doust, C. E.: Anomalous Effect in Lithium-Drifted Germanium Semiconductor (Radiation) Detector, Electronics Letters, 4 (1968) 13.
39. Cooper, J. A., Wogman, N. A., Palmer, H. E., Perkins, R. W.: The Application of Solid State Detectors to Environmental and Biological Problems, Health Physics, 15 (1968) 419.
40. Hulch, G. C., McKinney, R. A., Locker, R. J.: Development of a Germanium Avalanche-Type Semiconductor Nuclear Particle Detector and Discussion of Avalanche Detector Arrays, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-15 3 (1968) 246.
41. Arkad'eva, E. N., Maslova, L. U., Matveev, D. A., Ryukin, S. M., Rud, Yu. U.: On the Cd Te Detectors, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-15 3 (1968) 258.
42. Kandiah, K.: Nuclear Instruments over the Last Fifty Years, J. Sci. Instr., 1 (1968) 369.

#### Summary

#### SEMICONDUCTOR DETECTORS OF IONIZING RADIATION

Fast recent development of diode and transistor semiconductor detectors is briefly dealt with. A survey is given of the basic principles of work and of the most important characteristics of these detectors with special regard to their energy discrimination and potential position sensitivity. Comparison is made with gas and scintillation detectors. Some technical compromises in design are mentioned and at the end the most significant possibilities of application presented.

*Institute for Medical Research,  
Yugoslav Academy of Arts and Sciences, Zagreb*

*Received for publication  
January 30, 1969.*