

7 POLOVODIČOVÝ DETEKTOR

UČEBNÉ CIELE

Oboznámiť sa procesmi prechodu náboja cez polovodičový PN prechod. Pochopiť ako ovplyvňuje vlastnosti polovodičového detektora rezistivita (špecifický odpor), šírka ochudobnej oblasti a kapacita PN prechodu. Spoznať vlastnosti najčastejšie používaných polovodičových detektorov typu PN a P – i – N.

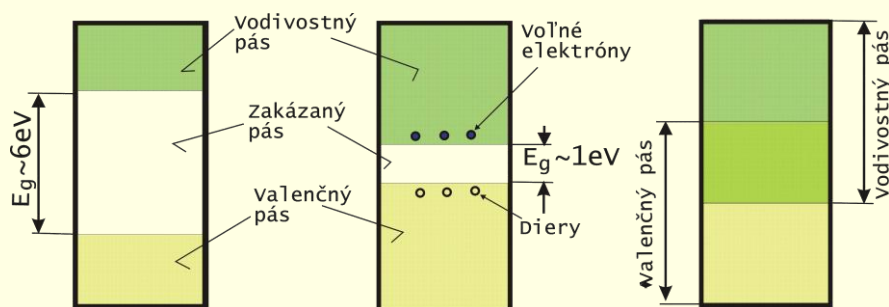
KLÚČOVÉ SLOVÁ

Elektrón – diera; PN prechod; prímiesné atómy; donory; akceptory; majoritný a minoritný nosič náboja; energetické hladiny; energia ionizácie; valenčný, vodivostný a zakázaný pás; vlastná (intrinická) koncentrácia; polovodič kompenzovaný; polovodič n – typu, polovodič p – typu; elektróda; pohyblivosť; rezistivita (špecifický odpor); fluktuácie jednosmerného prúdu; hrúbka ochudobnenej vrstvy; záverné napätie; procesy rekombinácie; nábojovo-citlivý predzosilňovač; detektory typu PN - difúzne detektory a detektory s povrchovou bariérou; detektory typu P-i-N - driftové detektory.

7.1 POLOVODIČOVÝ KRYŠTÁL

V polovodičových detektoroch, podobne ako v detektoroch s plynovou náplňou, sa pre registráciu nabitých častíc využíva ionizačný účinok, ktoré tieto častice vytvorili v pracovnom objekte detektora, v tomto prípade v polovodičovom kryštále.

V polovodičoch a izolátoroch existuje úplne zaplnený **valenčný pás** (obr. 7-1). Na prechod elektrónu z valenčného do **vodivostného pásu** je potrebné vynaložiť určitú energiu. Ak je šírka **zakázaného pásu** E_g veľká ($E_g > 3 \text{ eV}$), pripojené napätie nevyvolá prúd a takéto látky nazývame izolátory. Ak je šírka zakázaného pásu E_g malá, niektoré elektróny, vďaka tepelným fluktuáciám, môžu prejsť do vodivostného pásu a pri pripojení napätia vzniká prúd. Takéto látky nazývame polovodiče. Pre Si $E_g = 1,1 \text{ eV}$, pre Ge $E_g = 0,67 \text{ eV}$ (hodnoty pri $T = 300^\circ \text{K}$).



Obr. 7-1.

Štruktúra energetických pásov v izolante, v polovodiči a vo vodiči.

Počet elektrónov n , ktoré prejdú do vodivostného pásu, vďaka tepelným fluktuáciám, závisí od teploty, $n \sim \exp(-E_g/2kT)$. Elektrická vodivosť rýchlo rastie s teplotou, čo je charakteristická vlastnosť polovodičov.

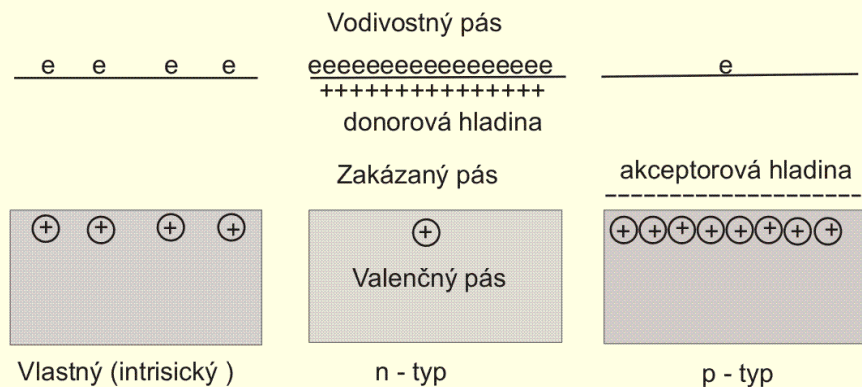
Stredná energia $\omega \sim 3E_g$, potrebná pre prechod elektrónu z valenčného do vodivostného pásu, t.j. **energia ionizácie**, je trochu väčšia ako E_g .

Ak sa valenčný a vodivostný pás prekrýva, vtedy hovoríme o kovoch. Nehľadiac na to, že môžu byť zhotovené veľmi čisté polovodičové kryštály, predsa sú v nich prítomné v malom množstve určité prímеси, ktoré vplývajú na elektrické vlastnosti látky.

Z polovodičových kryštálov sa používa na detekciu ionizujúceho žiarenia hlavne kremík a germánium. Pre tieto kryštály je charakteristická malá šírka zakázaného pásu E_g a pomerne vysoká pohyblivosť elektrónov a dier. Malá šírka zakázaného pásu spôsobuje, že **energia ω , ktorú stratila nabitá častica a ktorá slúži na vytvorenie páru nosičov náboja, je v kryštáloch zhruba o jeden rád menšia, ako v plynch**. Pre Ge $\omega \sim 2,96\text{eV}$ a pre Si $\omega \sim 3,66\text{eV}$, zatiaľ čo pre plyny $\omega \sim 35\text{eV}$. V scintilačnom detektore na utvorenie jedného fotoelektrónu je potrebná energia približne 350eV. To znamená, že očakávaná hodnota amplitúdy impulzu u polovodičových detektorov môže byť o rád väčšia, ako v prípade ionizačnej komory.

Polovodičový detektor sa v podstate skladá z dvoch **elektrod** (elektrodami sa nazývajú obrazne, pretože elektrodu môže tvoriť napr. vrstva zlata, naparená na polovodičový kryštál) medzi ktorými je umiestnený polovodičový kryštál.

Páry elektrón - diera, utvorené ionizujúcou časticou v pracovnom objeme polovodičového detektora, sa zbierajú elektrickým poľom na jeho elektrodách. Proces tvorenia a zberu náboja závisí od rozdelenia elektrónových energetických hladín v kryštále. Rozloženie elektrónových hladín v polovodičovom kryštále je na obr. 7-2.



Obr. 7-2. Energetické hladiny v polovodiči: vlastnom (intrinickom), n – typu a p – typu.

Keď **prímесné atómy** majú o valenčný elektrón navyše okrem tých, ktoré sú potrebné pre väzby atómov v kryštále, potom sa tieto elektróny pomerne ľahko odtrhnú od svojich atómov a môžu sa premiestňovať v kryštále. Polovodič tým nadobúda elektrickú vodivosť typu N. Prímесné atómy, ktoré polovodiču udeľujú elektrickú vodivosť elektrónovú (typu N), sa nazývajú **donormi**.

Ak majú prímесné atómy o jeden valenčný elektrón menej ako je potrebné pre väzbu atómov v kryštále, v kryštalickej štruktúre sa utvárajú diery - uvoľnené elektrónové hladiny. Tieto uvoľnené miesta môžu byť zaplnené na úkor elektrónov iných atómov a **diera** sa premiestňuje, čo je ekvivalentné premiestneniu kladného

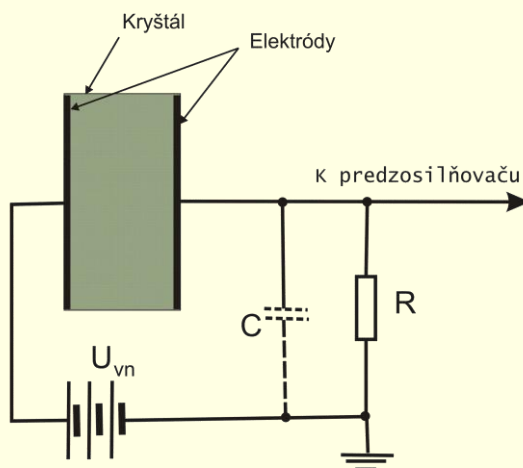
náboja. Polovodič tým nadobúda elektrickú vodivosť typu P. Prímesné atómy, ktoré polovodiču udeľujú elektrickú vodivosť dierovú (typu P), sa nazývajú **akceptormi**.

Pre Ge a Si ako prvky IV. skupiny, sú donormi fosfor, arzén alebo antimón, teda prvky V. skupiny a akceptormi sú bór, gálium alebo indium - prvky III. skupiny periodickej sústavy.

Oba typy prímiesí majú pomerne malú ionizačnú energiu. Donory majú hladiny, ktoré ležia blízko vodivostného pásu, akceptory - blízko valenčného pásu (obr 7-2).

V reálnych polovodičoch sú prítomne oba druhy prímiesi, ktoré sa určitým spôsobom kompenzujú. Druh nosičov, ktorý prevláda, nazývame **majoritný** - napr. elektróny v materiáli typu N. Druh nosičov, ktorý je v menšine, nazývame **minoritný** - napr. diery v materiáli typu N.

Ak sa počet donorov rovná počtu akceptorov, polovodič nazývame **kompenzovaný**. Tento prípad netreba zamieňať s prípadom veľmi čistého polovodičového materiálu, tzv. **vlastného polovodiča**, kedy v materiáli nie sú prítomné prímiesné atómy a vodivosť kryštálu je spôsobená elektrónmi a dierami utvorenými tepelnými fluktuáciami. Pre vlastný polovodič musí byť splnená podmienka elektrickej neutrality v podobe $p_i = n_i$, kde index i znamená **intrinšický**, čiže vlastnú koncentráciu dier p a elektrónov n .



Obr. 7-3.
Schéma zapojenia detektora na báze polovodičového kryštálu. (Čiarkovaná C reprezentuje kapacitu detektora spolu s kapacitou vstupu zosilňovača)

7.1.1 Rezistivita

Veľká **pohyblivosť** elektrónov a dier zabezpečuje nezávislosť amplitúdy impulzov od polohy dráhy registrovanej častice v pracovnom objeme detektora pri dostatočne dobrej časovej rozlišovacej schopnosti.

Avšak **rezistivita (špecifický odpor)** polovodičových kryštálov je pomerne malý, 10^2 - $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$. Preto keď na elektródy detektora, medzi ktorými je umiestnený polovodičový kryštál pripojíme malé jednosmerné napätie v elektrickom obvode bude pretekať jednosmerný prúd. Počet nosičov náboja, ktoré sa zúčastňujú na utváraní prúdu podlieha štatistickým fluktuáciám a v spojitosti s tým na detektore (na ekvivalentnej kapacite C detektora obr. 7-3) bude kolísať napätie (šum) nezávisle na tom či prešla častica cez detektor, alebo nie. To znamená, že pomer počtu nosičov náboja N , utvorených ionizujúcou časticou k hodnote fluktuácii jednosmerného prúdu určuje, nakoľko môžeme používať polovodičový kryštál ako detektor. **Fluktuácie**

jednosmerného prúdu sú tým menšie, čím menší je prúd. t.j. čím väčší je odpor polovodičového kryštálu R_p , Hodnota fluktuácie sa určuje - ako stredná kvadratická odchýlka od stredného počtu nosičov, ktoré sa zúčastňujú na vytváraní detektorom pretekajúceho prúdu, počas doby T zberu nosičov náboja od registrovaných častíc. Ak pri napätí U_{vn} cez detektor preteká prúd U_{vn}/R_p , potom stredný počet nosičov náboja, pretekajúci za čas T bude $(U_{vn}T)/(R_p e) \pm \sqrt{U_{vn}T/R_p e}$. Pomer

$$\eta_{SN} = \frac{N_0}{\sqrt{\frac{U_{vn} \cdot T}{R_p e}}} \text{ udáva pomer signál/šum, odkiaľ pre } R_p \text{ dostaneme: } R_p = \eta_{SN}^2 \frac{U_{vn} T}{e N_0^2}.$$

Z výsledkov príkladu 7-1 plynie, že rezistivita (špecifický odpor) polovodičových kryštálov Si a Ge je nedostatočný pre dosiahnutie potrebného pomeru signál/šum η_{SN} . Na **zváčšenie rezistivity** boli vypracované rôzne metódy zmenšenia počtu nosičov náboja, existencia ktorých je spôsobená prítomnosťou prímеси v Si a Ge. Metódy sú založené na utvorení v PN prechode detektora oblasti s malým množstvom nosičov.

Príklad 7-1

Na základe vyššie uvedených vzťahov si vytvorte predstavu o mernom odpore bežných kryštálov Si a Ge. Pritom predpokladajte, že v detektore častica alfa stratila energiu 6 MeV, energia na vytvorenie jedného páru elektrón diera je tak ako v Si je $\omega \sim 3,6\text{eV}$, doba zberu náboja $T=10^{-7}\text{s}$, na polovodičovom kryštále je napätie $U_{vn}=100\text{V}$ a požadujeme pomer signál-šum $\eta_{SN} \sim 1000$.

Riešenie:

Častica alfa s energiou $\Delta W=6\text{MeV}$ utvorí v kryštále približne $N_0=\Delta W/\omega \sim 1,7 \cdot 10^6$ párov elektrón - diera, pri napätí na detektore $U_n=100\text{V}$ a dobe zberu $T=10^{-7}\text{s}$ bude $R_p=20\eta_{SN}^2$. Pre veľmi dobré energetické rozlíšenie musí byť $\eta_{SN} \sim 1000$, potom $R_p \sim 2 \cdot 10^7 \text{ohm}$. Pre detektor s plochou $0,1 \text{ cm}^2$ pri hrúbke $0,1 \text{ cm}$ dostaneme pre rezistivitu (špecifický odpor) hodnotu $\rho=2 \cdot 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$, čo je oveľa viac, ako majú bežné kryštály. Pre porovnanie pri $T=300 \text{ K}$ je rezistivita (špecifický odpor) Si $\rho_{Si}=3 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ a pre Ge $\rho_{Ge}=50 \Omega \cdot \text{cm}$.

Príklad 7-2

Vo kremíku je priemerná energia na vytvorenie jedného páru elektrón - diera $\omega \sim 3,66 \text{ eV}$. Určite akú amplitúdu bude mať impulz na výstupe nábojového predzosilňovača s kapacitou v obvode spätnej väzby 30pF , ak alfa častica pri prechode detektorom stratila energiu 5MeV a ak predpokladáme, že pracovný odpor detektora R je veľmi veľký, takže jeho vplyv zanedbáme.

Riešenie:

Ak je priemerná energia na vytvorenie jedného páru elektrón - diera v Si je $\omega=3,66 \text{ eV}$ a ionizujúca častica má energiu $\Delta W = 5\text{MeV}$, vytvorí sa v v ochudobnenej vrstve detektora Si

$N=\Delta W/\omega=5\ 000\ 000/3,66=1\ 366\ 120$ párov elektrón – diera, resp.

náboj $Q=\pm 1\ 366\ 120 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}=\pm 2,2 \cdot 10^{-13}\text{C}$.

Ak je kapacita $C_{det} \sim C_{sv} \sim 30\text{pF}$ bude maximálna amplitúda napäťového impulzu

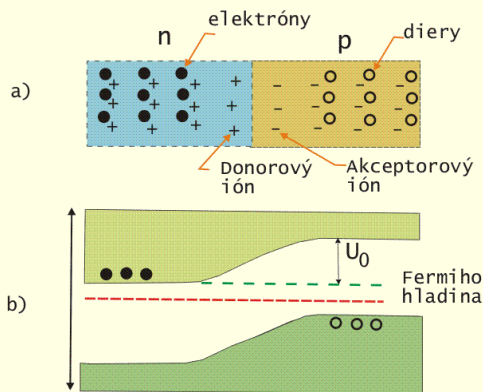
$U_{max}=Q/C_{sv} \sim 2,2 \cdot 10^{-13} / (30 \cdot 10^{-12}) = 7,2\text{mV}$.

Amplitúda napäťového impulzu z polovodičového Si detektora je veľmi malá a bude ju treba z výstupu predzosilňovača ešte ~ 200 krát zosilniť, aby sa mohla odmerať na mnohokanálovom analyzátore.

7.1.2 PN prechod

Prechod PN možno vytvoril tak, že na jednu plochu kryštálu z pomerne čistého materiálu typu P nanesieme vrstvu látky, ktorá obsahuje donory. Vďaka difúzii donory vytvoria v materiáli typu P tenkú povrchovú vrstvu, v ktorej je koncentrácia donorov mnohonásobne vyššia ako koncentrácia akceptorov. Za touto vrstvou, ktorá

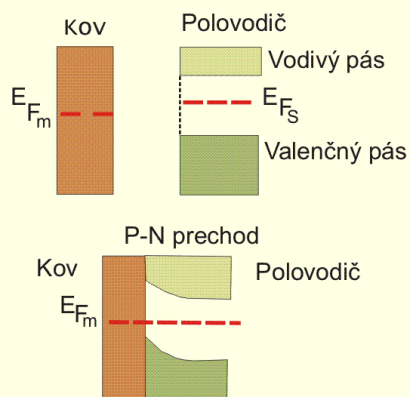
má elektrónovú vodivosť (typ N), vzniká prechodová oblasť, ktorá oddeľuje materiály typu N a P.



Obr. 7-4.

Štruktúra energetických pásov v PN prechode sa po vytvorení bariérového potenciálu U_0 deformuje.

Voľné elektróny z vrstvy typu N budú vďaka difúzii prenikať do hĺbky kryštálu typu P, v ktorom je koncentrácia elektrónov vo vodivostnom páse nízka. Diery budú difundovať opačným smerom, z kryštálu typu P do vrstvy typu N. V materiáli typu N vznikne určitý prebytok kladne nabitých donórnych atómov (ich počet je rovný počtu elektrónov, ktoré prešli do kryštálu typu P). V materiáli typu P, v blízkosti vrstvy typu N, vznikne prebytok záporne nabitých akceptorých atómov, ktorých záporný náboj už nie je kompenzovaný kladným nábojom, pretože určité množstvo dier prešlo do vrstvy typu N, čiže náboje prímestných atómov už nie sú kompenzované im prislúchajúcimi nosičmi. Je zrejmé, že nekompenzovaný negatívny náboj akceptorov bude rovný prebytočnému kladnému náboju donorov. Takto sa v oblasti PN prechodu vytvoria rovnako veľké priestorové náboje opačného znamienka, medzi ktorými je veľmi malá vzdialenosť. Tieto **priestorové náboje** utvárajú v oblasti PN prechodu elektrické pole, ktoré hrá **úlohu potenciálovej bariéry**, ktorá zamedzuje ďalšiu difúziu elektrónov do kryštálu typu P a dier - do vrstvy typu N. S postupným zvyšovaním potenciálovej bariéry sa bude rýchlosť difúzie znižovať a keď výška bariéry dosiahne určitého potenciálneho rozdielu U_0 , potom **nastane rovnovážny stav**, pri ktorom veľmi malá zvyšková difúzia majoritných nosičov náboja (ktoré získali tepelnú energiu na úkor fluktuácii, dostatočnú na prekonanie potenciálovej bariéry) sa bude kompenzovať práve takým malým prúdom, ktorý bude vytvorený prechodom cez PN prechod minoritných nosičov náboja (obr. 7-4).



Obr. 7-5.

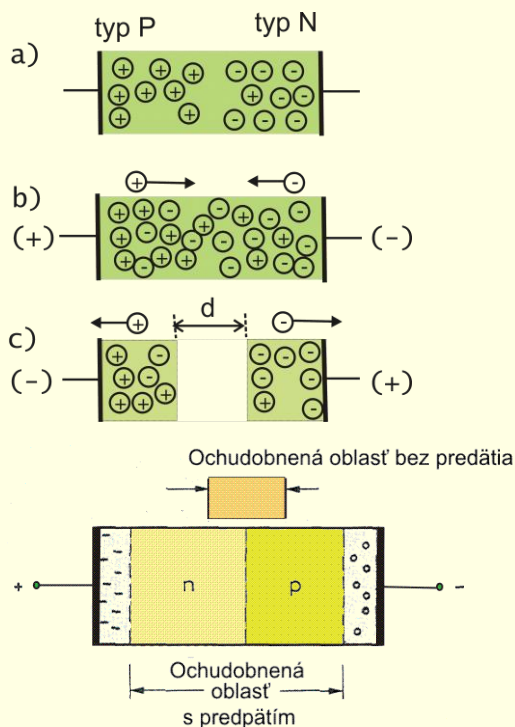
Vytvorenie prechodu s Schottkyho bariérou. V dôsledku rozdielnych Fermiho hladín kovu a polovodiča v mieste ich kontaktu vzrastie ich kontaktný potenciál. Takáto tzv. Schottkyho bariéra na styku kov - polovodič má v mnohom vlastnosť PN prechodu. Od rozhrania do vnútra polovodiča sa vytvorí ochudobnená vrstva, pre vysoko rezistívny Si môže mať hrúbku $\sim 5\text{mm}$.

Obrázok 7-5 ilustruje ako sa deformuje štruktúra energetických pásov na rozhraní kov – polovodič . Takto vytvorená tzv. **Schotkyho bariéra** na styku kov - polovodič má mnohé charakteristiky PN prechodu.

7.1.3 Šírka ochudobnej oblasti a kapacita PN prechodu

Barierový potenciál U_0 na hraniciach PN prechodu môže dosiahnuť niekoľko desiatín volta ($\sim 0,5$ V). Výška potenciálovej bariéry eU_0 nemôže byť väčšia ako je šírka zakázaného pásu kryštálu E_g .

To znamená, že kryštál s PN prechodom by sa principiálne mohol použiť **ako detektor častíc aj bez pripojenia vonkajšieho zdroja napätia** v obvode detektora, pretože elektróny a diery, utvorené ionizujúcou časticou v oblasti prechodu (ktorá je ochudobnená o vlastné nosiče náboja), by vytvárali prúdové impulzy vo vonkajšom obvode detektora pod vplyvom vnútorného elektrického poľa PN prechodu. Ale pretože **hrúbka ochudobnenej vrstvy** by bola v tomto prípade malá, detektor by nemal prakticky význam.



Obr.7-6.

Vysvetlenie usmerňovacieho javu na prechode PN:

a) prechod je v termodynamickej rovnováhe,

b) napätie pripojené v priamom (priepustnom) smere,

c) napätie pripojené v závernom smere.

d - šírka ochudobnenej oblasti

Obr 7-7.

Ochudobnená oblasť na v závernom smere polarizovanom PN prechode pri rôznom vonkajšom predpätí U_{vn} .

Šírka (hrúbka) ochudobnenej vrstvy d v PN prechodoch závisí od výšky potenciálovej bariéry a so zväčšovaním výšky bariéry jej šírka rastie. Toto umožňuje (pripojením ku kryštálu určitého vonkajšieho rozdielu potenciálov tak, aby vonkajšie elektrické pole zvyšovalo výšku bariéry) rozťahnuť oblasť, ochudobnenú o voľné nosiče elektrického náboja (obr. 7-6). Ak pripojíme ku kryštálu takéto **záverné napätie** U_{vn} , t.j. napätie v závernom smere (obr. 7-7), šírka pracovnej oblasti detektora (**šírka ochudobnenej oblasti**) sa zväčší a bude

$$d = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon \cdot (U_0 + U_{vn})}{e N_a}},$$

kde:

N_a – je koncentrácia neskompensovaných akceptorov v P type polovodiča,

$\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0$ - permitivita materiálu (Si alebo Ge),

$e = 1.603 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ – elementárny náboj.

Ak sú všetky akceptory ionizované, potom rezistivita (špecifický odpor) polovodiča môžeme vyjadriť ako

$$\rho = \frac{1}{N_a \cdot e \cdot \mu_p},$$

kde:

μ_p – je pohyblivosť dier.

Pre hrúbku ochudobnenej oblasti potom dostaneme:

$$d = \sqrt{2 \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \rho \cdot \mu_p \cdot (U_0 + U_{vn})} \approx \sqrt{10^{-9} \rho \cdot (U_0 + U_{vn})} \approx \sqrt{U_{vn}};$$

kde:

$\varepsilon_r = 11,8$ – je relatívna permitivita pre Si,

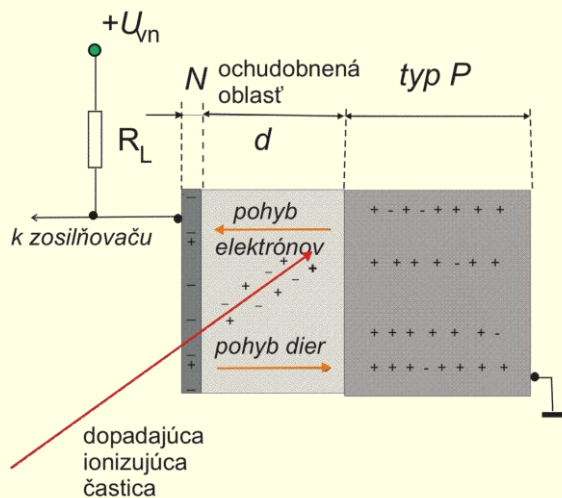
$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ - permitivita vákua.

Kapacita PN prechodu, ku ktorému je pripojené záverné napätie, sa približne rovná kapacite doskového kondenzátora, medzi doskami ktorého je dielektrikum –

kremík. Pretože medzi doskami je vzdialenosť d , pre kapacitu dostávame $C_{det} = \frac{\varepsilon S}{d}$

a na jednotku plochy S detektora pripadá:

$$\frac{C_{det}}{S} = \frac{\varepsilon}{S} = \frac{\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0}{\sqrt{2 \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \rho \cdot \mu_p \cdot (U_0 + U_{vn})}} = \sqrt{\frac{\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0}{2 \cdot \rho \cdot \mu_p \cdot (U_0 + U_{vn})}}.$$



Obr. 7-8.

Ilustrácia vzniku voľného náboja v ochudobnenej vrstve detektora typu PN

Šírka ochudobnenej oblasti d a kapacita prechodu C_{det} závisia od pripojeného napájacieho záverného napätia U_{vn} , čoho dôsledkom je, že aj amplitúda impulzu z detektora $U_{imp} = Q/C_{det}$ závisí od napájacieho napätia. Pre zosilnenie signálu (t.j. náboja, utvoreného v detektore, ktorý závisí od energie detegovanej častice) z polovodičového detektora je potrebné použiť **nábojovo-citlivý predzosilňovač**, ktorý ako integrátor umožňuje potlačiť závislosť jeho zosilnenia od vstupnej kapacity detektora. V nábojovo-citlivom predzosilňovači amplitúda napätového signálu na výstupe $U_{imp} = Q/C_{sv}$ nebude závisieť od napájacieho napätia U_{vn} , nakoľko v integrátore sa skompenzuje vplyv vstupnej kapacity detektora C_{det} inou kapacitou C_{sv} , v obvode spätnej väzby integrátora. Na základe výsledku z príkladu 7-2 vidno, že

pre amplitúdovú analýzu treba takýto signál z výstupu nábojového predzosilňovača zosilniť ešte $\sim 10^3$ krát v hlavnom zosilňovači.

Voľné nosiče náboja, utvorené ionizujúcou časticou v ochudobnenej oblasti, sa budú pohybovať v pripojenom elektrickom poli a budú sa zbierať na elektródach obr. 7-8. Z hľadiska úplného zberu náboja hrajú dôležitú úlohu **procesy rekombinácie** párov diera - elektrón. Tento proces je obzvlášť významný v prípade silno ionizujúcich častíc - protónov, ťažších iónov a fragmentov, vznikajúcich pri delení jadier, pre ktoré je charakteristická vysoká hustota utvorených párov - 10^{16} až 10^{19} párov/cm³. Pri detekcii slabo ionizujúcich častíc hrá väčšiu úlohu zachytenie nosičov náboja na záchytných centrách. Ak zanedbáme tieto procesy a pripustíme, že nastáva len krátkodobé zachytenie nosičov na záchytných centrách, t.j. ak budeme predpokladať, že na elektródach sa bude úplne zberať celkový náboj $Q=Ne$ (N - počet utvorených párov nosičov náboja), potom Q bude s vysokou presnosťou proporcionálne energii ionizujúcej častice.

Šírka ochudobnenej oblasti d je ohraničená merným odporom a prierazným napätím PN prechodu. Preto pri detegovaní monoenergetických častíc s rastom pripojeného napájacieho napätia U_{vn} sa hodnota d spočiatku zväčšuje a amplitúda impulzu rastie. Keď však hodnota d bude rovná dobehu registrovanej častice, ďalšie zvyšovanie napájacieho napätia už nemôže zväčšiť amplitúdu impulzu. **Rozlišovacia schopnosť polovodičového detektora** je podmienená niekoľkými faktormi:

- štatistickou presnosťou merania,
- rôznymi typmi elektrických šumov v detektore a vo vstupných obvodoch predzosilňovača,
- fluktuáciami náboja pri neúplnom zbere,
- fluktuáciami energetických strát v okienku detektora a pod.

Napr. pre častice alfa s energiou 5 MeV bude veľmi dobré rozlíšenie rádovo 10-12 keV, t.j. približne 0,2 %.

Priklad 7-3

Získajte reálnu predstavu o číselných hodnotách kapacity prechodu, pripadajúcu na jednotku plochy pre kremík P typu, s ktorými sa možno stretnúť v praxi .

Riešenie

Aby sme získali reálnu predstavu o číselných hodnotách, s ktorými sa možno stretnúť v praxi vezmeme kremík P typu. Ak budeme uvažovať $\rho = 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$, $\eta_{sn} = 480 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ a k detektoru je pripojené napájacie záverné napätie $U_{vn} = 100 \text{ V}$, potom $d = 319 \mu\text{m}$, $C_{det}/S = 33 \text{ pFcm}^{-2}$.

7.2 POUŽÍVANÉ TYPY DETEKTOROV

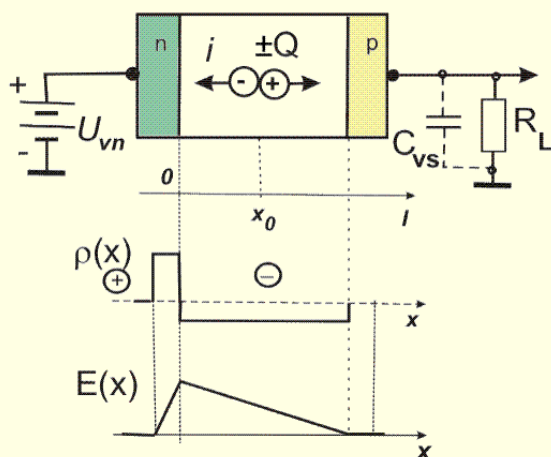
V súčasnej dobe sa používajú dva typy detektorov:

1. detektory typu PN - difúzne detektory a detektory s povrchovou bariérou,
2. detektory typu P-i-N - driftové detektory.

7.2.1 Detektory typu PN

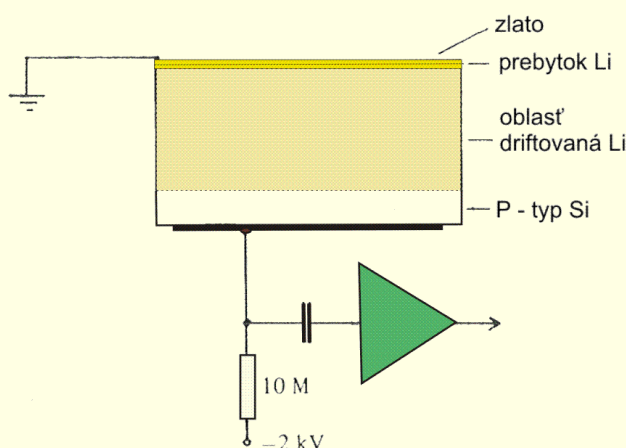
Pri zhotovení **difúzných detektorov** sa používa fosfor, ktorý sa nanáša na povrch Si typu P. Tenká vrstva fosforu s nadbytkom voľných elektrónov kompenzuje dierovú vodivosť kryštálu a v hĺbke, ktorá sa rovná hĺbke difúzie, sa utvorí PN prechod. Pripojené vonkajšie napätie vytvorí ochudobnenú oblasť širokú asi 1mm.

Detektory s povrchovou bariérou sa zhotovujú tak, že na povrchu materiálu typu N sa napr. leptaním utvorí vrstva typu P. Potom sa na tento povrch nanáša tenká vrstva zlata. Pri pripojení napätia sa utvára ochudobnená oblasť, ktorá môže dosiahnuť hrúbku niekoľkých milimetrov (v prípade Si). Detektory s povrchovou bariérou sa môžu zhotoviť ako z Si, tak aj z Ge, no Ge -detektory sa používajú len pri teplote tekutého dusíka, $T=77\text{ }^{\circ}\text{K}$, vzhľadom na hodnoty merného odporu (tab. 1). Si - detektory sa používajú aj pri teplote $T=300\text{ }^{\circ}\text{K}$.



Obr. 7-9.

Charakteristiky detektora so záverne polarizovaným PN prechodom. (Napájacie napätie U_{vn} má rovnakú polaritu ako barierový potenciál $-U_0$)
 a) priestorový náboj $\rho(x)$;
 b) intenzita poľa $E(x)$.



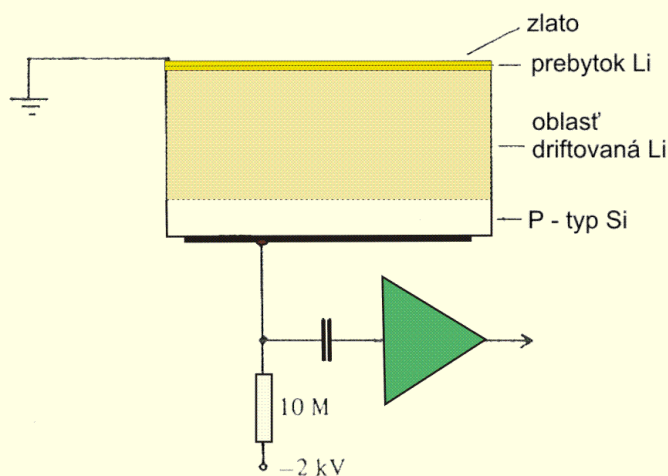
Obr 7-10.

Kremíkový detektor s povrchovou bariérou (SSB). Tenká naparená vrstva zlata slúži ako vstupné okno pre ionizujúce častice a vyvára tiež kontakt pre pripojenie napätia na PN prechod, vytvorený medzi polovodičom a určitým kovom (napr. kremíkom N – typu a zlatom alebo Si P - typu a hliníkom.)

Štruktúru detektora s PN prechodom objasňuje obr. 7-9. Ionizujúce žiarenie vstupuje do detektora cez tenkú vrstvu polovodiča typu N s vysokou koncentráciou donorov. Oblasť typu P má miernu koncentráciu prímiesí. V dôsledku difúzie nosičov sa v okolí rozhrania rozloží náboj $\rho(x)$ (obr. 7-9a). Ak sa k detektoru pripojí vonkajšie napätie U_{vn} , súhlasne polarizované s vytvoreným barierovým potencialom U_0 , tak prúd cez prechod netečie. Ionizujúca častica vytvorí v ochudobnenej oblasti voľné nosiče náboja – elektróny a diery (obr.7-8), vo vonkajšom obvode detektora pretečie prúd a na záťaži (podľa obrázku 7-9 cez záťaž tvorenú odporom R_L a kapacitou C_{vs}) vznikne signál. Najpoužívanejším typom tohto typu detektora je detektor s povrchovou bariérou (obr. 7-10).

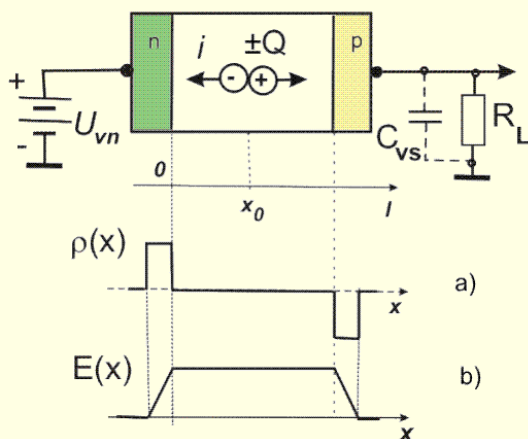
7.2.2 Detektory typu P-i-N

Šírka ochudobnenej oblasti difúzných detektorov a detektorov s povrchovou bariérou je ohraničená merným odporom použitých materiálov. Na registráciu kvánt gama a vysoko energetických častíc, ktoré majú malú ionizačnú schopnosť, sú uvedené detektory nevhodné. V týchto prípadoch sa používajú **driftové detektory** (niekedy označované ako **P- i - N detektory**, kde i znamená oblasť s intrinšickou vodivosťou kryštálu), v ktorých sú prímiesy kompenzované iónmi lítia. Lítiové ióny (donory) pomerne ľahko drifujú do Si (obr. 7-11) alebo do Ge a kompenzujú akceptory v materiáloch typu P. Hrúbka ochudobnenej oblasti v takomto detektore závisí od podmienok driftu (teploty, napätia - atď.). V súčasnosti sa zhotovujú veľké kryštály Ge(Li), ktoré majú objem citlivej vrstvy asi 100 cm^3 . Tieto detektory však môžu pracovať (ba musia sa aj skladovať) pri teplote tekutého dusíka.



Obr 7-11.

Kremíkový detektor driftovaný litom - Si(Li) detektor. Prechod P - i - N s vlastnou (intrinšickou) vodivosťou vytvára omnoho hrubšiu vrstvu citlivej oblasti detektora (s použitím záverného napätia v rozsahu 500-2000V).



Obr. 7-12.

Charakteristiky P- i -N detektora. (Napájacie napätie U_{vn} má rovnakú polaritu ako bariérový potenciál $-U_0$)

a) Priestorový náboj $\rho(x)$

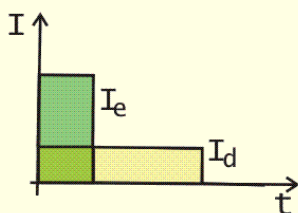
b) Intenzita poľa $E(x)$

V skompenzovanej oblasti o šírke l sa nevyskytuje priestorový náboj $\rho(x)$, takže elektrické pole $E(x)$ je v tejto oblasti prakticky konštantné. Hrúbka skompenzovanej oblasti u Si(Li) môže byť do 10-15 mm.

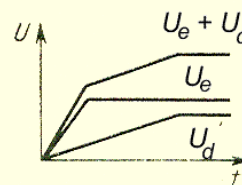
Pole $E(x)$ vo vnútri ochudobnenej - vykompenzovanej vrstvy (obr. 7-12) je takmer konštantné a **proces zberu náboja je analogický ako v ionizačnej komore**. Rozdiel medzi pohyblivosťami elektrónov a dier (tab.1) však nie je taký veľký ako medzi pohyblivosťami elektrónov a iónov v plynových detektoroch (obr. 7-13). Na tvarovaní výstupného impulzu v polovodičovom detektore (obr. 7-14) sa preto **podieľajú obe zložky prúdu**. Trvanie zberu náboja a rýchlosť nárastu výstupnej

amplitúdy impulzu závisí od dráhy, ktorú častica prešla v pracovnom objeme detektora. Výstupný impulz môže mať trvanie okolo 1 μ s. Vzhľadom k pomerne veľkej rýchlosti nosičov náboja a tým úmerne aj ku krátkej dobe zberu náboja je **časové rozlíšenie polovodičových detektorov veľmi vysoké**. Napr. pri šírke ochudobnenej vrstvy $d=1\text{mm}$ je trvanie čela výstupného impulzu okolo 1ns, pri šírke ochudobnenej vrstvy $d=10\text{mm}$ je trvanie čela výstupného impulzu okolo 100ns a viac.

Kvôli ľahšiemu porovnávaniu detektorov je **zvykom udávať energetické rozlíšenie detektorov** pomocou celkovej šírky píku meraného v polovičnej výške píku, t.j. skrátene **pomocou FWHM** (z anglického Full Width at Half Maximum), pri energii vybraných žiaričov. Napr. Ge(Li) detektory mávajú pri energii 1,33MeV (^{60}Co) rozlíšenie FWHM $\sim 1,8\text{keV}$ a pri energii 122 keV (^{57}Co) rozlíšenie FWHM $\sim 820\text{eV}$. S kremíkovými detektormi sa dosahuje pri registrácii častíc alfa s energiou 5,47MeV (^{241}Am) rozlíšenie FWHM $\sim 15\text{keV}$ a pri meraní röntgenoflorescentného žiarenia s energiou 6,4keV (^{55}Fe) rozlíšenie FWHM $\sim 170\text{eV}$.



Obr.7-13. Prúd cez P – i - N detektor pozostáva z elektrónovej a dierovej zložky, prúdu, s rôznym trvaním zberu náboja, v závislosti od pohyblivosti. Tvar zložiek $i_d(t)$ a $i_e(t)$ je podobný ako v ionizačnej komore.



Obr. 7-14. Výstupná amplitúda napätia v prípade voľby nekonečne veľkého zaťažovacieho odporu R, resp. voľby časovej konštanty $C_{\text{det}}R \sim \infty$

Tabuľka 1 – porovnanie vlastností polovodičových kryštálov Si a Ge

Parameter	Si	Ge
Atómové číslo	14	32
Atómová hmotnosť	28,08	72,60
Relatívna permitivita ϵ_r	11,8	16
Šírka zakázaného pásu E_g pri $T=300^\circ\text{K}$ [eV]	1,15	0,65
Energia ionizácie [eV]	3,66	2,96
Hustota vlastných nosičov náboja pri $T=300^\circ\text{K}$ [eV]	$1,5 \cdot 10^{10}$	$2,4 \cdot 10^{13}$
Pohyblivosť elektrónov pri $T=300^\circ\text{K}$ [cm^2/Vs]	1350	3900
Pohyblivosť dier pri $T=300^\circ\text{K}$ [cm^2/Vs]	480	1900
Pohyblivosť elektrónov pri $T=77^\circ\text{K}$ [cm^2/Vs]	$4 \cdot 10^4$	$3,6 \cdot 10^4$
Pohyblivosť dier pri $T=77^\circ\text{K}$ [cm^2/Vs]	$1,8 \cdot 10^4$	$4,2 \cdot 10^4$
Vlastná rezistivita (špecifický odpor) pri $T=300^\circ\text{K}$ [eV]	$3 \cdot 10^5$	50
Vlastná rezistivita (špecifický odpor) pri $T=77^\circ\text{K}$ [eV]	-	$5 \cdot 10^4$

KONTROLNÉ OTÁZKY

1. Ako ovplyvňujú donory a akceptory elektrónovú vodivosť polovodičového kryštálu?
2. Ako sa chovajú majoritné a minoritné nosiče náboja v oblasti PN prechodu?
3. Aký je rozdiel medzi vlastným (intrinickým) a kompenzovaným, polovodičom?
4. Porovnajme pohyblivosť elektrónov a dier?
5. Ako súvisí rezistivita (špecifický odpor) s veľkosťou napätia na PN prechode?
6. Prečo sa pri zosilňovaní impulzov z polovodičového detektora používa nábojový zosilňovač?
7. Charakterizujte vlastnosti difúzneho detektora a detektora s povrchovou bariérou.
8. Charakterizujte vlastnosti driftových detektorov.
9. Porovnajme vlastnosti polovodičového detektora typu P-i-N a plošnej ionizačnej komory s mriežkou.

SÚHRN

V polovodičových detektoroch sa pre meranie energie využíva náboj elektrónov a dier, ktorý sa na základe ionizačného účinku žiarenia vytvoril v pracovnom objekte detektora - v polovodičovom kryštále. Základom detektora je PN prechod, polarizovaný v závernom smere. Zvýšením vonkajšieho záverného napätia možno zväčšiť oblasť, ochudobnenú o voľné nosiče elektrického náboja. Veľkosť záverného napájacieho napätia limituje rezistivita (špecifický odpor) polovodiča, možno ho však ovplyvniť prítomnosťou vhodných prímiesi. Nevýhodou je, že šírka ochudobnenej oblasti a kapacita PN prechodu závisia od pripojeného napájacieho záverného napätia. Pokiaľ sa nepoužije na zosilnenie impulzov z detektora nábojový predzosilňovač bude amplitúda impulzu z detektora $U_{imp}=Q/C_{det}$ závisieť od pripojeného napájacieho záverného napätia. V súčasnej dobe sa používajú dva typy detektorov:

1. detektory typu PN - difúzne detektory a detektory s povrchovou bariérou,
2. detektory typu P-i-N - driftové detektory.



Návrat z acrobat readera -  (zatvorením okna)