

13. Polovodičové detektory

1. Všeobecná časť

Vysoká energetická rozlišovacia schopnosť, krátka doba narastania (nábehová hrana) signálu a malé rozmery umožňujú široké využitie polovodičových detektorov na registráciu a spektrometriu nabitých častíc, röntgenového a gama žiarenia.

V polovodičových detektoroch, podobne ako v detektoroch s plynovou náplňou, sa na registráciu nabitých častíc využíva ich ionizačný účinok v pracovnom objeme detektora, v tomto prípade v polovodičovom kryštáli.

V polovodičoch a izolantoch existuje úplne zaplnené valenčné pásmo. Na prechod elektrónu z valenčného do vodivostného pásma treba vynaložiť určitú energiu. Ak je šírka zakázaného pásma veľká ($\Delta W > 3 \text{ eV}$), pripojené napätie nevyvolá prúd a takéto látky nazývame izolantmi. Ak je šírka zakázaného pásma ΔW malá, niektoré elektróny môžu vďaka tepelným fluktuáciám prejsť do vodivostného pásma a po pripojení napätia vzniká prúd. Tieto látky nazývame polovodičmi (pri izbovej teplote ΔW je 1,12 eV pre Si a 0,67 eV pre Ge).

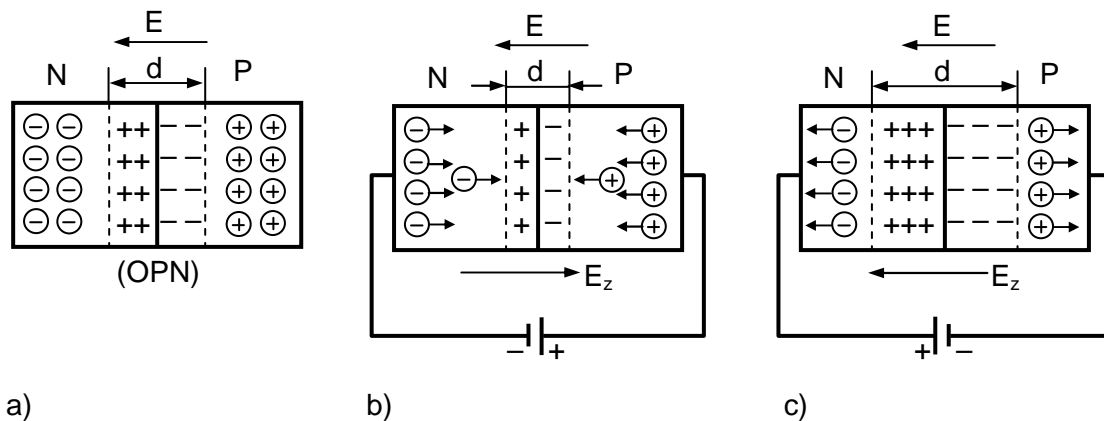
Polovodičový detektor ionizujúceho žiarenia sa získa spojením N a P typu polovodiča. Okolie rozhrania, v ktorom vznikne objemový kladný náboj ionizovaných donorov a záporný náboj ionizovaných akceptorov, sa nazýva oblasť priestorového náboja (OPN), resp. priechod P–N (obr. 13.1a). OPN dosahuje hrúbku d v rozmedzí od zlomkov do desiatok μm .

Priechod P–N má vlastnosti diódy. Je to oblasť silného elektrického poľa, ktorá zamedzuje difúzii elektrónov do polovodiča typu P a diery do polovodiča typu N.

Ak sa pripojí P-polovodič ku kladnému a N-polovodič ku zápornému pólu zdroja (obr. 13.1b), vonkajšie a vnútorné elektrické polia budú mať opačný smer, čím sa zmenší šírka OPN. V dôsledku toho elektróny a diery budú prenikať priechodom P–N a polovodičom potečie prúd (zapojenie v priepustnom smere).

Pri zmene polarita (obr. 13.1c) smer vonkajšieho a vnútorného poľa bude rovnaký, zväčší sa šírka OPN a polovodičom prúd nebude prechádzať (zapojenie v závernom smere). Šírka OPN však nemá vplyv na pretekanie tzv. vlastného šumového prúdu. Tento vzniká, keď v priechode P–N sa vytvárajú elektróny a diery neprímesného pôvodu (napr. pod vplyvom tepelného pohybu atómov). Vytvorené nosiče náboja cez OPN voľne prechádzajú a polovodičom potečie elektrický prúd.

Na registráciu žiarenia sa používajú polovodiče so záverne polarizovaným priechodom P–N. Pri takomto zapojení ním bude pretekať iba vlastný šumový prúd (šum), ktorý závisí od teploty T a šírky zakázaného pásma ΔW . Čím menšia je hodnota ΔW , tým silnejšie narastá šum v závislosti od teploty. Napr. pri germánii je šum pri izbovej teplote pomerne veľký. Pri kremíku je ΔW asi 1,7–krát väčšie ako pri Ge a šum pri izbovej teplote pomerne malý.



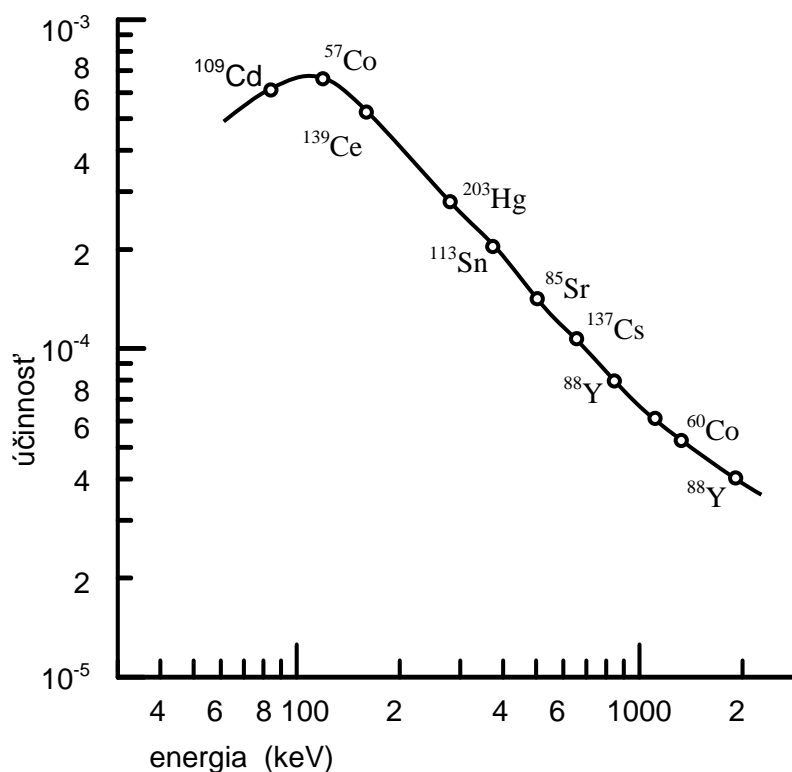
Obr. 13.1: a) Vznik oblasti priestorového náboja (priechodu P–N) s hrúbkou d , b) Priechod P–N zapojený v priepustnom smere, c) Priechod P–N zapojený v závernom smere.

Ak sa nabitá častica dostane do polovodičového detektora, ionizuje a vzbudzuje zväčša atómy kremíka alebo germánia. Podľa pásmovej teórie prejde elektrón v procese ionizácie zo zaplneného valenčného pásma do pásma vodivostného a v dôsledku toho sa vytvorí pár elektrón–díra ($e-d$). Ak ionizujúce žiarenie vnikne mimo oblasť priestorového náboja detektora (pozri obr. 13.1c), v obvode detektora netečie ionizačný prúd, pretože celé napätie je akoby priložené k P–N priechodu a na vzniknuté náboje v P– alebo N–časti nepôsobí. Premiestňovaniu elektrónov a dier cez priechod P–N prekážajú priestorové náboje opačného znamienka.

Ak elektróny a diery vznikajú ionizáciou v priechode P–N, vtedy sa elektróny a diery voľne premiestňujú pod vplyvom vonkajšieho napätia k anóde, resp. ku katóde. Pritom elektrické pole od vonkajšieho zdroja a pole samotného priechodu P–N spôsobuje rýchly zber elektrónov a dier na elektródach. Po zabrzdení zvonku vnikajúcej nabitkej častice do priechodu P–N a vytvorení párov $e-d$ sa elektrický obvod uzavrie. Krátko ním bude pretekať elektrický prúd I a na pripojenom zaťažovacom obvode vznikne napäťový impulz. Okrem prúdu I bude cez polovodič ustavične pretekať aj šumový prúd I_s . Nabitú časticu možno zaregistrovať iba vtedy, ak $I_s \ll I$. Táto podmienka je splnená pri Si detektoroch už pri izbovej teplote, pri Ge detektoroch iba pri ich chladení kvapalným dusíkom (77 K).

Na rozdiel od nabitých častíc, ktoré sú po vniknutí do citlivého objemu detektora zaregistrované vždy, gama kvantá sú detegované len s určitou pravdepodobnosťou (obr. 13.2).

Zaregistrovaný môže byť len ten fotón gama, ktorý odovzdal svoju energiu nabitej častici (elektrónu) pri niektorom z troch základných typov interakcií (fotoefekt, Comptonov efekt, tvorba elektrón–pozitrónového páru). Elektróny, ktorým bola odovzdaná časť energie detekovaného fotónu, vydávajú pri prechode materiálom detektora postupne svoju energiu na ionizáciu (t. j. na vytvorenie voľných párov e–d).



Obr. 13.2: Typická závislosť detekčnej účinnosti Ge(Li) detektorov od energie dopadajúcich gama kvánt s vyznačením používaných etalónov na jej meranie.

Pre polovodičové detektory je charakteristické:

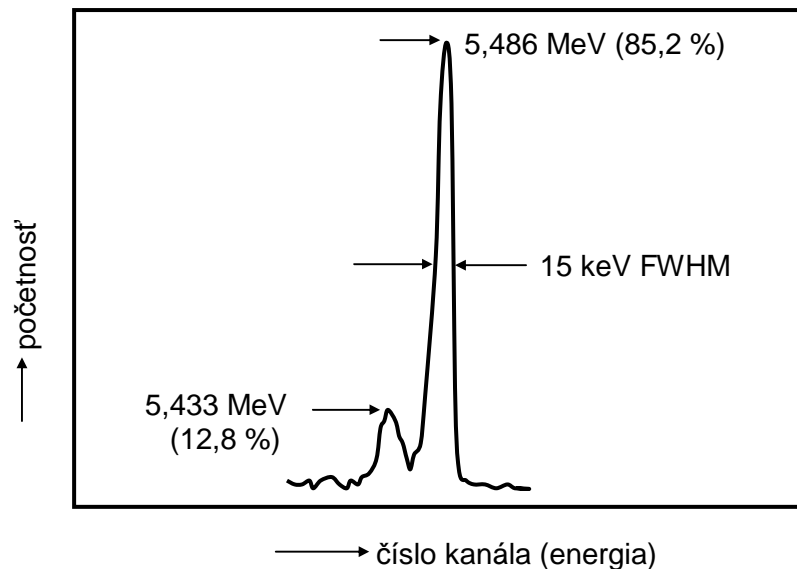
- Energia ϵ tvorby párov e–d nezávisí od druhu a energie nabitej častice.
- Energia ϵ je asi trikrát väčšia ako šírka zakázaného pásma ΔW .
- Hodnota ϵ je v polovodičovom kryštáli zhruba o jeden rád menšia ako v plynoch.
- Pohyblivosť elektrónov a dier (tab. 13.1) sa pri ochladzovaní zvyšuje.
- Doba zberu nosičov náboja je desiatky ns.
- Amplitúda impulzu je rádovo mV na 1 MeV energie registrovanej častice.
- Energetická rozlišovacia schopnosť ($\Delta E/E$) môže dosahovať desatiny %, pričom táto hodnota je podmienená štatistickou presnosťou merania, rôznymi typmi elektrických

šumov v detektore a vo vstupných obvodoch predzosilňovača, fluktuáciami náboja pri neúplnom zber atď. Napr. pre častice alfa s energiou 5,486 MeV z ^{241}Am bude veľmi dobré rozlíšenie ΔE (resp. FWHM – Full Width at Half Maximum) okolo 15 keV t. j. $R_E = 0,27\%$ (obr. 13.3).

Základné parametre vybraných polovodičov

Tab. 13.1

Parameter pri 300 K	Si	Ge	CdTe	GaAs	InP
Atómové číslo	14	32	48/52	31/33	49/15
Merná hmotnosť [g.cm ⁻³]	2,33	5,32	6,06	5,32	4,8
Šírka zakázaného pásma ΔW [eV]	1,12	0,67	1,44	1,42	1,35
Energia ionizácie (tvorby párov e–d) [eV]	3,62	2,98	4,43	4,3	4,2
Pohyblivosť elektrónov [cm ² V ⁻¹ s ⁻¹]	1400	3900	1100	8500	5400
Pohyblivosť dier	480	1900	100	400	100
Vlastný merný odpor [cm ² V ⁻¹ s ⁻¹]	$3 \cdot 10^5$	50	$1 \cdot 10^9$	$3,3 \cdot 10^8$	$8,7 \cdot 10^7$



Obr. 13.3: Alfa spektrum žiariča ^{241}Am získané polovodičovým detektorom s veľmi dobrou energetickou rozlišovacou schopnosťou.

- Šírka OPN je ohraničená merným odporom a prierným napätím priedochodu P–N.
- Šírka OPN a kapacita priedochodu C, a teda aj amplitúda impulzu $Q_{imp} = \frac{Q}{C}$ z detektora závisia od pripojeného napätia. Pre zosilnenie signálu treba použiť nábojovocitlivý predzosilňovač, pretože náboj utvorený v detektore má konštantnú hodnotu a závisí

len od energie detegovanej častice. V nábojovocitlivom predzosilňovači amplitúda signálu na výstupe bude úmerná náboju (nie amplitúde), ktorý bol privedený na jeho vstup, a je len málo závislá od kapacity pripojenej k jeho vstupu, t. j. od vlastnej kapacity detektora.

- Pre amplitúdovú analýzu treba signál z predzosilňovača (rádovo mV) ďalej zosilniť 10^3 – 10^4 – krát v hlavnom zosilňovači.

Na registráciu žiarenia gama, X a vysokoenergetických častíc sa používajú driftové detektory Si(Li) a Ge(Li) (tzv. P–I–N detektory, kde I znamená intrinzickú vodivosť kryštálu), v ktorých sú prímеси kompenzované iónmi lítia. Lítiové ióny (donory) pomerne ľahko driftujú do Si a Ge a kompenzujú akceptory v materiáloch typu P. Hrúbka OPN v takomto detektore závisí od podmienok driftu (teplota, napätie atď.). V súčasnosti sa zhotovujú napr. kryštály Ge(Li) s objemom citlivej vrstvy desiatiny až stovky cm^3 . Tieto detektory musia pracovať (a taktiež byť skladované) pri teplote kvapalného dusíka.

Detektory z veľmi čistého germánia (HPGe – High Purity Germanium) majú koncentráciu prímеси len okolo $10^{10} \text{ at.cm}^{-3}$. Pri závernom zapojení vzniká OPN v celom objeme medzi elektródami (kontaktmi typu N a P). Kontakt typu N je tvorený difundovaným lítiom (hrúbka 0,5 mm). Tenké vstupné okienko (P kontakt) sa zväčša pripravuje iónovou implantáciou bóru a umožňuje s veľkou účinnosťou meranie energií od 3 keV do 1 MeV pri planárnom prevedení, pri koaxiálnych detektoroch do 10 MeV. Výhodou týchto detektorov je možnosť tepelného cyklovania, t. j. skladovanie nevyžaduje chladenie s kvapalným dusíkom.

2. Zadanie

- Oboznámiť sa so spektrometrickou trasou detektorov
- Zmerať energetické spektrum gama kvánt etalónov ^{57}Co a ^{60}Co vybraným Ge(Li) resp. HPGe detektorom.
- Určiť účinnosť registrácie a energetickú rozlišovaciu schopnosť detektora pre energie kvánt 122, 1173 a 1332 keV.
- Zväčšovaním vzdialenosti žiarič–detektor a súčasným meraním odozvy bariérového detektora stanoviť stredný dolet alfa častíc ^{241}Am vo vzduchu a pomocou Geigerovho vzťahu ($R_0 = 0,318E^{1,5}$, kde R_0 sa dosadí v cm a E v MeV) určiť ich energiu E . Stanoviť aj relatívnu neistotu určenia energie alfa častíc.
- Krátko zhodnotiť meranie a získané výsledky
- Použitím mikroskopu overiť dolet alfa častíc v ťažších materiáloch (fotoemulziách).