

FÉLVEZETŐ ESZKÖZÖK, MINT SUGÁRZÁSÉRZÉKELŐ DETEKTOROK

Absztrakt

Mindennapi életünkben igen gyakori feladat a radioaktív sugárzások mérése, pl. laboratóriumokban, üzemekben, kórházakban, környezetvédelmi munkákban, stb. Ezek mérése a részecskék számának meghatározását, időbeli vagy anyagon való áthaladás miatti változásuknak észlelését, energiájuk mérését, stb. jelenti. Az ilyen feladatok elvégzésére különböző típusú részecskeszámlálókat fejlesztettek ki.

Az 1960-as évek elejétől kezdve terjedtek el a félvezető detektorok, amelyek a Si vagy Ge diódákhoz hasonlóan készülnek és működnek. Ezeket ma már a nukleáris mérés technika szinte minden ágában használjuk. Nagy előnyük, hogy csaknem nagyságrenddel jobb az energiafelbontásuk minden más számlálóval szemben.

Jelen cikkben a félvezető detektorok legalapvetőbb fizikai tulajdonságait és egy, manapság egyre nagyobb teret hódító eszközt, a PIN diódát szeretném bemutatni.

Measurement of radiation is a very frequent task in everyday life, for example in laboratory, hospitals, or during environment protection etc. The measurement means the determination of the particles' number, the detection of their energy distribution changing in time or via interaction with materials. Many kinds of particle counters have been developed to accomplish these tasks.

Semiconductor detectors appeared at the beginning of the 60's. The development and mechanism of them are similar to that of the Si or Ge diodes. These days they are already widely used in all areas of nuclear measurement. Their main advantage – compared to any other counter - is the significantly higher energy resolution.

The purpose of this article is to demonstrate the main features of semiconductor detectors, and a device that is getting more and more popular, the PIN diode.

Kulcsszavak: *félvezető, donor, akceptor, rekombináció, PIN dióda*

FÉLVEZETŐK ÁLTALÁNOS JELLEMZÉSE

A félvezető detektorok olyan ionizációs detektorok, melyekben az ionizáció szilárd, félvezető anyagban jön létre. A szilárd félvezető anyagok alkalmazása a gázközeg helyett több előnnyel jár. Ezek között legjelentősebb a szilárd anyagok gázokhoz viszonyított nagy sűrűsége, továbbá az, hogy a félvezető anyagokban (szilícium, germánium) egy töltéshordozó pár keltéséhez 8-10-szer kisebb energia kell, mint gázokban, és mintegy százszor kevesebb, mint egy fotoelektron keltéséhez a szcintillációs detektorokban [1]. Ez azt eredményezi, hogy azonos energia átadás mellett a félvezetőkben sokkal több töltéshordozó keletkezik, mint a szcintillációs és gázionizációs detektorokban, ennek révén a töltéshordozók számának viszonylagos ingadozása kisebb lesz, s ez a detektorok jobb energiafelbontását teszi lehetővé.

¹ ZMNE BJKMK KMDI doktorandusz hallgató, gabor.nagy@mail.somos.hu

² ZMNE BJKMK egyetemi docens, vincze.arpad@zmne.hu

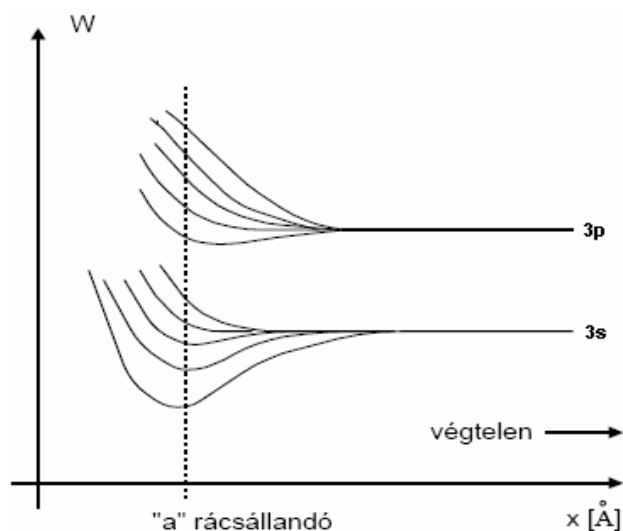
A félvezető detektorok jó energiafelbontási lehetőségeinek kihasználását azonban több tényező akadályozza. Ezek közé tartozik például, hogy a félvezető anyagoknak nagy a gázokhoz viszonyított fajlagos vezetőképessége, s ez a detektorok nagy alapáramához, ill. zajához vezet. A másik probléma az, hogy a félvezető anyagok kristályrácsa nem tökéletes, a rácshibáknál fellépő rekombináció jelentős töltéshordozó-veszteséget eredményez.

A félvezető detektorok működésének megértéséhez és a detektorok alkalmazásakor is szükséges, hogy ismerjük a félvezető anyagok jellemző tulajdonságait.

SÁVSZERKEZET

A kvantummechanika törvényei szerint azok az elektronok, amelyek szabad atomok erőterében mozognak, csak bizonyos meghatározott energiaértékűek lehetnek. Az atomok kristályá szerveződése során az egyes atommagok által meghatározott energiaszintek sok, egymástól csak kevéssel különböző energiája mintegy összeolvad, energiasávokká szélesednek ki.

A hatás az alacsonyabb főkvantumszámú belső elektronokon kisebb, a magasabb főkvantumszámú külső elektronokon erőteljesebb.



1. ábra

Megengedett energianívók és energiasávok az atomok közötti távolság függvényében

Szigetelő anyagokban az atomokhoz kötött elektronok teljesen betöltött sávja és az atomokhoz nem kötött, szabad elektronok sávja között energetikailag meg nem engedett ún. *tiltott sáv* van. Ha valamely anyagban az elektron energiája egy adott küszöbértéket meghalad, az atomok nem tudják az elektront „fogva” tartani. A nem kötött elektronok szabadon mozoghatnak a kristályban, s így a kristály vezetővé válik.

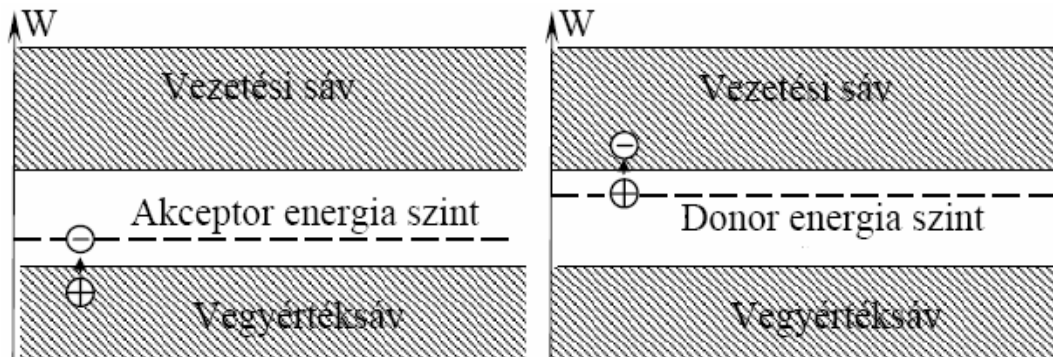
A félvezetőkben és a szigetelőkben a kötött elektronok legfelső energiasávját *valencia-* (vegyérték-) *sávnak*, a szabad elektronok legalsó energiasávját pedig *vezetési sávnak* szokás nevezni. Gerjesztés nélküli állapotban a valencia sáv teljesen betöltött, míg a vezetési sáv teljesen üres. Hő, fény, radioaktív sugárzás vagy egyéb energiaközlő hatásra a valencia sáv egyes elektronjai átkerülhetnek a vezetési sávba, és így részt vehetnek a vezetésben.

A két legjelentősebb félvezető anyagnak, a szilíciumnak és a germániumnak a kristályszerkezete gyémánt típusú, melyre jellemző a tetraéder kapcsolat (minden atomnak négy, a tetraéder egy-egy csúcsában elhelyezkedő vegyértékkapcsolattal kötött szomszédja van). A félvezető anyag kristályszerkezetébe azonban négyenél több vagy kevesebb valencia elektronú anyagok, ún. szennyeződések is beépülhetnek.

A félvezetők szerkezetébe beépülhetnek öt valencia elektronú anyagok, az ún. *donorok*, valamint három valencia elektronúak, az ún. *akceptorok*. Az előbbi csoportba tartozik többek között a foszfor, az arzén és az antimon, az utóbbiba az alumínium, bór, a gallium és az indium.

Ha egy félvezető anyagba donorszennyezést juttattuk, a donor atom öt valencia elektronja közül négy elektronpár kötést alkot a szomszédos atomok elektronjaival, az ötödik viszont nem tud elektronpár kötésbe lépni. Így a többletelektron eltávolításához igen kis energiára van szükség, energia szintjük közel fekszik a vezetési sávhoz, már szobahőmérsékleten az összes többletelektron a vezetési sávba megy át. A donorszennyezéseket tartalmazó kristályokat a többletelektronok negatív töltése alapján *n-típusúnak* nevezzük.

Íly módon magyarázható a *p-típusú* szennyezés, ahol akceptor szennyezést viszünk be a kristályba. Ilyenkor a négy szomszédos atom közül egyiknek egy valencia elektronja nem tud elektronpár kötést alkotni, így elektronhiány lép fel. Azt a helyet, melyet tiszta félvezető esetén elektron töltene ki, *lyuknak* nevezzük. A hiányzó elektront az akceptor mag könnyen fel tudja venni a szomszédos atomok valencia elektronjai közül, mivel sokkal kisebb energia szükséges, mint a valencia sávból a vezetési sávba való átmenethez, energia szintje közel fekszik a valencia sávhoz.



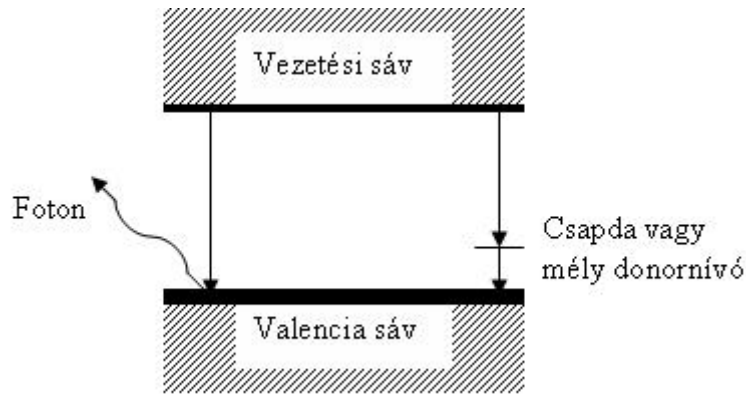
2. ábra

*Szennyező atomok által létesített nivók félvezető anyagban
(donornívó és akceptornívó)*

REKOMBINÁCIÓ

A félvezetők tárgyalásánál nagyon fontos jelenség a rekombináció folyamata. Itt csak a nem egyensúlyi állapotokkal foglalkozom. A nem egyensúlyi töltéshordozó koncentráció valamely külső tényező, pl. fény, magsugárzás, elektromos áram stb. hatására keletkezhet.

Ha az egyensúlyi állapoton felüli számban keletkezett töltéshordozók rekombinálnának, azaz a vezetési sávban levő elektronok a valenciasávban levő lyukakba befogódnak, az energiakülönbség foton alakjában sugárzódik ki.



3. ábra

Bal oldal: közvetlen sáv-sáv rekombináció.

Jobb oldal: rekombináció csapdán, vagy mély donornívón keresztül

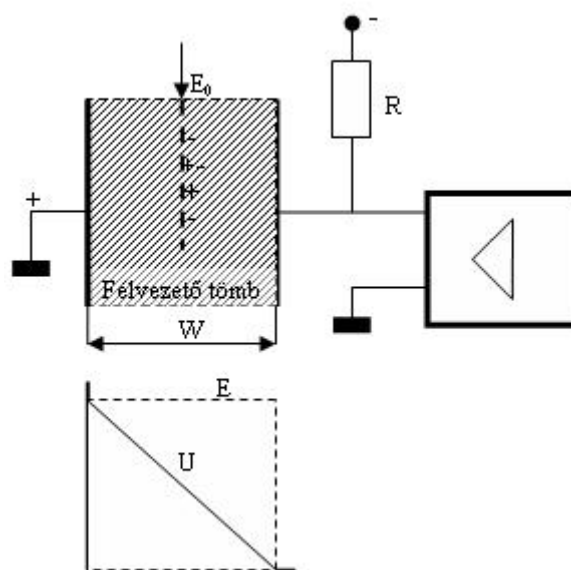
E mechanizmuson kívül fennáll annak a lehetősége is, hogy az elektronok és a lyukak rekombinációja egy közbelső állapot, az ún. rekombinációs centrum segítségével következik be. A leglényegesebb különbség a két mechanizmus között az, hogy az elsónél (sáv-sáv rekombináció) mind az elektronok, mind a lyukak mozognak. Számítások szerint ennek a valószínűsége nagyságrendekkel kisebb [1].

A második mechanizmusnak két változata lehetséges:

1. Az elektront a vezetési zóna aljához képest mélyen fekvő csapda fogja be. Amíg az elektron a csapdában van, addig a helyhez kötött elektronthoz könnyen eljuthat egy lyuk.

2. A félvezető anyagokban lehetnek olyan donornívók melyek közel fekszenek a valenciasáv felső széléhez. Ezek ionizációs energiája nagy, így a szobahőmérsékleten nagy valószínűséggel megtartják elektronjaikat, melyek helyhez kötöttek és könnyen befoghatják a lyukakat. A befogás következtében ezek a centrumok elektront veszítenek, de rövid idő múlva pótolják is a vezetési sávból.

TÖLTÉSHORDOZÓK GERJESZTÉSE MAGSUGÁRZÁSSAL



4. ábra

Félvezető detektor működési elve

Tételezzük fel, hogy valamely ionizáló magsugárzás olyan félvezető tömbbel (homogén detektorral) lép kölcsönhatásba, melyben a két szemben levő oldalon, egymástól W távolságban elhelyezett elektróda segítségével a kristály teljes térfogatában E elektromos térerősséget hozunk létre.

A kristályba belépő ionizáló részecske nagyon gyorsan, mintegy 10^{-12} - 10^{-11} s alatt lefékeződik. Fékeződéskor a részecske a kristályban lévő elektronoknak adja át energiáját, melyek így a valenciasávból a vezetési sávba kerülnek. Egyes elektronok melyek a primer kölcsönhatás folyamán elég nagy energiát kaptak, képesek további elektronokat a valenciasávból a vezetési sávba juttatni. A meglökött elektronok az ütközések folyamán lelassulnak egészen addig az értékig, amely már nem elegendő tovább ionizációra.

Az ionizációhoz szükséges energia lényegesen nagyobb, mint az adott anyag tiltott sávjának szélessége, mert az elektronok energiájuk nagy részét a kristálynak hőformájában adják át.

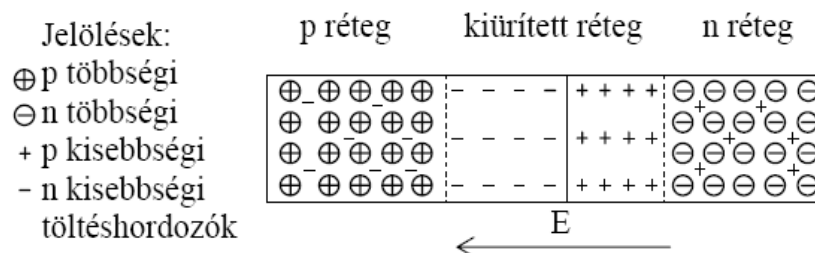
A nehéz töltött részek pályája a félvezető anyagban közelítőleg egyenes vonalú, ennek következtében az ilyen részecske által keltett ionizált nyom egy kis átmérőjű hengernek foghatjuk fel. Az ionizált nyom felbomlása után a félvezető anyagban keletkezett töltéshordozók az erőtér hatására az elektródák felé vándorolnak, és a külső körben áramot hoznak létre. Az áram integrálja, vagyis a begyűjtött töltés arányos a primer részecske által az anyagnak átadott energiával. A teljes áram az egyes töltéshordozók által létrehozott áramok összege.

Az 4. ábrán bemutatott külső áramkörben folyó áramimpulzus emelkedési idejét a félvezetőben mozgó töltéshordozó vándorlási ideje, lecsengését pedig a külső áramkör RC állandója szabja meg. Ha az emelkedési impulzus emelkedési idejét csökkenteni akarjuk, növelni kell a térerősséget. A töltéshordozók sebessége azonban nem változik arányosan a térerősséggel, mert nagy térerősségnél a mozgékonyaság csökken.

Az impulzus emelkedési idejét jelentősen megnövelhetik az anyagban található csapdák, melyek a töltéshordozókat egy időre befogják, anélkül, hogy azok rekombinálnának. A befogás valószínűsége adott anyagnál és térerősségnél az elektródák közötti távolsággal arányosan nő, így nagy elektródatávolságok esetében különösen fontos olyan anyagok kiválasztása, melyekben a csapdák száma csekély.

ZÁRÓRÉTEGES DETEKTOROK

Vizsgáljuk meg, hogy mi történik, ha egy n-típusú (donorfeleslegű) és egy p-típusú (akceptorfeleslegű) félvezető anyagot hozunk egymással érintkezésbe.



5. ábra

Szabad töltéshordozók kristály-menti eloszlása

A többségi töltéshordozók gerjesztetlen állapotban a rácsszerkezethez kötve található, szabad töltéshordozók döntően a kiürített rétegben alakulnak ki.

A két rétegben, mivel a többségi töltéshordozók töltése ellentétes és a rétegekben koncentráció különbség van, megindul egy kiegyenlítő áram (diffúziós áram). A többségi töltéshordozók a határfelületen (réteg, junction) az ellentétes töltésük miatt közömbösítik egymást. A kisebbségi töltéshordozók azonban állandóan keletkeznek és rekombinálnak, mivel ezeket a termikus gerjesztés hozta létre. Így a határfelületen csak kisebbségi töltéshordozók maradnak, azok is rekombináció miatt olyan megoszlásban, hogy a p rétegben az n kisebbségi, n rétegben a p kisebbségi töltéshordozók koncentrációja sokkal jelentősebb. Ez a töltésmegoszlás, mint egy sík kondenzátor viselkedik. A két oldal között térerő alakul ki, amely a többségi töltéshordozók mozgása ellen hat. Minél szélesebb a kiürített réteg annál nagyobb a belső térerő. Az így kialakult térerő azonban a kisebbségi töltésekre gyorsítón hat és kialakul egy kisebbségi töltéshordozó áram is (drift áram). Termikus egyensúlyban a két áram (a diffúziós- és a drift áram) egyenlő. A pn réteg a külvilág felé elektromosan semleges, a fenti folyamatok a réteg belsejében zajlanak le.

Ha pn-átmenetre külső feszültséget kapcsolunk úgy, hogy annak negatív pólusa a p-típusú oldallal essen egybe (záróirány), akkor a külső feszültség mindkét fajta töltéshordozót igyekszik eltávolítani az átmenettől, s ennek következtében a kiürítési tartomány kiszélesedik. A kiürítési tartományban nincsenek szabad töltéshordozók, így ez a réteg szigetelőként viselkedik. A különbség a valósi szigetelőanyagokhoz képest, az, hogy a félvezető detektor kiürítési tartományában létrehozott töltéshordozók könnyen begyűjthetők. A kiürítési tartomány tehát alkalmas részecskék detektálására.

A pn-átmeneten záróirányban átfolyó áram a p-típusú oldalon azokból a lyukakból keletkezik, melyek át tudnak diffundálni a pn-átmeneten. Ehhez járulnak a kiürített tartományban a termikus generáció hatására keletkező töltéshordozók, ezeket az elektromos tér a keletkezésük pillanatában kirántja a zárórétegből.

DETEKTOROK FŐBB TULAJDONSÁGAI

Kvantum hatásfok (QE)

A kvantum hatásfok megadja, hogy egységnyi beeső sugár hány elektront vagy lyukat képes gerjeszteni.

$$QE = \frac{\text{emittált elektronok száma}}{\text{beérkező fotonok száma}} [\%]$$

Detektor küszöbszintje, detektálhatóság (NEP)

A NEP(noise equivalent power) szó jelentése „zajjal azonos teljesítmény”. A NEP általános értelemben azt a beeső sugárzási energiát jelenti, amely a detektor kimenetén egységnyi jel/zaj viszont eredményez.

Az érzékeny réteg vastagsága

Ez a réteg szabja meg, hogy milyen energiaértékig lineáris az összefüggés a különböző típusú részecskék energiája és a detektor jel nagysága között. Egyes detektorok térfogatának minden mérete, így a vastagsága is, kizárólag konstrukciós adataiból, míg más esetekben az érzékeny réteg vastagsága a detektorra kapcsolt feszültségtől függ. Az első csoportba tartoznak a homogén, a másodikba a záróréteges, pn-átmenetű detektorok.

Kapacitás

A detektorokat tekinthetjük, mint egy síkpárhuzamos kondenzátor. A kondenzátor elektródái közötti távolságnak a záróréteg vastagsága felel meg. A detektor kapacitásának kiszámítására itt nem térek ki. Viszont megjegyezném, hogy meghatározása nemcsak a záróréteg vastagságának megállapítása szempontjából jelenetős, hanem fontos a detektorral elérhető legjobb energiafelbontó képesség számítása céljából is.

Visszárám

A detektorokon polarizációs feszültség hatására magsugárzás nélkül is átfolyó áram befolyásolja a detektorok energiafelbontó képességét. E hatás abban nyilvánul meg, hogy a detektoron átfolyó áram fluktuációjából eredő zajfeszültség pillanatnyi értékének megfelelően hozzáadódik a töltött részecske által létrehozott feszültségimpulzus-amplitúdó értékhez.

Felbontóképesség

A felbontóképesség határozza meg, hogy a detektor az egymáshoz közeli energiájú részecskéket energiájuk szerint mennyire képes megkülönböztetni.

γ -SUGÁRZÁS MÉRÉSE

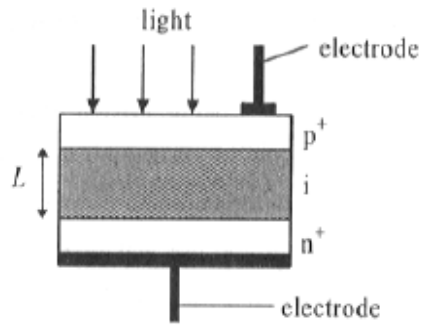
Félvezető detektorral a γ -sugárzásnak mind intenzitását, mind eloszlását meg tudjuk mérni. Intenzitás mérésekor a félvezető detektorok alkalmazása nem jelent számottevő előnyt a korábban használt eszközökkel (ionizációs kamrával, GM-számlálóval, szcintillációs detektorok) szemben. Ezzel szemben a félvezető detektorok gyökeresen megváltoztatták a korábbi spektrometriai lehetőségeket. A félvezető detektorok lehetővé tették a teljes spektrum egyidejű felvételét jó felbontóképesség és viszonylag nagy határfok mellett. A határfok növelhető vastagabb érzékeny rétegű detektor alkalmazásával.

A γ -sugárzás spektrumának mérésére mind a szilíciumból, mind a germániumból készült detektorok felhasználhatók. Ha a mérendő sugárzás energiája kicsi (100-150 keV-nál kevesebb) jó eredményt biztosítanak a szilíciumból készült spektrométerek. A germánium detektor előny, hogy anyagának nagyobb rendszáma sokkal nagyobb fotoelektromos kölcsönhatást eredményez, mint a szilícium. Azonban a germánium detektorok alkalmazása számos problémát hoz magával. Ezek közé tartozik, hogy előállításuk költséges, a detektort csak folyékony nitrogén hőmérsékleten lehet használni és hosszabb ideig tárolni. A germánium detektorok zaja, olyan kicsi lehet, hogy a felbontóképességet a csatlakozó elektronikus berendezések zaja szabja meg.

PIN DIÓDA

A PIN dióda a félvezető diódák egy speciális típusa. Viselkedésének jellegzetességeit szerkezete adja meg, -a nevében is erre utalóan- olyan a felépítése, hogy a P és az N réteget egy hosszú és viszonylag nagy ellenállású szakasz választja el egymástól.

Ennél a diódastruktúráknál a p és n típusú tartomány között egy sajátvezetésű („intrinsic”) tartomány helyezkedik el.



6. ábra
PIN dióda sematikus ábra

A PIN dióda planárdiffúziós eljárással készül. A planártechnológia a SiO_2 sajátos tulajdonságain alapul: a szilíciumszeletre termikusan növesztett oxidréteg rendkívül ellenálló és ugyanakkor szelektíven maratható. Ennek következtében a diffúzió során az adalékanyag csak az oxidon nyitott ablakon át hatol be a kristályba, és így az átmenetterület nagy pontossággal és jó reprodukálhatósággal alakítható ki.

A PIN dióda működése közben, adott zárófeszültségnél a kiürített réteg a fajlagos ellenállás növelésével nő, tehát a gyengén adalékolt, intrinsic tartomány a működtetés során teljes egészében kiürített lesz. A dióda felépítése olyan, hogy az intrinsic tartományhoz csatlakozó n és p típusú kristályrétegek rendkívül keskenyek, tehát a töltéshordozó párok keltése döntő többségben a kiürített réteg tartományban történik. A kiürített rétegben a rekombináció valószínűsége kicsi, tehát a keltett töltéshordozók csaknem száz százalékban hozzájárulnak a fotóáramhoz. A működési sebességet a töltéshordozók kiürített rétegben való áthaladási ideje, az úgynevezett futási idő fogja megszabni. A futási idő nagyban térerősség függő [2].

A PIN dióda felépítéséből köszönhetően: az alábbi képességekkel rendelkezik:

- Nagy zárófeszültség elviselésére is alkalmas lehet. Nagyfeszültség egyenirányításra alkalmas típusok is készíthetők. (~10 kV, pl. képcsövek gyorsítófeszültsége)
- Igen kis záróréteg kapacitás érhető el. Amennyiben ez párosul kis nyitóirányú differenciális ellenállással, igen jól használható rádiófrekvenciás kapcsolóként is, akár a mikrohullámú frekvenciákon is. (Mikrohullámú kapcsoló)
- Nagyfrekvenciás feszültségosztó áramkörökben áramvezérelt ellenállásként is használható, mivel párhuzamos kapacitásai kicsik, ezért áramfüggő differenciális ellenállása nem sőtől dik. (PIN diódás csillapítótag)
- Alkalmas geometriával kialakított PIN-dióda típusok optoelektronikai alkalmazása is elterjedt, fotodiódaként, vagy fényelemként.

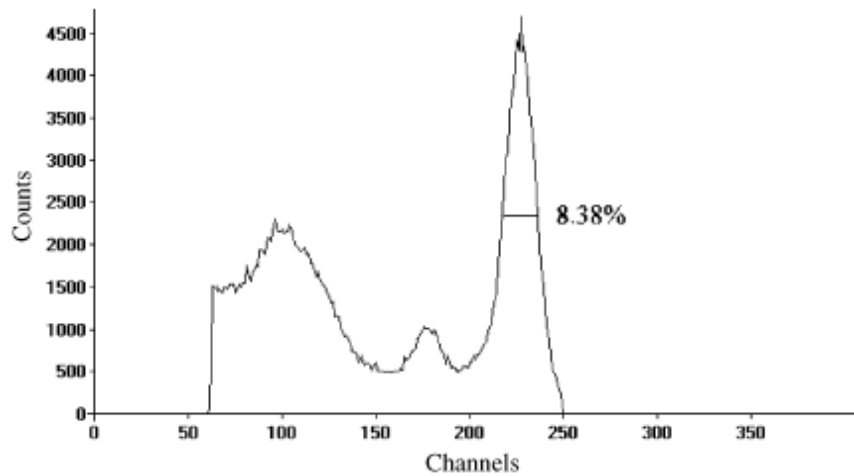
PIN DIÓDA, MINT SUGÁRZÁSMÉRŐ ESZKÖZ

A PIN dióda önmagában nem alkalmas magsugárzás mérésére, mivel az érzékenységi tartománya nemesik egybe az ionizáló sugárzásokéval. Mivel azonban fotóoptikai alkalmazásokra kitűnően alkalmazható, így csak azt kell megoldanunk, hogy a két frekvencia tartományt valahogy „összehangoljuk”. Erre, pedig a nukleáris technikában jól ismert szcintillátorra van szükség.

A szcintillátor nem más, mint olyan fényérzékeny anyag melyből a fotonok elektronokat váltanak ki. Ezen elektronok hullámhosszúsága megegyezhet a látható fény tartományával,

ami 380 és 780 nm között van. Ezzel az eszközzel tehát elérhetjük, hogy az ionizáló sugárzás a PIN dióda számára is „láthatóvá” váljon. Leggyakrabban alkalmazott szcintillátor anyagok:

NaI(Tl), CaI(Na), CsI(Tl), BGO, GSO(Ce), CdWo₄, stb [3].



7. ábra

¹³¹I spektrum, 5×5×5 mm² kristály [6]

ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben összefoglaltam a félvezető eszközök működésének fizikai alapjait, és bemutattam, hogyan viselkednek sugárzás hatására.

A félvezetők közül részletesebben foglalkoztam a PIN diódával, a mely úgy vélem háttérbe szorult más félvezető eszközökkel szemben a nukleáris mérés technikában. Azonban az anyagtudomány és a mikroelektronika fejlődésének köszönhetően ez az eszköz alkalmas lehet egy in-situ detektor rendszer megvalósításához. A detektor rendszer képességei elmaradnak egy laboratóriumi rendszer tulajdonságaihoz képest, ám terepi körülmények között, a mérete, fogyasztása és egyéb előnyös tulajdonságai alapján, megfelelő szcintillátor kristállyal, kiválthatók lennének a nehézkes félvezető detektorok.

A szcintillátor és PIN dióda összekapcsolva egy intelligens feldolgozó és kiértékelő elektronikai egységgel (DSP) egy komplett detektor rendszert kapnánk, amely nukleáris balesetknél hatékony felderítő eszköz lehetne, mind gyalogos mind járműves felderítésnél.

Felhasznált irodalom

- [1] Deme Sándor: Félvezető detektorok magsugárzás mérésére, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1968
- [2] Szentiday Klára: Félvezető fotodetektorok, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977
- [3] <http://www.eurorad.com/commun/00PDF/Detec&Pro.pdf>
- [4] Dr. Mojzes Imre: Mikroelektronika és elektronikai technológia, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1994
- [5] Nagy Lajos György - Nagyné László Krisztina: Radiokémia és izotóptechnika, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1997
- [6] J. Chavanelle, M. Parmentier (2003): A CsI(Tl)-PIN photodiode gamma-ray probe. Nuclear Instruments & Methods In Physics Research Section A 504:321-324