

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ГАМА-ФОНА С ПОМОЩТА НА ПОЛУПРОВОДНИКОВ ДЕТЕКТОР

ЕСТЕСТВЕН РАДИАЦИОНЕН ФОН

Естествен радиационен фон е радиационно поле, дължащо се на естествени източници. Естествен източник е източник на йонизиращо лъчение, съществуващ в естествени условия - космичното лъчение и естествено разпределените радионуклиди в околната среда, в храните и в организма на човека.

Според съвременната наука възрастта на Вселената се оценява на около 15 милиарда години, а Земята като планета от Слънчевата система се предполага, че е възникнала преди около 4,5 милиарда години. Слънчевата светлина и топлина, благодарение на които съществува Земята, се получават в резултат на ядрени реакции в Слънцето. Ядрени реакции протичат и в Галактическото пространство. При тези ядрени реакции възникват мощни потоци от йонизиращи частици с много голяма енергия, които формират първично космично лъчение. То се състои от две компоненти, които се различават съществено както по произхода си, така и по състав, интензивност и енергия:

- галактическо космично лъчение;
- слънчево космично лъчение.

Интензивността на галактическото космично лъчение, което достига до Земята, е постоянна, като въздействието е изотропно. Състои се от протони - 90%, алфа-частици - 10% и около 1% фотони, неутрони, електрони и атомни ядра на леки елементи (Li, Be, C, O, N), които възникват в дълбините на Вселената в резултат на изхвърляне и изпаряване на материя при звездни взривове и образуване на нови звезди. Интензивността на слънчевото космично лъчение не е постоянна и се изменя в зависимост от слънчевата активност. Цикълът на изменение на слънчевата активност е 11 години. Когато първичното космично лъчение достигне земната атмосфера, високоенергийните йонизиращи частици взаимодействат с атомите и молекулите на въздуха, при което се поражда множество електрически заредени и неутрални йонизиращи частици. Те от своя страна създават “лавини” от нови йонизиращи частици в атмосферата и се поражда вторично космично лъчение, което се състои от фотони (гама-кванти), електрони, неутрони и други елементарни частици. Интензивността на вторичното космично лъчение е максимална на височина 20-25 км от земната

повърхност. С намаляване на височината неговата интензивност намалява, като на морското равнище достига своя минимум.

Атмосферата, която обгръща Земята и се върти като едно цяло с нея, се простира на височина около 1000 км. Атмосферата може да се опише на "щит", който обгръща Земята и поглъща голяма част от космичното лъчение, насочено към нея, като забавя или спира мощните потоци от високоенергийни частици, идващи от Космоса. Благодарение на този "противорадиационен щит" значително отслабва йонизиращата радиация, която въздейства върху Земята. С увеличаване на надморската височина дебелината на защитния атмосферен слой намалява и затова нивото на облъчване от космичното лъчение във високопланински местности е по-голямо отколкото на морското равнище, където защитният слой е най-дебел и по-плътен. Например на връх Еверест, най-високата точка на Земята (8848 метра), въздействието на космичното лъчение е около 20 пъти по-интензивно в сравнение с районите на морско равнище.

Земята има още един естествен щит, който смекчава въздействието на космичното лъчение върху нейните обитатели – това е земното магнитно поле. Земята може да се опише на един гигантски магнит, чието магнитно поле отклонява част от електрически заредените частици, идващи от Космоса, като ги принуждава да заобикалят покрай нашата планета. Друга част от заредените космични частици под въздействие на земното магнитно поле се отклоняват (завихрят) в района на екватора и се концентрират в областта на полюсите, в съответствие с конфигурацията и направлението на магнитните силови линии, обкръжаващи Земята. Затова интензивността на космичното лъчение в екваториалните области на Земята е минимална, а в районите на северния и южния полюс е максимална. Поради наличието на земно магнитно поле интензивността на космичното лъчение се променя в зависимост от географската ширина. Например, при около 50 градуса северна ширина (Лондон, Москва, Токио, Ню-Йорк) облъчването от космичното лъчение е с около 30% - 40% по-голямо в сравнение с облъчването в географски области, разположени от двете страни на екватора, с географска ширина до около 15 градуса.

Космичното лъчение е природна даденост и облъчването от него не може да се предотврати и да се управлява от човека по никакъв начин. Типичната стойност на средната индивидуална годишна доза, която се получава при външно облъчване от космичното лъчение за средни географски ширини на Земята, включително за България, е равна на 0,4 mSv/y (0,4 милисиверта за година).

Естествени (природни) радионуклиди се наричат тези радионуклиди, които са разпространени в екосферата и не са резултат на човешката дейност. Естествените радионуклиди се намират във всички компоненти на живата и неживата природа на Земята. Те са и основният източник на облъчване на живите организми с йонизиращи лъчения заедно с вторичното космично лъчение.

Основното количество естествени радионуклиди принадлежат към тежките елементи. (Всички елементи с $Z > 80$ имат радиоактивни изотопи, а изотопите на елементите с атомен номер над 82 са само радиоактивни).

Естествените радионуклиди могат да бъдат разделени на три групи:

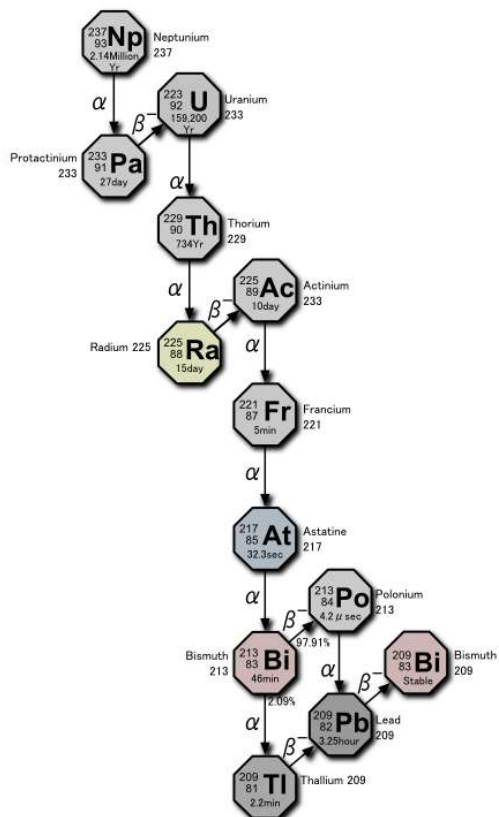
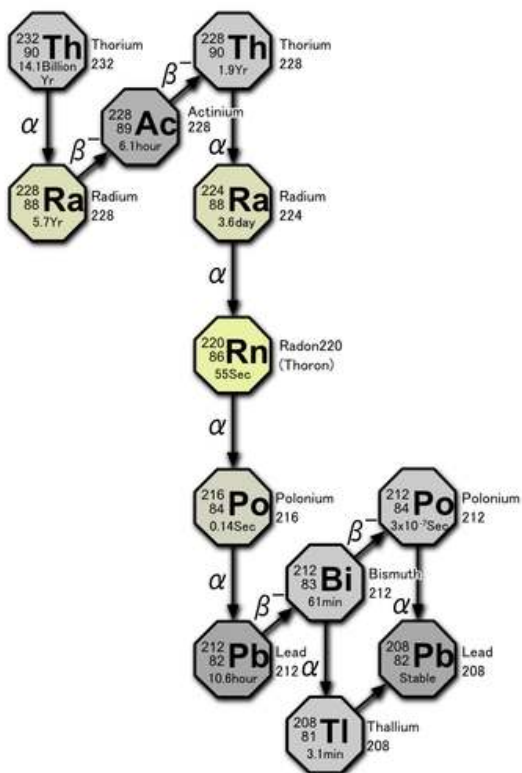
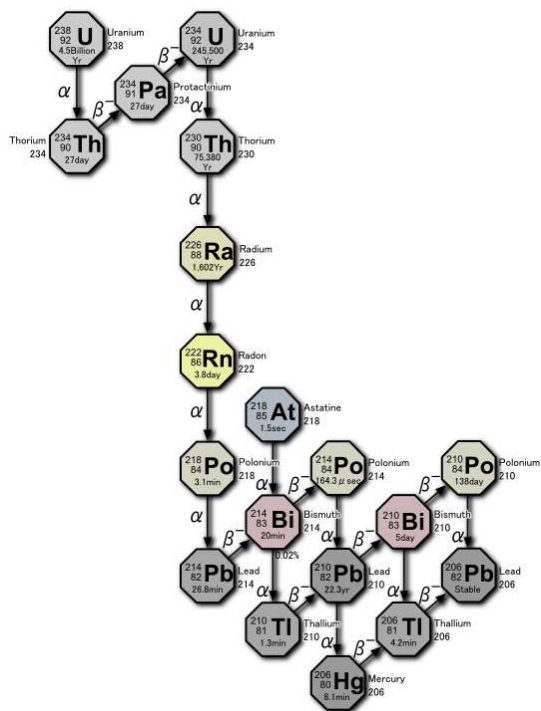
- Радиоактивни елементи, които образуват семейства;
- Изотопи на химични елементи, които не образуват семейства;
- Космогенни радионуклиди, които се образуват непрекъснато при процесите на взаимодействие на космичното лъчение със земната атмосфера и отделни компоненти на земната кора.

Радиоактивните елементи, които образуват семейства (вериги от майчини и дъщерни елементи, които са генетично свързани помежду си и се превръщат един в друг) оформят четири семейства (редове):

- Семейство на ^{238}U
- Семейство на ^{232}Th
- Семейство на ^{235}U
- Семейство на ^{237}Np

В литературата често се ползват и по-старите, използвани още в началото на миналия век, названия на семействата: съответно „уран-радиево” (за ^{238}U), „ториево” (за ^{232}Th) и „актиниево” (за ^{235}U). Тук семейството на ^{237}Np е указано за пълнота – членовете на това семейство не се срещат в природата, тъй като ^{237}Np има период на полуразпадане $T_{1/2} = 2,14 \cdot 10^6$ а и това семейство може да се получи само по изкуствен път.

Поради изключително големите периоди на полуразпадане, съизмерими с възрастта на Земята, родоначалниците и дъщерните продукти на трите естествени радиоактивни семейства, както и останалите природни радионуклиди (калий-40 и др.) продължават да съществуват в земната кора до наши дни.



Наличието на естествени радионуклиди в земната повърхност води до външно облъчване, като мощността на дозата от земното лъчение е право пропорционално на количеството (концентрацията) на естествените радионуклиди в почвата. Концентрацията на радионуклиди в почвата зависи от радиоактивността на веществата, от които е съставена почвата и от процесите на сорбция, отлагане и отмиване на радионуклиди при въздействието на природни води върху нея.

Естественият гама-фон над земната повърхност се създава главно от радионуклидите, които се съдържат в горния почвен слой с дебелина около 30 cm. Поради екраниращия ефект на почвата, гама-лъчението от естествените радионуклиди, намиращи се на по-голяма дълбочина от 30 cm, значително отслабва и не играе съществена роля при формирането на гама-фона.

35% от външното облъчване в резултат на естественото гама-лъчение от земната повърхност се дължи на калий-40, 25% - на гама-излъчващите радионуклиди от семейството на уран-238 (главно олово-214 и бисмут-214) и 40% - на гама-излъчващите радионуклиди от семейството на торий-232 (главно талий-208 и актиний-228). Изследванията в много страни по света показват, че е напълно нормално естественият гама-фон, дължащ се на земното лъчение, да се различава до 6 пъти за различните райони по света. Общоприето е естественият гама-фон да се измерва на височина 1 m от земната повърхност.

Населението, което живее в планински местности и райони, богати на гранити, минерали и почви с високи концентрации на естествени радионуклиди, е подложено на по-високо външно облъчване. Гама-фонът в такива места по принцип е по-висок. Когато се оценява облъчването на населението от естествени радионуклиди, трябва да се отчита факта, че значителна част от времето си човек пребивава в сгради, където живее и работи. По принцип стените, подовите и покривите на сградите екранират (отслабват) външния гама-фон. От друга страна обаче строителните материали (тухли, бетон, гипс), от които са изградени сградите и жилищата, съдържат естествени радионуклиди с най-различни концентрации. Това води до облъчване на хората, пребиваващи в сградите. Гама-фонът вътре в сгради, изградени от тухли, бетон и гранит, като правило е по-висок от този в дървени постройки. Резултатите от проведените по света изследвания показват, че гама-фонът вътре в помещенията на сгради е средно с 20% по-висок отколкото на открито. Това зависи от количественото съдържание на естествени радионуклиди в използваните строителни материали и от локалния гама-фон на открито.

При оценката на средната годишна ефективна доза за населението на Земята се отчита разделно облъчването от естествени радионуклиди, което се получава на открито и вътре в сгради. Приема се, че съвременният човек прекарва средно 80% от времето си в сгради (19 часа за денонощие), а 20% от времето пребивава на открито (5 часа за денонощие), което означава, че естественото външно облъчване при престоя на човек в сгради е доминиращо спрямо облъчването на открито.

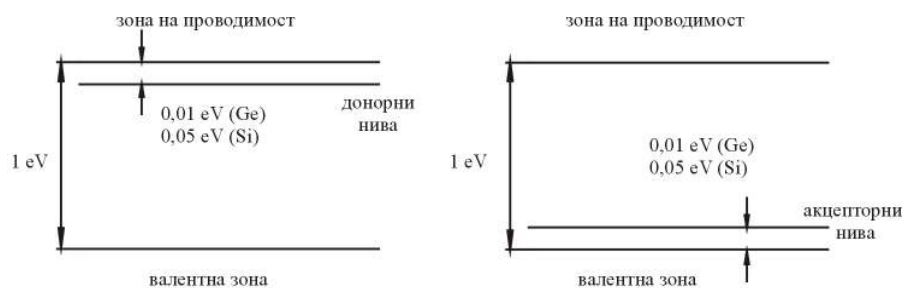
ПОЛУПРОВОДНИКОВИ ДЕТЕКТОРИ

Принцип на действие

Полупроводниковите детектори (ППД) са най-съвременните детектори със зависещ от енергията отклик и много по-добра разделителна способност от сцинтилационните детектори. Четиривалентните елементи Ge и Si образуват кристали, в които атомите образуват ковалентни връзки със съседните атоми. Всички валентни електрони участват във връзката, така че валентната зона на кристала е пълна, а зоната на проводимост – празна. Разликата между един изолатор и един полупроводник е в *ширината на забранената зона* – около 6 eV в изолатора и около 1 eV в полупроводника, което обуславя и разликата в специфичното им електрично съпротивление: $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ на изолаторите и от 10^9 до $10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ за полупроводниците. При температура $T > 0 \text{ K}$ поради топлинните трептения е възможно преминаването на електрон от валентната зона през забранената към зоната на проводимост. При този процес във валентната зона остава ваканция (или дупка), която може да мигрира вътре в кристала, тъй като веднага се заема от друг електрон от валентната зона (от друг атом), така както и електронът може да мигрира в зоната на проводимост. В идеален полупроводник двата вида носители са с равен брой и проводимостта на такъв материал се нарича *собствена проводимост*, като тя се определя от броя на носителите. С намаляване на температурата броят на носителите силно намалява и при $T = 0$ няма носители. Броят на носителите при ниска температура (достатъчно е даже охлаждане до 77 K) е с порядъци по-малък в сравнение с броя им при стайна температура и *собственият полупроводник* се превръща в изолатор. Носители в полупроводника могат да се създадат, ако през обема му премине йонизираща частица. Реалният полупроводник обаче и при най-съвременните технологии на пречистване не може да се направи без абсолютно никакви примеси и неговите електрични свойства ще се

определят от примесите. При германия поради по-ниската му температура на топене в сравнение с тази на силиция очистването може да се направи значително по-пълно.

Внасянето на подходящи *примесни атоми* в полупроводника създава донорни или акцепторни нива, с които се увеличава проводимостта на кристала. Ако примесните атоми са от пета валентност, при заместването на атом в кристалната решетка на Ge или Si петият електрон остава свободен, движейки се вътре в решетката. От гледна точка на зонната структура това ще създаде *донорни нива* близо до зоната на проводимост. В такъв кристал има излишък от електрони, затова той се нарича полупроводник от *n*-тип (от negative, тъй като носителите са отрицателни). Аналогично, ако примесните атоми са от трета валентност, изместването на атом от Ge или Si в кристала ще създаде *акцепторни нива* близо до валентната зона, на които могат да се залавят електрони, оставяйки дупки в самата валентна зона. В материал с акцепторни примеси основният тип носители са дупките, затова такъв тип полупроводник се нарича от *p*-тип (от positive, тъй като дупките имат поведение на положителни носители). На фиг. 1 е показана зонната структура на *n*- и *p*-тип полупроводници.



Фиг. 1. Донорни и акципторни нива в полупроводник

Ако в материал от *p*-тип се въведат донорни примеси, напр. Li (примес с противоположен знак), така че броят на свободните дупки да се изравни с броя на свободните електрони, броят на носителите в такъв *компенсиран материал* намалява силно и той става материал със собствена проводимост, наречен *i-материал*. В него концентрациите на донорите и на акцепторите са равни. По такъв изкуствен начин той се превръща в собствен полупроводник с много високо специфично съпротивление. За *p*-Ge това се постига чрез контролиран дрейф на Li в кристалната решетка, което се

извършва чрез термодифузия в електрично поле. Но подвижността на Li примеси в германия при стайна температура е голяма и затова дрейфовите детектори винаги трябва да бъдат при ниска температура, даже когато се съхраняват, без да работят. За детекторите от свръхчист германий това изискване не е задължително. Те могат да се съхраняват при стайна температура, но трябва задължително да са при температура на течния азот по време на работа, за да не протече голям обратен ток при включване на високото напрежение, а също и да се намалят шумовете им. Високото напрежение се включва не по-рано от 24 часа след началото на охлаждане на детектора. Кристалите от HpGe (Hp означава hurenpure, свръхчист) може и да не са от изключително чист материал, а компенсирани по време на технологичния процес с примеси, които не дифундират при стайна температура.

p-n-преход

Когато материал от *n*-тип се постави в електричен контакт до материал от *p*-тип, свободните електрони дифундират през контактния слой и навлизат в материала със свободни ваканции, при което в околността на контакта става рекомбинация. Така в тази област се образува тънък слой без свободни носители на заряд, т. нар. *обеднен* (depleted) *слой*. В материала от *n*-тип остават йонизираните положителни йони в кристалната решетка (на примеса) и аналогично, в материала от *p*-тип остават отрицателните тежки йони в местата на акцептора. Формира се пространствен заряд, който възпрепятства по-нататъшната миграция, като височината на създадената потенциална бариера U_0 е около 0,6 V за Si. Този заряд има запиращото действие на плосък кондензатор, затова и обедненият слой се нарича *запиращ слой*.

Дебелината на обеднения (чувствителен) слой d може да се увеличи с допълнително прилагане на обратно, запиращо напрежение U_r , което повишава потенциалната бариера. Капацитетът на обеднения слой се определя от израза

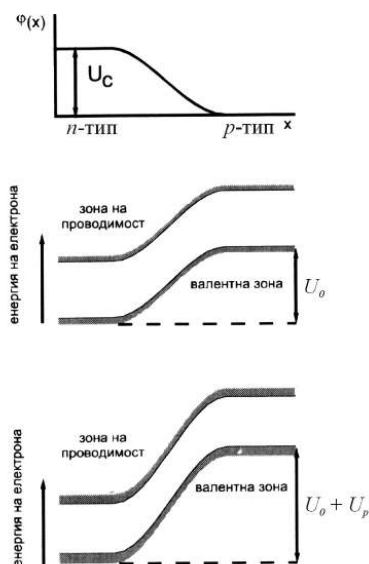
$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d},$$

където ϵ е диелектричната константа на материала, S – повърхността на обеднения слой, а дебелината d се определя от формулата

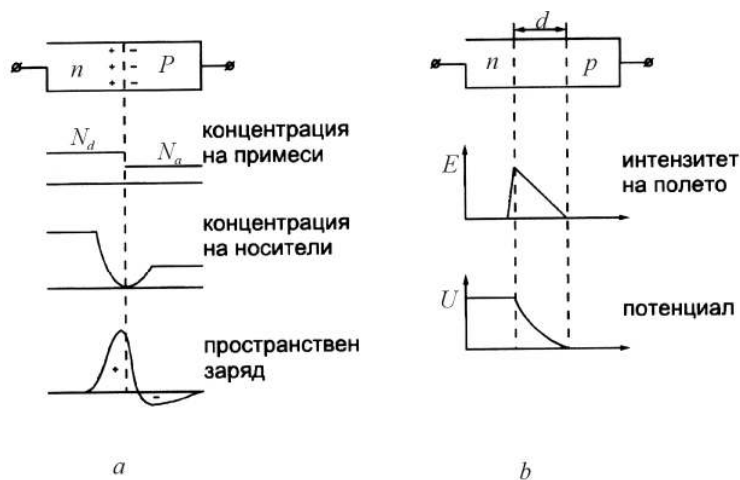
$$d = \sqrt{2\epsilon\epsilon_0\mu\rho U_r}.$$

Тук μ е подвижността на носителите (дупки при *p*-материал или електрони при *n*-материал), ρ – специфичното съпротивление на изходния материал, а $U = U_r + U_0$ е общото напрежение на детектора.

На фиг. 2 е показана промяната в зонната структура при допиране на материали от n - и от p -тип, а на фиг. 3 – концентрацията на примесите, носителите и пространствения заряд около p - n -контакта (а) и интензитета на електричното поле и потенциала (б) в обеднения слой.



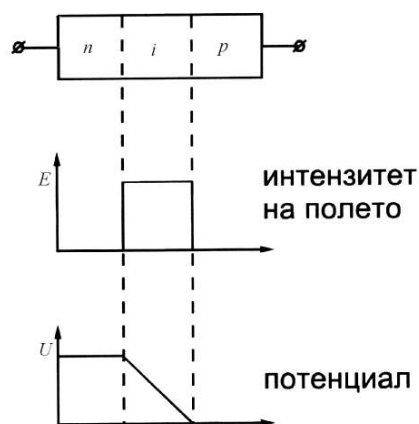
Фиг. 2. Промяна на зонната структура в областта на контакта: без включване на запиращ потенциал (б) и с допълнителен обратен потенциал (в)



Фиг. 3. Концентрация на примесите: а – концентрация на носителите и пространствения заряд на p - n -контакта, б – интензитет на полето във и около обеднения слой с дебелина d

p-i-n-преход

Когато полупроводникът е от компенсиран тип, се създава *p-i-n*-преход. При прилагане на обратно или запиращо напрежение (reversed bias) на такъв преход, обеднената област заема цялата *i*-област в кристала и целият потенциал пада върху нея, тъй като нейното специфично съпротивление е много високо. При плоско паралелен *p-i-n*-преход в *i*-областта електричното поле, в което се движат носителите, е хомогенно. Увеличаването на напрежението скъсява времето за събиране на зарядите. На фиг. 4 е показан интензитетът на полето и потенциала в *p-i-n*-преход.



Фиг.4. Интензитет на полето и потенциалът в един собствен (i) полупроводник

Работният обем на полупроводниковия детектор е именно обедненият слой. Ако в него влезе йонизиращо лъчение, *действието му е подобно на газовата йонизационна камера* – електроните се движат към положително заредения слой, а дупките – към отрицателно заредения. Пълният брой електрони, създадени в обема на обеднения слой и събрани от подходящ електрод в положително заредения слой, ще създадат електричен импулс, чиято амплитуда е пропорционална на енергията на лъчението. Енергията за създаване на двойка носители е около 3 eV в Ge и Si. В сравнение с газовата йонизационна камера, в която средната енергия за създаване на двойка йони е около 30 eV, в полупроводниковите детектори при преминаване на заредена частица ще се създадат около 10 пъти повече носители на заряд. Освен това голямата плътност на

детектора способства за пълното поглъщане на γ -лъчи с висока енергия в значително по-малка дебелина, отколкото при газовите детектори.

Полупроводниковите детектори работят при големи напрежения (1000–3000 V), чиято цел е не само да се разшири обеднения слой, т. е. *чувствителния обем на детектора*, но и да се увеличи електричното поле в неговия обем, за да става по-ефективно събирането на зарядите.

Технология и конструкция

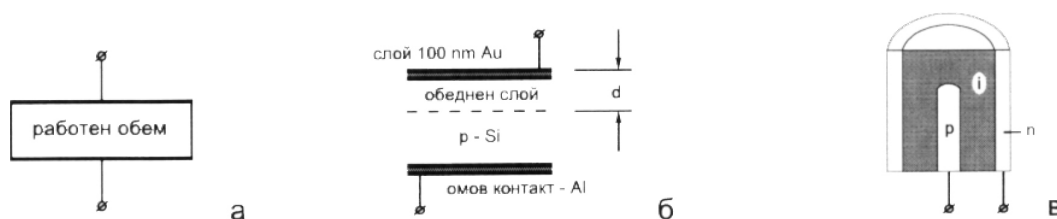
Полупроводниковите детектори са два типа: детектори със собствена проводимост и дрейфови детектори. Първият тип детектори се изработва от свръхчист материал – германий, а вторият тип е от компенсирани материал.

Електродите и електричният им контакт с полупроводника трябва да отговарят на специални изисквания. Зарядите трябва да преминават от двете страни на детектора еднакво, за да се запазва концентрацията на равновесие на носителите. Обикновеният контакт чрез допир с метал е недостатъчен и затова за електроди се използват гранични слоеве в полупроводника, в които е въведена много висока концентрация на даден вид примес (означавана с n^+ или p^+), осигуряваща много висока проводимост. Същевременно много ниската концентрация на носителите от другия вид прави действието им еднопосочно, те са *блокиращи контакти*.

Най-простият вид геометрична конфигурация е плосък детектор или *планарен* тип ППД. Диаметърът на цилиндричния кристал, от който се изработват, е ограничен до няколко сантиметра и понеже дебелината на обеднения слой е също ограничена до 1–2 cm, пълният активен обем на детектор от планарен тип не може да надвиши 10–30 cm³. Електродите при тези детектори са разположени върху двете плоскости на диск – фиг. 5а. Детекторите от планарен тип са подходящи за γ -лъчение с ниска енергия.

Частен случай на дрейфовите детектори от планарен тип представляват т. нар. *повърхностно-барьерни детектори*. При тях върху повърхността на Si от n -тип се нанася изключително тънък слой от материал от p -тип, а върху него чрез вакуумно изпарение се нанася също много тънък слой злато, който служи за електричен контакт. Общата дебелина на двата тънки слоя от около 100 nm не спира заредени частици или електрони с висока енергия. Работното напрежение на повърхностно-барьерните детектори е много ниско в сравнение с останалите полупроводникови детектори – не повече от 100 V. Повърхностно-барьерните детектори са подходящи за детектиране на електрони с висока енергия (над 50 keV) и заредени частици. Пробегът на електрон с

енергия 1 MeV е около 1 mm в Ge и Si, а на α -частица със същата енергия – само 0,02 mm. Електрони с по-ниска от 50 keV енергия обикновено не могат да се регистрират заради дебелината на златния електрод и *мъртвия слой* (разстоянието от повърхността на детектора до обеднения слой). На фиг. 5б е показан схематично повърхностно-барьерен детектор.



Фиг.5. Видове полупроводникови детектори: а – планарен, б – повърхностно-барьерен, в – коаксиален

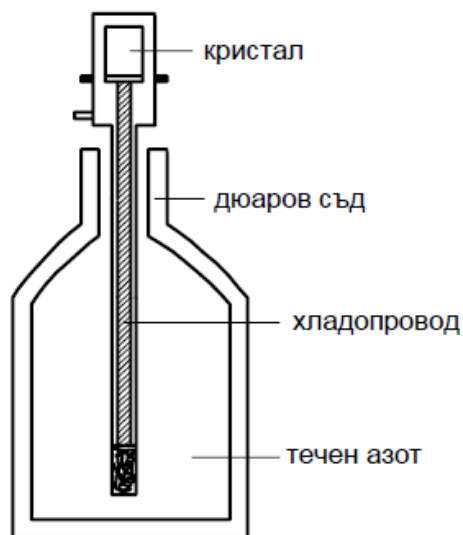
Значително увеличаване на активния обем на детектора, необходимо за регистриране на γ -лъчи с висока енергия, се постига в детекторите от *коаксиален* тип. Те се изработват от голям цилиндър от чист Ge чрез дифузия на Li през външната повърхност на цилиндъра навътре. Така почти целият обем на германия става от компенсиран тип. Само в центъра му, по оста на цилиндъра остава нискоомна p -област, а по околната повърхнина – нискоомна n -област, силно легирана с Li – фиг. 5в. При детекторите от свръхчист Ge допълнително в тези две области се внасят още примеси, за да се образува блокиращият контакт.

Шумовете в детектора се създават от самоволно прескачане на електрон през забранената зона, което е възможно при $T > 0$ K, и при стайна температура процесът е значително по-вероятен, отколкото при 77 K. Шумовете в реален детектор се дължат на флуктуации в токовете на утечка, които могат да са обемни и повърхностни. Обемните утечки идват от топлинната генерация на двойки в обема на детектора, а повърхностните утечки възникват около електрода на високото напрежение. Ако детекторът е малък и охладен, повърхностните токове играят основна роля и налагат ограничения върху големината на високото напрежение.

Времето за събиране на заряда в детектор с голям обем е между 10 и 100 ns и варира в зависимост от обема на детектора и неговия тип – планарен или коаксиален, а

също и от взаимното разположение на мястото на влизане на лъчението в детектора и електродите.

При работа с полупроводникови детектори *работното напрежение на детектора трябва да се повишава много бавно*, обикновено специалното захранване с високо напрежение има предвидено забавено повишаване на напрежението.



Външен вид и разрез на Ge(Li) детектор с криостат

Задачи:

1. Да се извърши енергетична калибровка на детектора, като се използват калибровъчни източници Cs-137 (662 keV), Co-60 (1132 и 1332 keV), Na-22 (511 и 1274 keV).
2. Да се снее гама-фона в лабораторията и се идентифицират гама-излъчващите радионуклиди, обуславящи фона

Основни гама-линии в семейството на уран-238

Енергия, MeV	Интензитет, γ -кв./разпад	Нуклид от който се излъчва
0,029	0,065	^{234}Th
0,063	0.035	^{234}Th
0,093	0,040	^{234}Th
0,186	0,045	^{226}Ra
0,242	0,077	^{214}Pb
0,295	0,191	^{214}Pb
0,352	0,373	^{214}Pb
0,609	0,475	^{214}Bi
0,768	0,050	^{214}Bi
0,935	0,033	^{214}Bi
1,120	0,140	^{214}Bi
1,238	0,060	^{214}Bi
1,378	0,043	^{214}Bi
1,765	0,163	^{214}Bi
2,204	0,054	^{214}Bi

Основни гама-линии в семейството на торий-232

Енергия, MeV	Интензитет, γ - кв./разпад	Нуклид от който се излъчва
0,209	0,041	^{228}Ac
0,239	0,450	^{212}Pb
0,241	0,040	^{224}Ra
0,338	0,123	^{228}Ac
0,463	0,047	^{228}Ac
0,511	0,090	^{208}Tl
0,583	0,300	^{208}Tl
0,727	0,079	^{212}Bi
0,795	0,049	^{228}Ac
0,911	0,290	^{228}Ac
0,967	0,230	^{228}Ac
1,588	0,046	^{228}Ac
1,631	0,034	^{228}Ac
2,615	0,359	^{208}Tl

Изотопи, не принадлежащи към семейства:

Калий-40 - 1461 keV