

**O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI
OLIY VA O'RTA MAXSUS TA'LIM VAZIRLIGI
SAMARQAND DAVLAT UNIVERSITETI**

**FIZIKA FAKULTETI
“5140200 – FIZIKA” TA'LIM YO'NALISHI**

“Yadro fizikasi” kafedrası

TOSHMAMATOV DOSTON

**XOLESTERIL BUTIRAT MOLEKULASINI
KVANTOXIMIYAVIY HISOBLASHLAR BILAN O'RGANISH**

BITIRUV MALAKAVIY ISH

Ilmiy rahbar: ass. Tuxtayev U.U.

Samarqand - 2018

MUNDARIJA

	KIRISH.....	3
I-BOB	O'TKAZGICH, YARIMO'TKAZGICH VA DIELEKTRIKLAR.....	5
1.1	Yarimo'tkazgichli moddalarning asosiy xususiyatlari.....	5
1.2	Yarimo'tkazgichlarning xususiy elektr o'tkazuvchanligi....	7
1.3	Yarimo'tkazgichlarda aralashmali o'tkazuvchanlik.....	9
1.4	Yarimo'tkazgichlarda energetik zonalar.....	13
	I-BOB xulosasi.....	15
II-BOB.	YARIMO'TKAZGICHLI DETEKTORNING TURLARI VA ULARNING ISHLASH PRINSIPI.....	16
2.1	Yarimo'tkazgichli detektorlarning turlari.....	16
2.2	Kremniy va germaniy kristalli yarimo'tkazgichlar.....	22
2.3	O'ta toza germaniyli yarimo'tkazgich detektor.....	27
	II-BOB xulosasi.....	30
III-BOB.	EKSPERIMENT NATIJALARI VA ULARNING TAHLILI.....	31
3.1	Yarimo'tkazgichli spektrometrning energiya bo'yicha ajrata olish qobiliyati.....	31
3.2	Yarimo'tkazgichli spektrometrlarning energiya bo'yicha graduirovkasi (darajalash).....	33
3.3	Yarimo'tkazgichli spektrometrlarning energiya bo'yicha qayd qilish effektivligi.....	36
3.4	Olingan natijalar va ularning tahlili.....	42
	XULOSA.....	44
	ADABIYOTLAR.....	45

KIRISH

Mavzuning dolzarbligi. Hozirgi vaqtga kelib, yadroviy nurlarni qayd qiluvchi binar asosli yarimo'tkazgichli (Ge(Li), Ge, CdTe, CdZnTe, HgI₂, GaAs) detektorlardan yasali keng qo'llanilmoqda. Bunday turdagi detektorlar xona temperaturasida ishlash tezkorligi va ekspress o'lchashlarda qo'llanilishi bilan samarali hisoblanadi. 1960 yildan boshlab yarimo'tkazgichli (Ge(Li), GaAs, CdTe, HgB asosli) detektorlar keng miqyosida ishlab chiqilmoqda. Shuning uchun hozirgi kunda rentgen va gamma nurlarni qayd qiluvchi detektorlarni ishlash prinsipi va asosiy xarakteristikalarini (effektivligi, ajrataolish qobiliyati)ni o'rganish katta ahamiyat kasb etmoqda.

Tadqiqot maqsadi –Bitiruv malakaviy ishning asosiy maqsadi yarimo'tkazgichli HpGe-detektorning ishlash prinsipi va asosiy xarakteristikalarini o'rganishdan iborat

Tadqiqot vazifalari quyidagilardan iborat:

1. yarimo'tkazgichli detektorlarga ishlatiladigan yarimo'tkazgichli materiall (Ga, As, Ge, Si)-ni fizikaviy xususiyatlarini atroflicha o'rganish.
2. yarimo'tkazgichli (HpGe)-detektor yordamida etalon manbadan olingan gamma-spektrlarini taxlil qilish (asbobni effektivligi va ajrata olish qobiliyatini) o'rganish.

Tadqiqot obyekti sifatida olingan yarimo'tkazgichli HpGe-detektorni gamma va rentgen nurlari ta'sirida sezgirli va kristallning tuzilishi o'rganishdan iborat.

Lekin hozirgacha HpGe-detektorning asosiy strukturasi va molekulalararo o'zaro ta'sirlari to'liq o'rganilmagan.

Tadqiqot predmeti yarimo'tkazgichli HpGe-detektorning molekulyar tuzilishi va uning qo'llanilish sohasini o'rganishdan iborat.

Tadqiqot usuli amaliy bo'lib tajriba natijalariga asoslangan. Tajribalardan olingan natijalarga asosan detektorni asosiy xususiyatlarini bilib olish mumkin.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi asbob yordamida universitetni bakalavr o'quvchilariga "Yadro fizikasi"-kursidan laboratoriya ishlarini bajarish uchun uslubiy qo'llanma tayyorlashdan iborat.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Ishni bajarish jarayonida asbob yordamida olingan natijalar asosida respublika miqyosida o'tkaziladigan ilmiy-amaliy konferensiyada maqolalar tayyorlash va namumalarning radioaktiv nurlanishi tezkor ekspress usulda o'rganishda qo'llanish.

Bitiruv ishining tuzilishi va hajmi. Ish kirish, 3 ta bob, xulosa va 21 nomdagi foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat bo'lib, 53 sahifada bayon qilingan. Ishda 32 rasm va 6 jadval mavjud.

I-BOB. O'TKAZGICH, YARIMO'TKAZGICH VA DIELEKTRIKLAR

1.1. § Yarimo'tkazgichli moddalarning asosiy xususiyatlari [1,2]

O'tkazgichlar ham xuddi metallar singari, elektron o'tkazgichlar hisoblanadi. Bunday o'tkazgichlarda elektr toki hech qanday kimyoviy o'zgarishlar bilan sodir bo'lmaydi. Ammo ayrim o'tkazgichlar zaryad tashuvchilar aralashmasi harorat ortishi bilan kuchli ravishda ortib boradi. Bunday o'tkazgichlarning solishtirma qarshiligi past haroratlarda juda katta bo'lib, ular o'tkazmovchilar (izolyator) deb ataladi. Biroq harorat ko'tarilishi bilan ularning solishtirma qarshiligi kuchli ravishda ko'tarilib va yuqori haroratlarda esa haddan tashqari kichik bo'ladi. Bunday moddalarga *elektron yarimo'tkazgichlar* deyiladi. Ko'plab elementlar kremniy (Si), germaniy (Ge), selen (Se) va boshqalar, mis oksidi (Cu_2O), qo'rg'oshin sulfid (PbS) hamda boshqa ko'plab kimyoviy birikmalar yarimo'tkazgichlarga kiradi. Tajribada olingan natijalar shuni ko'rsatadiki, o'ta sof kremniyda xona haroratida elektronlar aralashmasi $10^{17}/\text{m}^3$ dan kam, uning solishtirma qarshiligi esa $10 \text{ Om}\cdot\text{m}$ bo'ladi. Biroq 700°C haroratda undagi elektronlar aralashmasi $10^{24}/\text{m}^3$ gacha ortib, solishtirma qarshiligi $10^{-3} \text{ Om}\cdot\text{m}$ gacha kamayadi.

Yarimo'tkazgichlarda zaryad tashuvchilar aralashmasining haroratga kuchli bog'liq bo'lishi shuni ko'rsatadiki, o'tkazuvchanlik elektronlari issiqlik harakati tufayli sodir bo'lar ekan. Yarimo'tkazgichlarda atomlardan elektronlarni chiqarishligi va ularning o'tkazuvchanlik elektronlariga aylanishi uchun atomlarning o'zaro ta'siri yetarli bo'lmaydi. Buning uchun hatto zaif bog'langan elektronlarga ham biror qo'shimcha energiya berish kerak bo'ladi. Bu beriladigan qo'shimcha energiya issiqlik harakati energiyasidan olinadi.

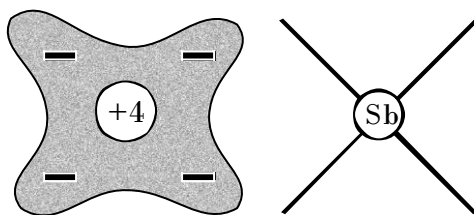
Kristall harorati ortganda, panjaraning issiqlik tebranishlari ba'zi valent bog'lanishlarining buzilishiga olib keladi. Natijada avval valent bog'lanishlarning hosil bo'lishida qatnashgan elektronlarning bir qismi uzib olinadi va o'tkazuvchanlik elektronlariga aylanadi. Elektr maydon mavjud bo'lganda, ular

maydonga qarama-qarshi harakatlanib, elektr tokini hosil qiladi. Har bir valent bogʻlanishning yoʻqolishi, bogʻlanishi boʻlmagan boʻsh oʻrinning paydo boʻlishiga olib keladi. Bogʻlanish elektronlari boʻlmagan bunday boʻsh oʻrinlar *teshiklar* deb ataladi. Yarimoʻtkazgich kristallarida teshiklarning yuzaga kelishi zaryad koʻchirish uchun qoʻshimcha imkon yaratishi mumkin. Teshik mavjud boʻlganda bogʻlanish elektronlardan birortasi teshik oʻrniga oʻtishi mumkin. Natijada normal bogʻlanish tiklanib, buning oʻrniga boshqa joyda teshik paydo boʻladi. Yangi teshikcha oʻz navbatida bogʻlanish elektronlardan boshqasiga oʻtishi mumkin va hakoza. Bu jarayon davom etib, natijada tokning hosil boʻlish jarayonida faqat oʻtkazuvchanlik elektronlari emas, balki bogʻlanish elektronlari ham qatnashadi. Bu elektronlar ham oʻtkazuvchanlik elektronlari singari asta-sekin elektr maydonga qarshi koʻchib boradi. Bu paytda teshiklar ularga qarama-qarshi, yaʼni elektr maydon yoʻnalishida harakat qiladi. Bu jarayonga *teshik oʻtkazuvchanlik* deyiladi. Harakat qancha yuqori boʻlsa, yarimoʻtkazgichlardan ajralgan ozod elektronlar soni, yaʼni oʻtkazuvchanlik elektronlari holatidagi elektronlar soni shuncha koʻp boʻladi.

Agar elektronlarni uzib olish energiyasi shu kristall mavjud boʻladigan sohadagi barcha haroratlarda issiqlik harakatining oʻrtacha (kT) energiyasiga nisbatan katta boʻlsa, u holda oʻtkazuvchanlik elektronlari yetarlicha miqdorda hosil boʻlmaydi. Biz yuqorida koʻrib oʻtdiki, bunday kristallar *oʻtkazmovchilar* deb nom olgan edi.

1.2. § Yarimo'tkazgichlarning xususiy elektr o'tkazuvchanligi [1-3, 28]

Yarimo'tkazgichlarda o'tkazuvchi elektronlarning hosil bo'lish jarayonini kremniy va germaniy misolida qaraylik. Ma'lumki, kremniy atom yadrosining zaryadi (Z)+14 ga va atom tarkibida 14 ta elektron mavjud. Shu elektronlardan 4 tasi zaif bog'langan bo'lib, ular kimyoviy reaksiyalarda qatnashadi va kremniyning 4 valentligini ifodalab, bu elektronlar valent elektronlari deb ataladi. Qolgan 10 ta elektron esa atomning asosini tashkil qiladi.

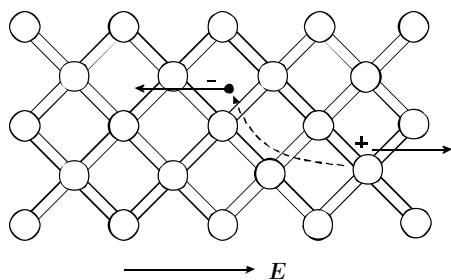


1-rasm. Kremniy atomi va uning to'rt bog'lanishi

Kremniy panjarasida atomlar shunday joylashgan bo'ladiki, har bir atom o'ziga yaqin 4 ta atom bilan o'ralgan. Kremniy kristallida atomlar joylashishini quyidagi ko'rinishda berish mumkin (1-rasm). Bu ko'rinish juda past haroratda sof germaniyga tegishlidir. Bunda barcha valent elektronlar atomlar orasidagi bog'lanishda qatnashib, elektr o'tkazuvchanlikda ishtirok etmaydi. Ikki qo'shni atomlarning bog'lanishi elektron juftlariga bog'liq bo'ladi. Unga *juft elektron bog'lanish* yoki *valent bog'lanish* deyiladi.

Kristall harorati ortganida panjaraning issiqlik tebranishlari ba'zi valent bog'lanishlarning buzilishiga olib kelar ekan. Natijada avval valent bog'lanishlarning hosil bo'lishida qatnashgan elektronlarning bir qismi uzib olinib, ular o'tkazuvchanlik elektronlariga aylanadi. Elektr maydon mavjud bo'lganda ular maydonga qarama-qarshi harakatlanib, natijada elektr tokni hosil qiladi. Biroq o'tkazuvchanlik elektronlari yordamida zaryad ko'chirish jarayonidan tashqari, elektr o'tkazuvchanlikning boshqa xususiyati ham mavjud. Bu shunday xususiyatki, har bir valent bog'lanishning yo'qolishi bog'lanishi bo'lmagan bo'sh o'rinning paydo bo'lishiga olib keladi.

Bogʻlanish elektronlari boʻlmagan bunday boʻsh oʻrinlar teshiklar nomini olgan edi (2-rasm). Yarimoʻtkazgich kristallida teshiklarning yuzaga kelishi zaryad

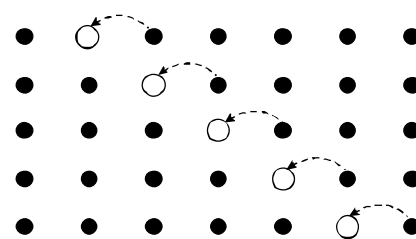


2-rasm. Kremniy panjarasida elektron oʻtkazuvchanlik va teshikning paydo boʻlishi.

koʻchirish uchun qoʻshimcha imkon yaratishni koʻrish qiyin emas. Haqiqatdan ham, teshik mavjud boʻlganda, bogʻlanish elektronlardan birortasi teshik oʻrniga oʻtishi mumkin. Natijada, bu joyda normal bogʻlanish tiklanib buning oʻrniga boshqa joyda teshik paydo boʻladi. Yangi teshikka oʻz navbatida bogʻlanish elektronlaridan boshqasi oʻtishi mumkin va hakoza.

Bunday jarayon koʻp marta davom ettirilib, buning natijasida tokning hosil boʻlishida faqatgina oʻtkazuvchanlik elektronlari qatnashibgina qolmay, balki bogʻlanish elektronlari ham ishtirok etadi. Bu elektronlar ham oʻtkazuvchanlik elektronlari singari asta-sekin elektr maydoniga qarshi koʻchib boradi. Teshiklarning oʻzi xuddi musbat zaryadlangan zarralar harakatlanganidek kuchayadi (3-rasm). Bu jarayon *teshik oʻtkazuvchanlik* deb nom olgan. Yarimoʻtkazgichlarda elektr oʻtkazuvchanlik ikki turli jarayoni mavjud boʻlib, ular oʻtkazuvchanlik elektronlarning harakati bilan amalga oshadigan elektron oʻtkazuvchanlik va teshiklar harakati bilan amalga oshadigan teshik oʻtkazuvchanliklardir.

Elektronlarning bogʻlangan holatdan erkin holatga oʻtishlari bilan bir qatorda teskari oʻtishlar ham boʻladi, bunday oʻtishlarda oʻtkazuvchanlik elektroni bogʻlanish elektronlarining boʻsh joylaridan birida tutilib qoladi. Bu hodisa *elektron va teshik rekombinatsiyasi* deb ataladi.



$F \rightarrow$

3-rasm. Teshik oʻtkazuvchanlik-ning umumiy koʻrinishi.

Muvozanat holatida elektronlarning shunday aralashmasi qaror topadiki, bunda vaqt birligida toʻgʻri va teskari oʻtishlar soni bir xil boʻladi.

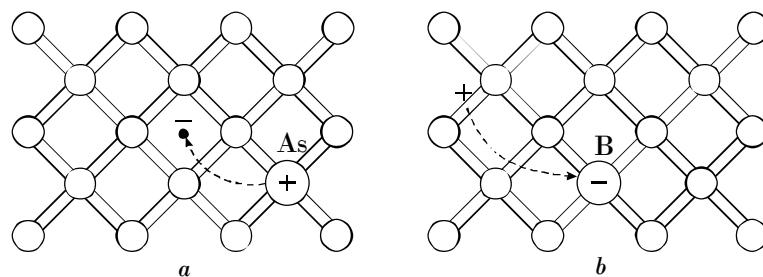
Kimyoviy aralashmalar va boshqa panjara nuqsonlaridan holi boʻlgan sof yarimoʻtkazgichlardagi biz qarab oʻtgan oʻtkazuvchanlik jarayoni *xususiy*

o'tkazuvchanlik deb ataladi. Kristall moddalarda atom yoki ionlar ma'lum tartibda joylashgan bo'lib, x, y, z yo'nalishi bo'yicha ham davriy ravishda takrorlanib turadi va natijada kristall panjarasi hosil bo'lib, shu moddani tavsiflaydi. Panjara tugunlarida atomlar yoki ionlar joylashib, ular tebranma harakat qilib turadilar. Tebranish amplitudasi harorat oshishi bilan kattalashadi. Yuqori haroratlarda esa atomlar tugundan uzilib kristall bo'ylab harakat qiladilar. Ideal strukturaning bunday buzilishiga *kristallning nuqsoni* (defekti) deyiladi. Kristall nuqsonlari haroratdan tashqari har xil yot atomlar kiritish yoki tashqi nurlanish ta'sirida ham hosil bo'lishi mumkin. Kristallarda nuqson hosil bo'lishi, ularning elektr o'tkazuvchanlik xususiyatiga katta ta'sir qiladi.

1.3. § Yarimo'tkazgichlarda aralashmali o'tkazuvchanlik [3,5,7]

Aralashmalar bo'lganidan yarimo'tkazgichlarning elektr o'tkazuvchanligi kuchli o'zgaradi. Masalan, kremniyga 10^{-3} atom foizi miqdorida fosfor (P) qo'shilsa, uning xona haroratidagi qarshiligi $6 \cdot 10^{-2} \text{ Om} \cdot \text{m}$ ga teng bo'lib, sof kristallarning solishtirma qarshiligiga nisbatan 10 marotaba kamayadi.

Aralashmalarning bunday ta'siri yarimo'tkazgichlarning tuzilishi haqidagi yuqorida aytib o'tilgan mulohazalar bilan to'la tushuntiriladi. Yana kremniy misoliga qaytaylik va unda kremniy atomlari o'rnini olgan atomlar aralashmasi mavjud bo'lsin. Aralashma sifatida beshinchi guruh elementi mishyak (As) bor deb olaylik. Mishyak atomida, u beshinchi guruh elementi bo'lgani uchun beshta valent elektron mavjud. Biroq kremniy panjarasida juft-elektron bog'lanish-larni vujudga keltirish uchun faqat to'rtta elektron kerak, shu sababli mishyak atomining beshinchi elektroni juda zaif bog'langani uchun panjaraning issiqlik tebranishlarida osongina urib chiqariladi. Bunda bitta o'tkazuvchanlik elektroni paydo bo'lib, mishyak atomi esa musbat zaryadlangan ionga aylanadi va teshik hosil bo'lmaydi. Bu jarayonning ko'rinishi 4-rasmda keltirilgan.



4-rasm. a) kremniy panjarasida mishyak (As) atomlari;
b) kremniy panjarasida bor (B) atomlari

Endi uchinchi guruhda turgan bor (B) atomini ko'raylik. Bor atomida hammasi bo'lib uchta valent elektron mavjud, lekin kremniy panjarasida normal valent bog'lanish bo'lishi uchun to'rtta elektron kerak. Yetishmayotgan to'rtinchi elektron kristallning qo'shni joylaridan olinadi, bu joyda esa teshik hosil bo'ladi va bor atomi manfiy ionga aylanadi.

Shunday qilib, kremniy kristalida bor (B) atomi bo'lganida ham tok hosil bo'lishi mumkin, biroq mishyak bo'lgan holdagidan farqi shundaki, bu tok elektronlardan emas, balki teshiklar harakatidan bo'ladi.

Yarimo'tkazgichlarning elektr o'tkazuvchanligi aralashmalar tufayli amalga oshishi ham mumkin. Bunga *aralashmali o'tkazuvchanlik* deyiladi.

O'tkazuvchanlik elektronlarini hosil qiluvchi aralashmalarga *donor aralashmalar*, teshiklarning paydo bo'lishiga sabab bo'luvchi aralashmalarga *akseptor aralashmalar* deyiladi. Demak, yarimo'tkazgichlarning elektr o'tkazuvchanligi harakatchan elektronlar tufayli ham, teshiklar tufayli ham bo'lishi mumkin ekan. Agar yarimo'tkazgichlarda elektronlar aralashmasi undagi elektron aralashmasidan ancha katta bo'lsa, unda yarimo'tkazgich elektron o'tkazuvchanlikka ya'ni *n-tip o'tkazuvchanlik*ka ega deyiladi.

Agar musbat teshiklar ko'p bo'lsa, u holda yarimo'tkazgichning o'tkazuvchanligi *teshik o'tkazuvchanlik* yoki *p-tip o'tkazuvchanlik* deb ataladi. Yarimo'tkazgichdagi ko'pchilikni tashkil qiluvchilar zaryad tashuvchilar (*n-tip yarimo'tkazgichda elektronlar va p-tip yarimo'tkazgichda teshiklar*) *asosiy zaryad tashuvchilar*, kamchilikni tashkil qilgani esa *asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar*

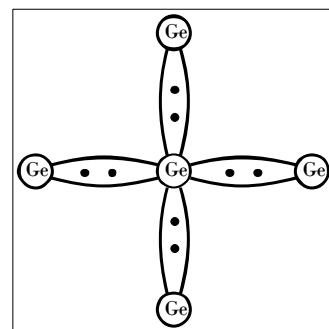
deb ataladi. Agar elektronlar va teshiklar aralashmalari o‘zaro teng bo‘lsa, bunda yarimo‘tkazgichning o‘tkazuvchanligi *aralashmali o‘tkazuvchanlik* bo‘ladi.

Masalan, mishyak (As) aralashmasi bo‘lgan kremniy past haroratda faqat aralashmali o‘tkazuvchanlikka ega bo‘ladi va *n*-tip yarimo‘tkazgich bo‘ladi. Unda elektronlar asosiy zaryad tashuvchilar, teshiklar asosiy bo‘lmagan zaryad tashuvchilar bo‘ladi. Teshiklar faqat valent bog‘lanishlarning uzilishi tufayli hosil bo‘lib, past haroratlarda ularning aralashmasi kichik bo‘ladi. Biroq harorat ortganda, aralashmali o‘tkazuvchanlik xususiy o‘tkazuvchanlikdan ancha kam bo‘lib, teshiklarning aralashmali amalda elektronlar aralashmasiga teng bo‘lib qoladi.

Yarimo‘tkazgichli detektor materiallari asosan germaniy va kremniy kristallardan tashkil topganligini hisobga olib, germaniy yarimo‘tkazgich kristallini ham qarab chiqishni lozim topdik. Bu to‘g‘rida yuqorida eslatib o‘tgan edik.

Toza germaniyni tuzilish strukturasi 5-rasmda keltirilgan. Unda har qaysi germaniy atomi qo‘shni atomning ikki elektroni bilan bog‘langan. Germaniy atomining tartib raqami $Z=32$ bo‘lib, 28-elektron yopiq qobiqni tashkil qiladi. Qolgan 4 elektron eng tashqi valent qobiqda joylashib, germaniyni valentligi ham 4 ga teng bo‘ladi. Shuning uchun ham shu 4 elektron uning kimyoviy xususiyatini tavsiflaydi.

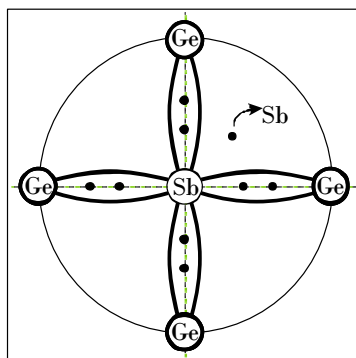
Agar germaniy kristalliga beshinchi guruh elementlaridan begona (yot) aralashma qo‘shilsa, elektronli, uchinchi guruh elementlaridan qo‘shilsa, teshikli o‘tkazuvchanlik bo‘ladi.



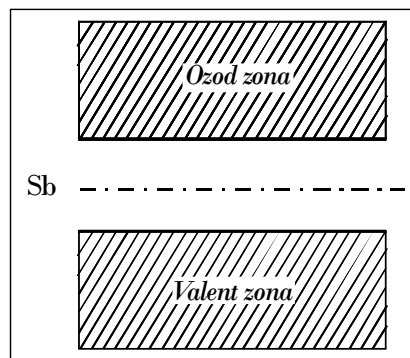
5-rasm. Toza germaniy strukturasi.

Faraz qilaylik, toza germaniy kristalliga beshinchi guruh elementlaridan surma (Sb) yot atomlari aralashtirilgan bo‘lsin (6-rasm). U holda besh valentli surmaning to‘rt elektronli struktura bog‘lanishiga qatnashadi. Beshinchi elektron erkin yashay boshlaydi (uning bog‘lanish energiyasi 10^{-2} eV).

Kristallarning zonalar nazariyasiga asosan beshinchi elektron energiya holati taqiqlangan zonada bo‘lib, ozod zonaga yaqinroq tushadi (7-rasm).



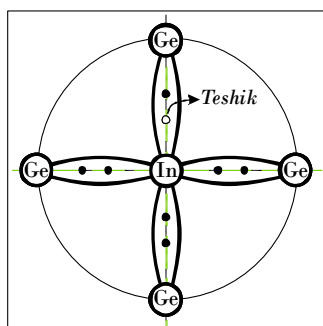
6-rasm. Germaniy kristalliga surma atomlari kiritilgan.



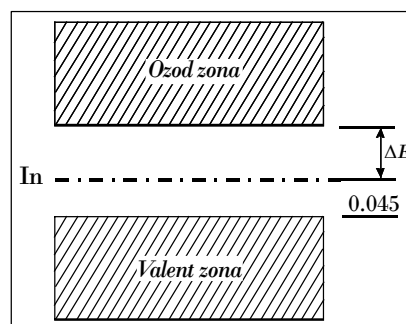
7-rasm. Surma atomi energiya holatining joylashishi.

Shuning uchun ham surmaning beshinchi elektronlari osonlik bilan ozod zonaga o'tadi va elektronli o'tkazuvchanlik hosil bo'ladi. Yarimo'tkazgichlarda elektronli o'tkazuvchanlik beruvchi yot atomlar aralashmasi *elektronlarini beruvchilar* deyiladi. Elektronli o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan yarimo'tkazgichga esa *n-yarimo'tkazgich* deyiladi.

Agarda germaniy kristalliga uchinchi guruh elementlaridan indiy (In) yot atomi aralashtirilsa, struktura bog'lanishiga indiyning uch tashqi elektroni ham qatnashadi. Lekin germaniyning to'rtinchi elektroni bog'lanishga qatnashmaydi (8-rasm). Natijada indiy aralashmasida *teshik* paydo bo'ladi. Indiy yot atomlarining energiya holati taqiqlangan zonada bo'lib, valent zonaga yaqinroq turadi (9-rasm). Shuning uchun ham valent zonadagi elektronlar osonlik bilan teshiklarga o'tadi va teshikli o'tkazuvchanlikka ega bo'ladi. Teshikli o'tkazuvchanlik beruvchi yarimo'tkazgichga *p-yarimo'tkazgich* deyiladi va teshiklar soni indiy atomlar soniga teng bo'ladi. Teshikli o'tkazuvchanlik beruvchi yot atomlar aralashmasiga elektronlarni *qamrab oluvchilar* deyiladi.



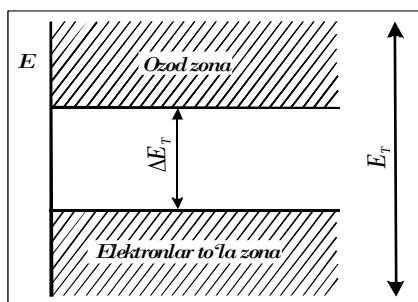
8-rasm. Germaniy kristalliga indiy atomi holatining joylashishi kiritilgan.



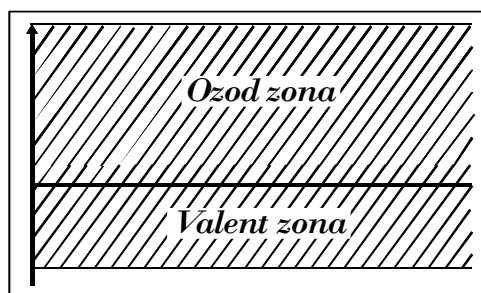
9-rasm. Indiy energiya

1.4. § Yarimo'tkazgichlarda energetik zonalar [1-3,7]

Kristallarda birdaniga juda ko'p atomlar o'zaro ta'sirda bo'lib, ularning energetik holatlari bo'linib ketadi. Bir-biriga juda yaqin holatlar guruhlashib zonalar hosil qiladilar. Bu zonalar bir-biridan taqiqlangan zona bilan ajralishib turadilar (10 -rasm). Tashqi ta'sirlar natijasida elektronlar bir zonadan ikkinchi zonaga o'tib turishi mumkin. Elektronlar o'z atomi bilan aloqada bo'lgan eng tashqi zonaga *valent zona* deyiladi. Pauli tamoyiliga (prinsipi) asosan har bir holatga qarama-qarshi spinga (S) ega bo'lgan ikkita elektron joylashishi mumkin. Ammo kristallda bunday elektronlar soni ikkita bo'lmasdan balki $2N$ ta bo'lganligi uchun energetik holatlar bir-biriga yaqin N ta holatga bo'linadi. Valent zona yuqorisida elektronlari bo'lmagan ozod zona joylashadi. Ozod zonaga valent zonadan elektronlarni ko'chirish uchun, elektronlarga taqiqlangan zona kengligiga (E_T) teng bo'lgan energiya berish kerak.



10-rasm. Zonalarning bir-biridan taqiqlangan zona bilan ajralib turishi.



11-rasm. Metallarda ozod va valent zonalari.

Taqiqlangan zona kengligiga qarab hamma moddalar guruhga bo'linadilar: metallar yoki o'tkazgichlar, dielektriklar yoki o'tkazmovchilar va yarimo'tkazgichlar.

Metallarda valent zona bilan ozod zona ustma-ust tushadi (11-rasm). Shuning uchun ham metallarda doimo erkin elektronlar tartibsiz (xaotik) harakat qiladi (1 sm^3 hajmli kristallda $\approx 10^{22}$ ta atom mavjud).

Dielektriklar yoki o'tkazmovchilarda ozod zona valent zonadan yetarli kenglikdagi ($E > 10 \text{ eV}$) taqiqlangan zona bilan ajralib turadilar. Shuning uchun ularga elektr maydoni berilganda ham tok oqmaydi. Yarimo'tkazgichlarda taqiqlangan zona kengligi juda kichik bo'lib, germaniy uchun $E_T = 0,75 \text{ eV}$ va kremniy uchun $E_T = 1,1 \text{ eV}$ ga teng.

I-BOB xulosasi

Yarimo'tkazgichlarda zaryad tashuvchilar aralashmasining haroratga kuchli bog'liq bo'lishi shuni ko'rsatadiki, o'tkazuvchanlik elektronlari issiqlik harakati tufayli sodir bo'lar ekan. Yarimo'tkazgichlarda atomlardan elektronlarni chiqarishligi va ularning o'tkazuvchanlik elektronlariga aylanishi uchun atomlarning o'zaro ta'siri yetarli bo'lmaydi. Buning uchun hatto zaif bog'langan elektronlarga ham biror qo'shimcha energiya berish kerak bo'ladi. Bu beriladigan qo'shimcha energiya issiqlik harakati energiyasidan olinadi.

Kristall harorati ortganda, panjaraning issiqlik tebranishlari ba'zi valent bog'lanishlarining buzilishiga olib keladi. Natijada avval valent bog'lanishlarning hosil bo'lishida qatnashgan elektronlarning bir qismi uzib olinadi va o'tkazuvchanlik elektronlariga aylanadi

II-BOB. YARIMO'TKAZGICHLI DETEKTORNING TURLARI VA ULARNING ISHLASH PRINSIPI

2.1. § Yarimo'tkazgichli detektorlarning turlari [7-9]

Ssintillyatsion detektorlarning boshqa detektorlarga nisbatan ustunligi uning zarralarni qayd qilish effektivligi kattaligi va vaqt bo'yicha ajrata olish qobiliyati kichikligi hamda tajribada ishlatish qulayligidir. Uning eng muhim kamchiliklardan biri energiya bo'yicha ajrata olish qobiliyatining pastligidir.

Yarimo'tkazgichli detektorlarni paydo bo'lishi bilan gamma-kvantlar va zaryadli zarralarni spektrometrlash sohasida inqilob bo'ldi desak mubolag'a bo'lmaydi.

Hozirgi kunda esa kremniy hamda germaniy kristallari asosida tashkil etilgan yarimo'tkazgichli detektorlar fan va texnikaning barcha sohalariga to'la kirib bordi. Kristall yarimo'tkazgichli detektorlarni tayyorlashda kremniy va germaniydan boshqa yarimo'tkazgich moddalar ham mavjud. Bu moddalarning ba'zi bir tavsiflari to'g'risida ma'lumotlar 1-jadvalda keltirilgan.

Kristall yarimo'tkazgichli detektorlarni tayyorlashda ishlatiladigan ba'zi bir materiallarning asosiy tavsiflari.

1-jadval

Yarim-o'tkazgich elementlari	Z	Zichligi, $\text{at}\cdot\text{sm}^{-3}\times 10^{22}$	t.k	Taqiqlan-gan zona kengligi (eV)	Juft hosil bo'lish ener. (eV)	Dielektrik doimiylik
Si	14	5,02	300	1,12	3,61	12
Si	14	5,02	77	1,16	3,76	12
SiC	14-6	19	300	2,96	11,3	-
Ge	32	4,44	300	0,65	-	-
Ge	32	4,44	77	0,74	2,98	16
GaAs	31-33	2,21	300	1,43	4,2	-
GdTe	48-52	3,04	300	1,47	4,43	-

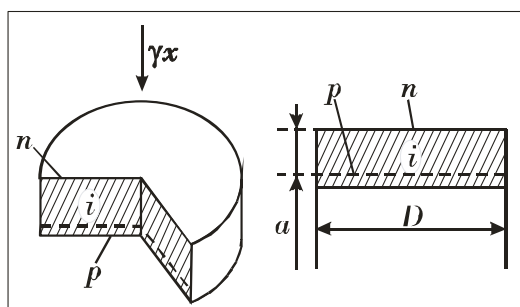
HgI ₂	80-53	2,50	300	2,13	6,5	-
GaSb	31-51	-	77	-	0,77	-
InAs	49-33	-	77	-	0,43	-
C	6	-	300	5,4	-	-

Hozirgi paytda yadroviy nurlanishlarni qayd qilishda faqatgina kremniy va germaniy kristallaridan yasalgan detektorlardan foydalanmoqda. Boshqa yarimo'tkazgichli yuqori sifatli kristall detektorlarni yasash uchun esa o'ta sof materiallar kerak. Ularni hosil qilish uchun yangi sohalar yaratish talab qilinadi.

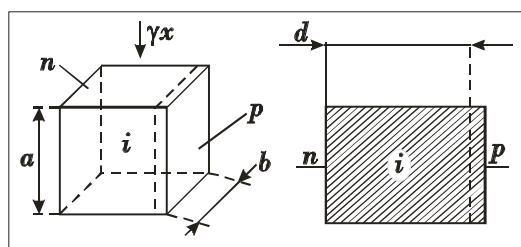
p-n va p-i-n o'tishli detektorlar. Kristall detektorning ishlash tamoyili ionizatsion kameraning ishlash tamoyiligi o'xshash bo'ladi. Bu detektor yordamida qayd qilinayotgan zaryadlangan zarra detektor moddasi orqali o'tib, unda elektron va teshikdan iborat erkin zaryad tashuvchilarni paydo qiladi. Bu zaryad tashuvchilar o'z navbatida doimiy elektr maydoni yordamida boshqarib turiladi. Bunday detektorni gazli ionizatsion kameradan muhim va afzallik tomoni shundan iboratki, bunda yuqori darajada zichligi katta ishni modda hosil qilinadi. Qattiq jismda yo'qotilgan energiya birligiga to'g'ri keluvchi atomlarning yuqori zichligi mavjudligi hisobiga, zaryadlangan zarralar o'tish paytida ko'plab erkin elektr zaryad tashuvchilar jufti yuzaga keladi. Shu tufayli hosil bo'lgan zaryad tashuvchilar juftidagi statistik fluktuatsiya kamroq bo'ladi. Demak, kristall detektorning energiya bo'yicha ajrata olish qobiliyati gazli ionizatsion kameraga qaraganda, yaxshiroq bo'ladi. Detektor materialida nuqsonlar, aralashmalar mavjudligi tufayli kristall detektorda ushlab qoluvchilar (lovushka) mavjud bo'ladi va ularda erkin elektron tashuvchilarning rekombinatsiyasi yuzaga keladi. Bu esa paydo bo'lgan elektr zaryadlarning to'la to'planishiga xalaqit qiladi. Shu sababdan ham yarimo'tkazgichli detektorlar yasash uchun sof va o'ta sof kristall kerak bo'ladi. Kristall detektorlar hajmida elektr zaryadlarning to'planishini doimiy elektr maydoni yordamida amalga oshirish uchun detektor materiali o'tkazmovchi bo'lishi kerak. Aks holda detektor orqali katta doimiy qochoq toklar o'ta boshlaydi

va haddan ziyod shovqinning paydo bo'lishiga sabab bo'ladi. O'tkazmovchilar asosida qurilgan kristall detektorlar hozircha keng tarqalgan emas.

Ge(Li)-detektorlar. Bu detektor gamma-kvantlar spektrini o'lchashga mo'ljallangan. Detektorning energiya bo'yicha ajrata olish qobiliyatining mumkin bo'lgan eng maksimum qiymatiga erishilgan. Ma'lumki, Ge(Li)-detektorlari turli xil konfiguratsiyalarda bo'ladi. Kuzatishlar shuni ko'rsatadiki, spektral chiziqlarning shakli va vaqt birligi ichida zaryadlarning to'planishiga elektr maydonining bir jinsligi o'ta muhim rol o'ynaydi. Odatda detektorlar beshta turli xil konfiguratsiyalar (12-14-rasmlar) ko'rinishida tayyorlanadi va ular quyidagi masalalarni yechishda qo'llaniladi:



12-rasm. Ge(Li)-detektorining parametri va tuzilishi (Yupqa parallel Ge(Li)-detektor).



13-rasm. Ge(Li)-detektorining parametri va tuzilishi (Yupqa parallel Ge(Li)-detektor).

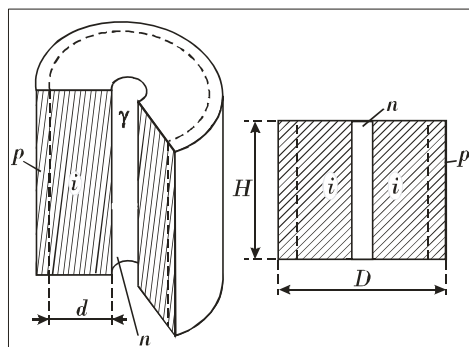
- katta gavdali burchakda past energiyali kvantlarni qayd qilishda;

- maydon effektini hisobga olmaganda gamma-kvantlar energiyasini o'ta aniqlik (pretsizion) bilan o'lchashda;

- vaqt bo'yicha ajrata olish qobiliyati yomon, maydon effektivligi va yuqori darajada qayd qilish effektivligiga ega bo'lganda gamma-kvantlar spektrini o'lchashda;

- kichik effektivlikka, detektorda maydon effektivligi bo'lganda, lekin vaqt bo'yicha yuqori darajada ajrata olish qobiliyatiga ega bo'lganda gamma-kvantlar spektrlarini o'lchashda;

- kuchsiz radioaktivlikka ega bo'lgan manbalar va namunalar aktivligini o'lchashda.



14-rasm. Koaksial Ge(Li)-detektorining parametri va tuzilishi (Koaksial, o‘ra ko‘rinishli Ge(Li)-detektori)

Si(Li)-detektorlar. Bu detektor beta-zarralar va gamma-kvantlar spektrlarini o‘lchashga mo‘ljallangan. Aytish mumkinki, detektorlarning energiya bo‘yicha ajrata olish qobiliyatida energiya bo‘yicha mumkin bo‘lgan maksimum qiymatga erishilgan. Haqiqatdan ham, ichki konversion elektronlar (IKE) spektrini o‘lchashda energiya bo‘yicha ajrata olish qobiliyati $E_e=100\text{ keV}$ da 880 eV ga teng (6.1-jadval). Beta-zarralarni qayd qilishda energiyasi 100 keV bo‘lganda bundan yuqoriroq natijaga erishish qiyinroq. Chunki detektor joy-lashtirilgan alyuminiy qoplama, zaryadlar to‘plash, radioaktiv zarralar va boshqa effektlar ma’lum daraja yarimo‘tkazgichli detektorning energiya bo‘yicha ajrata olish qobiliyatiga ta’sir qiladi. Past energiya diapazonida ($<50\text{ keV}$) joylashgan gamma-kvantlar spektrini o‘lchashda energiya bo‘yicha ajrata olish qobiliyatida yuqori ko‘rsatgichga erishish ancha og‘ir. Buning sababi shundaki, old kuchaytirgichga (OK) katta qiymatli R_c va elektron-optik teskari bog‘lanish (obratniy svyaz) qo‘llanilishidir.

To‘siq sirtli Si(Li)-detektorlari. Bu spektrometr asosan alfa-, past energiyali beta- va rentgen nurlari spektrlarini o‘lchashga mo‘ljallangan. Si(Li)-detektorlarining energiya bo‘yicha ajrata olish qobiliyati yuqori bo‘lishiga qaramasdan ularni pretsizion beta- va rentgen nurlari spektroskopiyasida qo‘llanilish sohasi chegaralangan. Bunga qo‘llanilish sohasining chegaralanganligiga sabab shundaki, detektorning sezgirlik qatlamida kuchlanishni va

teskari doimiy tokni saqlab turish ancha murakkab. Bundan tashqari, tizimda yuqori vakuumni hosil qilish va uni doimiy ushlab turish ham katta qiyinchiliklarga olib keladi.

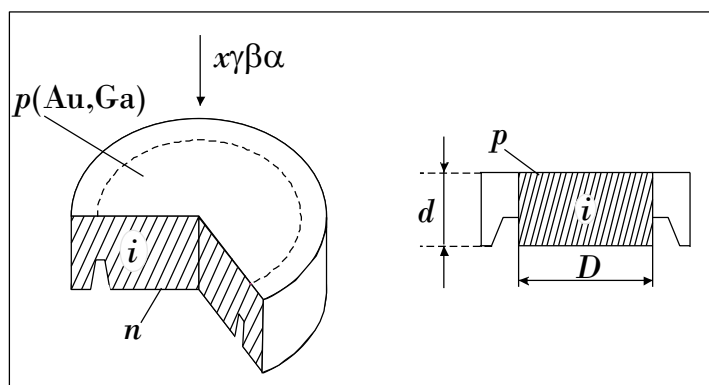
Si(Li)-detektorlari solishtirma qarshiligi $0,5 \div 100 \text{ k}\Omega \cdot \text{sm}$ bo'lgan n -tipli kremniydan tayyorlanadi. Si(Li)-detektorlari-ning parametri va tuzilishi 8.6-rasmda ko'rsatilgan.

$$W \cong 0,35\sqrt{\rho \cdot U},$$

bunda p - n tipli kremniyning solishtirma qarshiligi, $\Omega \cdot \text{sm}$;

U – kuchlanishning siljishi, V;

W – sezgirlik qatlam qalinligi, mm.



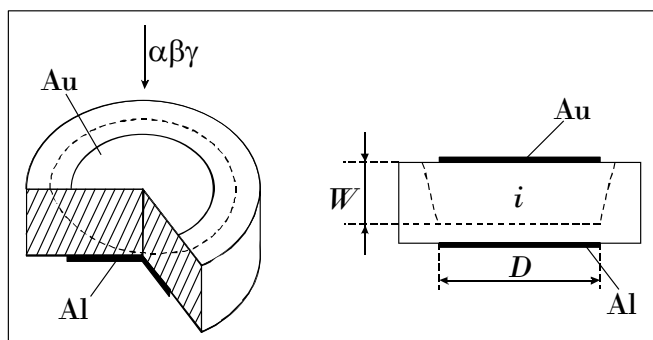
15-rasm. To'siq sirtli Si(Li)-detektorining parametri va tuzilishi.

Ba'zi bir eksperimentlarda to'siq sirtli p -tipli kremniydan tayyorlangan Ge(Al)-detektorlari ham qo'llaniladi. Ge(Al)-detektorlarining Si(Li)-detektorlardan ustunligi shundan iboratki (zarraning erkin chopish masofasi W dan kichik bo'lganda), vaqt bo'yicha ajrata olish chidamli va tayyorlash texnologiyasi uncha murakkab emas.

To'siq sirtli Ge(Li, Au)-detektor. Bu detektorning asosiy vazifasi ichki konversion elektronlarni (IKE) va past energiyali gamma-kvantlar spektrlarini o'lchashga mo'ljallanganligidir. Ge(Li,Au)-detektorining eng muhim va qulay tomoni shundan iboratki, bir vaqtning o'zida gamma-kvantlar va konversion

elektronlar spektrlarini oʻlchash mumkin. Demak, ular ichki konversion koefitsientini (IKK) oʻlchash imkoniyatini beradi. Ge(Li,Au)-detektor p -tipli germaniydan tayyorlanadi.

Baʼzi bir eksperimentlarda xuddi shunga oʻxshash spektrlarni oʻlchashda implantatsiya usuli bilan olingan Ge(Li)-detektorlari ishlatiladi. Bunday detektorlar yordamida alfa-zarralar spektrini oʻlchash qulaydir. Faqatgina uning kamchiligi shundan iboratki, germaniyga litiy atomlari katta tezlikda diffuziya qilish yoʻli bilan kiritiladi va natijada kristallarda radiatsion defektlar hosil boʻladi. Bu esa detektorlar parametrlarini yaxshilashga maʼlum darajada toʻsqinlik qiladi.



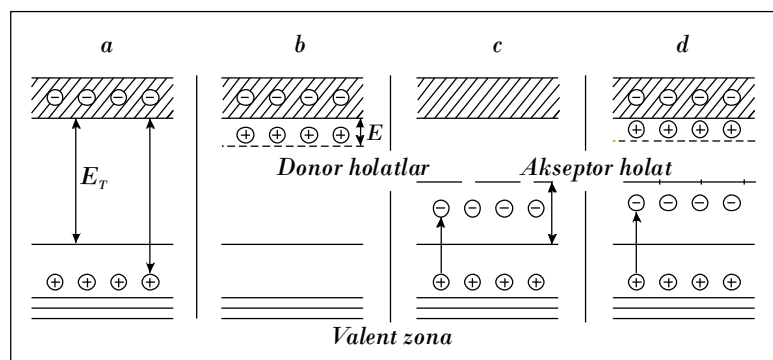
16-rasm. Toʻsiq sirtli Si(Au)-detektorining parametri va tuzilishi.

Sof germaniy (Ge)-detektor. Bu detektorning asosiy vazifasi rentgen nurlari va past energiya diapazonida ($E < 200 \text{ keV}$) joylashgan gamma-kvantlar spektrini oʻlchashdan iboratdir. Sof germaniydan yasalgan detektorning Ge(Li)-detektordan ustunligi shundaki, uni xona haroratida ham bimalol saqlash mumkin. Bu detektorni faqatgina eksperiment oʻtkazish davrida azot haroratida saqlansa yetarli. Baʼzi hollarda sof germaniy detektorini oʻrnini Ge(Li, Au)-detektor ham bimalol bosa oladi.

2.2. § Kremniy va germaniy kristalli yarimoʻtkazgichlar [9, 10]

Agar uy haroratida ularga doimiy elektr maydoni yuborilsa, ulardagi qochoq toklar katta boʻladi. Yarimoʻtkazgichlardan detektor sifatida foydalanish uchun ularning effektiv solishtirma qarshiligini oshirish lozim boʻladi, buning uchun esa

detektor moddasiga aralashma sifatida oltin (Au) kiritiladi. Oltin aralashma past haroratda effektiv solishtirma qarshilikka erishish imkoniyatlarini beradi. Ammo zaryad to'plash holatini yomonlashtiradi, shu sababli detektorlarni sovutib turishga to'g'ri keladi, bu esa o'z navbatida ulardan foydalanishni qiyinlashtiradi. Kristalli yarimo'tkazgichli detektorlar yasash uchun odatda xususiy o'tkazuvchanlikli (*i*-tipdagi) yarimo'tkazgichli materiallar olinadi. Yarimo'tkazgichlarda absolyut nol haroratda valent zonasining barcha elektron sathlari band bo'lib, o'tkazuvchanlik zonasining barcha sathlari esa bo'sh bo'ladi. Bunday vaqtda yarimo'tkazgichlar o'zini o'tkazmovchi kabi his etadi. Haroratning oshishi tufayli taqiqlangan zona hosil qilgan to'siq erkin o'tkazuvchanlik zonasiga o'tishi mumkin. Yarimo'tkazgichli materiallarning xususiy elektr o'tkazuvchanligi shunga asoslangandir. Xususiy o'tkazuvchanlikli *i*-tipdagi yarimo'tkazgichlarda (17-rasm (a)) erkin zaryad tashuvchilar o'tkazuvchanligi valent zonasidan o'tkazuvchanlik zonasiga o'tishi bilan bog'liqdir. Natijada o'tkazuvchanlik zonasida elektron valent zonasida esa teshik paydo bo'ladi. *n*-tipdagi yarimo'tkazgichda o'tkazuvchanlik zonasi paydo bo'ladigan elektron uning valent zonasidagi emas, balki donorli aralashma hosil qilgan ruxsat etilgan energetik sathlardan o'tishi natijasida u sathlarda esa teshiklarning paydo bo'lishiga olib keladi (17-rasm (b)). Teshikli o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan yarimo'tkazgichlar *p*-tipdagi yarimo'tkazgichlar deyiladi (17-rasm (c)). Bularda o'tkazuvchanlik akseptorli aralashmalar tufayli yuzaga keladi. Akseptorli aralashmalar o'zlarini elektronlarini valent zonaga berolmaydi. Valent zonadan akseptorli aralashmalarning mavjud energetik sathlariga elektronlar o'tishi va valent zonada teshiklar hosil bo'lishi bu tipdagi yarimo'tkazgichlarni teshikli o'tkazuvchanlikka ega bo'lishiga olib keladi. *p*-tipdagi xususiy kompensatsiyalangan o'tkazuvchanlikka yarimo'tkazgichlarda (17-rasm (d)) birdaniga ham donorli ham akseptorli aralashmalarni mavjudligi va bu aralashmalarning miqdori bir xil bo'lganligi tufayli hosil bo'ladigan elektronlar soni valent zonasida hosil bo'lgan teshiklar soniga teng bo'ladi. Natijada esa kompensatsiyalangan xususiy o'tkazuvchanlikli yarimo'tkazgichga o'xshash bo'ladi.



17-rasm. Yarimoʻtkazgichlarda turli xil oʻtkazmovchilikda energetik holatlarining joylashish sxemasi.

Yarimoʻtkazgichga birdaniga donor va akseptor aralashmalarini kiritish p -tipdagi oʻtkazuvchanlikli kompensatsiyalashgan yarimoʻtkazgich hosil boʻladi degan edik. Odatda p -tipdagi kremniy yoki germaniy litiy bilan kompensatsiya qilinadi. Natijada, bunday kremniyning aktivatsiya energiyasi $4,3 \cdot 10^{-2}$ eV ga teng boʻladi. Ammo bunday yarimoʻtkazgichlar aralashmasini yaratish sohasi maʼlum qiyinchiliklarga olib keladi. Yaʼni yarimoʻtkazgichli materialga juda kichik miqdordagi aralashmani kiritish lozim boʻladi. Odatda aralashma atomlar soni 10^{-7} - 10^{-10} tani (xususiy atomlar soniga nisbatan) tashkil etadi. Yarimoʻtkazgich yoki boshqacha aytganda, yarimoʻtkazgichli materialning 1 sm^3 dagi aralashma atomlar soni 10^{13} - 10^{16} tani tashkil etadi. Hozirgi kunda 1 sm^3 yarimoʻtkazgichli material hajmida 10^9 - 10^{10} ta aralashma atomini hosil qilish muammosi hal etilgan.

Radioaktiv nuklidlar spektrlarini oʻlchashda past energiya diapazonlarda ($E < 200 \text{ keV}$) oʻta sof germaniydan yasalgan detektorlardan foydalaniladi. Bu esa energiya boʻyicha ajrata olish qobiliyatining hozirgi vaqtda yuqori koʻrsatgichi boʻlib, bu nazariy hisoblashlarda olingan natijalarga deyarlik yaqindir.

Ionizatsion detektorlarning energiya boʻyicha ajrata olish qobiliyatining eng yuqori qiymati, xuddi shuningdek yarimoʻtkazgichli detektorlarda ham bu tavsif quyidagi formula yordamida aniqlanadi:

$$\overline{\Delta N^2} = FN \quad (1)$$

N – baʼzi bir muhitda juft ionlar hosil boʻlish oʻrtacha sonini bildiradi. F – Fano faktori boʻlib, N ga umuman bogʻliq boʻlmaydi.

ΔN^2 – hosil bo‘lgan juft ionlar kvadratik dispersiyani ifodalaydi.

Statistik qonun taqsimotning ehtimoliyat zichligi, N uchun spektral chiziq shaklining aniqlik darajasini ifodalaydi. N ning katta qiymatlarida spektral chiziq shakli amaliy jihatdan Gaussdan farq qilmaydi. N ning kichik qiymatlarida esa spektral chiziqning shakli taqsimot ehtimoliyat zichligiga bog‘liq.

Bir juft ionga to‘g‘ri keluvchi o‘rtacha energiya W , masalan, germaniy uchun 3 eV ga, Fano faktori esa $F=0,1$ ga teng (1.2) formuladan shuni ko‘rish mumkinki, E energiyali yadroviy nurlanish spektri uchun energiya bo‘yicha ajrata olish qobiliyati quyidagi formula yordamida topiladi:

$$\Delta E = 2,35\sqrt{F \cdot E / W} \quad (2)$$

Sof germaniydan tayyorlangan yarimo‘tkazgichli gamma-detektorlari uchun: $E=1 \text{ MeV}$ da, $\Delta E=1,4 \text{ keV}$; $E=100 \text{ keV}$ da, $\Delta E=450 \text{ eV}$; bundan ko‘rish mumkinki, $E=1 \text{ MeV}$ da mumkin bo‘lgan energiya bo‘yicha ajrata olish qobiliyatiga $\Delta E=1,5 \text{ keV}$ erishilgan (1-jadvalga qaralsin).

Yarimo‘tkazgichli detektorlarning energiya bo‘yicha ajrata olish qobiliyatini yomonlashishiga sabab shundaki, yarimo‘tkazgichli detektorlar elektrodlarida zaryadlarning to‘la yig‘ilmasligi va elektronika qismining shovqinlaridir. Yarimo‘tkazgichli detektorlarning energiya bo‘yicha ajrata olish qobiliyatini yanada yaxshilash uchun sof va o‘ta sof materiallardan foydalanish kerak bo‘ladi. Bu esa o‘z navbatida detektorlar elektrodlarida zaryadni to‘la yig‘ilishga imkon beradi.

Odatda kristall yarimo‘tkazgichli detektorlar $p-n$ yoki $p-i-n$ yarimo‘tkazgichli diodlar ko‘rinishida tayyorlanadi. Ularning tavsifi va qo‘llanilish sohalari kristallning ishchi geometriyasiga, detektorning sezgirlik hajmi va konfiguratsiyasiga bog‘liq bo‘ladi.

Yarimo‘tkazgichli kremniy kristallidan to‘siq sirtli Si(Au)-detektorlar va diffuziya yo‘li bilan atomlarni kiritish Si(Li)-detektorlar tayyorlanganda, odatda ularning ko‘rinishi yupqa tabletkaga o‘xshagan bo‘lib, diametri taxminan $10\text{mm} \times 50\text{mm}$ atrofida bo‘ladi. Tabletkada diametri detektorning maksimum sirt yuzasini aniqlaydi. Bunday yarimo‘tkazgichli detektorlar *planar yarimo‘tkazgichli*

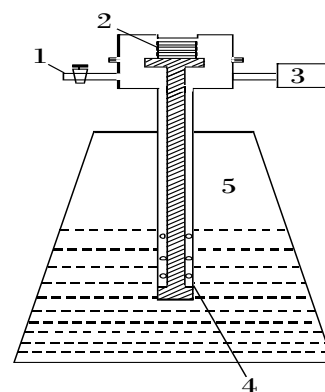
detektorlar deb ataladi. Ularda *p-n* va *p-i-n* o'tishlar juda yupqa bo'ladi. Planar detektorlar katta ishchi sirtga, ammo kichik sezgirlik yuzasiga ega bo'ladi. Shuning uchun ham yarimo'tkazgichli detektorlar qisqa chopuvchi zarralarni qayd qilishda keng qo'llaniladi.

p-i-n o'tishli Ge(Li)-detektorlar tayyorlanadigan yarim-o'tkazgichli kristall odatda silindr ko'rinishida bo'ladi. Silindr ko'rinishidagi bu kristallning balandligi uning diametriga teng qilib olinadi. Agarda diffuziya va dreyf usuli bilan litiy atomlarini yarimo'tkazgichga kiritish silindrning bir tomonidan olib borilsa, bunga *p-i-n* o'tishli *yupqa planar detektorlar* deyiladi. Bunday planar detektorlarning sezgirlik hajmi unchalik katta bo'lmay $3-5 \text{ sm}^3$ atrofida bo'ladi.

Yarimo'tkazgichli detektorning sezgirlik hajmini oshirish uchun detektorni tayyorlash paytida diffuziya va dreyf usuli bilan litiy atomlarini kiritish, silindr shaklidagi germaniy kristallining yon sirtidan bir vaqtda olib boriladi. Mana shu usul bilan tayyorlangan yarimo'tkazgichli detektorga *ikki torsli koaksial detektorlar* deyiladi. Bunday yarimo'tkazgichli detektorlarning sezgirlik hajmi $30-50 \text{ sm}^3$ atrofida bo'ladi.

Agar diffuziya va dreyf usuli bilan litiy atomlarini kiritish bir vaqtning o'zida silindr ko'rinishidagi germaniy kristallining yon sirtidan bitta torsdan olib borilsa, bunday yarimo'tkazgichli detektorlarga bir *ochiq torsli koaksial detektorlar* deyiladi. Bunday turdagi detektorlarning sezgirlik hajmlari: 100 sm^3 yoki undan ham ortiq bo'lishi mumkin.

Fizika fakulteti yadro fizikasi kafedrasida qoshidagi Yadro fizikasi laboratoriyasida (YFL) ilmiy eksperimentlarda ishlatilayotgan gamma-kvantlarni qayd qiluvchi Ge(Li)-detektorlardan birining umumiy ko'rinishi 18-rasmda keltirilgan. Kremniydan yasalgan yarimo'tkazgichli detektorlar oddiy xona haroratida ham bimalol ishlayveradi. Kremniy yarimo'tkazgichli detektorlari oddiygina alyuminiy materialidan yasalgan qoplama bilan o'ralgan bo'ladi.



18-rasm. Yarimo'tkazgichli detektorning umumiy ko'rinishi: 1 – vakuum krani (VK); 2 – yarimo'tkazgichli detektor (YaD); 3 – oldkuchaytirgich (OK); 4 – sorbent; 5 – dyuar idishi.

Germaniy kristallaridan yasalgan Ge(Li)-detektorlarning, kremniy kristallaridan tashkil topgan Si(Li)-detektorlardan farqi shundaki, u faqat azot (N) haroratida ishlaydi. Shuning uchun ham Ge(Li)-detektorlar doimo suyuq azot solingan idishlarda (dyuar-larda) saqlanadi. Ushbu uslubiy qo'llanmada tavsiflari keltirilgan barcha zamonaviy yarimo'tkaz-gichli detektorlar Moskva viloyatining Dubna shahrida joylash-gan Birlashgan yadro tadqiqotlari instituti (BYaTI) Yadro muammolar laboratoriyasining ilmiy eksperimental (IE) va Radiokimyo (RK) bo'limida bo'lib, u yerda sinovdan o'tkazilib ishlatilmoqda.

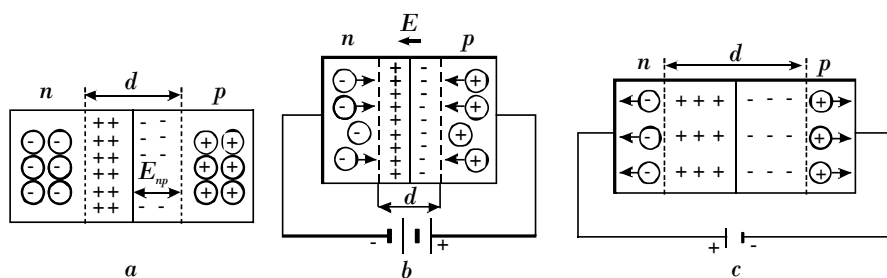
2.3. O'ta toza germaniyli yarimo'tkazgich detektori [7-10,18]

Gazli detektorlardagi gaz o'rniga qattiq jism ishlatish ma'lum qulaylik tug'diradi va detektorning effektivligini oshiradi. Lekin buning uchun qattiq jismlar, birinchidan, gaz kabi izolyator bo'lishi, yadro nurlanishi ta'sirida o'tkazgichdek ishlay olishi, ikkinchidan esa, qattiq jism hajmida yuzaga kelgan ionlar potentsiallar ayirmasi qo'yilgan tegishli elektrodalarda to'planishi zarur. Dastlabki kristalli, masalan, olmos, kumush xlorid, osh tuzi va hokozolar ishlatilgan schyotchiklarda ikkinchi shart yaxshi bajarilmaganligi sababli ulardan hozir kam foydalaniladi. Yarimo'tkazgichlarning xossalariidan foydalanib yasalgan detektorlar kristalli schyotchiklarga qaraganda afzalroq. Bor, germaniy, kremniy, fosfor elementlari yarimo'tkazgichlardir. Ularning elektr o'tkazuvchanligi haroratga juda bog'liq: isitilganida ularning elektr o'tkazuvchanligi ortadi. O'tkazgichlarda esa buning aksi.

Kimyoviy jihatdan juda toza yarimo'tkazgich tayyorlash ancha qiyin. Hozirgi zamon ishlab chiqarish texnologiyasiga asoslanib tayyorlangan toza yarimo'tkazgichlarda ham har doim ozmi ko'pmi "begona" atomlar bo'ladi. Bu atomlar oz miqdorda qolgan bo'lsada, yarimo'tkazgichning elektr o'tkazuvchanligiga kuchli ta'sir ko'rsatadi. Masalan, kremniy kristallida har 10^5 ta kremniy atomiga bittadan bor atomi to'g'ri kelsa ham yarimo'tkazgichning elektr o'tkazuvchanligi 20°C da 1000 baravar oshib ketadi. Yarimo'tkazgichli "begona" atomlar qo'shilishidan u elektronli yoki teshikchali "begona" o'tkazuvchanlik xossasiga ega bo'ladi. Elektronli o'tkazuvchanlik xossasiga ega bo'lgani *n-yarimo'tkazgich*, ikkinchisi esa *p-yarimo'tkazgich* deb ataladi. Shu *n* va *p* yarimo'tkazgichlarni birga qo'shib yarimo'tkazgichli detektor yasalgan.

n-yarimo'tkazgichda erkin elektronlar, *p*-yarimo'tkazgichda teshikchalar to'plangan bo'ladi. Bu yarimo'tkazgich-larning har biri alohida turganida neytraldir; ikkalasi jipslashtirilsa, erkin elektronlar o'tkazgichning *n* sohasidan *p* sohasiga o'tib, teshikchalarni neytrallashtiradi va *p*-yarimo'tkazgichning yupqa qatlami manfiy zaryadlanib qoladi. Teshikchalar *p* sohadan *n* sohaga o'tganda esa

aksincha, erkin elektronlar neytrallashadi va n -yarimo‘tkaz-gichning chegara qatlamida ortiqcha musbat ionlar hisobiga musbat qatlam paydo bo‘lib, elektr maydoni (E) vujudga keladi. Bu qatlam n - p -o‘tish qatlami deyiladi (19-rasm, *a*). Shu elektr maydoni kuchlanishining qarshiligi tufayli elektronlar p sohaga, teshikchalar esa qarshi tomonga o‘tolmaydi va n - p li yarimo‘tkazgich xossalari jihatidan diodga o‘xshab ketadi. Agar bu yarimo‘tkazgich tashqi elektr maydoniga (19-rasm, *b*) ulansa, elektronlar va teshikchalar tashqi kuch E ta’sirida n - p -o‘tish qatlamidan o‘tadi va yarimo‘tkazgich tok o‘tkaza boshlaydi. Aksincha, agar yarimo‘tkazgichning n tomoni musbat qutbga, p tomoni manfiy qutbga ulansa (19-rasm, *c*), n - p -o‘tish qatlami yanada kengayadi, endi bu sistemadan tok o‘tmaydi.



19-rasm. Yarimo‘tkazgichda p - n o‘tishning vujudga kelishi.

Shunday qilib, n - p -o‘tish qatlami “begona” elektr toki uchun to‘siq hisoblanadi. Bu qatlam yarimo‘tkazgichdan “shaxsiy” tok o‘tishiga xalaqit bermaydi, chunki bunday tokni “begona” atomga bog‘liq bo‘lmagan hamda turli jarayonlar, masalan, atomlarning issiqlik harakati natijasida paydo bo‘ladigan elektron va teshikchalar oqimi vujudga keltiradi. Yadro nurlanishi ta’sirida ham shunday elektron va teshikchalar hosil bo‘ladi. Yarim o‘tkazgich va metall plastinka olib, ular jipslashtirilsa, elektronlar yarimo‘tkaz-gichdan metall plastinkaga o‘tib, plastinka yarimo‘tkazgich-ga nisbatan manfiy zaryadlanadi va ular orasida $u_0 = u_1 + u_2$ kontakt potentsiallar ayirmasi paydo bo‘ladi (bu yerda u_1 va u_2 – metall plastinka bilan yarimo‘tkazgichdagi chiqish ishining kattaligi). Metall plastinka bilan yarimo‘tkazgich orasida elektr maydoni kuchlanganligi vujudga keladi:

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{ed} 4\pi\sigma \quad (3)$$

bu yerda σ – sirtqi zaryadlar zichligi; d – oraliq kengligi. Yarimo‘tkazgich elektronlarining “qo‘shni” metall plastinka-ga o‘tib ketishi natijasida yarimo‘tkazgichda elektron yetishmaydigan qatlam hosil bo‘ladi. Ionlashtiruvchi nurlanishni xuddi shu qatlam sezadi. Bu qatlamga tushgan zarra o‘z energiyasini elektron-teshikcha jufti hosil qilish uchun sarflaydi. Sarflangan energiya gazda bir juft ion hosil qilish uchun kerak bo‘ladigan energiyadan taxminan 10 baravar kam. Shuning uchun zarra to‘la to‘xtaganida yarimo‘tkazgichda gazdagiga nisbatan birmuncha katta elektr zaryadi paydo bo‘ladi. Tashqi elektr maydoni ta’sirida elektron bilan teshikchalar mos elektrodlarga qarab harakatlanadi va elektr zanjirida tok paydo bo‘ladi. Yadro nurlanishini qayd qilish uchun ko‘pincha kremniy (Si) va germaniy (Ge)dan qilingan detektorlar ishlatiladi. Bunday detektorlar tuzilishi va xossalari jihatidan xilma xildir.

β -zarra va γ -kvantlarni qayd qilish uchun sezgir qatlam qalinroq bo‘lishi zarur. p -yarimo‘tkazgichga diffuziya yo‘li bilan litiy (Li) atomi kiritiladi. Litiyning diffuziya koeffitsienti fosfor, mishyaklarnikiga nisbatan juda katta. Shuning uchun Li yarimo‘tkazgich ichiga “chuqurroq” kira oladi. Litiy bilan ishlab (dreyf yo‘li bilan) olingan yarimo‘tkazgichlarda p va n qatlamdan tashqari, begona o‘tkazuvchanlikka ega bo‘lmagan yangi i qatlam hosil bo‘ladi. Bunday detektorlar p - i - n tipidagi detektor deb ataladi. Yarimo‘tkazgichli bu detektorning zarralarni qayd qilish effektivligi 100% ga boradi.

Gamma-kvantlar uchun esa, qatlamning qalinligiga bog‘liq bo‘lib, taxminan 10%ga yetadi. Bunday detektorning asosiy afzalligi zarralar energiyasini juda aniq ajrata bilishdir. Masalan, ^{137}Cs yadrosining 661 keV li γ -fotonini qayd qilishda xatolik 0,5%dan oshmaydi. Bundan tashqari, detektordan olingan impulsning kengligi 10^{-10} s ni tashkil qiladi. Demak, bunday detektorni zarralar oqimi katta bo‘lgan hollarda ham ishlatish mumkin.

II-BOB xulosasi

Gazli detektorlardagi gaz o'rniga qattiq jism ishlatish ma'lum qulaylik tug'diradi va detektorning effektivligini oshiradi. Lekin buning uchun qattiq jismlar, birinchidan, gaz kabi izolyator bo'lishi, yadro nurlanishi ta'sirida o'tkazgichdek ishlay olishi, ikkinchidan esa, qattiq jism hajmida yuzaga kelgan ionlar potentsiallar ayirmasi qo'yilgan tegishli elektrodlarda to'planishi zarur. Dastlabki kristalli, masalan, olmos, kumush xlorid, osh tuzi va hakovolar ishlatilgan schyotchiklarda ikkinchi shart yaxshi bajarilma-ganligi sababli ulardan hozir kam foydalaniladi. Yarimo't-kazgichlarning xossalaridan foydalanib yasalgan detektorlar kristalli schyotchiklarga qaraganda afzalroq. Bor, germaniy, kremniy, fosfor elementlari yarimo'tkazgichlardir. Ularning elektr o'tkazuvchanligi haroratga juda bog'liq: isitilganida ularning elektr o'tkazuvchanligi ortadi. O'tkazgichlarda esa buning aksi.

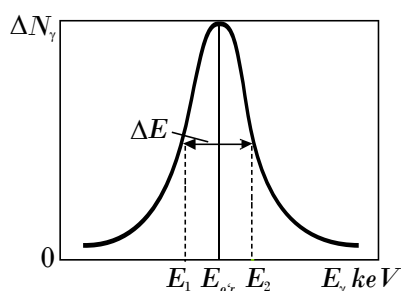
III-BOB. EKSPERIMENT NATIJALARI VA ULARNING TAHLILI

3.1. Yarimo'tkazgichli spektrometrning energiya bo'yicha ajrata olish qobiliyati [13,14]

Yarimo'tkazgichli gamma-spektrometrning energiya bo'yicha ajrata olish qobiliyati deb, umumiy spektrdagi ajralgan spektral chiziq cho'qqisi maksimal qiymatining yarimiga to'g'ri kelgan kengligini, shu energiyaga bo'lgan nisbatiga aytiladi. Uni foizlarda quyidagicha hisoblash mumkin:

$$R = \frac{\Delta E}{E_{\gamma r}} \cdot 100\% \quad (\Delta E = E_2 - E_1) \quad (4)$$

Odatda, yarimo'tkazgichli detektorlarning ajrata olish qobiliyati spektral chiziqning cho'qqisi yarim balandligidagi energetik kengligi orqali beriladi. Masalan, hajmi 50 sm^3 bo'lgan Ge(Li)-detektorning ^{60}Co radioaktiv yadrosi $1332,5 \text{ keV}$ gamma-chizig'i uchun ajrata olish qobiliyati $E_{\gamma}=2,1 \text{ keV}$ ga teng (20-rasm).



20-rasm. Yarimo'tkazgichli spektrometrning energiya bo'yicha ajrata olish qobiliyatini aniqlash.

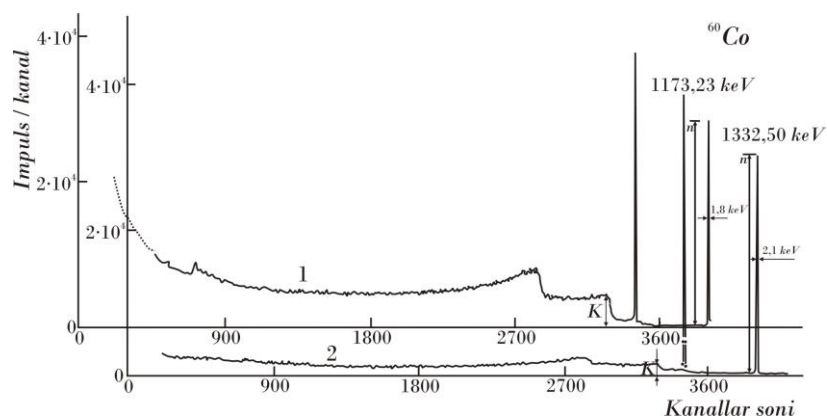
Ushbu uslubiy qo'llanmada talabalar o'rganishi uchun zamonaviy yarimo'tkazgichli spektrometrlarning energiya bo'yicha ajrata olish qobiliyatlari va boshqa bir qator tavsiflari 2-jadvalda keltirilgan.

Yarimo'tkazgichli detektorlarning energiya bo'yicha ajrata olish qobiliyati va boshqa tavsiflari

2-jadval

t/r	Detektor	Nurlanish	Parametrlar	V, B	Ajrata olish qobiliyati, keV			Qo'llanilish oblasti, keV
					$E_e \sim 10^0$	$E_\gamma \sim 5$	$E_\gamma \sim 100$	
1.	Si(Au)	β	80 mm ² ×2 mm	1000	0,90	—	—	200-1000
2.	Si(Li)	β	80 mm ² ×4 mm	1500	0,88	0,30	0,60	30-3000
3.	Ge(Li,Au)	β	80 mm ² ×4 mm	1200	1,30	0,40	0,60	100-4000
4.	Si (Li)-	X	80 mm ² ×4 mm	1500	—	0,29	0,55	5-160
5.	Ge-	γ	25 mm ² ×5 mm	1200	—	0,15	0,50	14-280
6.	Ge(Li)	γ	200 mm ² ×5mm	1000	—	0,24	0,55	14-600
7.	Ge-	γ	300 mm ² ×7mm	1500	—	0,25	0,55	14-600
8.	Ge(Li)-	γ	1,3 sm ³	1500	—	—	0,60	14-600
9.	Ge(Li)-	γ	11 sm ³	2500	—	—	1,30	60-1750
10.	Ge(Li)-	γ	18 sm ³	2900	—	—	3,00	50-1500
11.	Ge(Li)-	γ	37 sm ³	3000	—	—	1,50	70-1750
12.	Ge(Li)-	γ	38 sm ³	3000	—	—	1,90	60-4000
13.	Ge(Li)-	γ	50 sm ³	3000	—	—	1,40	120-4000

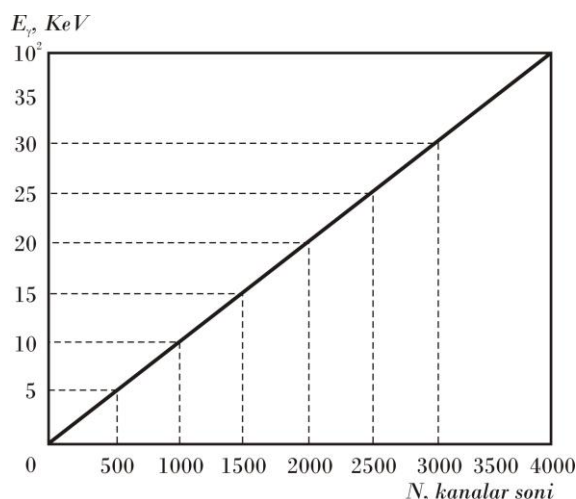
Hajmlari 1 sm³ va 37 sm³ ga teng bo'lgan Ge(Li)-yarimo'tkazgichli detektorlar yordamida ⁶⁰Co radionuklidi-ning gamma-spektri keltirilgan (16-rasm). Ushbu spektrdan ko'rish mumkinki, detektorlarning (1 sm³ va 37 sm³) ajrata olish qobiliyatlari nihoyatda yuqori bo'lib, ⁶⁰Co radionuklidining energiyasi 1332,50 keV ga teng bo'lgan gamma-spektral chizig'ida $E_\gamma=1,8$ va $E_\gamma=2,1$ keV. Bundan tashqari spektral chiziq amplitudasi va Kompton chegarasining balandliklari ham ko'rsatilgan.



21-rasm. Hajmlari 1 sm^3 va 37 sm^3 ga teng bo'lgan $\text{Ge}(\text{Li})$ -yarimo'tkazgichli detektorlar yordamida ^{60}Co radionuklidining gamma-spektri.

3.2. § Yarimo'tkazgichli spektrometrlarning energiya bo'yicha gradirovkasi (darajalash) [13,14]

Yarimo'tkazgichli spektrometrlarni oddiygina usul bilan ham gradirovkalash (darajalash) mumkin, ya'ni yarimo'tkazgichli spektrometrni energiya bo'yicha darajalash yoki analizatorning har bir kanaliga to'g'ri keluvchi energiya qiymatini aniqlash uchun energiyasi oldindan ma'lum bo'lgan radioaktiv nuklidlar chiqarayotgan gamma-kvantlar energiya qiymatlaridan foydalaniladi. Odatda, 4-6 ta energiyasi oldindan ma'lum bo'lgan gamma-kvantlar energiyalari yordamida spektrometrlar energiya bo'yicha darajalanadi. Ya'ni, ma'lum vaqt ichida chiqarilgan gamma-kvantlar soni o'lchanadi. Shundan so'ng gamma-kvantlarning energiyasi (E_γ) bilan analizatorning kanallar soni (N_{ks}) orasidagi bog'lanish grafikasi chiziladi. Masalan, shunday bog'lanishlardan biri 22-rasmda keltirilgan.



22-rasm. Yarimo 'tkazgichli spektrometrlarning
energiya bo 'yicha graduirovkasi.

Spektrometrlarni energiyasi bo'yicha darajalash uchun ushbu laboratoriya ishida mualliflar tomonidan taklif qilingan radioaktiv nuklidlar energiya qiymatlaridan foydalanish mumkin va 3-jadvalda berilgan. Mualliflar tomonidan katta energiya diapazonida (30-3250) keV, 20 dan ziyodroq gamma-kvantlar energiyasi o'ta yuqori aniqlik bilan o'lchanilgan radionuklidlar keltirilgan.

Radioaktiv nuklidlar gamma-kvantlar energiyasi va ularning xatoliklari

3-jadval.

Nuklid	$E_{\gamma}(\Delta E_{\gamma}), \text{ keV}$	Nuklid	$E_{\gamma}(\Delta E_{\gamma}), \text{ keV}$	Nuklid	$E_{\gamma}(\Delta E_{\gamma}), \text{ keV}$
1	2	3	4	5	6
^{182}Ta	31,7370(7)	^{173}Lu	285,369(6)	^{160}Tb	962,342(18)
^{182}Ta	42,7143(9)	^{92}Ir	295,9483(52)	^{152}Eu	964,070(18)
^{241}Am	59,538(2)	^{160}Tb	298,571(6)	^{160}Tb	966,163(19)
^{169}Yb	63,1182(11)	^{133}Ba	302,850(6)	^{56}Co	1037,841(18)
^{182}Ta	65,7219(13)	^{175}Se	303,908(10)	^{82}Br	1043,996(20)
^{182}Ta	67,7496(13)	^{169}Yb	307,732(6)	^{207}Bi	1063,660(19)
^{182}Ta	84,2517(15)	^{192}Ir	308,4464(54)	^{152}Eu	1085,835(19)
^{182}Ta	84,6802(16)	^{192}Ir	316,4977(56)	^{152}Eu	1112,065(22)

¹⁶⁰ Tb	86,790(2)	¹⁵² Eu	344,267(7)	⁶⁵ Zn	1115,555(20)
¹⁰⁹ Gd	88,032(2)	¹³³ Ba	356,005(7)	¹⁸² Ta	1121,290(20)
¹⁷⁹ Lu	88,367(3)	¹³³ Ba	383,831(8)	⁶⁰ Co	1121,290(20)
⁷⁵ Se	96,734(3)	¹¹³ Sn	391,688(7)	⁵⁶ Co	1175,095(23)
¹⁰⁹ Gd	97,432(3)	⁷⁵ Se	400,650(8)	¹⁶⁰ Tb	1177,970(22)
¹⁸² Ta	100,1067(19)	¹⁵² Eu	411,084(10)	¹⁸² Ta	1177,970(22)
¹⁵³ Gd	103,181(2)	¹⁹⁸ Hg	411,794(7)	¹⁶⁰ Tb	1199,904(23)
¹⁶⁹ Yb	109,784(3)	¹⁹² Ir	416,4501(79)	¹⁵² Eu	1212,895(23)
¹⁸² Ta	113,6677(22)	¹⁵² Eu	443,940(9)	¹⁸² Ta	1221,391(22)
¹⁸² Ta	116,4172(23)	¹¹⁰ Ag	446,802(11)	¹⁸² Ta	1230,988(23)
¹⁶⁹ Yb	118,191(3)	¹⁹² Ir	468,0546(82)	⁵⁶ Co	1238,271(22)
⁷⁵ Se	121,117(3)	⁸² Br	554,330(11)	¹⁸² Ta	1257,416(23)
¹⁵² Eu	121,782(3)	¹³⁴ Cs	563,231(11)	¹⁸² Ta	1271,896(24)
⁵⁷ Co	121,060(2)	¹³⁴ Cs	569,322(12)	¹⁸² Ta	1273,711(24)
¹⁶⁹ Yb	130,525(3)	²⁰⁷ Bi	569,683(11)	²² Na	1274,531(23)
¹⁴⁴ Ce	133,518(3)	¹⁹² Ir	588,5562(106)	¹⁸² Ta	1289,119(24)
⁷⁵ Se	136,000(3)	¹⁹² Ir	604,3942(106)	¹⁵² Eu	1289,119(24)
⁵⁷ Co	136,475(5)	¹³⁴ Cs	604,701(12)	¹⁶⁰ Tb	1312,174(26)
¹⁴¹ Ce	145,443(3)	¹⁹² Ir	612,4460(106)	⁸² Br	1317,459(25)
¹⁸² Ta	152,4298(29)	¹¹⁰ Ag	620,353(14)	⁶⁰ Co	1332,485(25)
¹⁸² Ta	156,3819(30)	¹⁷³ Lu	636,129(13)	⁵⁶ Co	1360,209(24)
¹³⁹ Ce	165,854(3)	¹¹⁰ Ag	657,744(13)	¹³⁴ Cs	1365,177(24)
¹⁷³ Lu	171,402(4)	¹³⁷ Cs	661,648(13)	²⁴ Na	1368,615(26)
¹⁶⁹ Yb	177,208(4)	¹¹⁰ Ag	677,613(14)	¹¹⁰ Ag	1384,285(26)
¹⁷³ Lu	179,363(4)	¹¹⁰ Ag	687,001(14)	¹⁵² Eu	1407,974(26)

3.3. § Yarimo‘tkazgichli spektrometrlarning energiya bo‘yicha qayd qilish effektivligi [4,7]

Spektrometrning effektivligi (ε_{eff}) deb, spektrometr tomonidan qayd qilingan zarralar sonini (N^*), manbadan hamma tomonga chiqayotgan umumiy zarralar soniga (N), bo‘lgan nisbatiga aytiladi. Odatda, yarimo‘tkazgichli spektrometrlarning effektivligi foizlarda beriladi:

$$\varepsilon = \frac{N^*}{N} \cdot 100\% \quad (5)$$

Yarimo‘tkazgichli spektrometrlarning zarralarni qayd qilish effektivligi absolyut va nisbiy usullar bilan ko‘riladi. Biz ularni alohida-alohida ko‘rib o‘tamiz.

Absolyut effektivlik. Yarimo‘tkazgichli detektorlarning absolyut effektivligini kurish uchun radioaktivligi olindan ma’lum bo‘lgan, ya’ni radioaktivligi bo‘yicha darajalangan radionuklidlardan foydalaniladi. Tajribada o‘lchash jarayoni oldindan belgilangan standart geometriyada hamda gamma-spektrdagi spektral chiziqlarning shakliga ta’sir qiluvchi barcha effektlarni hisobga olgan holda boriladi. Tajribada, ayniqsa xatoliklarni oshib ketmasligiga e’tibor bermoq kerak. Radioaktiv manbalar detektor ustiga bir xil standart geometriyada qo‘yilishiga, spektrometrning o‘lik vaqtiga, o‘lchash vaqtiga va radionuklidning yarim yemirilish davriga hamda boshqa kattaliklarni alohida hisobga olishga e’tibor bermoq kerak. Spektrometrning absolyut effektivligini hisoblash navbatdagi formula orqali olib boriladi:

$$\varepsilon_{abs} = \frac{S / \tau}{I \cdot \exp(-\lambda t)}, \quad (6)$$

bu yerda S – berilgan energiyadagi spektral chiziqning yuzasi; τ – o‘lchash vaqti; I – berilgan energiyada bir sekund davomida 4π fazoviy burchak bo‘yicha chiqadigan monoenergetik zarralar soni (radionuklidning pasportida berilgan bo‘ladi).

$\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ – radiofaol nuklid yemirilish ehtimoliyati (kun^{-1}); $T_{1/2}$ – radioaktiv nuklidning yarim yemirilish davri (sekund; kun; yil);

t – radioaktiv nuklidni attestatsiya qilgan kundan boshlab, o‘lchash vaqtigacha o‘tgan davr (kun), (attestatsiya qilingan vaqt radioaktiv nuklidning pasportida berilgan bo‘ladi).

Tajriba o‘tkazilgandan so‘ng, (5) formula bo‘yicha hisoblashlar olib boriladi. Tajriba o‘tkazish jarayonida hisoblashlar 3-jadvalda keltirilgan namunaviy gamma-spektrometrik radioaktiv manbalar (NGSRM) to‘g‘risidagi ma’lumotlardan foydalaniladi.

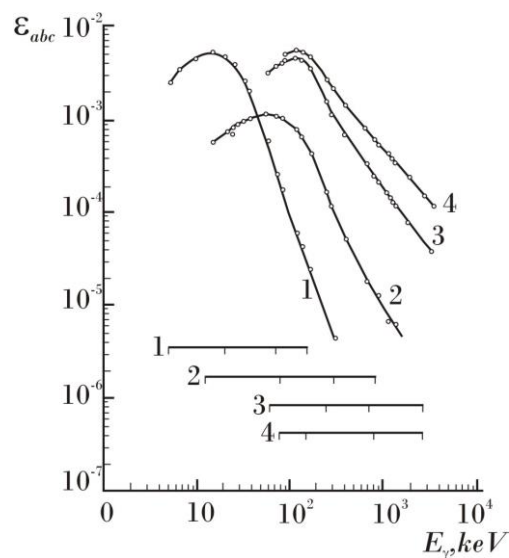
Talabalar o‘rganish uchun (5) formula yordamida NGSRM olingan hisoblash natijalari hajmi $80\text{mm}^2 \times 4\text{mm}$ bo‘lgan Si(Li)- va hajmlari 1,3; 11; 37sm^3 bo‘lgan Ge(Li)-detektorlari uchun keltirilgan.

Namunaviy gamma-spektrometrik radioaktiv nuklidlar asosida qurilgan spektrometrlarning absolyut effektivliklari 23-rasmda keltirilgan.

4-jadvalda keltirilgan barcha radioaktiv nuklidlarni energiya va nisbiy intensivliklari to‘g‘risidagi ma’lumotlar 4-jadvaldagi namunaviy gamma-spektrometrik radioaktiv nuklidlar asosida qurilgan spektrometrlarning absolyut effektivliklari yordamida olingan.

(6) formuladagi spektrometrning absolyut effektivligi ($\varepsilon_{abs.}$)ni hisoblash xatoligi quyidagi ifoda bilan hisoblaniladi:

$$\Delta\varepsilon_{abs} = \varepsilon_{abs} \left\{ \left(\frac{\Delta I}{I} \right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S} \right)^2 + \left(\frac{0,693\Delta t}{T_{1/2}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta\tau}{\tau} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (7)$$



23-rasm. Namunaviy gamma-spektrometrik radioaktiv nuklidlar asosida qurilgan spektrometrlarning absolyut effektivliklari.

1 – Si(Li)– $80\text{mm}^2 \times 4\text{mm}$; 2 – Ge(Li)– $1,3\text{sm}^3$;
3 – Ge(Li)– 11sm^3 ; 4 – Ge(Li)– 37sm^3 .

Namunaviy gamma-spektrometrik radiofaol nuklidlar to‘g‘risidagi asosiy ma’lumotlar.

Nuklid	$T_{1/2}$	$E_{\gamma} keV$	I	ΔI
^{341}Am	432,9(8)yil	59,54	35,9	0,6
^{109}Gd	453,2(18)kun	88,3	3,79	0,07
^{52}Go	269,8(4)kun	14,41	9,5	0,2
		122,06	85,6	0,4
		136,47	10,75	0,30
^{139}Ge	137,2(4)kun	165,85	80,35	0,08
^{203}Hg	46,78(8)kun	275,19	81,55	0,15
^{113}Sn	115,2(8)kun	255,12	1,9	0,1
		391,69	64,4	0,3
^{137}Cs	30,18(10)yil	661,65	85,1	0,5
^{54}Mn	312,5(3)yil	834,86	100	-
^{88}Y	107,4(8)yil	898,01	91,40	0,07
		1836,07	99,40	0,07
^{65}Zn	245,7(11)yil	1115,56	50,6	0,4
^{60}Co	5,275(5)yil	1173,24	99,74	0,05
		1332,49	99,85	0,02
^{22}Na	2,602(5)yil	1274,53	99,95	0,02
		1368,60	100	-
^{34}Na	15,030(3)yil	2753,97	99,85	0,02

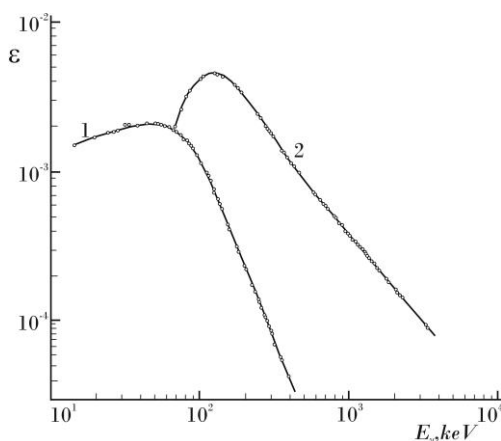
Nisbiy effektivlik. Yarimo‘tkazgichli spektrometrning nisbiy effektivligini topish absolyut effektivlikni aniqlashga nisbatan biroz oddiyroq. Bu usulda nisbiy intensivligi ma’lum bo‘lgan, radioaktiv nuklidlardan foydalanilsa bo‘ladi. Nisbiy effektivlikni topish quyidagi formula yordamida amalga oshiriladi:

$$\varepsilon_{nisb.} = \frac{S}{I} \quad (7)$$

Biz yarimo‘tkazgichli spektrometrning nisbiy effektivli-gini qurishda gamma-kvantlar nisbiy intensivliklari (3-5)% aniqlik bilan o‘lchangan bir qator radioaktiv nuklidlardan foydalanamiz. Bu radioaktiv nuklidlar: ^{75}Se ; ^{169}Yb ; ^{133}Ba ; ^{171}Lu ; ^{155}Gd ; ^{207}Bi ; ^{137}Cs ; ^{173}Lu ; ^{152}Eu ; $^{110\text{m}}\text{Ag}$; ^{160}Tb ; ^{182}Ta ; ^{192}Ir ; ^{226}Ra ; ^{56}Co ; ^{144}Ce lardir.

Bu radioaktiv nuklidlar tanlashiga sabab ularning yarim yemirilish davrlari ($T_{1/2} \geq 1$ yil) katta va olish texnologiyasi oson. Yarimo‘tkazgichli spektrometrning nisbiy effektivligini aniqlashda ishlatiladigan radionuklidlar gamma-kvantlarni energiya, nisbiy intensivligi va ularning xatoliklari 4-jadvalda keltirilgan. Bu yarimo‘tkazgichli spektrometrlar bilan tajriba o‘tkazuvchi va ilmiy ish olib boruvchi barcha talaba, ilmiy tadqiqotchilar uchun kerakli bo‘lgan ma’lumotlardir.

Misol tariqasida ishchi hajmlari $200\text{mm}^2 \times 5\text{mm}$ (1) va 38sm^3 (2) bo‘lgan Ge(Li)-spektrometrlarining nisbiy effektivliklari 19-rasmda keltirilgan. Bu spektrometrlarning nisbiy effektivliklarini qurishda 4-jadvalda keltirilgan radioaktiv nuklidlarni nisbiy intensivliklaridan foydalanildi.



24-rasm. Hajmlari $200\text{mm}^2 \times 5\text{mm}$ (1) va 38sm^3 (2) bo‘lgan Ge(Li)-spektrometrlarining nisbiy effektivliklari.

Yarimo‘tkazgichli spektrometrning nochiziqligi. Yarimo‘tkazgichli spektrometrning nochiziqligi spektrometrning asosiy xususiyatlaridan biri bo‘lib, yadro spektroskopiyasidan o‘ta aniq (pretsizion) eksperimentlar o‘tkazishda uni albatta hisobga olish lozim. Biror radioaktiv nuklid chiqarayotgan gamma-kvantlar energiyasini o‘ta aniqlik bilan o‘lchash uchun yarimo‘tkazgichli spektrometr nochiziqligining muhimligini bilish talab etiladi. Aks holda gamma-kvantlar energiyasini o‘lchashda va ularning xatoli-gini baholashda ancha noaniqliklarga

olib keladi. Demak, yarimo'tkazgichli spektrometrning nochiziqligi uni muhim xususiyatlardan biri hisoblanib, yadroviy nurlanishlar (α -, β -, γ -)ni energiyasini o'lchashda muhim rol o'ynar ekan.

Yarimo'tkazgichli spektrometrlarning nochiziqligini o'lchashda ikkita ixtiyoriy turli xil energiyali spektral chiziq bitta to'g'ri chiziq ustida yotadi deb qaraladi. Bunda V_1 va V_2 koeffitsientlar quyidagi tenglamadan topiladi:

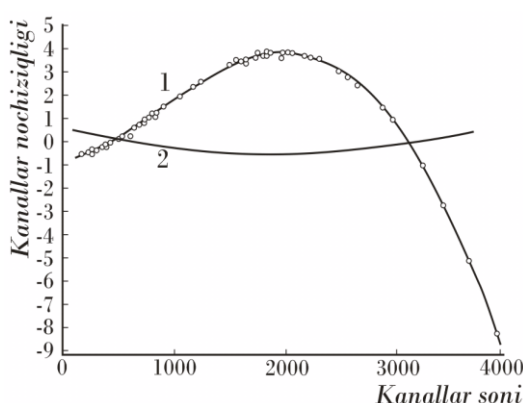
$$E = V_1 R + V_2 R$$

$$\begin{aligned} B_1 &= \frac{E_1 P_2 - E_2 P_1}{P_2 - P_1} \\ B_2 &= \frac{E_1 - E_2}{P_1 - P_2} \end{aligned} \quad (8)$$

bunda R_1, R_2 – 1 va 2 spektral chiziqlarning maksimum holatlari.

Bulardan ko'rish mumkinki, yarimo'tkazgichli spektrometrning nochiziqliklarini ko'rishning aniqlik darajasi $(R_1 - R_2)$ ning farqini tanlashga bog'liq. Xuddi shuningdek, yadroviy nurlanishlar spektrini o'lchashda, zarralar energiyasini o'ta aniqlik bilan baholash ham shunga bog'liq ($R_1 - R_2 > 3500$) bo'ladi.

(8) formula yordamida energiyasi ma'lum spektral chiziqlar holatlarining qiymati hisoblanib topildi va $\delta_j = R - R_j$ bilan analizator kanallari o'rtasidagi bog'liqlik grafigi chiziladi. Misol tariqasida spektrometrlarning nochiziqligi 25-rasmda keltirilgan.



25-rasm. Yarimo'tkazgichli spektrometrning nochiziqligi.

Ushbu rasmdan ko‘rinadiki, har bir spektrometr uchun doimiy tayanch nuqtalari tanlangan. O‘lchash jarayoni turli etalon radioaktiv nuklidlar yordamida olib borilgan. Ushbu reja yordamida bir necha seriyalarni o‘tkazish imkoniyati mavjud. Eksperimental nuqtalar esa quyidagi polinom bilan approksimatsiya qilinadi:

$$\delta_j = \sum_{i=1}^M A(i)P_j^{i-1} \quad (9)$$

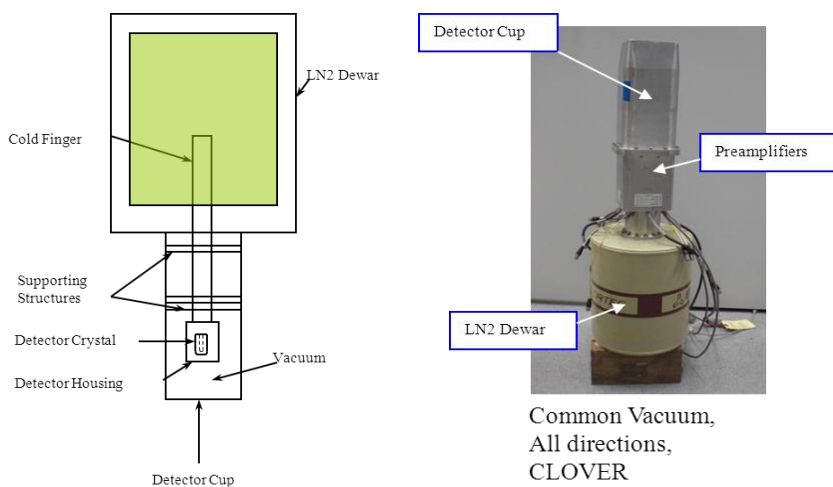
(9)da $M=2-5$. Berilgan diapazonda M ning optimal qiymati quyidagi qiymat tahlili asosida tanlanadi:

$$\Delta_j = \delta_{taj.}(R_1) - \delta_{hisob}(R_1). \quad (10)$$

Butun spektrometr nochiziqligidagi approksimatsiya qilinadigan qismlar (uchastkalar) soni $M > 5$ bo‘lishi kerak.

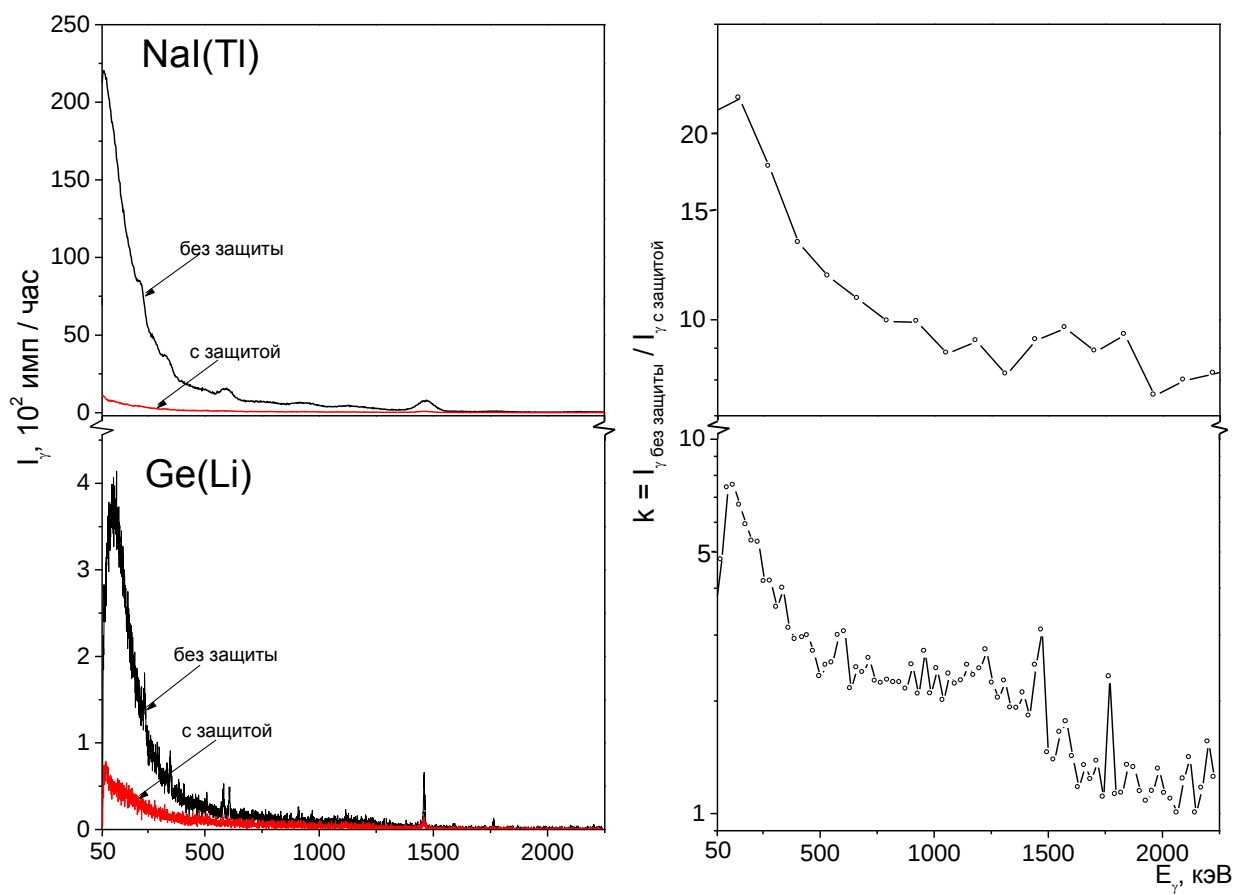


26–rasm. NaI(Tl) ssintilyatsoin gamm-spektrometrni umumiy kurinishi

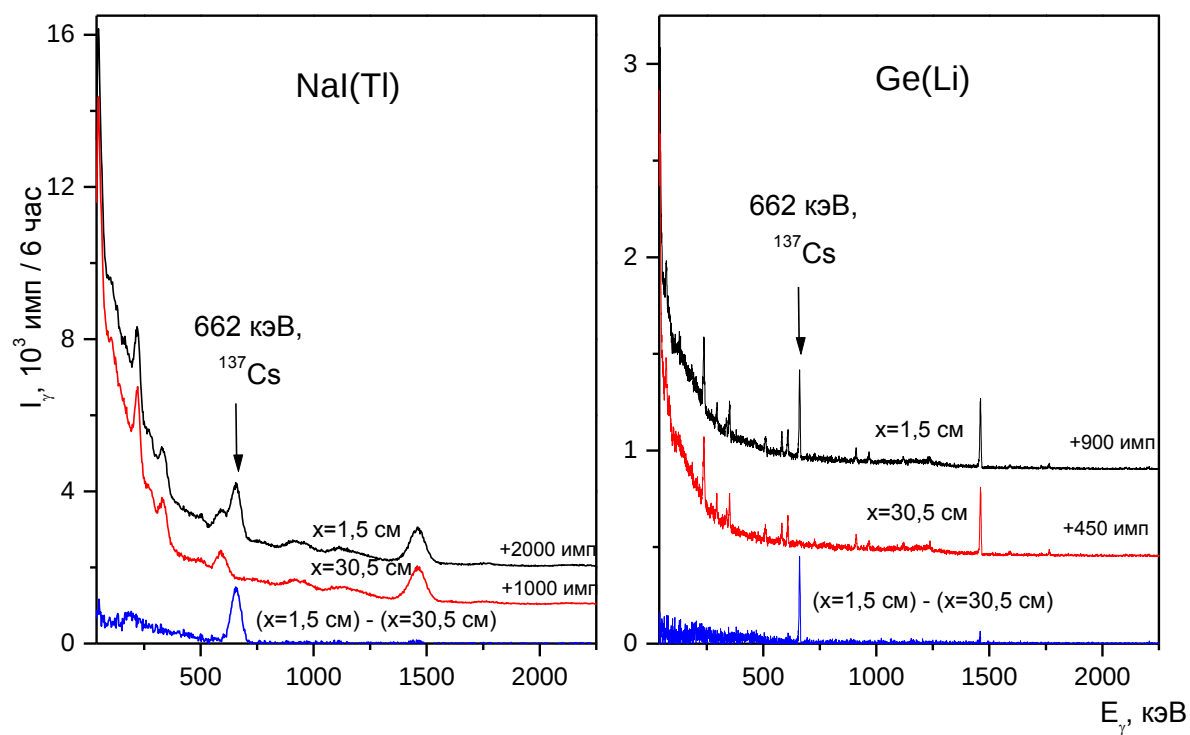


27-rasm. Yarimo‘tkazgichli Ge-detektorlarning tashqi ko‘rinishi

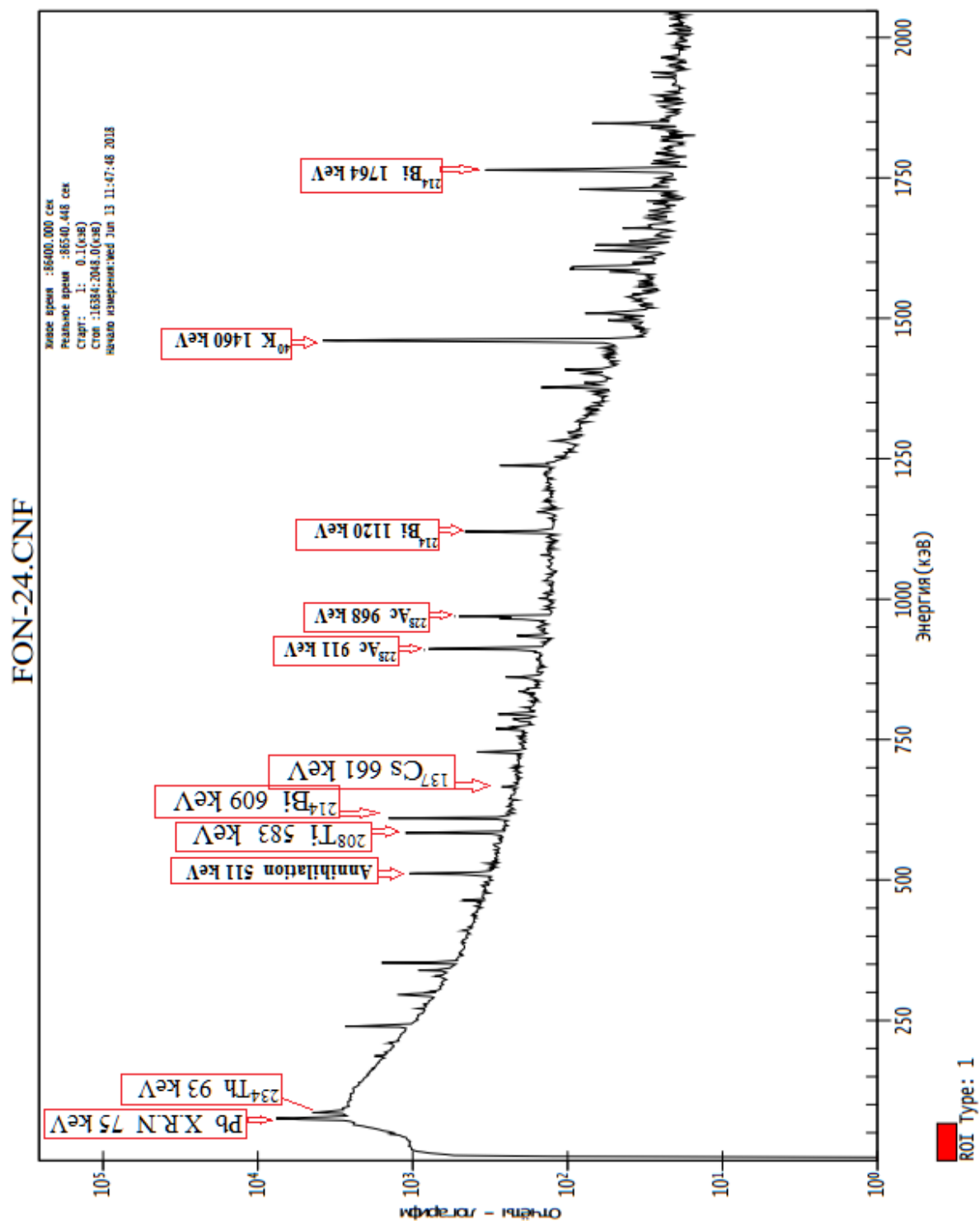
3.4. § Olingan natijalar va ularning tahlili



28-rasm. Ge(Li) detektori orqali tabiiy fonni himoya ekransiz va himoyalovchi ekran bilan olingan spektrlari. Himoyalovchi ekran fonni susaytiradi



29 rasm. Ssintilyatsion va yarimo'tkazgichli gamma spektrometr yordamida olingan gamma spektrni ko'rinishi.



30-rasm. Tabiiy fon spektri

Fon spektrdan olingan natijalar

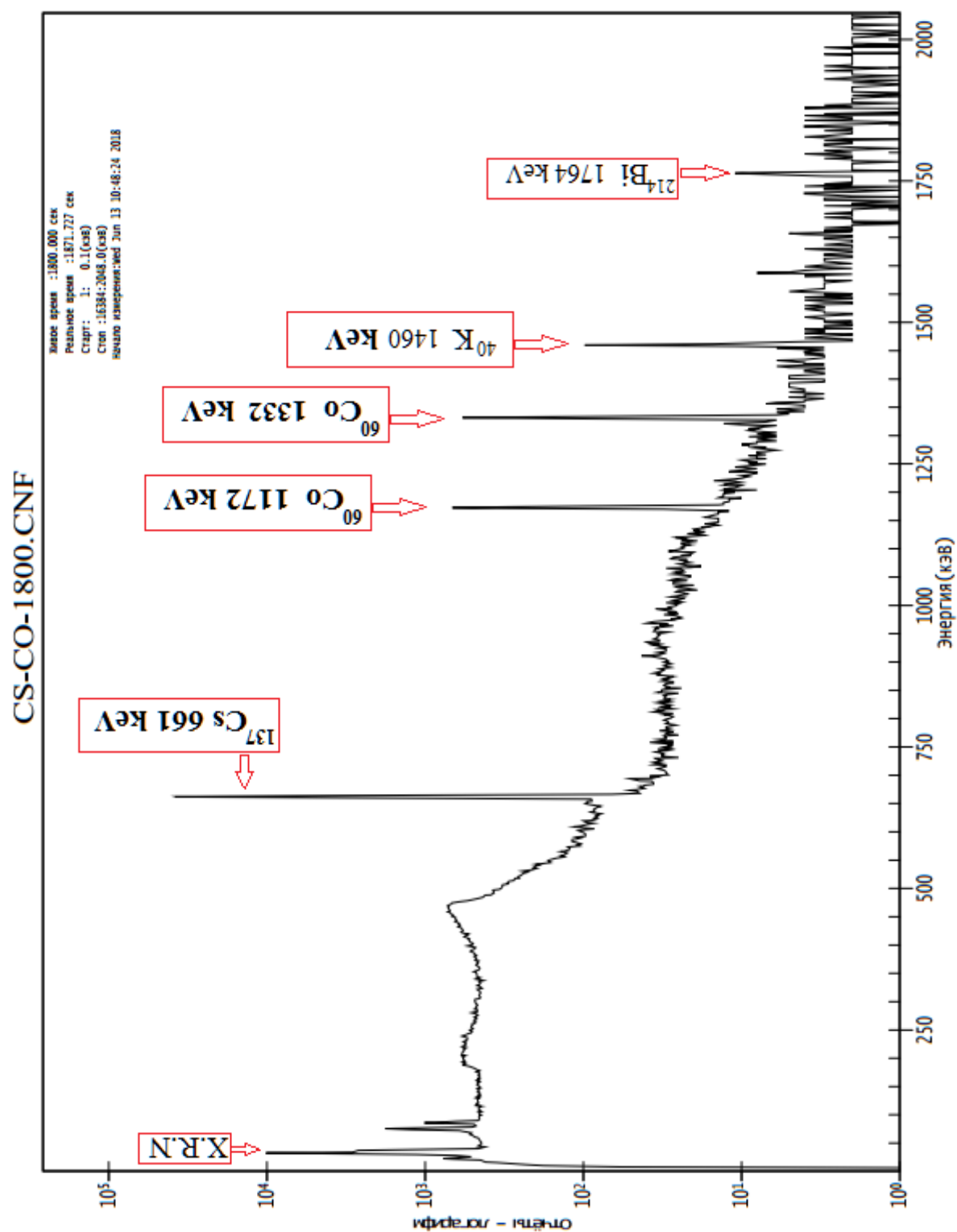
 ***** ОТЧЁТ ОБ АНАЛИЗЕ ПИКОВ *****

Детектор : MP2_MCA2
 Имя образца : Background
 Дата/время анализа пиков: 6/14/2018 12:28:35 PM
 Первый канал при анализе: 1
 Последний канал при анализе: 16384

№ пика	Начало	Конец	Центроида, каналы	Энергия, кэВ	ПППВ, кэВ	Чистая площадь	Погрешность
1	53-	87	69.86	8.73	1.60	4.60E+003	181.67
2	359-	392	378.59	47.32	1.22	2.85E+003	459.99
3	492-	522	512.65	64.08	0.24	1.74E+003	569.35
4	567-	626	588.96	73.62	1.70	3.46E+004	344.02
5	567-	626	606.28	75.78	1.71	6.42E+004	421.57
6	663-	770	684.86	85.61	1.92	2.89E+004	356.03
7	663-	770	705.90	88.24	1.93	1.42E+004	297.24
8	663-	770	750.34	93.79	1.94	4.90E+003	274.93
9	1032-	1056	1040.38	130.05	0.13	5.58E+002	486.41
10	1475-	1517	1495.39	186.92	1.09	4.16E+003	634.77
11	1662-	1697	1681.60	210.20	0.47	2.03E+003	495.60
12	1892-	1964	1916.58	239.57	1.76	2.47E+004	246.38
13	1892-	1964	1940.64	242.58	1.76	5.62E+003	172.83
14	2151-	2183	2169.30	271.16	1.39	1.88E+003	367.42
15	2214-	2251	2229.62	278.70	0.57	1.53E+003	403.98
16	2344-	2425	2368.84	296.10	1.77	8.56E+003	182.27
17	2344-	2425	2408.11	301.01	1.78	1.75E+003	136.33
18	2612-	2653	2631.45	328.93	0.49	1.68E+003	389.09
19	2690-	2736	2713.64	339.20	1.68	5.66E+003	422.96
20	2797-	2847	2822.21	352.78	1.71	1.65E+004	448.90
21	3268-	3300	3283.58	410.45	0.23	6.39E+002	261.51
22	3690-	3728	3711.65	463.96	1.56	2.52E+003	273.55
23	4066-	4120	4093.31	511.66	2.42	1.55E+004	379.17
24	4492-	4524	4505.96	563.24	0.36	4.00E+002	205.40
25	4643-	4698	4671.15	583.89	1.89	1.44E+004	347.35
26	4853-	4907	4880.07	610.01	1.86	1.88E+004	342.67
27	5307-	5349	5327.67	665.96	0.23	6.72E+002	234.06
28	5796-	5842	5823.17	727.90	1.87	3.22E+003	245.02
29	5928-	5957	5945.47	743.18	0.48	2.45E+002	153.31
30	6025-	6063	6045.45	755.68	0.31	3.42E+002	196.21
31	6131-	6203	6151.13	768.89	1.83	1.69E+003	89.85
32	6131-	6203	6184.94	773.12	1.84	4.71E+002	70.62
33	6269-	6387	6291.82	786.48	2.19	9.00E+002	78.72
34	6269-	6387	6364.53	795.57	2.19	2.09E+003	91.58
35	6436-	6478	6453.65	806.71	0.22	7.88E+002	195.86
36	6673-	6743	6690.31	836.29	2.35	8.29E+002	76.41
37	6673-	6743	6722.88	840.36	2.35	6.74E+002	75.10
38	6866-	6912	6889.03	861.13	1.83	1.80E+003	217.33
39	7219-	7323	7236.02	904.50	2.08	2.90E+002	64.81
40	7219-	7323	7293.52	911.69	2.09	1.14E+004	132.32
41	7445-	7494	7476.18	934.52	1.16	1.34E+003	211.41
42	7699-	7785	7720.90	965.11	2.18	2.53E+003	81.05

Отчёт об анализе пиков 6/14/2018 12:28:35 PM

№ пика	Начало	Конец	Центроида, каналы	Энергия, кЭВ	ПШПВ, кЭВ	Чистая площадь	Погрешность
43	7699-	7785	7754.97	969.37	2.19	7.20E+003	109.97
44	7998-	8023	8010.52	1001.32	0.29	3.43E+002	112.87
45	8083-	8108	8095.52	1011.94	0.17	1.16E+002	109.47
46	8246-	8279	8262.46	1032.81	0.29	2.04E+002	140.02
47	8936-	8994	8962.94	1120.37	2.14	6.12E+003	250.60
48	9220-	9266	9242.43	1155.30	1.19	9.53E+002	185.72
49	9876-	9933	9904.64	1238.08	1.91	2.75E+003	235.31
50	10013-	10042	10026.70	1253.34	0.26	2.55E+002	113.02
51	10223-	10263	10244.33	1280.54	0.17	4.50E+002	144.53
52	10519-	10546	10532.03	1316.50	0.13	2.60E+001	91.95
53	10780-	10809	10793.31	1349.16	0.28	6.51E+001	83.53
54	10994-	11101	11019.98	1377.50	2.28	1.74E+003	62.17
55	10994-	11101	11083.17	1385.40	2.28	4.20E+002	43.87
56	11190-	11288	11210.97	1401.37	2.45	6.10E+002	47.32
57	11190-	11288	11262.87	1407.86	2.45	1.03E+003	55.57
58	11650-	11719	11685.12	1460.64	2.25	7.50E+004	313.03
59	11948-	12094	11966.92	1495.86	2.10	3.15E+002	35.15
60	11948-	12094	12013.99	1501.75	2.10	7.04E+001	29.82
61	11948-	12094	12072.73	1509.09	2.11	8.33E+002	45.39
62	12291-	12406	12304.97	1538.12	1.27	8.58E+001	24.85
63	12291-	12406	12341.36	1542.67	1.27	1.06E+002	25.49
64	12291-	12406	12392.30	1549.04	1.27	6.01E+001	21.66
65	12626-	12764	12640.99	1580.12	2.43	1.20E+002	25.80
66	12626-	12764	12665.32	1583.17	2.43	1.97E+002	27.35
67	12626-	12764	12703.65	1587.96	2.43	1.32E+003	40.43
68	12626-	12764	12737.81	1592.23	2.43	1.24E+003	39.49
69	12940-	13115	12962.74	1620.34	2.24	6.90E+002	38.73
70	12940-	13115	13042.66	1630.33	2.25	6.07E+002	36.87
71	12940-	13115	13101.89	1637.74	2.25	1.77E+002	27.69
72	13268-	13312	13287.98	1661.00	0.31	4.00E+002	74.36
73	13810-	13862	13834.58	1729.32	1.67	1.30E+003	85.01
74	14079-	14147	14112.89	1764.11	2.31	6.75E+003	124.02
75	14688-	14804	14701.33	1837.67	2.48	9.58E+001	24.5
76	14688-	14804	14776.04	1847.00	2.48	8.29E+002	40.44
77	16149-	16180	16164.62	2020.58	0.32	-1.23E+001	45.08



31-рasm. Нуqtaviy манбалардан оlingан спектр

Nuqtaviy manbalarning spektridan olingan natijalar

 **** ОТЧЁТ ОБ АНАЛИЗЕ ПИКОВ *****

Детектор : MP2_MCA2
 Имя образца : Sample title.
 Дата/время анализа пиков: 6/14/2018 12:26:13 PM
 Первый канал при анализе: 1
 Последний канал при анализе: 16384

№ пика	Начало	Конец	Центроида, каналы	Энергия, кэВ	ПППВ, кэВ	Чистая площадь	Погрешность
1	57-	86	68.84	8.61	1.04	1.40E+003	105.15
2	162-	231	180.92	22.61	1.59	-3.37E+003	652.67
3	243-	316	261.79	32.72	1.96	1.51E+005	432.75
4	243-	316	297.80	37.23	1.97	3.54E+004	231.79
5	348-	363	355.79	44.47	0.16	5.98E+001	138.46
6	567-	627	589.32	73.66	1.90	1.06E+004	184.69
7	567-	627	606.65	75.83	1.90	1.92E+004	221.40
8	664-	727	685.55	85.69	1.96	9.07E+003	171.06
9	664-	727	705.73	88.22	1.97	3.38E+003	131.55
10	2806-	2837	2822.61	352.83	0.19	4.91E+002	260.52
11	4658-	4694	4669.99	583.75	0.13	4.21E+002	135.68
12	4865-	4902	4879.07	609.88	0.14	3.73E+002	132.19
13	5268-	5325	5296.88	662.11	2.12	6.82E+005	848.87
14	7277-	7302	7289.29	911.16	0.51	1.58E+002	53.08
15	7738-	7767	7751.80	968.97	0.51	1.45E+002	55.11
16	9350-	9415	9382.65	1172.83	2.38	1.34E+004	136.29
17	9746-	9773	9759.56	1219.95	0.19	1.21E+001	27.39
18	10566-	10689	10574.67	1321.83	2.45	3.98E+000	14.14
19	10566-	10689	10655.56	1331.94	2.45	1.16E+004	105.61
20	11654-	11707	11680.89	1460.11	1.44	1.43E+003	48.73
21	12686-	12715	12700.68	1587.58	0.15	3.36E+001	10.99
22	13818-	13847	13832.44	1729.05	0.16	1.26E+001	12.50
23	14095-	14124	14109.13	1763.64	0.55	1.27E+002	14.67

Detektorning energiya bo'yicha ajrata olish qobiliyati deb energiyaviy spektr taqsimotidagi cho'qqi yarim balandligi kengligi ΔE ning bu taqsimotidagi monoenergetik zarralarning o'rtacha energiyasi (E)ga nisbatiga ya'ni $\frac{\Delta E}{E}$ ga aytiladi. Energiya bo'yicha ajrata olish kattaligini detektor chikishidagi signallarni ajrata olish bilan bog'lash mumkin.

Agar $V = f(E)$ deb hisoblasak, u holda

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta V}{V} \frac{f(E)}{f(E)E}$$

Signal kattaligini zarra energiyasiga proporsionalligini hisobga olsak,

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta V}{V}$$

ga ega bo'lamiz.

Aytaylik detektorga har xil energiyali 2 guruh zarralar kelib tushayotgan bo'lsin. Bu zarralarning signallari kattaligi o'rtacha qiymati $\bar{V}_1$ va $\bar{V}_2$ shu taqsimotning maksimal va minimal qiymatidan iborat.

Detektorning energiya bo'yicha ajrata olish dispersiyasi bilan quyidagicha bog'lanishda bo'ladi.

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta V}{V} \frac{f(E)}{f(E)E} = \frac{2\sqrt{2D\ln 2}}{V} \frac{f(E)}{f(E)E} = 2.36 \frac{D}{V} \frac{f(E)}{f(E)E}$$

Energiyaviy ajrata olishni Fano koefitsienti (F) orqali quyidagicha yozishimiz mumkin

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{2.36\sqrt{F}}{\sqrt{\frac{E}{W}}} \frac{f(E)}{f(E)E}$$

Energiyaviy ajrata olish kattaligi $\frac{I}{\sqrt{E}}$, energiya ortishi bilan kamayadi.

Germaniy va kremniy uchun Fano koefitsienti qiymati 0,1 dan 0,3 oraliqda bo'ladi.

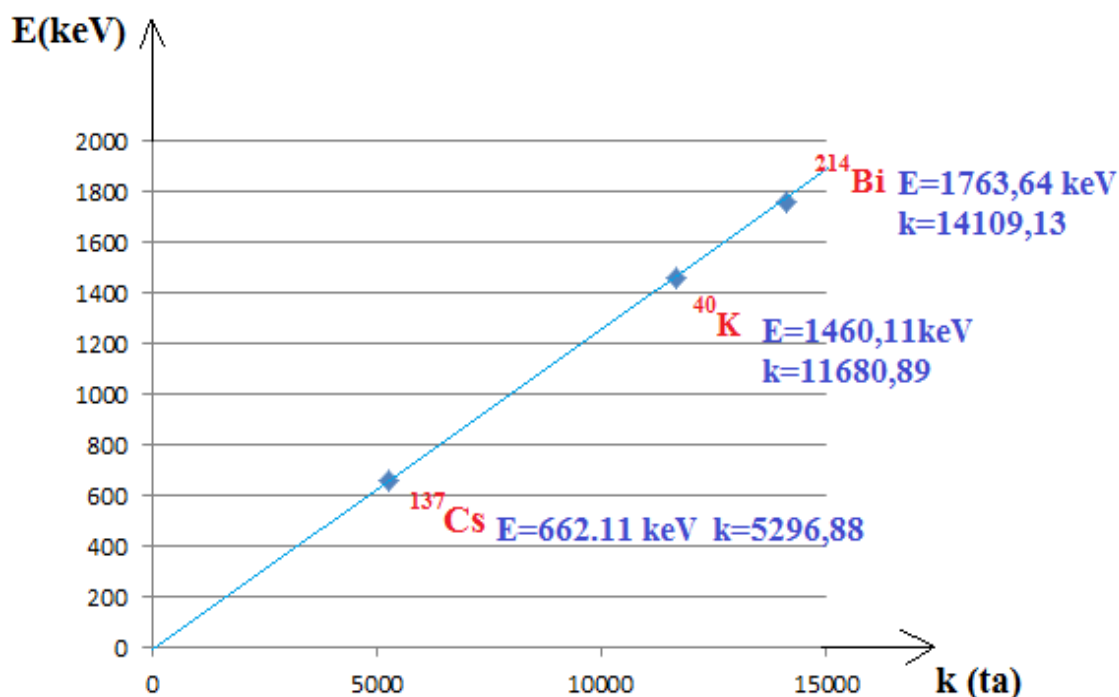
Gamma spektrdagi fotocho'qqining boshlang'ich va oxirgi holatlari belgilinadi va ular to'g'ri chiziq bilan tutashtiriladi, hamda to'g'ri chiziq bilan fotocho'qqini maksimal balandligi orasidagi masofa o'lchanib teng yarmi

belgilanadi, ΔE kengligi nechta kanalga mos kelganligi sanaladi va quyidagi ifoda orqali ajrata olish qobiliyati topiladi.

$$\Delta E = \frac{E_2 - E_1}{N_2 - N_1} K$$

Bunda ΔE energiya bo'yicha ajrata olish qobiliyati, E_1 birinchi fotocho'qqi energiyasi, N_1 shu energiyaga mos keluvchi kanalning nomeri, K fotocho'qqining kanallar sonidagi yarim kengligi. Bizning ishimizda ^{137}Cs , ^{40}K , ^{214}Bi va ^{208}Tl fotocho'qqilari spektrda yaqqol ko'rinadi shu fotocho'qqilar asosida detektorni energiya bo'yicha ajrata olish qobiliyatini hisobladik

Detektorning energiya bo'yicha darajalash (graduirovkasi)



32-rasim spektrning energiya bo'yicha graduirovkasi

XULOSA

Hajmlari 1 sm^3 va 37 sm^3 ga teng bo'lgan Ge(Li)-yarimo'tkazgichli detektorlar yordamida ^{60}Co radionuklidi-ning gamma-spektri keltirilgan. Ushbu spektrdan ko'rish mumkinki, detektorlarning (1 sm^3 va 37 sm^3) ajrata olish qobiliyatlari nihoyatda yuqori bo'lib, ^{60}Co radionuklidining energiyasi 1332,50 keV ga teng bo'lgan gamma-spektral chizig'ida $E_\gamma=1,8$ va $E_\gamma=2,1$ keV. Bundan tashqari spektral chiziq amplitudasi va Kompton chegarasining balandliklari ham ko'rsatilgan.

Qalinligi 1mm va yuzasi 10mm^2 li metall yarimo'tkazgich metall xona temperaturasi 59,5 keV energiyali gamma kvantlar uchun spektrning yarim kengligi 1,7 keV, 122 keV uchun 3,2 keV va 662 keV uchun 20 keV-ga teng. Agar detektorning Petle termoparalari yordamida to 30°C –gacha sovitilsa unda sovqin toklari yuqoladi unda 662 keVli gamma kvant uchun 10-15 keVga erishish mumkin. Metal yarimo'tkazgich metal strukturali detektorlar fan va texnikada keng qo'llanilmoqda. Asosan yadro medisinasida bemorning qon aylanish sistemasida radioaktiv element yuboriladi va kasallangan organizmda lokallizasiyalanishi natijasida aniqlash mumkin, buyrak ishlashini kuzatishda, suyaklarni zichligini hisoblashda, atelosklerozni davolashda qon tomirlarining shuntlanishini aniqlashda keng qo'llaniladi. Tomografiya sistemasida agar $30 \times 30 \text{ sm}$ yuzani kremniyli detektor bilan 40 sekund o'lchansa HpGe -detektori bilan 4 sekundda o'lchanadi. Hozirda reaktorlarning yoqilg'i bloklarini tarkibiga uran va plutoniy miqdorini aniqlashda HPGe -toza germaniyli detektor qulayligi bilan ajralib turadi.

Hozirgi kunda yadro spektroskopiyasida hajmi $200\text{--}300 \text{ mm}^3$ HPGe detektori keng qo'llanilmoqda va spektrni 661 keV-li fotocho'qqisi uchun ajrata olish qobiliyati 2,6 keV teng bu esa oz navbatida dala sharoitida ekspress natijalar olish uchun qulay hisoblanadi.

ADABIYOTLAR:

1. Mo'minov T.M., Xushmurodov Sh.X., Xoliqulov A.B. Atom yadrosi zarralar fizikasi. O'quv qo'llanma, Samarqand, 2004.
2. Акоста В., Кован К., Грем Б. Основы современной физики. М. 1981
3. Salixbayev U., Hazratov T., Xushmurodov Sh., Xoliqulov A. Yadro fizikasidan laboratoriya ishlari. SamDU nashriyoti, 2000.
4. Мейер Н.В., Ваганов П.А. Основы ядерной геофизики. Ленинград, 1978.
5. Ахмедова Г., Боймуродов Х. Радиоэкологическое состояние почв различных географических районов. Материалы научно-практической конференции «Теоретические и прикладные проблемы географии на рубеже столетий» 8-9 июня, Алмата, 2004.
6. Ahmedova G., Amirillayeva B. Tabiatda radionuklidlar. Olimalarning qishloqda taraqqiyot va va farovonligini ta'minlashdagi roli. Respublika ilmiy-amaliy anjumani materiallari. 10 sentabr 2009 yil, Samarqand-2009.
7. Муминов И.Т., Ахмедова Г., Азимов А. и др. Радионуклиды в почвах адыров каратюбинских гор. Ташкент-2010.
8. Максимов М.Т., Оджагов Г.О. Радиоактивные загрязнения и их измерение. М. Энергоатомиздат, 1989.
9. Ahmedova G., Bozorova Sh. Tuproqning radioaktivligi. O'zbek ta'lim modeli ijrosi va barkamol shaxsni tarbiyalashda olimalarning o'rni mavzusidagi ilmiy-amaliy konferensiya materiallari. Samarqand 2012 yil 26-27 dekabr.
10. Азимов А.Н., Ахмедова Г., Муминов И.Т., Сафаров А.Н., Холикулова А.Б., Хушмуродов Ш.Х., Маматкулов О.Б. Радионуклид Be^7 в почвах Каратюбинских гор. Замоновий физика ва астрономиянинг долзарб муаммолари. II илмий-амалий конференция материаллари, Самарқанд, 2010.
11. Ахмедова Г., Бозоров М., Маматкулов О.Б., Тўраев Э.С., Хазратов Т. Радиоэкологик муаммолар. Ўзбекистонда таълим тизимида ўзаро ҳамкорлик сифати ва самарадорлигини оширишнинг назарий-амалий муаммолари.

Иккинчи илмий-амалий конференция материаллари, 1-қисм, Самарқанд, 2010.

12. Иродов И.Б. Задачи по общей физики. – Москва: МГУ, 2001.
13. Korolev F.A. Fizika kursi. Optika, atom va yadro fizikasi. – Toshkent: O‘qituvchi, 1978. – 616 b.
14. Ливенцев Н.М. Курс физики. Атомная и ядерная физика. – Москва: Высшая школа, 1978.
15. Матвеев А.Н. Атомная физика. – Москва: Высшая школа, 1989. – 439 с.
16. Нерсесов Э.А. Основные законы атомной и ядерной физики. – Москва: Высшая школа, 1988. – 288 с.
17. Рунов Н.Н. Строение атомов и молекул. – Москва: Просвещение, 1987.
18. Savelev I.V. Umumiy fizika kursi. III tom. – Toshkent: O‘qituvchi, 1976. – 449 b.
19. Сивухин Д.В. Общей курс физики. Атомная и ядерная физика. Ч.1. – Москва: Наука, 1986. – 415 с.
20. Chertov A., Vorobyov A. Fizikadan masalalar to‘plami. – Toshkent: O‘zbekiston, 1997. – 604 b.
21. Shpolskiy E.V. Atom fizikasi. I tom. – Toshkent: O‘qituvchi, 1970. – 584 b.