



ZRÍNYI MIKLÓS NEMZETVÉDELMI EGYETEM
BOLYAI JÁNOS KATONAI MŰSZAKI KAR
Katonai Műszaki Doktori Iskola

Alapítva: 2002 évben

Nagy Gábor

HORDOZHATÓ ENERGIASZELEKTÍV
SUGÁRZÁSMÉRŐ SZONDA
KIFEJLESZTÉSE PIN DIÓDA
ALKALMAZÁSÁVAL

Doktori (PhD) értekezés

Témavezető:

Dr. habil. Vincze Árpád

Budapest, 2010

Tartalom

BEVEZETÉS	4
1. FEJEZET NAPJAINKBAN HASZNÁLT TEREPI IZOTÓPSZELEKTÍV ESZKÖZÖK VIZSGÁLATA.....	8
1.1. Nukleáris sugárzások energiaspektruma	8
1.2. A NATO in-situ, izotópszelektív sugárhelyzet monitorozási eljárásai.....	9
1.3. Magyar Honvédség terepi sugár felderítő eszközparkja	11
1.4. Magyar Honvédség HAVÁRIA készenléti szolgálat izotópszelektív eszközeinek bemutatása	16
1.5. Izotópszelektív eszközök terepi használatának elemzése	21
1.5.1. „Ideális” terepi detektor	25
Következtetések.....	26
2. FEJEZET FÉLVEZETŐ ESZKÖZÖK, MINT FÉNYÉRZÉKELŐ DETEKTOROK.....	27
2.1. Szcintillációs mérés technika	27
2.2. Félvezető alaptulajdonságai, sáv szerkezet	28
2.3. p-n átmenet.....	31
2.4. Diódák, PIN dióda.....	33
2.5. A fotoelektron-sokszorozó és a PIN dióda összehasonlítása	35
2.6. PIN dióda alkalmazása napjainkban	37
Következtetések.....	45
3. FEJEZET PIN DIÓDÁS DETEKTORRENDSZER KIALAKÍTÁSA	46
3.1. A detektorrendszer felépítése	46
3.1.1. Töltés érzékeny előerősítő.....	47
3.1.2. A detektor csatolása az előerősítőhöz	52
3.1.3. Jelformáló főerősítő	53
3.2. Zajszámítás.....	55
3.2.1. Zaj definíciója és hatásai	55
3.2.2. A PIN dióda saját zaja.....	57
3.2.3. A detektor és az előerősítő zajanalízise	59
3.3. A prototípus összeállítása.....	64
3.3.1. Szcintillátor kristály kiválasztása	64
3.3.2. PIN dióda kiválasztása	67
3.3.3. A töltés érzékeny erősítő kialakítása.....	69
3.3.4. Jelformáló főerősítő kialakítása	71

Következtetések.....	72
4. FEJEZET PIN DIÓDÁS DETEKTORRENDSZER, MINT IZOTÓPSZELEKTÍV ESZKÖZ.....	73
4.1. A teljes rendszer elektromos tulajdonságainak meghatározása	73
4.1.1. A kialakított moduláris rendszer tulajdonságai.....	76
4.2. A kialakított rendszer radioaktív forrásokkal történő vizsgálata	77
4.2.1 A PIN dióda saját háttérének vizsgálata	87
Következtetések.....	87
ÖSSZEFOGLALÁS	89
ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	90
AJÁNLÁSOK, JAVASLATOK	91
HIVATKOZÁSOK	92
TÉMAKÖRBŐL KÉSZÜLT PUBLIKÁCIÓIM	94

BEVEZETÉS

A hordozható izotópszелеktiv eszközök széles körben használatosak, mint például a környezet radiológiai monitorozása, a katasztrófavédelem/nukleáris-baleset elhárítás, a radioaktív anyagok illegális kereskedelme, a NAÜ biztosítéki ellenőrzések (safeguards) és a katonai műveletek ABV támogatása területén. Magyarországon a honvédség, a Paksi Atomerőmű, az Országos Élelmiszervizsgáló Intézet, különböző kutató intézetek (AEKI, OSSKI), különböző egyetemek és az Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság rendelkezik hordozható izotópszелеktiv eszközzel.

Dolgozatomban elsősorban a katonai területen alkalmazott eszközökkel foglalkozom és a kutatásom is ilyen alkalmazásra koncentrál. Jelenleg a Honvédség helyszínre vonuló egységei közül, csak a HAVÁRIA laboratórium rendelkezik izotópszелеktiv eszközökkel. Ezek hátrányos tulajdonságokkal rendelkeznek a terepi alkalmazhatóságukat tekintve. Ezt felismerve kezdtem bele kutatásomba, melynek középpontjába tehát egy olyan sugázmérő szonda kifejlesztését helyeztem, amely tulajdonságai jobban alkalmazkodnak a terepi igénybevételhez, és megfelelő alapot nyújthat más, helyszínre vonuló egység számára is.

A Magyar Köztársaság NATO csatlakozása után, a 2000-2009 közötti időszakban, a Magyar Honvédség csapatainak sugárfelderítő képessége jelentősen javult. Ellátták a csapatokat IH-95 sugárszint- és szennyezettségmérő műszerrel, a vegyivédelmi szakcsapatoknál megjelentek a korszerű járműfedélzeti sugárfelderítés eszközei, előbb a VS BRDM-2, majd a VS-BTR harcjárműveken. Rendszeresítésre került a „Légi sugárfelderítő konténer”, ami négy csatornás (közelítő) gamma spektroszkópiára is alkalmas. A HAVÁRIA laboratóriumhoz beszerezték gammasugárzó radioaktív izotópok azonosítására alkalmas nagytisztaságú germánium félvezető detektorokat.

A Magyar Honvédségnek a NATO SIRA kézikönyvben [1] meghatározott követelményeknek kell megfelelni a detektálás, felderítés és azonosítás területén. Ezen követelmények közül az egyik legfontosabb, hogy a szakalegységeket el kell látni olyan hordozható és gépjárműre szerelhető gamma spektroszkóppal, amely alkalmas a gyakoribb gammasugárzó radioaktív izotópok terepi azonosítására.

A talajra kihullott gammasugárzó radioaktív izotópok gyors, helyszíni kimutatására alkalmas eszközök már ismertek. Ezek a többnyire félvezető detektort és sokcsatornás analizátort

alkalmazó eszközök drágák, óvatos kezelést és speciális szakértelmet igényelnek, katonai alkalmazhatóságuk gyakran nehézségekbe ütközik.

A szennyezettség izotópszelektív kimutatására alkalmasak még a szilárd szcintillációs detektorokat alkalmazó spektrométerek is, ezek működéséhez azonban egy a környezeti körülményekre (hőmérséklet, mechanikai igénybevétel, stb.) érzékeny fotoelektron-sokszorozóra van szükség [2]. A fotoelektron-sokszorozó kevésbé érzékeny komponenssel történő kiváltásával és a hozzá tartozó elektronikának a miniatürizálásával jelentős méretbeli, fogyasztásbeli és a mechanikai érzékenységbeli csökkenés érhető el.

A fotoelektron-sokszorozó kiváltására ígéretes eszköz lehet egy speciális félvezető eszköz, a PIN dióda [3]. A PIN dióda a fotoelektron-sokszorozóhoz képest számos előnyös tulajdonsággal rendelkezik, melyek közül a kutatás szempontjából legfontosabb a kis fogyasztása és mérete, kvantumhatásfoka a mágneses térrel szembeni érzéketlensége. Mivel a PIN dióda is egy egyszerű p-n átmenet, ezért ha a rétegek nem sérülnek gyakorlatilag tönkretételten.

Ha optikai csatolást létesítünk a PIN dióda és egy szilárd szcintillátor kristály között, a dióda segítségével érzékelhetjük a kristályban létrejött fény impulzusokat. Megfelelő elektronika és sokcsatornás analizátor segítségével a sugárforrás gamma-spektrum felvételére van lehetőség, így a gyakoribb gammasugárzó izotópok azonosíthatóak lennének.

A szcintillációs detektor gyengébb felbontásából eredő analitikai probléma speciális, célorientált kiértékelési algoritmusokkal kiküszöbölhető [4].

A kereskedelemben már kaphatóak szilárd szcintillációs kristállyal integrált PIN diódás detektorok, de ezek elsősorban kutatási célra, laboratóriumi körülmények közötti használatra egyedileg kerültek kifejlesztésre és ezért nem alkalmasak katonai igénybevételre.

A fentiek alapján hipotézisként lefektettem, hogy megvalósítható egy olyan szcintillátor kristályból, PIN diódából, jelfeldolgozó erősítőből álló detektorrendszer, amely kisebb, olcsóbb és terepi alkalmazásra jobban alkalmazható a rendszerben lévő, gammasugárzó izotópok kimutatására használt eszközöknél.

Kutatási célkitűzések

A kutatásom általános célkitűzése, hogy (i) a terepi körülmények közötti alkalmazhatóság szempontjából értékeljem a Magyar Honvédségnél jelenleg bevethető, gammasugárzó izotópok meghatározásra alkalmas eszközparkot. Az értékelés alapján (ii) meghatározom az ideális terepi mérőeszköz fontosabb tervezési peremfeltételeit, és ebből kiindulva (iii) kidolgozom a terepi körülményekhez jobban igazodó, gammasugárzó izotópok kimutatására alkalmas, PIN diódát alkalmazó eszköz rendszertervét.

Ezen belül a következő konkrét célokat tűztem ki:

- a) A Magyar Honvédség egyes egységeinél (HAVÁRIA, MH 93 Vegyivédelmi Zászlóalj, MH Honvéd Egészségügyi Központ) jelenleg alkalmazott eszközök elemzése a terepi alkalmazhatóság szempontjából és ezek alapján egy ideális terepi mérőeszköz fontosabb tervezési peremfeltételeinek a meghatározása.
- b) A PIN dióda, mint foton detektálására képes eszköz, terepi alkalmazhatóságának elemzése és egy a terepi viszonyok között jól alkalmazható eszköz rendszertervének elkészítése.
- c) A PIN diódát alkalmazó detektorrendszer zajsámításának elvégzése és optimális áramköri tervezése és kiépítése.
- d) Az új mérő rendszer mintapéldányának elkészítése és energiaszelektivitásának elemzése az izotópszelektív mérési lehetőség bizonyítására.

A kutatás módszerei

A kutatás során alapvető szempontnak tekintetem a tudományos megalapozottságot, a rendszerszemléletű megközelítést, a megfigyelésekre, az analízisekre, és szintézisekre épülő következtetések kialakítását. Célkitűzéseimet a kapcsolódó szakirodalom és más dokumentumok feldolgozásával, elemzésével valamint saját tapasztalataimon, kísérleti méréseimen és feldolgozásomon keresztül kívántam elérni. A nukleáris sugárfelderítés tárgyban kiadott szabályozókat, módszertani útmutatókat tanulmányoztam, a témához kapcsolódó könyveket, jegyzeteket, tanulmányokat kutattam fel, kritikai feldolgozásnak vettem alá, elemeztem. Áttekintettem és összehasonlítottam a Magyar Honvédségnél, jelenleg használatos, a kutatásomhoz kapcsolódó eszközöket, rendszereket és módszereket. Kutatásaim során konzultáltam a honvédség HAVÁRIA laboratóriumában dolgozó kollegákkal, melyek eredményeit az általam kidolgozott rendszer kialakításánál messzemenően felhasználtam.

Fejezetek rövid ismertetése

I. fejezet

A fejezet elején röviden tisztázom a gamma spektroszkópiás mérésen alapuló izotópszelektív meghatározás fogalmát. Ezt követően bemutatom és áttekintem a honvédségnél bevethető terepi sugárfelderítő eszközöket, részletesen tárgyalom a HAVÁRIA készenléti szolgálat és a MH 93 Vegyivédelmi Zászlóalj izotópszelektív mérőeszközeit, megvizsgálom ezek főbb tulajdonságait a terepi alkalmazhatóság szempontjából.

II. fejezet

A fejezet célja, hogy bemutassa a félvezető eszközök működésének elméleti hátterét, és ismertesse, hogy milyen fizikai folyamatok alapján képesek a fény impulzusok detektálására. Az általános rész után, külön kitérek a PIN dióda felépítésére, illetve tulajdonságaira. A fejezet végén összehasonlítom a fotoelektron-sokszorozó és a PIN dióda főbb tulajdonságait, kompatibilitás bizonyítására. Végül néhány olyan már megvalósított egyedi fejlesztés eredményét ismertetem, amelyekben a PIN diódát használják érzékelő eszközként.

III. fejezet

Bemutatom az általam tervezett detektorrendszert, külön kitérve az egyes részegységek kiválasztási szempontjaira bontva. Külön alfejezetben térek ki a zajszámításra, mivel a munka jelenetős része a zaj csökkentésére, és rendszer leárnýékolására irányult. Ismertetem és elemzem a teljes rendszer elektronikus, illetve zaj mérési eredményeit.

IV. fejezet

Utolsó fejezetben megvizsgálom a kialakított rendszer mérés-technikai- (hatásfok, energiaszelektivitás, háttér, stb.) és a terepi használhatóságát meghatározó tulajdonságait.

1. FEJEZET

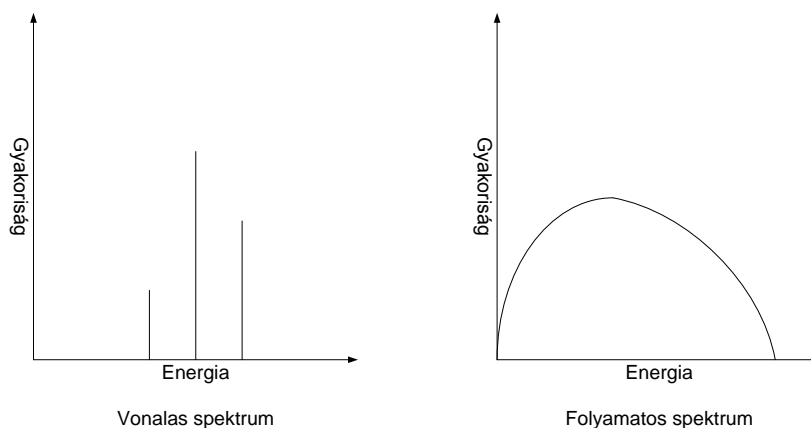
NAPJAINKBAN HASZNÁLT TEREPI IZOTÓPSZELEKTÍV ESZKÖZÖK VIZSGÁLATA

1.1. Nukleáris sugárzások energiaspektruma

Környezetünkben természetes és mesterséges eredetű radioizotópok is találhatóak, amelyek előfordulhatnak levegőben, vízben, talajban, növényben, állatban és beépülhetnek az emberi szervezetbe is. A nukleáris mérés technika feladata, hogy meghatározza a bioszféra különböző elemeiben a radioaktív izotópok minőségét és mennyiségét. A dolgozatomban a nukleáris mérés technika egy speciális ágával, a gamma-spektroszkópiával foglalkozom, amely lehetővé teszi a gammasugárzó izotópok minőségi és mennyiségi meghatározását a minták feldolgozásának szükséglete nélkül.

A radioaktív atommagok bomlása során többféle energiahordozó részecske jelenhet meg, melyek térben és időben történő terjedését nevezzük sugárzásnak.

Az energiahordozó részecskék energiáját elsősorban radioaktív bomlás energetikai viszonyai határozzák meg, amelyek az egyes radioaktív izotópokra egyedileg jellemzőek. A minőségi elemzéshez tehát az energiahordozó részecskék energia szerinti eloszlását (energiaspektrumát) kell megmérnünk. Az energiaspektrumoknak két elvi csoportja lehetséges: vonalas és folytonos [2].



1. ábra. A gyakoriság-spektrumok típusai [2]

A vonalas spektrumban csak bizonyos energiáknál tapasztalunk részecskéket, melyek egyértelműen jellemzőek az energiát kibocsátó mag minőségére (ilyen például a gamma- és röntgen fotonok és az alfa-sugárzások spektruma). A folytonos spektrum esetében általában egyszerre egynél több részecske viszi el az energiát, melynek megoszlása folytonosan változhat a részecskék között. Ezért folytonos például a β^- és β^+ sugárzások spektruma. Ilyen esetekben a szelektív kimutatás csak előzetes kémiai szeparációt követően válik lehetővé.

Gamma-spektroszkópiai eszközökkel, azaz a gamma sugárzás energiaszelektív méréséből származó gamma-spektrum feldolgozásával, végzett radioaktív izotóp azonosítás alapján következtethetünk a minta eredeti elemösszetételére (kvalitatív analízis), valamint a megfelelő energiákon - a teljes energiacsúcsoknál - mért gamma intenzitások alapján a már azonosított elemek mennyiségére (kvantitatív analízis).

1.2. A NATO in-situ, izotópszelektív sugárhelyzet monitorozási eljárásai

A SIRA kézikönyv a légi illetve földi sugárfelderítés mellett külön eljárásként említi az *in-situ gamma spektroszkópiát*, vagyis a szennyezettség helyben történő izotópszelektív azonosítását. Ez az eljárás magába foglalja a felderítést és a mintavételt is, olyan helyeken, ahol a szennyeződés összetételére vagyunk kíváncsiak. Az eljárást a 60-as években alkalmazták először a földtani felderítéseknél és azóta tovább fejlesztették hordozható, nagy felbontású gamma spektrométerrel és hordozható számítógép alkalmazásával. Mint földi in-situ sugár felderítési eljárás megkülönböztetünk kis- illetve nagyfelbontású gamma spektroszkópiát.

Kis felbontású (szcintillációs) γ -spektroszkópia

Az ionizáció során keletkezett elektronok és ionok anyaggal való kölcsönhatása olyan gerjesztett atomokat, molekulákat hozhat létre, melyek például látható vagy ultraibolya fotonokat sugároznak ki. Ezt a jelenséget használja fel az ún. szcintillációs mérés technika [2]. Szcintillációs anyagokban a nagy energiájú sugárzás hatására fényfelvillanás, „szcintilláció” keletkezik, azaz a sugárzás energiája adott határfokkal 350...600 nm közötti hullámhosszúságú fotonokat produkál.

Szcintillátor kristály előállítására használt leggyakoribb anyagok: NaI(Tl), CsI(Tl), CsI(Na), BGO (Bizmut-Germanát, $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$), CdTe (Kadmium-Tellurid), LaBr₃ (Lantán-Bromid). Ezek közül is a legtöbbször használt NaI(Tl) kristályból megfelelő nagyságú, jó hatásfokú

A félvezető detektorral felvett γ -spektrumok jellegükben megegyeznek a szcintillációs γ -spektrumokkal; a lényeges eltérés az egyes spektrumrészletek relatív intenzitásában és a teljesenergia-csúcs relatív félértékszélességében van.

A félvezető detektorok készítésénél jelenleg a legnagyobb probléma a megfelelő nagyságú érzékeny térfogat előállítása. A kereskedelmi forgalomban is kapható, γ -spektroszkópiai célokra alkalmas, lítiummal driftelt germánium detektorok érzékeny térfogata $10\text{-}50\text{ cm}^3$ körül van, de előfordul jóval nagyobb akár 80cm^3 -es is.

A Ge(Li) detektorok használata számos gyakorlati problémát is felvet. Ezek közül az előállítás nagy költségein kívül a legfontosabb az, hogy ezeket a detektorokat a folyékony nitrogén hőmérsékletén lehet csak használni, és üzemben kívül is állandóan alacsony hőmérsékleten kell tartani. A HPGe detektoroknál a hűtés a detektálás idejére korlátozódik.

A félvezető γ -detektorok felbontóképessége 1 MeV energiatartományban több mint egy nagyságrenddel jobb, mint a szcintillációs detektoroké, de ugyanakkor számlálási hatásfokuk nagyságrendekkel kisebb lehet [2].

A félvezető detektorok közül meg kell még említeni a CdTe detektort, amely különösen az alacsony (35keV és 200keV) energia tartományban rendkívül jól használható. Az energia felbontása jobb a NaI(Tl) detektorénál azonban nem éri el a HPGe detektoroké, viszont a hatásfoka kisebb. De van egy nagy előnye a HPGe detektorokkal szemben, mégpedig az hogy nincs szükség hűtésre, így mobil detektorként jól használható.

1.3. Magyar Honvédség terepi sugár felderítő eszközparkja

Dolgozatomban célul tűztem ki, a Magyar Honvédségnél alkalmazható terepi izotópszelektív eszközök bemutatását. Mielőtt részletesen is elemezném ezen eszközöket, röviden összefoglalom a Honvédség helyszínre vonulni képes erőinek sugár felderítési képességét.

MH 93. Petőfi Sándor Vegyivédelmi Zászlóalj

A zászlóalj részt vesz az ország területén bekövetkezett nukleáris baleset-elhárításban, a szárazföldi hadtest hadműveleteinek vegyivédelmi biztosításában. Egyik feladata, felkészülés a Honvédelmi Katasztrófavédelmi Rendszer keretében az országot ért természeti katasztrófák (árvíz, földrengés, nukleáris, stb.) felszámolásában való részvételre a szolgálati előljáró külön intézkedése alapján. [5]

Egy esetleges nukleáris katasztrófa felderítésénél az alábbi szaktechnikai eszközök segítik a feladataik ellátását:

VSBDRM-2M vegyi-, sugárfelderítő harcjármű:

Az ABV támogató század legfontosabb eszköze a VSBDRM-2M típusú vegyi- és sugárfelderítő harcjármű, mely képes a felderítő szakalegységeket a vizsgálandó területre szállítani [6]. Ez egy páncélozott eszköz, melynek belsejében túlnyomást lehet létrehozni, a levegő ilyenkor egy szűrőn halad át. A páncélzat csökkenti a sugárzás intenzitását, a vegyi-, sugárfelderítést pedig a beépített és hordozható sugárzásmérők, vegyi felderítő eszközök segítik.



2. ábra. VSBDRM-2M vegyi, sugárfelderítő harcjármű (forrás: HAVÁRIA laboratórium)

IH-99D harcjármű fedélzeti sugárzásmérő műszer:

A műszer a VSBDRM-2M felderítő jármű két oldalán elhelyezett szondák felől érkező adatokat gyűjti, illetve megjeleníti. A szondák alkalmazhatók folyamatos felderítésre alacsony és rendkívül magas radioaktív sugárszint mellett. [6]

Fontosabb technikai paraméterei:

- detektor: energia-kompenzált GM-cső
- mérési tartomány: 50 nGy/h – 1 Gy/h
- energia tartomány: 50 keV – 1,5 MeV
- átlagolási idő: 2 s – 4 perc, automatikus

IH-95 sugárszint és szennyezettségmérő műszer:

A felderítendő terephez érve, a felderítők ezen eszköz segítségével képesek a gamma sugárszint gyors mérésére, illetve felületi alfa és béta szennyezettség mérésére. Az eszköz képes összegzett alfa, béta, gamma beütésszám indikálására felületi radioaktív szennyeződés keresése céljából. [6]

Fontosabb technikai paraméterei:

- detektor: GM-cső
- mérési tartomány: 50 nGy/h – 0,5 Gy/h
- energia tartomány: 60 keV – 1,5 MeV
- mérési idő: 2 s – 4 perc, önműködő



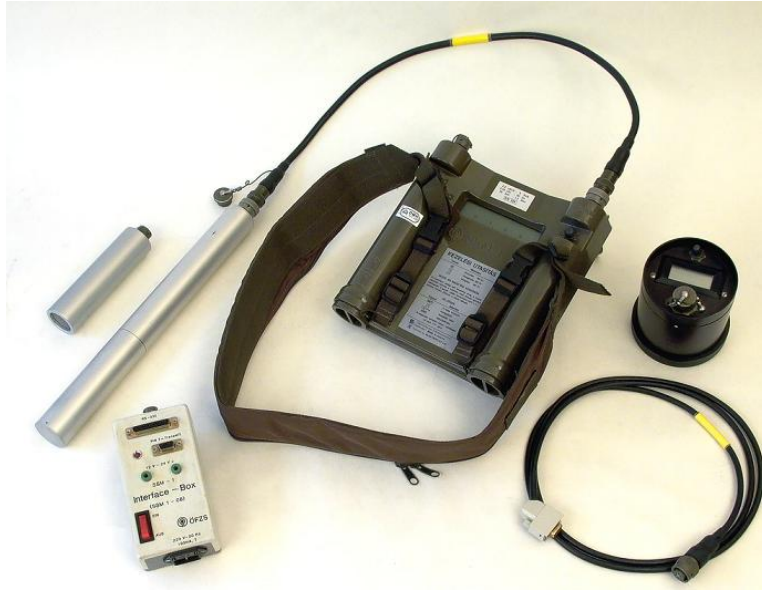
3. ábra. IH-95 sugárszint- és dózisteljesítmény mérő műszer (forrás: HAVÁRIA laboratórium)

SSM-1 sugárszint és dózisteljesítmény mérő műszer:

Az eszköz képes a dózisteljesítmény-egyenérték kijelzésére.

Fontosabb technikai paraméterei:

- detektor: GM-cső
- mérés tartomány: 100 nSv/h – 5 Sv/h
- energia tartomány: 50 keV – 1,3 MeV



4. ábra. SSM-1 sugárszint- és dózisteljesítmény mérő műszer (forrás: HAVÁRIA laboratórium)

MH Dr. Radó György Honvéd Egészségügyi Központ, Preventív Igazgatóság, Közegészségügyi Intézet

Az intézet feladatai település-, ételmezés-, munkaegészségügyi, környezet higiénés ellenőrzések végrehajtása. Kémiai biztonsággal kapcsolatos feladatok ellátása. Közegészségügyi és közegészségügyi építéshatósági szakhatósági tevékenység végzése. Közegészségügyi Higiénés Laboratórium működtetése, víz- szennyvízvizsgálatok, valamint élelmiszer- és ételmezés higiénés vizsgálatok végzése. Munka- és Sugáregészségügyi Laboratórium működtetése, mérések végrehajtása. [7]

MH 86. Szolnok Helikopter Bázis, Légi sugárfelderítő Csoport

A sugárfelderítő eszközrendszer egyik fontos elemét képezik a légi sugárfelderítő eszközök, melyek rendeltetése háborús körülmények és ipari nukleáris balesetek után a terep sugárfelderítése gyors, elsődleges helyzetfelmérés céljából. A légi sugárfelderítés a leggyorsabb módszer, ugyanakkor a legpontatlanabb, ezért az elsődleges helyzetfelmérést később egyre pontosabb, de egyre időigényesebb földfelszíni mérések követik járműfedélzeti eszközzel, hordozható műszerrel, végül a begyűjtött minták laboratóriumi analízisével. [8] A légi sugárfelderítés egyik célja, hogy energiaszelektív mérésekkel támpontot nyújtson egy terület radioaktív szennyezettség összetételének becsléséhez. Az itt felvázolt feladatot a MH 86. Szolnok Helikopter Bázis által működtetett Légi Sugárfelderítő Csoport hajtja végre állandó készenléti szolgálat keretein belül. [9]

Történtek fejlesztések pilóta nélküli robotrepülő eszközök területén, azonban rendszerbe csak a Gamma Műszaki Zrt. által kifejlesztett légi sugárfelderítő konténert állították, melyet egy MI-24 harci helikopterre szereltek.



5. ábra. Légi sugárfelderítő konténer a MI-24-en [8]

A helikopterrel egy szennyezett terepszakasz felderítését 150-200 m-es repülési magasságon, valamint 150-180 km/h sebességgel végzik. Pontszerű sugárforrás felderítése esetén 100 m alatti repülési magasságon, 100-120km/h közötti sebességgel hajtják végre a feladatukat, amennyiben a vegyvédelmi szakterület ettől eltérően nem határoz.

A konténerbe beépítésre kerültek az alábbiak [8]:

- BNS-98 típusú dózisteljesítmény-távadó (GM csöves nukleáris detektor);
- NDI/SK típusú intelligens szcintillációs nukleáris detektor, speciális üreges NaI(Tl) kristállyal, ólom kollimátorban, beépített sugárkapu algoritmussal;
- Adatgyűjtő egység (BCU-01 típusú), amely az alábbiakból áll;
- barometrikus nyomásmérő termosztátban;
- GPS helykoordináta meghatározó vevő egység;
- GPS helykoordináta meghatározó antennája;
- "LegiABV" adatgyűjtő-, megjelenítő- és feldolgozó program.

A mérési ciklus 2 s, így a szokásos repülési sebesség mellett is kellő felbontással lehet a sugárszintet meghatározni, ha a fedélzeten mérhető dózisteljesítmény eléri a $\mu\text{Gy/h}$ nagyságrendet. Alacsonyabb dózisteljesítmény esetén a 2 másodperces adat az utolsó n mérés átlagából képződik. Az intelligens szcintillációs detektor egy $\varnothing 75*50$ mm NaI(Tl)

szcintillátor, speciális üreges kiképzéssel. Az üregbe homlok és haránt irányból egyaránt fényérzékeny fotoelektron-sokszorozó illeszkedik. Árnyékolása 20 mm ólom kollimátor, látószög 45°, kúpos. A detektorba be van építve a sugárkapu algoritmus, ami a sugárzás szignifikáns növekedése esetén riasztást küld. A pillanatnyi, az átlag értékeket és a státuszokat RS-485 soros vonalon lekérdezésre küldi az adatgyűjtőnek. A mérési ciklusa 0,5 s. A riasztás 0,5s alatt bekövetkezik, ha a sugárzás legalább 200nGy/h-ra növekedik, Cs-137 sugárforrással vizsgálva, a hazánkra jellemző háttérsugárzás értékek (80 nGy/h) mellett. Az energiaszelektív riasztásnál a sugárzás szignifikáns növekedése esetén a riasztásnak csatornánként is be kell következnie a 20-100 keV, 100-400 keV, 400-900 keV és a 900 keV fölötti tartományban.

MH Görgei Artúr Vegyivédelmi Információs Központ

A központ rendeltetése a vegyi-, biológiai- és sugárhelyzetre, a katonai környezetbiztonságra vonatkozó információk gyűjtése, nyilvántartása, folyamatos elemzése, a káros következmények előrejelzése és értékelése, a Magyar Honvédség felső vezetésének tájékoztatása a döntések megalapozása céljából. Feladata az MH HAVÁRIA Laboratórium működtetése: vegyi és a radiológiai minták vétele, hadműveleti azonosítása. [10]

Eszközparkjába a már fentebb említett IH-95, illetve SSM-1 sugárzásmérő műszerek tartoznak.

Ezen felül jelenleg, egyedül a HAVÁRIA Laboratórium rendelkezik hordozható, terepi izotópszелеktív mérőeszközökkel.

1.4. Magyar Honvédség HAVÁRIA készenléti szolgálat izotópszелеktív eszközeinek bemutatása

Jelenleg a Magyar Honvédség HAVÁRIA készenléti szolgálata riasztás esetén a következő izotópszелеktív mérőeszközökkel képes a helyszínre vonulni:

- Berkeley SAM 940 NaI szcintillációs detektor
- Canberra HPGe (nagy tisztaságú germánium) detektor
- Gamma IH-111L CsI(Na) szcintillációs detektor, élelmiszervizsgáló

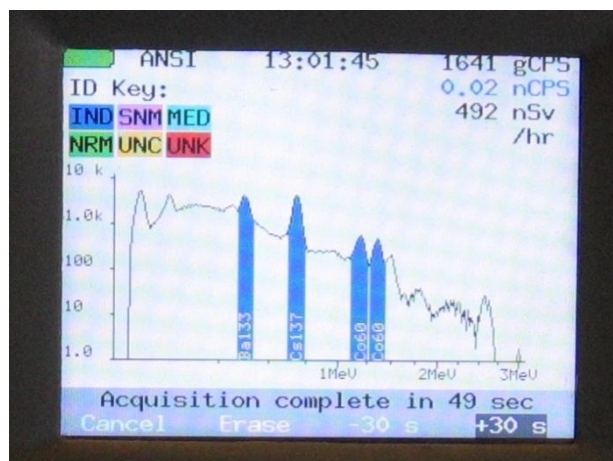


6. ábra. Berkeley SAM-940 Defender

Az eszköz, szcintillációs detektor segítségével, képes radioaktív szennyezések gyors, helyszíni, izotópszelektív azonosítására. Az eszközhöz GPS csatlakoztatható, amellyel az adott méréshez pontos koordinátákat is tudunk társítani. A műszer egyszerűen ellátható neutrondetektálásra képes detektorral is.

Fontosabb paraméterek [11]:

- 3" x 3" NaI, ^6LiI , vagy LaBr szcintillációs detektor;
- energia tartomány: 18keV... 3MeV;
- tápellátás: 8 darab AA elem;
- működési hőmérséklet tartomány: -20 ... +50°C;
- össztömeg: 4 kg;
- külső méret: 304mm x 101mm x 127mm;
- saját kijelzővel rendelkezik



7. ábra. A Berkeley SAM-940 detektor képernyőjén megjelenő spektrum

A 7. ábrán látható, hogy az eszköz képes megkülönböztetni, és külön színekkel jelölni a különféle forrásokból eredő izotópokat, úgymint ipari, gyógyászati, természetes, stb.

Canberra HPGc GC2020

A nagy tisztaságú germánium detektor egy P-I-N struktúrájú félvezető detektor, amelynek kiürített tartománya érzékeny az ionizáló sugárzásra. A P-I-N struktúráról bővebben szó lesz a disszertáció II. fejezetében.

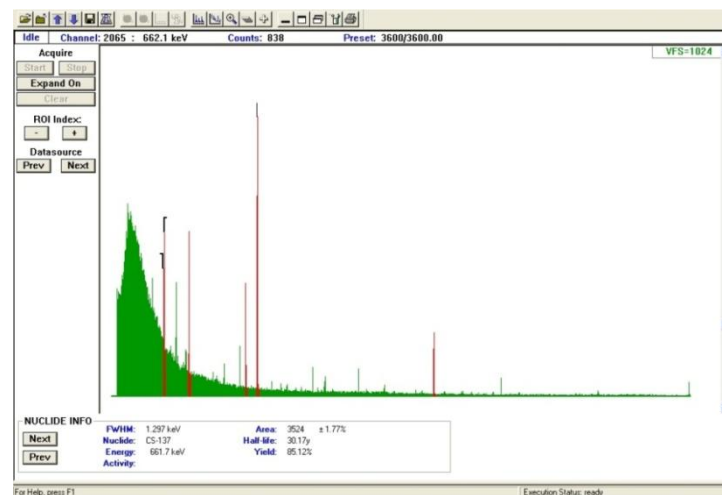
Mivel a félvezető anyagoknál (a tiltott sáv szélességtől és az anyag tisztaságától függő mértékben) a termikus energia szobahőmérsékleten is generál bizonyos mennyiségű töltéshordozót, amik rontják a detektálási képességet, ezért a detektort, működés közben, folyékony nitrogénhűtéssel kell ellátni. Valamint, hogy minél jobb detektálási tulajdonságot érjenek el, maga a félvezető egy vákuum kamrába van szerelve. A vákuumnak és a hűtésnek köszönhetően rendkívül jó felbontást érhetünk el a műszerrel (122keV energiánál 0,9%, 1,3MeV energiánál 2% a félértékszélessége). Ezen kedvező tulajdonsága miatt, és nagy tömege miatt, hacsak a terepi mérés nem követeli meg, inkább laboratóriumban használják.



8. ábra. Canberra HPGe GC200 félvezetű detektor és a hozzá tartozó spektrum analízátor

Fontosabb paraméterek [12]:

- 51mm átmérőjű, 43,5mm hosszú koaxiális HPGe kristály
- 220V feszültség a működéshez
- 3000V nagyfeszültség az előfeszítéshez
- 5 liter térfogatú kriosztát, 36 órás működés egy feltöltéssel, a detektor lehűlési ideje 4 óra
- energia tartomány: 40keV ... 10MeV
- össztömeg 20kg
- hordozható számítógép kijelzés



9. ábra. A Canberra HPGe GC200 detektor által mért spektrum

Gamma IH-111L

Az IH-111L típusú műszer nukleáris veszélyhelyzetet követően (háborús körülmények és ipari nukleáris balesetek után) önmagában alkalmas élelmiszerek radioaktív szennyezettségének meghatározására az élelmiszerek fogyaszthatóságának jelzésével. Az IH-111L típusú műszer ezen túlmenően számítógépes kapcsolattal, a vezérlést annak átadva, alkalmas a minták szakember általi kiértékelésére, úgymint gamma és bétakoncentráció meghatározás, gamma izotópazonosítás.

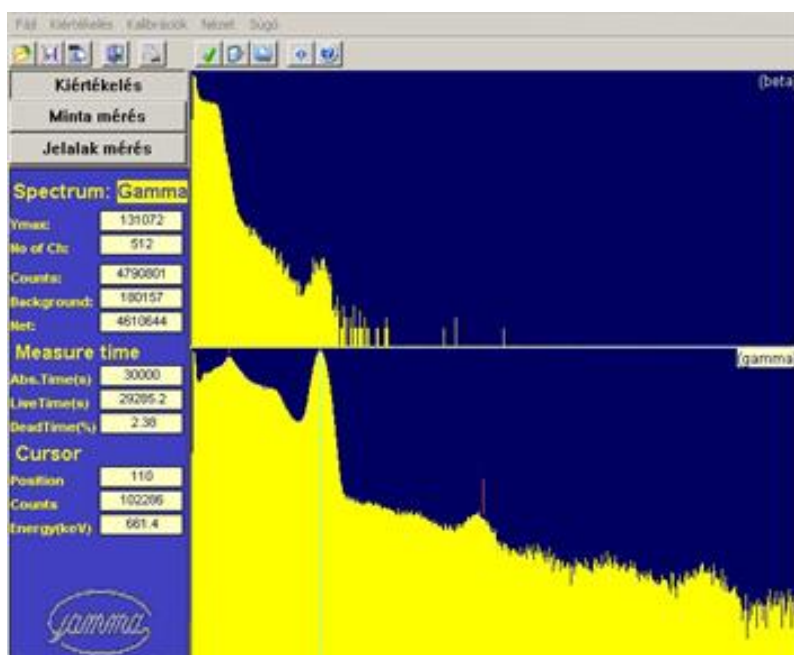


10. ábra. A Gamma IH-111L élelmiszervizsgáló berendezés (forrás: Gamma Műszaki ZRt.)

Fontosabb paraméterek [13]:

- detektor: Ø50x23mm CsI(Na) gamma érzékeny szcintillációs kristály, előtte egy Ø50x5mm béta plasztik szcintillátor;
- az eszköz alkalmas a 3954/87/EURATOM, illetve az azzal megegyező NATO STANAG 2136 által előírt határértékek kimutatására;
- gamma energia tartomány: 25keV ... 1,5MeV;
- tápellátás: belső 12V, 1,2 Ah-s zselés akkumulátor, tartozék akkutöltővel, 230V hálózatról;
- működési hőmérséklet tartomány: -10 ... +50°C;
- össztömeg: 25kg;
- külső méret málházva: 380 x 180 x 340 mm.

- hordozható laptop kijelzés



11. ábra. A Gamma IH-111L által mért ^{137}Cs és háttér spektrum

1.5. Izotópszелеktív eszközök terepi használatának elemzése

A fentebb említett három eszköztől megállapítható, hogy alkalmasak terepi (katonai) alacsony szintű kontamináció kimutatására, illetve radioizotópok azonosítására. Azonban mindegyik rendelkezik valamilyen, a terepi alkalmazás szempontjából hátrányos tulajdonsággal. A következő pontokban ezeket a hátrányos tulajdonságokat elemzem.

Nagyfeszültség előállítása, fogyasztás

A szcintillációs illetve a félvezetős mérés technikánál is szükség van nagyfeszültség előállítására. A nagyfeszültség megszűnése egyet jelent az eszköz használhatatlanságával.

A szcintillációs technikánál a fotoelektron-sokszorozó működéséhez szükséges több száz, vagy akár néhány ezer volt. Ahhoz, hogy a dinóda sor megfelelő erősítést tudjon produkálni, az egyes dinódák között 100-150V potenciál különbségnek kell lenni. Ez pedig egy 10 dinódás eszköznél 1000-1500V feszültséget jelent.

A nagyfeszültség stabilitásával szemben rendkívül nagy az elvárás ($\pm 1\%$ az üzemi hőfoktartományban), ezért alkalmaznak nagy stabilitású, beállítható feszültségű, hőfokkompenzált nagyfeszültségű tápegységet.

A félvezető technikánál nagyobb feszültségnél gyorsabb a detektorban keletkezett töltések kigyűjtési ideje, illetve bizonyos tekintetben nagyobb felbontás érhető el, azonban a káros hatások, mint például sötétáram hatása is jelentősen megnő, ezt hűtéssel kompenzálják.

A működéshez szükséges nagyfeszültség előállítása jelentős mértékben csökkenti az eszközök saját tápellátásról történő működéséi idejét a nagy fogyasztás miatt. A Canberra HPGe detektor nem is működik hálózati táplálás nélkül. Az IH-111L zselés akkumulátorral, míg a Berkeley SAM-940 AA elemmel illetve akkumulátorral működhet, a hálózattól függetlenül.

Vákuum

Szcintillációs technikánál, mint azt fentebb is említettem, a fotoelektron-sokszorozó egy üvegburában található, melynek feladata a cső belsejében található vákuum megtartása. Vákuum szükséges ahhoz, hogy az alacsony energiájú elektronokat is hatékonyan gyorsítsa fel az elektromos mező.

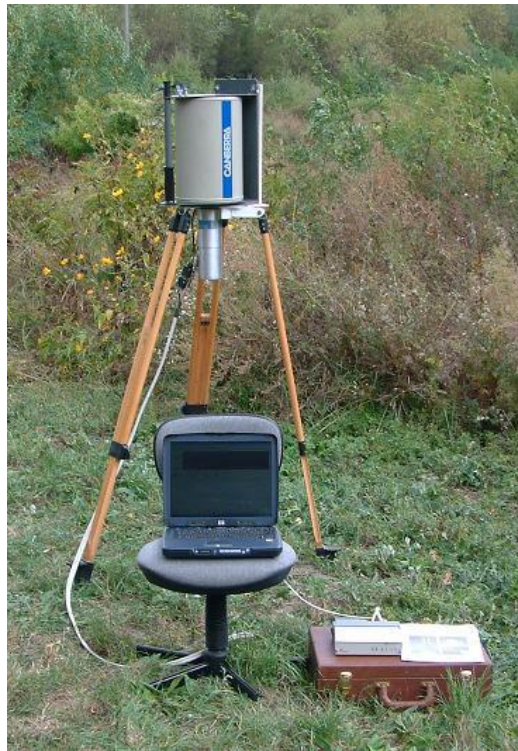
A félvezető eszközöknél szintén, a hatásfok növelése érdekében van szükség a vákuumra. Ha a vákuum kamra valamilyen okból megsérül, az eszköz használhatatlanná válik.

Hordozhatóság, telepíthetőség

A Canberra félvezető detektorához nem tartozik hordtáska. Az eszközt úgy alakították ki, hogy a detektorra egy fogantyút helyeztek el, amivel viszonylag egyszerű a detektor mozgatása. Mivel azonban maga a félvezető detektor nincs védve a jelentős külső behatásoktól (ütődés), ezért rendkívül óvatosan kell mozgatni az eszközt, ami a 20kg-os tömeg miatt nem mindig egyszerű.

A detektort a földfelszíntől 1m távolságban, a felszín síkjára merőlegesen használják, ún. tripód állványon pozicionálva, majd kb. 15 perctől max. 2 óras mérést követően rövid, számítógépes kiértékelés után megkapjuk a környezetben lévő gammasugárzó izotópok mennyiségét a talajban (koncentráció Bq/kg), és az egyes izotópok dózisteljesítmény járulékát.

A számítógép valamint a detektor működéséhez is szükség van hálózati tápellátásra, amit terepi körülmények között valamilyen áramfejlesztővel oldanak meg.



12. ábra. Telepített Canberra félvezető detektor (forrás: HAVÁRIA laboratórium)

Az IH-111L eszköz számítógép kapcsolat mellett alkalmas izotópazonosításra, radioaktív koncentráció meghatározásra szakember által. A különböző helyekről begyűjtött mintákat, mintatároló edényekbe helyezik és a rendszer telepítési helyére szállítása után megméri azokat. Az IH-111L-hez tartozik málhazsák, illetve rendelkezik saját hordtáskával.



13. ábra. IH-111L málhazsák (balra) és hordtáska (jobbra) (forrás: Gamma Műszaki ZRt.)

Ennél az eszköznél is szükséges hálózati táplálás a számítógép alkalmazása miatt.

A SAM-940 is rendelkezik hordtáskával, amiben még a tartozékoknak is kialakítottak helyet. Az izotópozonosításhoz nem szükséges számítógép csatlakoztatása, azonnal egy kis monitoron láthatjuk a mérés eredményeit. Rendkívül jól hordozható hiszen kényelmesen tartható kézben és a navigáló billentyűk is kézre esnek.



14. ábra. Berkeley SAM-940 hordtáskában (balra) és terepi mérés közben [11] (jobbra)

Összességében:

Hátrányok:

- a Canberra, és az IH-111L jelentős össztömeggel rendelkezik, illetve a spektrum kiértékeléshez számítógépet kell csatlakoztatni az eszközhöz;
- a Canberra félvezető detektor telepítése meglehetősen időigényes, és a hűtéshez szükséges nitrogént is biztosítani kell a méréshez;
- a Berkeley illetve az IH-111L műszerek a szcintillációs mérés technika miatt saját akkumulátorral nem képesek hosszú működésre;
- a Canberra detektorhoz nem tartozik hordtáska, így sérülékeny mozgás közben;
- a Berkeley műszernél a detektor és a kiértékelő eszköz csatlakoztatása egymáshoz nem szerencsés, mivel a terepi (katonai) használat során ez könnyen megsérülhet;

Előnyök:

- a Canberra detektor rendkívül jó, talán már „túl jó”, felbontóképességgel rendelkezik;
- a Berkeley műszerhez számos kiegészítő rendelhető, például neutron detektorfej, GPS;
- a Berkeley műszer kezelése, kialakítása nagyon egyszerű, egy kézzel képes a katona a

spektrumkiértékelésre;

1.5.1. „Ideális” terepi detektor

Az ideális sugázmérő eszköz csak elméletben létezik, megvalósítani gyakorlatilag lehetetlen. Azonban kiindulva a létező detektorok előnyös illetve hátrányos tulajdonságaiból felvázolható egy olyan eszköz, ami a lehető legjobban alkalmazkodik a katonai igénybevételhez, és a detektálási tulajdonságai megfelelőek az elsődleges felderítések során.

Ideálisnak mondható detektor tulajdonságai:

- gyorsan telepíthető, használható:
Gyorsabban használható az eszköz, ha a detektor nem igényel hűtést, nem kell figyelni, hogy a hűtőfolyadék rendelkezésre áll-e megfelelő mennyiségben. Esetleges feltöltés után meg kell várni, míg a detektor a megfelelő hőmérsékletre visszahűl.
- alacsony fogyasztású:
Ha a detektor nem igényel nagyfeszültséget a működéshez, akkumulátoros táplálással tovább üzemelhet.
- alacsony tömegű:
A kész eszköz, detektorral, feldolgozó elektronikával, kijelzővel és akkumulátorral egy kézben hordozható és egy kézzel üzemeltethető is legyen.
- kialakítása megfelel a katonai követelmény rendszernek (például hőhatás, rázás, ütés):
A katonai kivitel magas követelményeit támaszt az eszközzel szemben. A kialakításánál ügyelni kell, hogy az egyes alkatrészek, csatlakozók minél üzembiztosabban működjenek, mostoha körülmények között is.
- rendelkezik saját kijelzéssel, illetve számítógépes csatlakozási lehetőséggel (például USB):
Az elsődleges spektrum kiértékeléshez ne kelljen külső számítógépet csatlakoztatni az eszközhöz, mert annak már hálózati táplálás kell a hosszabb idejű működéshez, és plusz terhet jelent. Azonban, hogy meglegyen a lehetőség a későbbi, pontosabb spektrumanalízásra, rendelkeznie kell valamilyen csatlakozási felülettel, akár vezetékes, akár vezeték nélküli formában.
- különböző eszközökkel egyszerűen bővíthető (például GPS):

Az eszköz fel legyen készítve különböző kiegészítő egységek gyors fogadására. Ilyen lehet például a GPS, valamilyen memória kártya, további akkumulátor csatlakoztatása, stb. Ehhez csatlakozó felületeket kell biztosítani az eszközön.

Dolgozatomban egy olyan moduláris rendszert ismertetek, melyben a szcintillációs és a félvezetős technikát ötvözöm oly módon, hogy a szcintillátor kristályban keletkezett fény impulzust egy félvezető eszközzel detektálom. Így egy olyan detektor állítható elő, ami kis tömeggel rendelkezik, alacsony fogyasztású, hűtést nem igényel, és megfelelő felbontással rendelkezik izotópok azonosítására. A dolgozatban a felsorolt tulajdonságok első felével foglalkozom, a detektor, az előerősítő és a jelformáló erősítő kialakításával. A további részek kialakítását csak, mint tovább fejlesztési lehetőségeket említem.

Következtetések

A fejezet első részében definiáltam, hogy mit értünk izotópszелеktiv mérési eljárás alatt. Bemutattam azt a két, a NATO-ban is használatos méréstechnikát, ami alkalmas gammasugárzó izotópok terepi körülmények közötti azonosítására. A fejezetben megállapítottam, hogy a Magyar Honvédség, különböző alegységei rendelkeznek ugyan terepi körülményekhez igazodó izotópszелеktiv eszközökkel, azonban ezen eszközök részletes elemzése után arra a következtetésre jutottam, hogy az egyes eszközök kialakításuk, hordozhatóságuk, mérési eljárásaik miatt bizonyos hátrányokkal rendelkeznek. Megállapítottam, hogy szükség van egy olyan kompakt, terepi körülmények között is helyt álló izotópszелеktiv eszközre, amely kezelése egyszerű, nem igényel hálózati tápellátást, spektrum kiértékeléshez nem szükséges számítógépet csatlakoztatni a detektorhoz és könnyen hordozható, telepíthető.

2. FEJEZET

FÉLVEZETŐ ESZKÖZÖK, MINT FÉNYÉRZÉKELŐ DETEKTOROK

2.1. Szcintillációs mérés technika

Az általam kialakított rendszer alapja a szcintillációs technika és amelyben - eltérően a megszokott módszertől, ahol fotoelektron-sokszorozót használnak - a szcintillátorban keltett fény impulzusok elektromos jellé alakítására PIN diódát alkalmazom.

A későbbi részek érthetősége miatt a fejezet első részében összefoglalom a szcintillációs detektorok működését, majd ismertetem azon fizikai tulajdonságokat, ami alapján, a PIN dióda alkalmas a fény impulzusok feldolgozására.

A szcintillációs detektorok működési módja néhány szerves és szervetlen anyag azon tulajdonságán alapul, hogy bennük radioaktív sugárzás hatására fényfelvillanás keletkezik. A fényfelvillanás intenzitása arányos a részecske detektorban leadott energiájával, ezért a lineáris erősítésű fotoelektron-sokszorozó kimenetén jelentkező villamos jel feszültségéből vissza lehet következtetni a részecske energiájára is.

A szervetlen szcintillátor kristályok működése szempontjából fontos tisztázni, hogy miért használnak kis mennyiségű adalékot a kristály előállításához, például a Na kristályhoz miért adnak Tl szennyezést. Ha egy anyag valamilyen energiájú fotonokat kibocsát, akkor az ugyanilyen energiájúakat el is nyeli. Azonban a kis arányú szennyezés létrehoz a tiltott sávon belül energianívókat, melyhez tartozó fotonokra nézve a kristály átlátszó. Így, ha az ionizáció miatt a vezetési sávba került elektronok ezen közbenső állapotokon keresztül veszítik el gerjesztési energiájukat, ez a kristály által nem abszorbeált fotonok megjelenéséhez vezet.

A radioaktív részecske észlelése, ill. az általa leadott energia villamos jellé való átalakítása több lépcsőben történik:

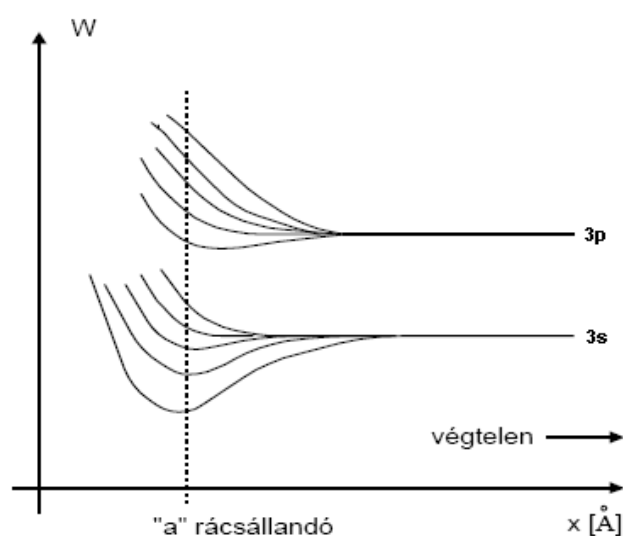
- a beeső részecskét a szcintillátor anyaga abszorbeálja, amely így gerjesztett állapotba kerül;
- a szcintillátor fényfelvillanás (fotoemisszió) kibocsátásával bizonyos időn belül ismét stabil állapotba kerül. Minél nagyobb a részecske energiája, annál több szcintillációs foton keletkezik, annál nagyobb a fényfelvillanás intenzitása;

- a keletkezett fotonok a szcintillátorból fényvezetéssel eljutnak a fotoelektron-sokszorozó foto katódjához;
- a beeső fotonok hatására a foto-katód fotoelektronokat emittál;
- a katódot elhagyó fotoelektronokat a fókusz elektróda az első anód felé irányítja, melyet dinódának nevezünk.

A dinóda anódja olyan anyagból készül, hogy minden egyes becsapódó fotoelektron hatására több szekunder elektron keletkezik, melyeket a második dinóda erőtere gyorsít és ez az elektronsokszorozási folyamat ismétlődik.

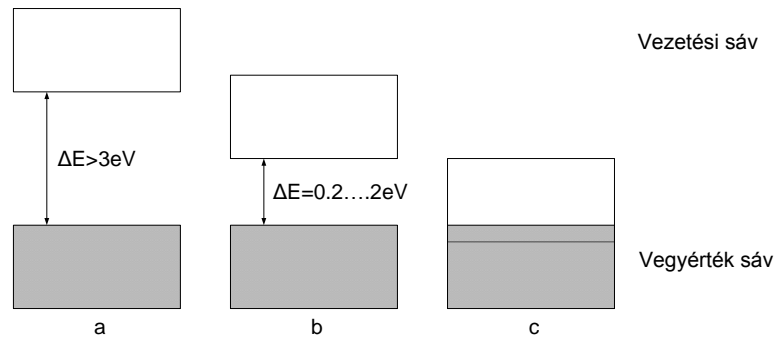
2.2. Félvezető alaptulajdonságai, sávszerkezet

Kvantummechanikai megfontolások alapján bizonyítható, hogy adott kristályszerkezetben található elektronok energiája csak egy meghatározott intervallumrendszerbe eső értékeket vehet fel. Ezt az intervallumrendszert sávszerkezetnek nevezzük, struktúrája jellemző a kristály szerkezetére és függ az azt kialakító anyagoktól. A Pauli-elv szerint egy elektronállapotot legfeljebb két, ellentétes spinű elektron tölthet be. A meghatározott diszkrét energia pályák felhasadnak és nagyszámú szint lehetséges egymáshoz viszonylag közel. A felhasadás mértéke annál nagyobb, minél erősebb a kölcsönhatás az eredeti nívók között. A felhasadt nívók egy energiatartományt – sávot - alkotnak. A sávok közötti energiák tiltottak, ez a tiltott sáv.



15. ábra. Megengedett energianívók és energiasávok az atomok közötti távolság függvényében

A sávok közül az utolsó részben vagy teljesen betöltött sávot vegyértéksávnak, míg az első be nem töltött vagy csak kis mértékben betöltött sávot vezetési sávnak nevezzük. A vegyértéksáv és a vezetési sáv közötti tiltott sáv nagysága (ΔE) jellemzője a vezető, félvezető és szigetelő anyagoknak.



16. ábra. Szigetelők (a), félvezetők (b), vezetők(c) vezetési és vegyérték sávjai

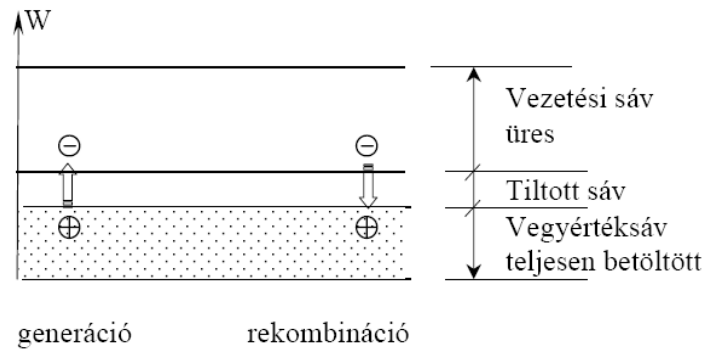
Szokásos félvezető anyagoknál a tiltott sáv szélessége: Si esetén 1,1 eV, Ge esetén 0,72 eV, GaAs esetén 1,3 eV [14].

Elektromos vezetésre az olyan nívókon elhelyezkedő elektronok képesek, melyek felett tetszőleges kis távolságban van üres szint. Csak ebben az esetben tud tetszőleges kis elektromos tér energiát közölni az elektronnal, a tér irányával párhuzamos sebességre felgyorsítani, ezzel elektromos áramot létrehozni. A vezetési sávban lévő vezetési elektronok szabadon mozoghatnak a kristályban, nincsenek meghatározott ionhoz, atomhoz vagy molekulához kötve. Szabad elektronoknak is hívjuk őket. Szabad elektronokat szigetelőkben és félvezetőkben is kelthetünk, ha a kötött, vegyértéksáv-béli elektront a tiltott sáv szélességénél nagyobb energiával a vezetési sávba gerjesztjük. Az elektron gerjesztésével viszont egy üres nívó marad a vegyértéksávban. Ezt betöltheti egy másik elektron, de akkor annak a helye marad üres. Az üres hely –lyuk úgy viselkedik, mint egy pozitív töltésű szabad részecske, és az elektronnal együtt hozzájárul az elektromos vezetéshez.

A félvezető anyagokban a tiltott sáv szélessége elegendően kicsi ahhoz, hogy már szobahőmérsékleten a vegyértéksávból elektron lépjen ki és a vezetési sávba kerüljön. A kilépett elektron (n) helyén elektron hiány lép fel, ami pozitív töltést (p) jelent ezt hívjuk lyuknak.

Az elektron gerjesztés hatására bekövetkező kiszakadását a kötött rácsszerkezetből párképződésnek (generációnak), a visszatérését rekombinációnak nevezzük. A generáció

során lyuk-elektron pár keletkezik, a rekombináció során azonban egy lyuk-elektron pár megsemmisül. Egy adott hőmérsékleten a töltéssűrűség egyensúlyban van, azonos számú generáció és rekombináció zajlik le. Termikus gerjesztés esetén tehát mindig azonos számú elektron és lyuk keletkezik.



17. ábra. Generáció illetve rekombináció a félvezetőben

A nagy tisztaságú félvezetőkben termikus gerjesztés hatására létrejött vezetést sajátvezetésnek, az ilyen típusú félvezetőt sajátvezetőnek (intrinsic) nevezzük. A sajátvezetés és a saját töltéshordozó sűrűség is nagymértékben függ a tiltott sáv szélessége és a hőmérséklet viszonyától ($\Delta W/T$). Ha ez a hányados kicsi, akkor a saját töltéshordozó sűrűség is kicsi és a vezetőképesség is kicsi [14].

A sajátvezetés töltéssűrűség koncentrációja kicsi és erősen hőmérsékletfüggő (mivel maga a hőenergia váltja ki), ami hátrányos a stabil vezetés szempontjából, ezért a gyakorlatban szennyezett félvezetőket használunk, de a saját vezetés, mint fizikai jelenség minden 0 K hőmérséklet felett üzemelő félvezetőben fellép. Léteznek félvezetők, amelyekben szándékosan hozunk létre intrinsic réteget, hogy a félvezető bizonyos - a felhasználás szempontjából fontos - tulajdonságait erősítsük (például pin-dióda).

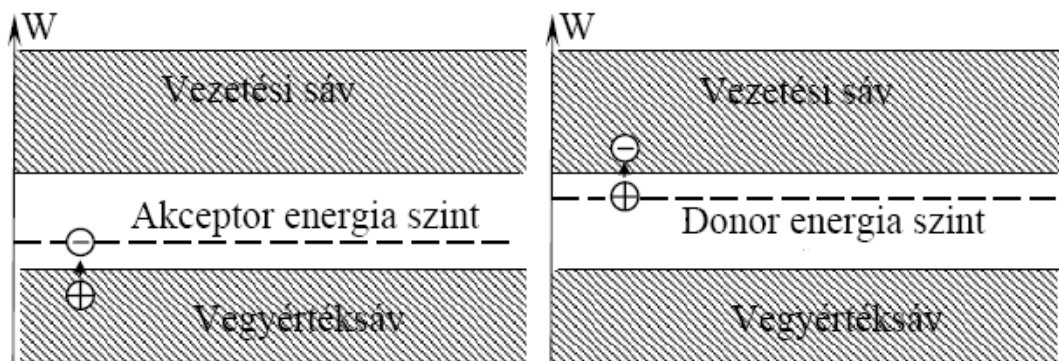
A félvezető alapanyagok (Si, Ge, SiC, stb.) 4 vegyértéke stabil kovalens kötésű rácsszerkezetet eredményez.

A félvezető alapanyagokhoz adalékolt 5 vegyértékű anyag azt eredményezi, hogy egy szabad (le nem kötött) elektron keletkezik minden szennyező atomra. Ez elektron többletet eredményez. Az így kapott félvezető réteget n rétegnek nevezzük (a szabad töltéshordozók töltése alapján), magát a szennyezést donor típusú szennyezésnek nevezzük.

3 vegyértékű szennyező anyag alkalmazása esetén egy szabad elektron hiány (lyuk) keletkezik minden szennyező atomra (a negatív töltés hiánya pozitív töltésként viselkedik és a vezetésben úgy vesz részt, mint az elektron, de ellentétes mozgási iránnyal). Az elektron hiány pozitív töltést, azaz p réteget eredményez. A vezetésben csak a szabad elektronok és lyukak vesznek részt. A 3 vegyértékű szennyezést akceptor típusú szennyezésnek nevezzük.

Az akceptor típusú szennyezés esetén a szennyező anyag energia szintje a tiltott sávba a vegyértéksávhoz közel esik, így a vezetés a szennyezett anyag vegyértéksávja és a szennyező anyag akceptor energia szintje között zajlik le.

A donor típusú szennyezés esetén a szennyező anyag energia szintje a tiltott sávba a vezetési sávhoz közel esik, így a vezetés a szennyezett anyag vezetési sávja és a szennyező anyag donor energia szintje között zajlik le.



18. ábra. Szennyező atomok által létesített nívók félvezető anyagban
(donornívó és akceptornívó)

A szennyezéssel bevitt töltéshordozókat (éppen meghatározó jellegük miatt) többségi töltéshordozóknak, míg a termikus gerjesztés révén keletkező lyuk-elektron párokat kisebbségi töltéshordozóknak nevezzük. A szennyezés mértékének jelölése: n^+ vagy p^+ erősen szennyezett, n^- vagy p^- gyengén szennyezett.

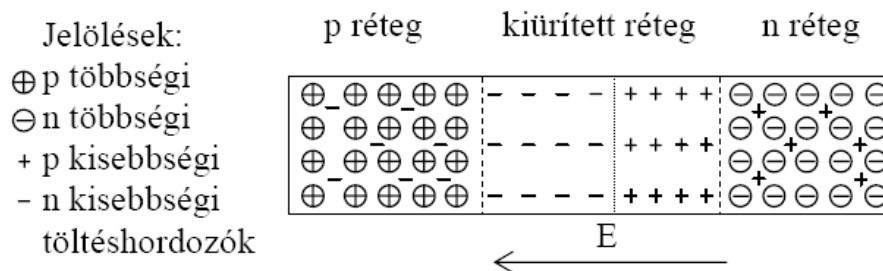
2.3. p-n átmenet

Adalékoljuk egy félvezető kristály egyik felét n-típusúra, a másikat p-típusúra. A p-típusú és n-típusú tartomány közötti határfelületet *p-n átmenetnek* nevezzük.

A p-n átmenet környezetében a szabad töltéshordozók véletlenszerű termikus mozgásukat végezve átjutnak a p- és n-típusú tartományt elválasztó határfelületen, és mivel az n-típusú

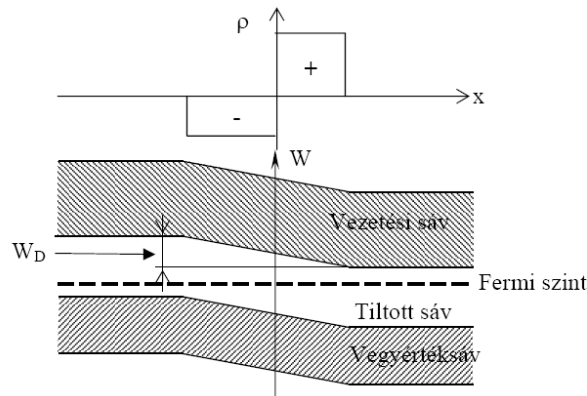
részben nagyobb az elektronok koncentrációja, mint a p-típusban, természetesen több elektron érkezik időegység alatt a p-típusú tartományba, mint onnan vissza. Ugyanígy, a p-típusú részből több lyuk jut át az n-típusúba, mint elektron.

A p-n átmeneten átdiffundáló töltéshordozók azonban nem maradnak "szabadok", hanem legnagyobb részük rekombinálódik az azon a részen lévő többségi töltéshordozóval: a p-típusú részben a lyukakkal, n-típusúban az elektronokkal. A rekombinációs folyamat miatt a p-n átmenet mindkét oldalán egy szabad töltéshordozókban szegény, kiürített réteg jön létre. A szabad töltéshordozók ugyanakkor töltéssel bíró részecskék. A p-típusú részt mind a beérkező elektronok, mind a távozó lyukak negatívvá teszik, míg az n-típusú részben a szabad töltéshordozók diffúziója miatt pozitív többlettöltés halmozódik fel. Ennek következtében a p-n átmenet körül a p-típusú oldalon negatív, az n-típusúban pozitív töltéssűrűség jön létre. Ez a tértöltés tartomány a kiürített (rekombinációs) rétegre terjed ki.



19. ábra. Szabad töltéshordozók kristály-menti eloszlása

A töltések elektromos teret hoznak létre. Az elektromos tér iránya a pozitív tértöltésű tartománytól a negatív felé, azaz az n-rétegtől a p-réteg felé mutat. Ennek megfelelően az n-típusú tartomány elektromos potenciálja pozitívabb, mint a p-típusú tartományé. A p-n átmeneten kialakult feszültség, a küszöbfeszültség végül megakadályozza a szabad töltéshordozók további átvándorlását az ellentétes típusú tartományba. A küszöbfeszültség értéke a dióda anyagától függ, egyéb tényezőktől közel független. Szilíciumdiódáknál a tipikus érték 0,7 V.



20. ábra. A töltéseloszlás és az elektromos potenciál változása a p-n átmenet környezetében

A 20. ábrán látható Fermi szint az a maximális energiaszint, amelyet az elektronok 0K hőmérsékleten még betölthetnek.

2.4. Diódák, PIN dióda

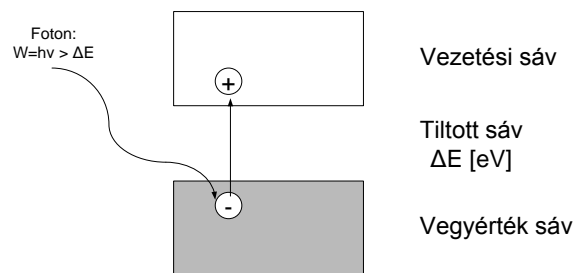
A rétegdióda egyetlen p-n átmenettel rendelkező félvezető eszköz. Olyan kétpólus, ahol az egyik kivezetés (az anód) egy félvezető kristály p-típusúra adalékolt oldalához, a másik kivezetés (a katód) az n-típusú oldalhoz csatlakozik.

Kapcsoljunk a p-oldalra pozitív, az n-oldalra negatív feszültséget. Ekkor a potenciálgát alacsonyabb lesz, és újabb elektronok diffundálhatnak át az n-oldalról a p-oldalra, illetve újabb lyukak a p-oldalról az n-oldalra, a rekombinációs tartomány keskenyebb lesz. Az átdiffundáló töltéshordozók az elektródokhoz jutnak, áram indul meg. Ha a külső feszültség meghaladja a küszöbfeszültséget, a kiürített réteg eltűnik, és a p-n átmeneten semmi nem akadályozza a szabad töltéshordozók áthaladását. Az áramerősség a diódára kapcsolt külső feszültség növelésével rohamosan nő. A dióda tehát átvezet. Az ilyen irányú feszültséget nyitófeszültségnek, az áramot nyitóirányú áramnak nevezzük.

Fordítsuk meg a feszültség irányát. Most a rákapcsolt külső feszültség a belső potenciálgát magasságát növeli, a többségi töltéshordozók diffúziója a határrétegen keresztül gátolva van, a rekombinációs tartomány kiszélesedik, a dióda "lezár". Az ilyen irányú feszültséget zárófeszültségnek nevezzük. Ilyenkor is folyik egy kis áram (nagyságrendekkel kisebb, mint nyitóirányban), melyet a kisebbségi töltéshordozók hoznak létre. Ez a záróirányú áram. Növelve a záróirányú feszültséget azt tapasztaljuk, hogy egy bizonyos értékéig az áram

gyakorlatilag állandó, de e feszültség túlhaladása után rohamosan növekedni kezd. Ezt nevezzük a dióda letörési feszültségének.

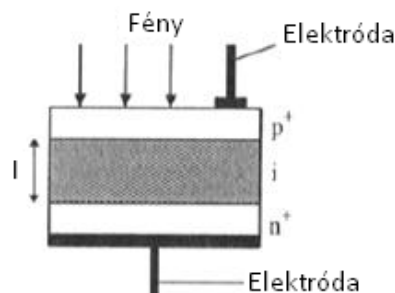
A diódák foto érzékelőként történő alkalmazásának alapja a belső fényelektromos hatás. Lényege, hogy ha záróirányba előfeszített p-n átmenetet a félvezető anyag tiltott sáv szélességénél nagyobb energiájú (rövidebb hullámhosszúságú) fénnel világítjuk meg, úgy a félvezetőben töltéshordozók válnak szabaddá, melyek a külső tér hatására elmozdulnak s a besugárzás erősségétől függő áramerősség növekedést hoznak létre.



21. ábra. Belső fényelektromos hatás

A 21. ábrán látható, hogy ha az elnyelt foton energiája $W=ħν$ nagyobb, mint a tiltott sáv E szélessége, akkor szabad elektron-lyuk pár jön létre.

A PIN dióda a félvezető diódák egy speciális típusa. Viselkedésének jellegzetességeit szerkezete adja meg, - a nevében is erre utalóan - olyan a felépítése, hogy a P és az N réteget egy hosszú és viszonylag nagy ellenállású szakasz választja el egymástól. Ennél a diódastruktúráknál a p és n típusú tartomány között egy sajátvezetésű („intrinsic”) tartomány helyezkedik el.



22. ábra. PIN dióda sematikus ábra

A PIN dióda planárdiffúziós eljárással készül. A planártechnológia a SiO_2 sajátos tulajdonságain alapul: a szilíciumszeletre termikusan növesztett oxidréteg rendkívül ellenálló

és ugyanakkor szelektíven maratható. Ennek következtében a diffúzió során az adalékanyag csak az oxidon nyitott ablakon át hatol be a kristályba, és így az átmenetterület nagy pontossággal és jó reprodukálhatósággal alakítható ki.

A PIN dióda működése közben, adott zárófeszültségnél a kiürített réteg a fajlagos ellenállás növelésével nő, tehát a gyengén adalékolt, intrinsic tartomány a működtetés során teljes egészében kiürített lesz. A dióda felépítése olyan, hogy az intrinsic tartományhoz csatlakozó n és p típusú kristályrétegek rendkívül keskenyek, tehát a beeső fény hatására keletkező töltéshordozó párok keltése döntő többségben a kiürített réteg tartományban történik. A kiürített rétegben a rekombináció valószínűsége kicsi, tehát a keltett töltéshordozók csaknem száz százalékban hozzájárulnak a fotóáramhoz. A működési sebességet a töltéshordozók kiürített rétegben való áthaladási ideje, az úgynevezett futási idő fogja megszabni. A futási idő nagyban térerosság függő [15].

A PIN dióda felépítéséből köszönhetően: az alábbi képességekkel rendelkezik:

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

2.5. A fotoelektron-sokszorozó és a PIN dióda összehasonlítása

A két legfontosabb komponens a fotoelektron-sokszorozóban, a fotokatód és az elektrongyorsító rendszer, a dinódák. Ahhoz, hogy teljesen megértsük a fotoelektron-sokszorozó működését, e két komponens fizikáját kell tisztázni.

A kereskedelemben kapható legtöbb fotoelektron-sokszorozó fotokatódja cézium és antimon ötvözetből (Cs-Sb) áll. Fotokatód választásánál szempont lehet a magas kvantum hatásfok. A kvantum hatásfok (Q_E) definíciója a következő:

$$Q_E = \frac{\text{emittált elektronok száma}}{\text{beérkező fotonok száma}} \quad (1)$$

A fotókatódok kvantum hatásfoka 20-30% közé esik.

Hogy a fotoelektron-sokszorozó milyen mennyiségű elektront képes előállítani, az a másodlagos emisszió alapul. A csőben található dinódák vagy cézium-antimon (Cs-Sb) vagy ezüst-magnézium (Ag-Mg) réteggel vannak bevonva. Ezen anyagok révén képesek a beeső elektronok újra emittálódni. Annak érdekében, hogy az elektronerősítés milliós nagyságrendű legyen, minden fotoelektron-sokszorozó több fokozatú erősítést használ.

Mikor az elektron elhagyja a fotókatódot, becsapódik az első dinódába, ahol minden egyes beeső elektron létrehoz δ számú elektront. Mivel ezek az elektronok nagyon kis energiával rendelkeznek, az első és a második dinóda között elektromágneses mező könnyen gyorsítja őket. Ha az elektronokat N lépésben erősítjük a teljes fotoelektron-sokszorozó erősítése:

$$A = \alpha \cdot \delta^N \quad (2)$$

ahol

A - a fotoelektron-sokszorozó erősítése

α - a sokszorozó rendszer által begyűjtött elektronok száma

δ - elektronok száma

N - az erősítések száma

Ez az erősítés nagyban függ a csőre kapcsolt feszültségtől. Mivel az erősítés nagyon érzékeny a nagyfeszültségre, ezért ezt a feszültséget előállító forrásnak rendkívül stabilnak kell lennie.

A spontán módon keletkező termikus elektronok száma függ a katód anyagi minőségétől, és igen erősen hőmérsékletfüggő. Ezért célszerű kis energiájú részecskék detektálásánál a fotókatódot lehűteni.

Az előzőek alapján a következőket lehet megállapítani a fotódiódáról és a fotoelektron-sokszorozóról:

- méretbeli különbség. Egy félvezető eszköz jóval kisebb, mint egy PM cső;
- a működési feszültség is sokkal kisebb 20-50V, a PM csőnél akár néhányszor 1000V is lehet;
- a PM válasz függvények alakja, nagyban függ a fotókatód hőmérsékletétől. Minél

magasabb a katód hőmérséklete, annál nagyobb a sötét áram, annál zajosabb a kimenő jel;

- a legnagyobb előny, a magas kvantum hatások. Egy tipikus PM cső a beeső fotonoknak csak a 10-25%-kát alakítja hasznos jellé, míg egy félvezető dióda akár 90%-os is lehet;
- a fotodiódák érzéketlenek a mágneses mezőre;
- PM cső működéséhez elengedhetetlen a megfelelő nagyságú vákuum biztosítása.

2.6. PIN dióda alkalmazása napjainkban

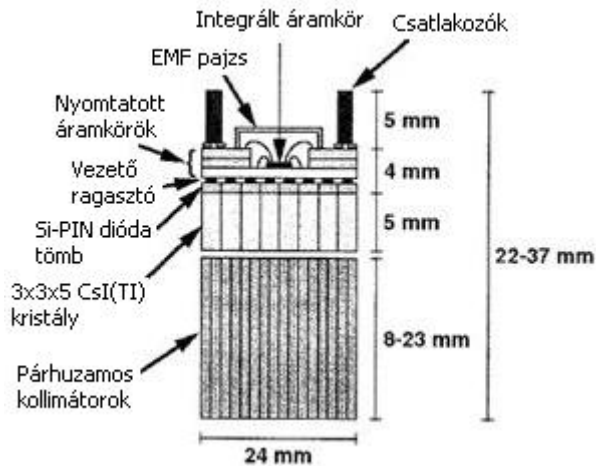
Az alábbiakban néhány alkalmazási példát mutatok be, ahol a szcintillátor kristály és a PIN dióda összekapcsolása képezi a detektort.

GAMMA KAMERA

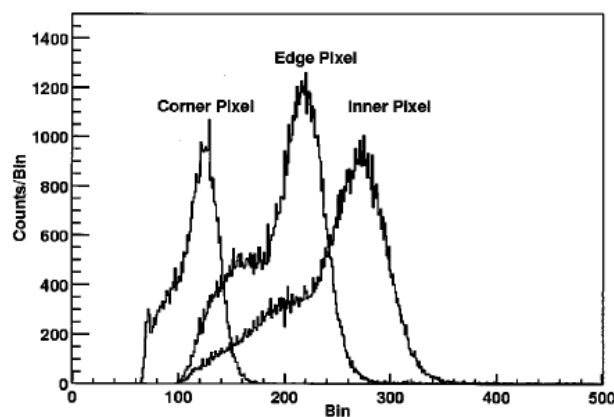
Az in-vivo képalkotó diagnosztikai eljárás a Röntgen sugárzás felfedezésével és annak orvosi-biológiai alkalmazásával kezdődött 100 évvel ezelőtt. Az azóta eltelt időben számos más képalkotó eljárás (ultrahang, NMR..) is elterjedt a napi klinikai gyakorlatban. Az egyes szervek in-vivo biokémiai folyamatainak izotópeloszlás térképét, s annak gyors időbeli megváltozását leképező, és képszerű formában történő megjelenítését megvalósító eszközök a nukleáris képalkotó berendezések a gamma (Anger) kamera (2D), SPECT (Foton Emissziós Tomográfia, 3D), PET (Pozitron Emissziós Tomográfia, 3D) [16].

Az Egyesült Államokban évente 180 ezer új mellrákot diagnosztizálnak. A hagyományos Anger kamerák nem a legalkalmasabb eszközök a tumor felismerésére. A térbeli felbontása alacsony, ami szintén csökkenti a tumor diagnosztizálását. Ezen felismerések vezettek az un. kompakt gamma kamerák fejlesztéséhez, amelyek kisebb mérettel és nagyobb érzékenységgel rendelkeznek.

Kifejlesztettek egy olyan 64-pixeles gamma kamera rendszert, amely egy optikailag teljesen elszigetelt $3 \times 3 \times 5 \text{ mm}^3$ -es CsI(Tl) kristályból, egy alacsony zajú Si PIN fotodiódából és egy, a kiolvasásra szolgáló integrált áramkörből áll. 50V-os előfeszítésnél a 64-pixeles fotodióda tömb maradékáram kb. 28pA, 98,5%-os teljesítménynél kisebb mint 100pA, a kvantum hatásfoka 540nm-nél 80%. A 64-pixeles fotodióda tömb $3 \times 3 \text{ mm}^2$ területű és 300 μm vastag. A kerületén egy gyűrű fut körbe a maradék áramok „begyűjtésére”.



23. ábra. A képképző rendszer legfontosabb egységei [16]



24. ábra. Szoba hőmérsékleten 140keV ^{99m}Tc
FWHM 23%, 19.8%, 20.4% [16]

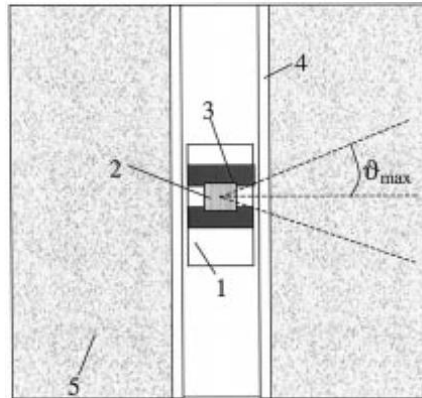
A gamma kamera használható radiológiai fegyverek, balesetek esetén szennyezettség ellenőrzésére.

TALAJSZENNYEZETTSÉG MÉRÉS

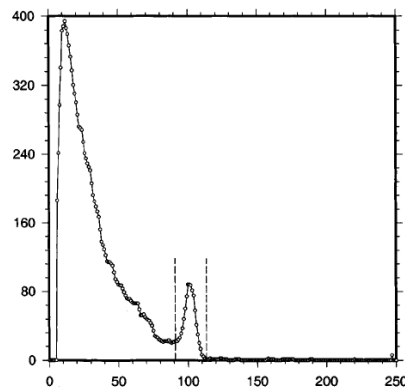
A talaj természetes és mesterséges gammasugárzó izotópjainak a helyszíni, izotópszelektív mérésére is használhatóak a γ -szcintillációs detektorok.

A hagyományos mérési eljárás a rétegről rétegre való mintavételezés. Az eljáráshoz laboratóriumi körülmények szükségesek, ezzel azonban pontos eredményeket kapunk. Azonban szükség van egy olyan terepi spektroszkópiai eszközre mellyel gyors de nem „túl” pontos méréseket lehet végezni.

Kitűnő megoldás lehet az ún. DIP detektor [17], mellyel mélységi felderítést végezhetünk a talajban, Cs-137 szennyeződésre. A detektor rendszer CsI(Tl) szcintillációs kristályból, PIN fotódiódából és kiértékelő elektronikából áll.



25. ábra. DIP detektor sematikus rajza
a detektor doboza; 2-CsI(Tl) kristály; 3-ólom kollimátor;
4-megvezető cső; 5-szennyezett talaj [17]



26. ábra. DIP detektor energia spektruma ^{137}Cs forrással [17]

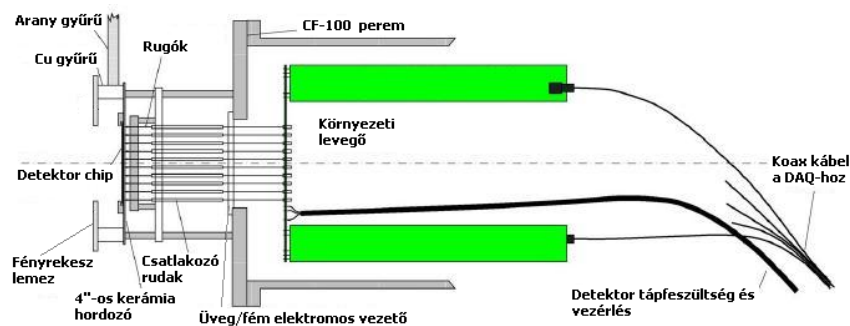
A 26. ábrán jól látható, hogy a detektor egyértelműen kimutatja a Cs-137 forrást, így alkalmas talajszennyezettség helyszíni mérésére.

ALACSONY ENERGIÁJÚ BÉTA RÉSZECSKÉK DETEKTÁLÁSA

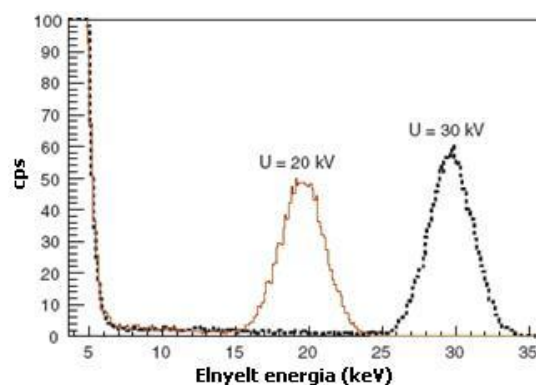
A PIN diódát nem csak gamma és neutron részecske detektálásra, hanem béta sugárzás detektálására is alkalmazzák.

A Karlsruhe Trícium Neutrínó Kísérlet (KATRIN) alapja a trícium béta bomlásakor keletkező elektronok pontos, precíz mérése [18]. Ez egy nagy elektrosztatikus spektrométerrel történik,

amit egy elektron detektor követ. A detektor legfőbb jellemzői a nagy érzékeny felület (~80cm²), a jó energia felbontás ($\Delta E = 600\text{eV}$ 18.6keV-nél) és a multi-pixel felépítésnek köszönhető térbeli felbontás (~3mm). A cikkben egy új fajta PIN diódás detektor rendszert ismertetnek, amely redukált felülettel (~16cm²) és redukált pixel számmal (64) rendelkezik. A detektorrendszer érzékelője egy nagy szilícium PIN dióda tömbből (44x44mm²) áll, amely 8x8 szegmensből (pixelből) áll. A szegmentált PIN dióda chip egy folyékony nitrogénnel hűtött kerámia hordozóra van felfogatva rozsdamentes acél kerettel. A kerámia laphoz szintén hozzáillesztettek egy-egy JFET közös drain vezérlésű fokozatot, minden egyes detektor elemhez. Ez az elrendezés csökkenti a különböző zajok (elektromágneses impulzusok, indukciós, mikrofonhatás) zavaró hatását. Hátránya a JFET közös drain vezérlésű fokozat alkalmazásának, hogy a feszültség erősítése kisebb 1-nél.



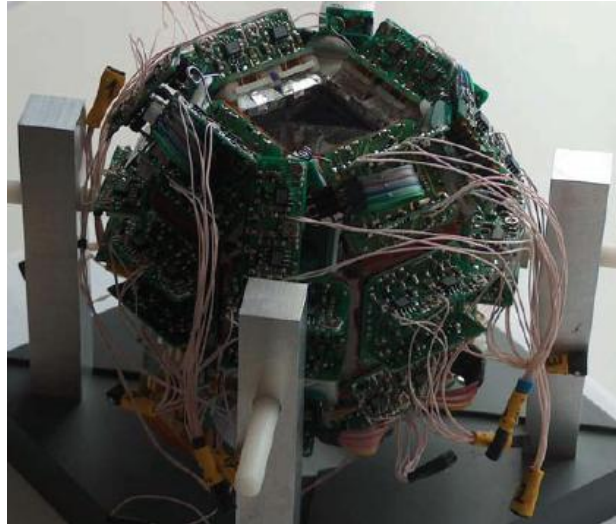
27. ábra. A detektor hosszirányú keresztmetszete [18]



28. ábra. A detektor válasz függvénye [18]

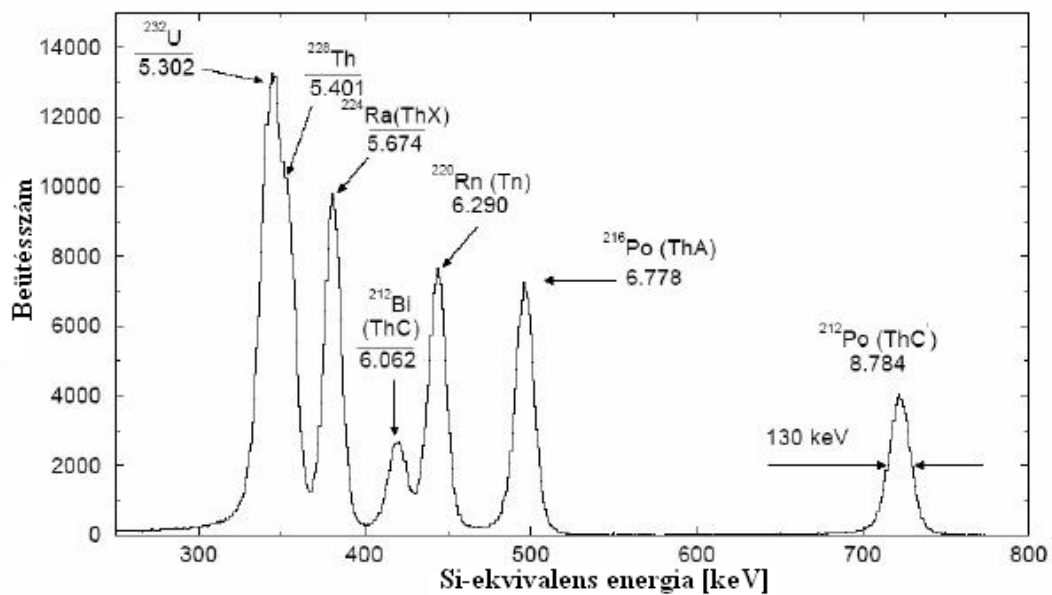
ALFA RÉSZECSKÉK DETEKTÁLÁSA

Mint az előzőleg tárgyalt detektálási módszereknél, itt is az egyik legfontosabb dolog a detektorelrendezés. Jó példa erre egy magyar fejlesztésű detektor, a DIAMANT, könnyű töltött részecske detektor rendszer [19].



29. ábra. DIAMANT detektor [19]

Ebben a gömb geometriában, egy gömb felületén helyeznek el 84 darab CsI(Tl) szcintillátor kristályt a hozzájuk csatlakozó diódával. Minden egyes detektor fényzáró burkolatban elhelyezett négyzetes hasáb alakú kristály. A magfizikai kísérletek és a későbbiek során a detektorok és az előerősítők vákuumban vannak. A DIAMANT-nak nevezett detektorrendszer a debreceni Atomki és egy bordeaux-i csoport közötti együttműködés keretében Atomki-beli detektortechnikai és nukleáris elektronikai fejlesztések alapján készült. A detektorrendszer a könnyű töltött részecskék energiájának, fajtájának és becsapódási időpontjának meghatározására szolgál.

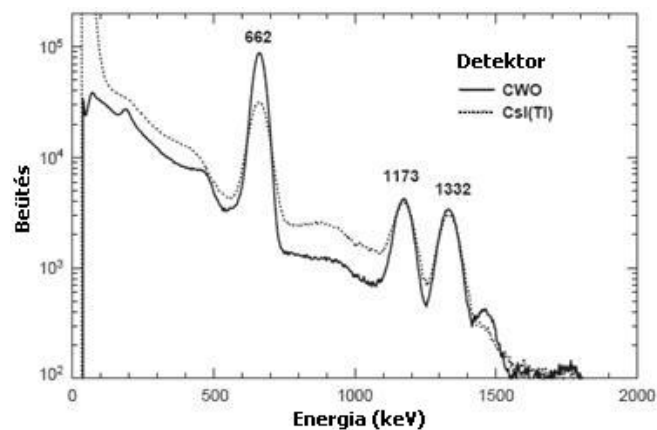


30. ábra. α forrás DIAMANT által mért spektruma [19]

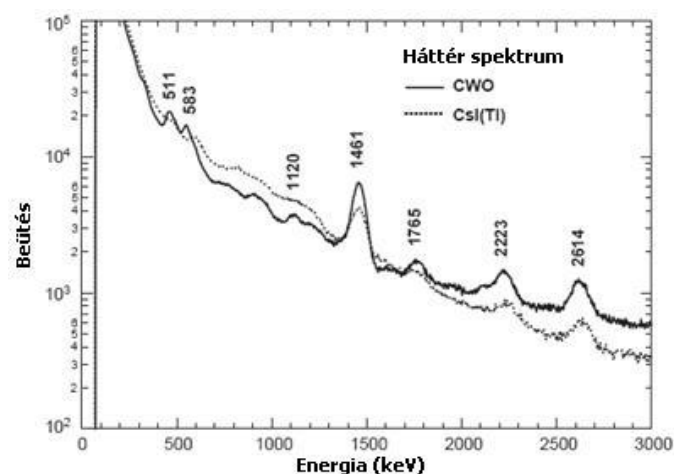
PIN DIÓDA AZ ŰRKUTATÁSBAN

A múltban az űrkutatásban NaI(Tl), CsI(Tl), BGO szcintillátor kristályokat valamint HPGe félvezető detektorokat használtak. Méretük és egyéb hátrányaik miatt új anyagok és rendszerek kifejlesztésén dolgoznak. A PIN diódák felé kismérete és alacsony fogyasztása miatt fordultak [20].

2007-ben a NASA egy „mobil tudományos laboratórium” indított a Marsra. Ennek a laboratóriumnak része volt egy gamma spektrométer (GRS). A legfőbb követelmény ezen detektor rendszernél az alacsony súly, alacsony fogyasztás és az ellenállás az állandó kozmikus sugárzásnak. Két felépítést vizsgáltak, CdWO₄ szcintillátor után egy fotoelektron-sokszorozót és egy CsI(Tl) szcintillátor után egy PIN fotodiódát.

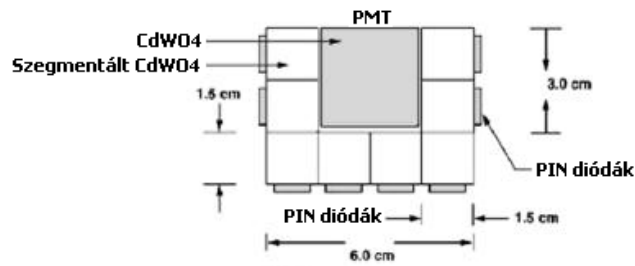


31. ábra. ¹³⁷Cs és ⁶⁰Co forrás energia spektruma, CdWO₄ és CsI(Tl) kristállyal [20]

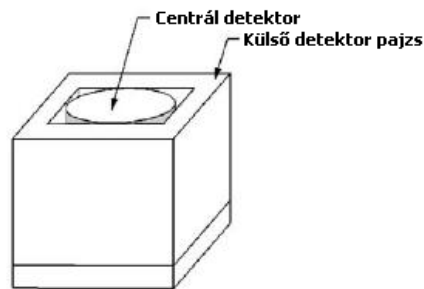


32. ábra. Gamma háttér spektrum [20]

Az eredmények és a szimulációk feldolgozása után a következő „ajánlott” konfigurációra jutottak.



33. ábra. A detektor felülnézeti ábrája [20]



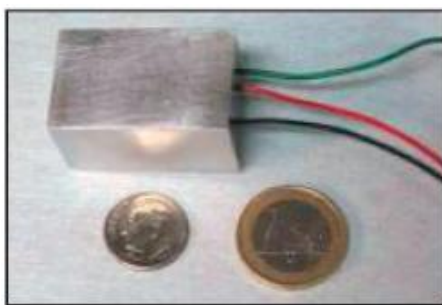
34. ábra. A detektor 3D képe [20]

Ez az elrendezés egy középső CdWO_4 és több ezt körül ölelő CdWO_4 kristályból áll, amelyek egymástól optikailag teljesen elszigeteltek. A középső kristályt egy fotoelektron-szorzóval olvassuk ki, míg az oldalsó kristályokat PIN diódákkal.

KERESKEDELEMBEN KAPHATÓ KÉSZ KONFIGURÁCIÓK

Kész detektort, tehát valamilyen típusú szcintillátor kristályt PIN diódával összekötve, kereskedelemben nem sokat találni. Inkább a kutatóbázisok (egyetemek, kutató laboratóriumok, stb.) fejlesztései között találjuk őket.

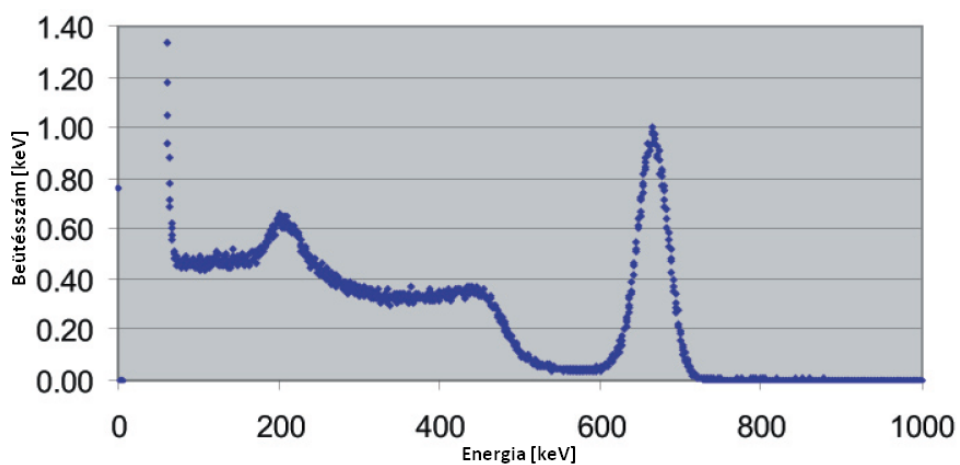
Saint-Gobain Crystals [21]



35. ábra. CsI(Tl) + PIN dióda detektor tokozásban, kivezetésekkel

1. táblázat: Detektor paraméterei

PIN dióda érzékeny felülete	10mm x 10mm
CsI(Tl) kristály csatlakozó felülete	10mm x 10mm
Előfeszítés	12V
Zaj	70keV
Detektor mérete [mm]	21x23x35,6



36. ábra. Gyártó által közölt, az eszközzel felvett ^{137}Cs spektrum



37. ábra. CdTe + PIN dióda detektor tokozásban, kivezetéssel

2. táblázat: Detektor paraméterei

PIN dióda érzékeny felülete	10mm x 10mm
CdTe kristály csatlakozó felülete	10mm x 10mm
Előfeszítés	12V
Zaj	70keV
Detektor mérete	Ø35mm, 70mm

Következtetések

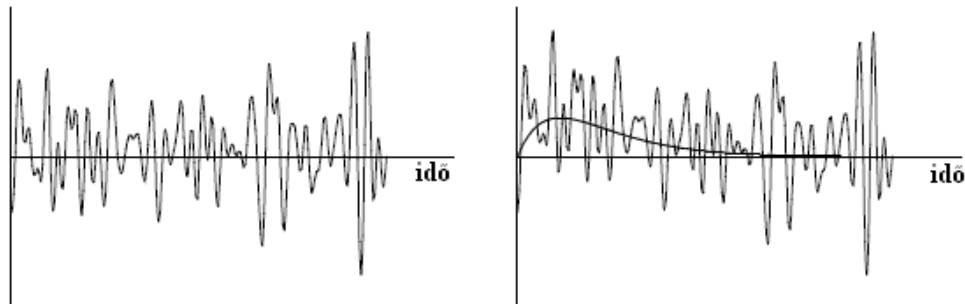
A fejezetben összefoglaltam a félvezető eszközök azon fizikai tulajdonságait, amik alkalmassá teszik a kis energiájú fény impulzusok detektálására. Megvizsgáltam, hogy mi történik, ha egy szcintillációs foton csapódik a félvezető kiürített rétegébe, miután megállapítottam, hogy a diódából kijövő jel nagysága arányos a diódába érkező fény intenzitásával. A diódába beeső fény intenzitása arányos a szcintillációs kristályban leadott energiával, ezért a PIN dióda alkalmas izotópszelektív detektor készítésére. Összehasonlítottam a szcintillációs mérés technikában használt fotoelektron-sokszorozót és a PIN diódát, ismertetve előnyeiket illetve hátrányaikat. Ezen tulajdonságokat figyelembe véve megállapítottam, hogy a PIN dióda alkalmasabb, nagyobb (terepi) igénybevétel mellett, a szcintillációs kristályból érkező fény impulzusok detektálására, mint a fotoelektron-sokszorozó.

3. FEJEZET

PIN DIÓDÁS DETEKTORRENDSZER KIALAKÍTÁSA

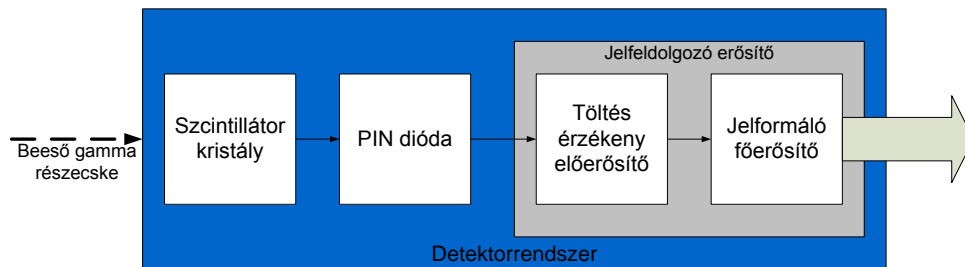
3.1. A detektorrendszer felépítése

Ahhoz, hogy minél pontosabb információt kapjunk az egyes gammasugárzó izotópokról, az érzékelőkben keltett jeleket a lehető legpontosabban kell detektálni. A környezetben található különböző zavarforrások (elektromos, elektromágneses) nagyban nehezítik ezt.



38. ábra. Fehérzaj illetve a fehérzajban „elveszett” hasznos jel hullámformája

A feladat, hogy megkülönböztessük a számunkra hasznos jelet a zavarjeltől. Ezt a feladatot megvalósító rendszer rendszertervét a 39. ábrán láthatjuk.



39. ábra A detektor rendszerterve

A 39. ábra szerint, az általam tervezett detektorrendszer három fő egységre oszthatjuk:

- szcintillátor kristály;
- PIN dióda;
- jelfeldolgozó elektronika (töltés érzékeny előerősítő és jelformáló főerősítő).

A szcintillátor kristály és a PIN dióda a zaj szempontjából adott tulajdonságokkal rendelkeznek, amiket legfeljebb konstrukciós megoldásokkal (jobb fényzárás, jobb

fényillesztés, stb.) tudunk javítani. Viszont az előerősítő és a főerősítő elektromos illetve zaj paramétereit pontos számításokkal már előre meg tudjuk adni, így ezeket a prototípus összeállításánál a már kiszámított értékekre beállíthatjuk.

3.1.1. Töltés érzékeny előerősítő

Az érzékelőkből érkező jelek általában rövid impulzusok, $i_s(t)$. Az impulzusok szélessége is változik az érzékelő működése miatt, egy vékony Si érzékelőnél néhány 100ps, míg egy szcintillátor kristálynál néhány 10 μ s is lehet.

Az érzékelt részecske energiájával arányos töltés nagysága tehát [22]:

$$Q_s = \int i_s(t) dt \quad (3)$$

ahol

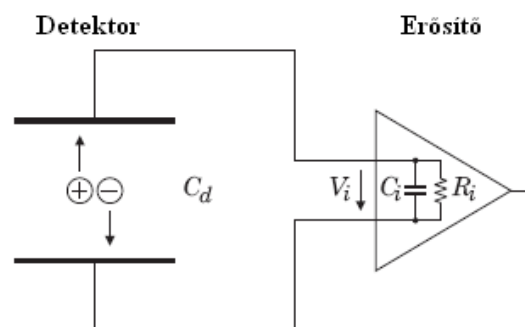
i_s – az érzékelőből érkező áramimpulzusok [A]

t – az idő [s]

Az integrálást a következő lineáris rendszerekkel végezhetjük el:

- maga a szenzor integrálja a jelet (kondenzátor);
- integráló előerősítőt használunk (töltés érzékeny előerősítő);
- erősítés után egy integráló típusú analóg-digitális átalakítót használunk;
- mintavételezés és digitalizálás után, numerikus módszert alkalmazunk.

A nagy energiájú fizikai méréseknél az első három eljárást alkalmazzák leggyakrabban. A kifejlesztett eszközben a töltés érzékeny előerősítőt használtam, mivel költség kímélőbb, mint a digitalizálás, illetve pontosabban beállíthatók az integrálás paramétereit (felfutási, lefutási időállandó).



40. ábra. Töltés kigyűjtés és jel integrálás modellje

ahol

C_d – a detektor kapacitása [F]

V_i – a detektor által az erősítő bemenén keltett feszültség nagysága [V]

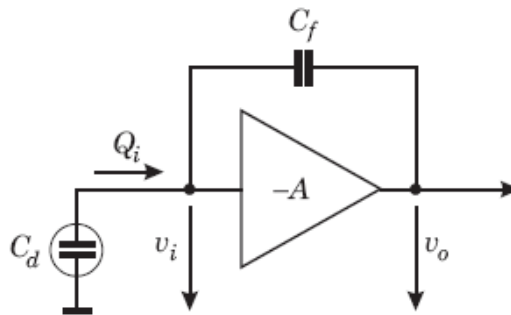
C_i – az erősítő bemeneti kapacitása [F]

R_i – az erősítő bemeneti ellenállása [Ω]

Az előző fejezetben ismertetett fizikai folyamatok következtében a szenzort úgyis modellezhetjük, mint egy kapacitással rendelkező kondenzátor. Ha az erősítő bemeneti ellenállása nagyon kicsi, az erősítő egy rövid időállandóval fogja kisütni a szenzor kapacitását, ami jel veszteséggel járhat. Azonban ha az erősítő bemeneti ellenállása nagy, akkor ez az időállandó elég a hasznos jel teljes kiolvasásához [23], és az erősítő bemenetén megjelenő jel nagysága

$$V_i = \frac{Q_s}{C_d + C_i} \quad (4)$$

Hogy megvalósítsuk a szenzorból érkező impulzus integrálását, helyezzünk egy kondenzátort az erősítő visszacsatoló ágába.



41. ábra. Integráló alapséma

ahol

Q_i – az erősítőbe beáramló töltés mennyisége [C]

v_i – az erősítő bemenetén mért feszültség nagysága [V]

A – az erősítés mértéke

C_f – a visszacsatoló kondenzátor értéke [F]

v_o – az erősítő kimenetén mért feszültség nagysága [V]

Az erősítő nyílthurkú feszültségerősítése $-A$, ahol a negatív előjel a fázisfordítást jelöli. Hogy egyszerűsítsük a számítást, tételezzük fel, hogy az erősítő bemeneti impedanciája végtelen, vagyis nem folyik áram az erősítő bementén.

Ha a szenzor felől érkező bementi jel nagysága v_i , akkor az erősítő kimenetén megjelenő jel $-Av_i$ nagyságú. Így, a visszacsatoló kondenzátoron eső feszültség nagysága

$$v_f = v_i - v_o = (A + 1) \cdot v_i \quad (5)$$

ahol

v_f – a visszacsatoló kondenzátoron eső feszültség nagysága [V]

Tehát a kondenzátoron keletkezett töltés nagysága

$$Q_f = C_f \cdot v_f = C_f (A + 1) \cdot v_i \quad (6)$$

ahol

Q_f – a visszacsatoló kondenzátoron keletkezett töltés nagyság [C]

Mivel áram nem folyik az erősítő felé, ezért a teljes Q_s töltés a kondenzátoron jelentkezik, tehát $Q_s = Q_i$.

Az erősítők fontos jellemzője az ún. Miller hatás, amely lényege, hogy ha az erősítő invertáló bemenete és a kimenet közé kapcsolt kapacitás (C) úgy viselkedik a bemenet felé, mintha a kapacitása $(1+A)C$ lenne. A Miller hatás miatt tehát

$$v_o = -A \cdot v_i = -A \frac{Q_i}{(A + 1)C_f} \quad (7)$$

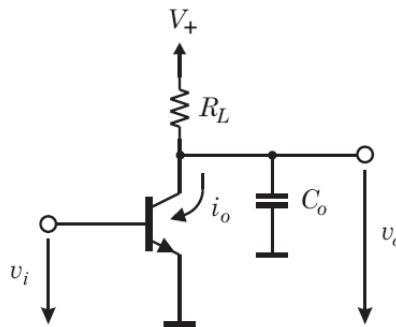
Elegendően nagy nyílthurkú erősítést választva tehát a kimeneti feszültség

$$v_o = -\frac{Q_i}{C_f} \quad (8)$$

Ami azt jelenti, hogy a kimeneti feszültség független a bemenetet terhelő kapacitásoktól, a töltés erősítést csak a visszacsatoló kondenzátor befolyásolja.

A töltés érzékeny előerősítők lényege tehát nem az, hogy a bemeneti érzékelő jelét minél nagyobb szintre erősítse, ellenkezőleg. A töltés érzékeny előerősítők erősítése általában egységnyi. Ezzel azt érjük el, hogy az érzékelőben keltett töltés nagysága teljes egészében megjelenik a visszacsatoló kondenzátoron. Illetve a kimeneti jel nagysága független a bemeneti (detektor) kapacitástól, csak a visszacsatoló kondenzátor értéke szabja meg.

A töltés érzékeny erősítők nem egy erősítő elemet takarnak, hanem több erősítő összekapcsolását. Későbbiek során bebizonyítom, hogy ezen erősítők legkritikusabb része az első, bemeneti fokozat. A gyakorlatban ezt az elemet egy bipoláris, térvezérlésű tranzisztorral, esetleg elektroncsővel valósítják meg. A további elemek már lehetnek integrált áramkörök, de szokás ezeket is tranzisztorokkal megépíteni. A 42. ábrán egy ilyen bemeneti fokozat egyszerűsített kapcsolása látható.



42. ábra. Egyfokozatú erősítő kapcsolási rajza

ahol

R_L – a tranzisztor felhúzó ellenállása [Ω]

i_o – a tranzisztor kollektor árama [A]

A fokozat feszültségerősítése

$$A_v = \frac{dv_o}{dv_i} = \frac{di_o}{dv_i} Z_L \equiv g_m Z_L \quad (9)$$

ahol

Z_L – a felhúzó ellenállás és a kimeneti kapacitás által meghatározott impedancia [Ω]

g_m a tranzisztor meredeksége

g_m jelentősen befolyásolja az erősítést, a sávszélességet és a zajt. Z_L komplex szám, értéke

$$\frac{1}{Z_L} = \frac{1}{R_L} + i\omega C_0 \quad (10)$$

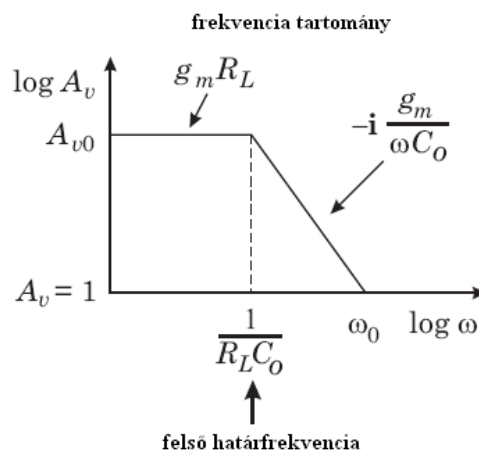
ahol

ω – a körfrekvencia [Hz]

A feszültségerősítés tehát

$$A_v = g_m \left(\frac{1}{R_L} + i\omega C_0 \right)^{-1} \quad (11)$$

Alacsony frekvencián a második tag elhanyagolható, mivel a kondenzátor ilyenkor szakadásként viselkedik. Magasabb frekvenciákon azonban a második tag dominál, ezért egy bizonyos frekvencia (felső határfrekvencia) felett már erősítés csökkenés lép fel.



43. ábra. átviteli görbe frekvencia tartományban

A felső határfrekvencia (vágási frekvencia) értéke

$$f_u = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{1}{2\pi R_L C_0} \quad (12)$$

ahol

f_u – felső határfrekvencia [Hz]

τ – R_L és C_0 által meghatározott időállandó [s]

Mivel egy töltés érzékeny előerősítő több fokozatból épül fel, és minden fokozatnak van saját vágási frekvenciája, az egyes fokozatok vágási frekvenciáját úgy kell megválasztani, hogy a domináns időálló tartományában ne okozzanak erősítés csökkenést, vagyis nagyobb legyen a vágási frekvenciájuk, mint a bemeneti fokozaté [23].

A fentebb említett Miller hatás miatt a bemeneti impedancia értéke

$$Z_i = \frac{Z_f}{A+1} \approx \frac{Z_f}{A} \quad (13)$$

ha a nyílthurkú feszültségerősítés jóval nagyobb, mint egy. A feszültségerősítés frekvencia tartománybeli képletéből levezethető [23], hogy $Z_i \approx \frac{Z_f}{A}$, ahol $Z_f = \frac{1}{i\omega C_f}$. Mivel tudjuk, hogy a töltés érzékeny előerősítő visszacsatolásának impedanciája $Z_f = \frac{1}{i\omega C_f}$, ezért a két egyenletből a bemeneti impedancia

$$Z_i = \frac{i}{\omega C_f} \cdot \frac{1}{i \frac{\omega_0}{\omega}} = \frac{1}{\omega_0 C_f} \equiv R_i \quad (14)$$

Az egyenletből látszik, hogy ha a frekvencia alacsony ($f \ll f_u$) az előerősítő bemenete kapacitív, míg magasabb frekvencián ($f_u \ll f$) a bemenet rezisztív.

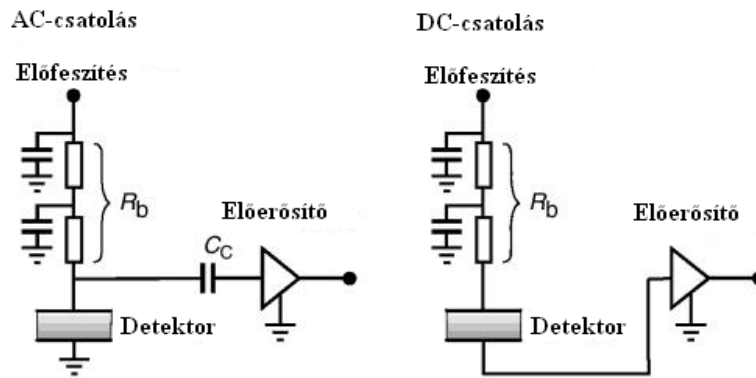
Ha az előerősítő bemenete rezisztív a detektor C_d kapacitását ez az ellenállás süti ki, τ_i időállandóval,

$$\tau_i = R_i C_d = \frac{1}{\omega_0 C_f} C_d \quad (15)$$

Az egyenletből az látszik, hogy ha növekszik a detektor kapacitása, nő az előerősítő felfutási ideje. Szintén megállapítható, hogy gyors felfutási idő eléréshez a visszacsatoló kondenzátor értékének jóval kisebbnek kell lennie, mint a detektor kapacitásának.

3.1.2. A detektor csatolása az előerősítőhöz

A detektor AC illetve DC csatolással csatlakozhat az előerősítőhöz.



44. ábra. AC és DC csatolás

ahol

R_b – az előfeszítő ellenállás nagysága [Ω]

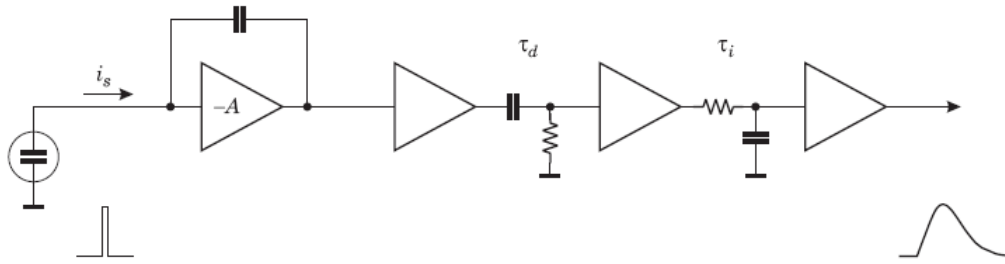
C_c – a detektor és az erősítő között lévő csatoló kondenzátor kapacitása [F]

Ha önmagában ionizáló sugárzást, vagy ha a szcintillátor kristály által gerjesztett fény impulzust akarjuk mérni, minden félvezető detektornak szüksége van előfeszítő feszültségre, ami néhány 10V-tól néhány 1000V-ig terjed. A PIN diódáknál általában nem alkalmaznak 100V-nál nagyobb előfeszítést, mivel az már nagyban növelné a sötétáram nagyságát, ami a zaj emelkedéséhez vezet.

R_b értéke általában 10M Ω és 100M Ω között szokott lenni. A soros ellenállás áramkorlátozó szerepet játszik, értékének megválasztása fokozott figyelmet igényel, mivel nagy szerepet játszik a bemeneti zaj meghatározásában. A kondenzátorok szerepe az előfeszítés zavarcsökkentése. Az AC-csatolásnál egy kondenzátoron keresztül jut a detektor jele az előerősítőbe, így egyenfeszültségtől mentes jelet kapunk. A DC-csatolás előnye mellett, hogy jobb a jel-zaj viszonya, magas dózisteljesítménynél is használható.

3.1.3. Jelformáló főerősítő

Minden, a detektor után alkalmazandó elektronika, amelyet jelfeldolgozó elektronikának nevezünk. Feladata, hogy a detektor jelét a további feldolgozást végző számláló vagy spektrum analízátor elektronikája számára kellő nagyságúra erősítse.



45. ábra. Előerősítő és főerősítő általános felépítése

ahol

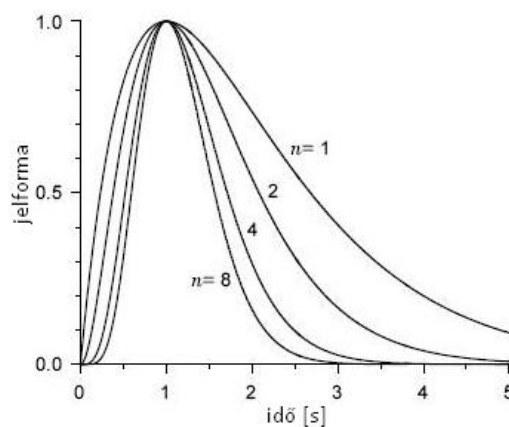
i_s – a detektor felől érkező áramimpulzus nagysága [A]

τ_d – differenciális időállandó [s]

τ_i – integrálási időállandó [s]

A megfelelő jelszint elérése mellett a főerősítő másik feladata a jel-zaj viszony kellő szinten tartása. Ha egy egyszerű erősítőt alkalmaznánk, az minden frekvenciát felerősítene, vagyis a zajt is. Ezért alkalmazunk a főerősítőben egy felül illetve alul áteresztő szűrőket, amelyek differenciális és integrálási időállandóval rendelkeznek. Ezen időállandók megválasztásánál, fontos szerepe van az előerősítóből érkező jel időállandójának, illetve a zaj szempontjából a legideálisabb, ha ez az integrálási és a differenciálási időállandó azonos.

Gyakran találkozunk olyan megoldásokkal, ahol nem csak egy integrátort alkalmaznak, hanem több integrátort sorba kapcsolnak. Ezzel a megoldással a későbbi jelfeldolgozás számára állítanak elő a gauss görbéhez minél jobban hasonlító jel alakot, azonban a jel-zaj viszony illetve a rendszer gerjedékenysége így jelentős mértékben romlik.



46. ábra. n -tagú integrátor alkalmazása

3.2. Zajszámítás

A nukleáris mérés technikában talán a leggyakoribb probléma a külvilág felől érkező zavaró jelek kiszűrése, illetve a zavarjelek, megkülönböztetése a hasznos jeltől. Ahhoz, hogy a zaj szempontjából legjobb tulajdonságokkal rendelkező detektort készíthessük, pontosan meg kell határoznunk, hogy az egyes komponensek miként vesznek részt a „zajkeltésben”.

3.2.1. Zaj definíciója és hatásai

A zaj legtágabb értelemben úgy definiálható, mint bármely zavaró hatás, amely a hasznos jelet elfedi vagy zavarja. Ezek a zavarok gyakran származnak a vizsgált rendszeren kívüli forrásokból, mint például az 50Hz-es hálózati vezetékek és az áramkör közötti elektrosztatikus vagy elektromágneses csatolásból, rádióadókból vagy a fénycsővilágításból. Az egymás mellett elhelyezett áramkörök közötti áthallás, a tápegységekből felszedett brumm, vagy az alkatrészek mechanikai rezgése okozta mikrofónia mind zavarforrás [24].

Egy érzékelő felbontóképességének határa általában a zaj. Egy rendszer dinamikatarományát a zaj határozza meg. A feldolgozható legnagyobb jelszint ugyan az áramkör jellemzői korlátozzák, a legkisebb észlelhető (detektálható) jelszintet azonban a zaj szabja meg.

A zaj teljes mértékben véletlen (sztochasztikus) jel. Olyan frekvenciakomponensekből áll, amelyeknek amplitúdója és fázisa is véletlenszerű. Bár a zaj hosszú idejű effektív értéke mérhető, pontos amplitúdója egy tetszőleges időpillanatra előre nem határozható meg.

A zaj sáv szélesség nem azonos az általánosan használt, 3dB-es pontok között mért sáv szélességgel. Más a sáv szélesség definíciója a jelre és más a zajra vonatkozóan. A klasszikus definíció szerint egy erősítő vagy egy hangolt kör sáv szélessége azon pontok közötti frekvenciatávolság, amelyeken a jel teljesítménye a felére csökken. Ezek a pontok a frekvenciatengelyen ott vannak, ahol a jelátvitel 3dB-el csökken a közepes frekvenciás vagy sávközépi referenciaértékhez képest. Ez azt jelenti, hogy a feszültség szint a sávhatáron sávközépi értékének $\frac{1}{\sqrt{2}}$ -ed részére csökken.

A zaj sáv szélesség azon elképzelt téglalap alakú teljesítményerősítés-görbe által határolt frekvenciatartomány, amely görbe alatti terület egyenlő a tényleges teljesítményerősítés-görbe alatti területtel, ordinátája pedig a maximális teljesítményerősítés. A zaj sáv szélességet tehát

megkapjuk, ha a teljesítményerősítés-görbe alatti területet elosztjuk a görbe maximális ordinátájával. Egyenlet formájában felírva:

$$B_z = \frac{1}{A_{p \max}} \int_0^{\infty} A(f) df \quad (16)$$

ahol

B_z - a zaj sávszélesség [Hz]

f - frekvencia [Hz]

A_p - a frekvenciafüggő teljesítményerősítés

$A_{p \max}$ - a teljesítményerősítés maximális értéke

Ököl szabályként [24] alkalmazzák zajszámításoknál, hogy ha a nagyfrekvenciás átvitelt egy egyszerű RC időállandó határozza meg, akkor a feszültségerősítés oktávonként 6dB-el csökken, és a zaj sávszélesség

$$B_z = \frac{\pi}{2} f_2 = 1,571 f_2 \quad (17)$$

ahol

f_2 - a feszültségerősítés-karakterisztika felső vágási frekvenciája

Ehhez hasonlóan, ha egy erősítő frekvencia átvitelét két azonos időállandójú RC tag határozza meg, a nagyfrekvenciás feszültség erősítés oktávonként 12dB-el csökken, és a zaj sávszélesség

$$B_z = 1,222 f_2 \quad (18)$$

lesz. Az általam kialakított rendszerben is ezt a képletet alkalmaztam a zaj sávszélességének meghatározásához.

Még egy nagyon fontos dolgot kell tisztázni a komponensek ismertetése előtt. Ez pedig a zajfeszültségek összegzése. Ha két különböző frekvenciájú, U_1 és U_2 effektív forrásfeszültségű szinuszos generátort kapcsolunk sorba, akkor ez eredő feszültség effektív értéke $(U_1^2 + U_2^2)^{1/2}$ lesz. Az eredő feszültség négyzetes középértéke az összetevők négyzetes középértékeinek összegével egyenlő:

$$U_e^2 = U_1^2 + U_2^2 \quad (19)$$

Ugyanez igaz a zajfeszültségekre is, tehát a különböző zajforrások egyesítésekor létrejövő eredő zajfeszültség négyzetes középértéke egyenlő az egyes független zajfeszültségek négyzetes középértékeinek összegével.

3.2.2. A PIN dióda saját zaja

Mint a fényérzékelőknél általában, alacsony frekvencia tartományban a detektálás határfokát legnagyobb mértékben az eszköz zajkarakterisztikája határozza meg.

A PIN konstrukció a detektálhatóság szempontjából rendkívül kedvező. Az 1/f-zaj a planártechnológia következtében annyira lecsökken, hogy kb. 5...100 Hz-től kezdve elhanyagolható [15]. Az impulzus zaj ritkábban lép fel ezeknél az eszközöknél, és a megjelenésére inkább a maximálisan megengedett zárófeszültség közelében lehet számítani. Mint fentebb említettem, a kiürített rétegben a rekombináció gyakorlatilag elhanyagolható, így a generációs-rekombinációs zaj sem jelentős.

A fotodióda saját zaja, tehát a termikus zaj, az un. sörétzaj és a sötétáram összegével számítható:

$$i_Z = \sqrt{i_{ZT}^2 + i_{ZS}^2 + i_{ZD}^2} \quad (20)$$

ahol

i_Z – a fotodióda saját zajárama [A]

i_{ZT} – termikus zajáram [A]

i_{ZS} – a sörét zajáram [A]

i_{ZD} – sötét zajáram [A]

Termikus zaj

Az elektronok hő mozgása miatt a vezetőben igen kis áramok keletkeznek, amelyek frekvenciasávja a legkisebb frekvenciától a legnagyobbig terjed. Bár ezeknek az áramoknak hosszú időtartamra számított összege nulla, egy adott időpillanatra ez nem áll fenn, s így valamilyen irányban áram folyik. E tranziens áramok által keletkezett feszültségesezt, azaz a

zajfeszültséget *fehér zajnak* nevezzük. Ennek spektrumsűrűsége a frekvenciától függetlenül állandó. Levezethető [25], hogy egy ellenállás által termelt zajfeszültség:

$$i_{zr} = \sqrt{\frac{4kTB}{R}} \quad (21)$$

ahol

k - a Boltzmann állandó, $k = 1,3806504 \cdot 10^{-23}$ J/K

T - az eszköz abszolút hőmérséklete [$^{\circ}\text{C}$]

B - a zaj sávszélessége [Hz]

R – az ellenállása nagysága [Ω]

A PIN diódában a legnagyobb termikus zajt a sönt ellenállás okozza.

Sörétzaj

Minden elektron q töltést visz magával, s amikor az anódra érkezik, egy áramimpulzust hoz létre. Ez a lüktető áramlás vagy áramingadozás a sörétzaj. A sörétzaj az elektronáram potenciálgáton való áthaladásával kapcsolatos jelenség. Ilyen potenciálgát van minden félvezető eszköz pn-átmeneténél. Mivel a sörétzaj mechanizmusa ugyancsak a részecskemozgáson alapszik, a termikus és sörétzajnak hasonlóak a jellemzői. A zaj frekvencia független és arányos a sávszélességgel.

A keletkezett zajáram effektív értéke arányos az átfolyó diódaárammal és a sávszélességgel:

$$i_{zs} = \sqrt{2I_D q B} \quad (22)$$

ahol

q - az elektron töltése, $q = 1,602176462 \cdot 10^{-19}$ C

I_D – diódaáram [A]

Sötétáram

A diódán átfolyó áram megvilágítás nélkül. A pn réteg lezárt állapotban sem ideálisan zárt, mert folyik a kisebbségi töltéshordozók árama, amelyet sötétáramként definiálunk:

$$i_{zd} = \sqrt{2I_L q B} \quad (23)$$

ahol

I_L - a dióda fotóárama [A]

Az érzékenységi küszöb pontosabb meghatározása érdekében nem a detektor zajfeszültségét adják meg, hanem azt a beeső fényenergiát, amely a detektorra jutva ugyanakkora hasznos jelet kelt, mint amekkora a detektor zajfeszültsége vagy zajárama. Ez az érték, mint fontos detektorjellemző, a „zajjal azonos teljesítmény”, ill. NEP elnevezést kapta az angol „noise equivalent power” kifejezés alapján. A NEP általános értelemben azt a beeső sugárzási energiát jelenti, amely a detektor kimenetén egységnyi jel/zaj viszonyt eredményez.

$$NEP = \frac{i_z}{s} \left[W / \sqrt{Hz} \right] \quad (24)$$

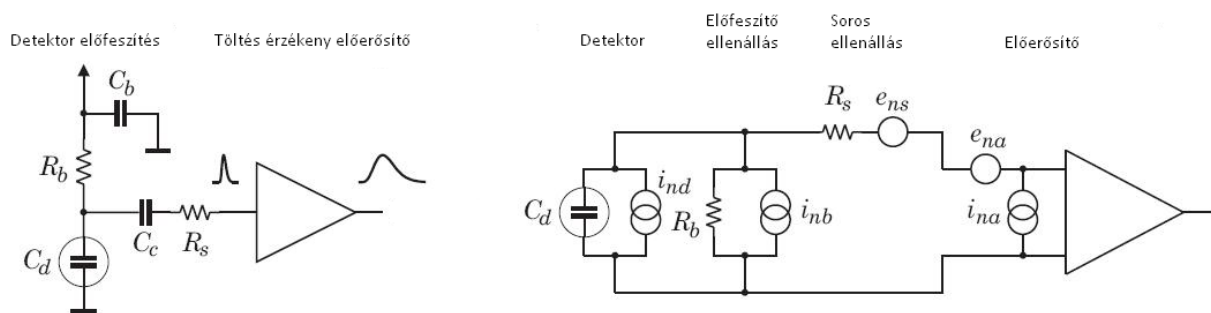
ahol

i_z – a fotodióda zajárama a frekvencia függvényében [$A/Hz^{1/2}$]

s - az érzékenység [A/W]

3.2.3. A detektor és az előerősítő zajanalízise

A kialakított rendszer működésében zaj szempontjából a detektor maga, illetve az előerősítő viselkedése a legfontosabb. Ehhez a detektor és az előerősítő zajanalízisét kell elvégezni, amit egy ekvivalens áramkör vizsgálatával végezhetünk.



47. ábra. Detektor és előerősítő egyszerűsített kapcsolási rajza, illetve annak zaj ekvivalens áramköre

A detektor egy C_d kapacitású kondenzátorral modelleztem. A detektor előfeszítő feszültség az R_b ellenálláson keresztül kapcsolódik a detektorhoz. C_b a tápfeszültségen keresztül az áramkörbe jutó zavarjeleket szűri. C_c kapacitás leválasztja a bemenetet az előfeszítő feszültségtől. Az R_s soros ellenállás a detektor és az előerősítő közötti kontaktusok ellenállását

modellezi. Magába foglalja, az érzékelő elektródáinak ellenállását, a nyomtatott huzalozások ellenállását és különböző parazita ellenállásokat.

Az egyes elemeket zajszempontjából modellezhetjük feszültség illetve áramforrással, amelyek hozzájárulnak a teljes zajhoz. Attól függően, hogy feszültség vagy áram jellegű a zaj forrása, szokás soros vagy párhuzamos zajnak is hívni őket. A 47. ábrán láthatjuk a zaj szempontjából legfontosabb elemek helyettesítéseit.

i_{nd} : a dióda sörétzaja (szivárgási áram), értéke $i_{nd}^2 = 2eI_d$

ahol I_d - a szenzor szivárgó árama [A]

i_{nb} : a dióda sönt ellenállásának zaja, értéke $i_{nb}^2 = (4kT)/R_b$

e_{ns} : soros ellenállás zaja, értéke $e_{ns}^2 = 4kTR_s$

e_{na}, i_{na} : az alkalmazott erősítő elem zaj adatai, amit a katalógusok adnak meg

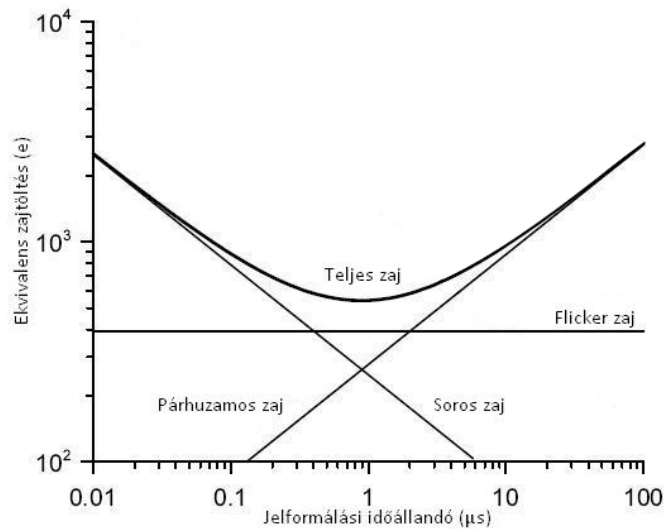
Habár a zajforrások feszültség illetve áram jellegűek, mivel a sugárzásmérő detektorok töltést mérnek, a rendszer zaj szintjét szokás az un. Q_n ekvivalens zajtöltéssel kifejezni. Az ekvivalens zajtöltés nem más, mint annak a detektorból érkező jelnek a nagysága, ami egységnyi jel/zaj viszonyt eredményez. Mértékegysége a Coulomb, [C].

A fenti áramkörnek az ekvivalens zajtöltése (ENC – equivalent noise charge) [23]

$$Q_n^2 = \left[\left(2eI_d + \frac{4kT}{R_b} + i_{na}^2 \right) \cdot \tau + (4kTR_s + e_{na}^2) \cdot \frac{C_d^2}{\tau} + 4A_f C_d^2 \right] \quad (25)$$

A kifejezés első tagja az áram jellegű zajok összege növelve az erősítő időállandójával. A második tag a feszültség jellegű zajok összege, csökkentve az erősítő időállandójával, növelve a detektor kapacitásával. A harmadik tag a *flicker zaj*, ami a félvezető eszközök gyártástechnológiájából adódó zaj. A technológia fejlődése miatt, illetve, hogy csak alacsony frekvencián (néhány Hz) jelentkezik, elhanyagolható a szerepe. A gyakorlatban a detektorral párhuzamosan kapcsolódó R_b ellenállása is elhanyagolható.

Az ekvivalens zajtöltés összefüggéséből látszik, hogy ha kis jelformálási időt választunk, akkor a soros (feszültség) zaj jelenetős, míg nagyobb időállandót választva a párhuzamos (áram) zaj válik meghatározóvá. A következő ábra azt az ideális állapotot mutatja, mikor 1µs-os időállandóval sikerül beállítani a legalacsonyabb zajt.



48. ábra. Ekvivalens zajtöltés a jelformálási idő függvényében

Azonban ez abban az optimális esetben lehetséges, amikor az egyenlet tagja lineárisan változik a frekvenciával. A gyakorlati megvalósításnál azonban tisztán látható, hogy ez közel sincs így. A detektor kapacitása illetve a visszaram változása jóval nagyobb szerepet játszik a zajban, mint például a soros ellenállás illetve az előfeszítő ellenállás termikus zaja. Nagy szerepe van a magának a nyomtatott áramkör kialakításának is a parazita kapacitások miatt.

Láncba kapcsolt erősítők zaja

Az érzékelőből kijövő jelet általában további jelek formálás és erősítés követ. Ezen feladatokat több erősítő láncba kapcsolásával végzik. Fontos tehát megvizsgálni, hogy a rendszer eredő zajtényezője hogyan függ a zajforrások rendszeren belüli helyétől.

Az eredő zajtényező meghatározása előtt azonban két fontos fogalmat kell tisztázni:

- a bemenetre redukált zajhőmérséklet: az a bemeneti zajhőmérséklet többlet, amely esetén ideális zajmentes fokozatot alkalmazva ugyanannyi zajteljesítményt kapunk a kimeneten, mint a zajos fokozat alkalmazásakor eredeti zajhőmérséklet esetén.

$$T_{red} = \frac{P_{zaj,saját}}{AkB} \quad (26)$$

ahol

T_{red} – bemenetre redukált zajhőmérséklet

$P_{zaj,saját}$ – az eszköz saját zaj teljesítménye

- illetve a zajtényező pontos fogalmát: a rendszer bemenetén és kimenetén mérhető jel-zaj (S/N) viszonyok hányadosa (a jel-zaj viszony romlása) akkor, ha a bemeneti zajhőmérséklet éppen $T_0=290\text{K}$ [25].

$$F = \frac{\left(\frac{S}{N}\right)_{be}}{\left(\frac{S}{N}\right)_{ki}} = \frac{P_{zki}}{AP_{zbe}} \quad (27)$$

ahol

F – zajtényező

P_{zki} – kimeneti zajteljesítmény

P_{zbe} – kimeneti zajteljesítmény

A rendszer kimenő zajteljesítménye, a bemenő zaj teljesítménye és az átviteli rendszer által termelt zaj teljesítménye [25].

$$P_{ki} = AP_{zbe} + P_z = ABk\left(T + \frac{P_z}{ABk}\right) = ABk(T + T_{red}) \quad (28)$$

ahol

P_{ki} – a kimenő átlagteljesítmény

P_z – az átviteli rendszer által termelt zajteljesítmény

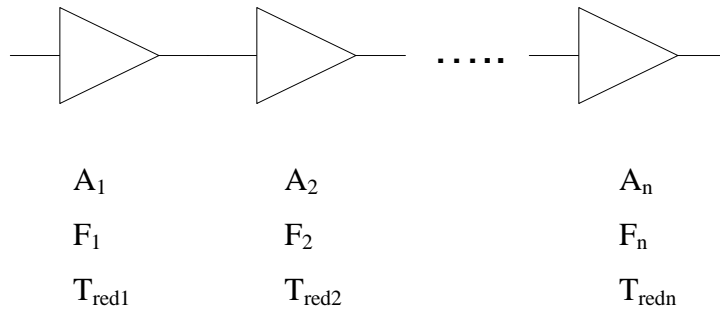
$$F = \frac{ABk(T_0 + T_{red})}{ABkT_0} = 1 + \frac{T_{red}}{T_0} \quad (29)$$

ahol

F – zajtényező

$T_0 = 290\text{K}$

Ezek ismeretében, több egymás után kapcsolt blokk eredő zajtényezője, és redukált zajhőmérséklete:



49. ábra. Összetett rendszer paraméterei

Az eredő erősítés a blokkok erősítésének a szorzata:

$$A = A_1 A_2 A_3 \dots A_n \quad (30)$$

Az áttekinthetőség érdekében először csak két fokozatot tételezünk fel ($n=2$). Az 1. blokk kimenetén megjelenő zajteljesítmény:

$$P_{1ki} = A_1 P_{zbe} + A_1 B k T_{1red} \quad (31)$$

A második fokozat szempontjából az első fokozat kimenő teljesítménye számít bemenő teljesítménynek, ezért:

$$P_{2ki} = A_2 P_{1ki} + A_2 B k T_{2red} \quad (32)$$

Behelyettesítés és átrendezés után:

$$P_{2ki} = A_1 A_2 \left(P_{zbe} + B k \left(T_{1red} + \frac{T_{2red}}{A_1} \right) \right) \quad (33)$$

Az egyenletben megjelenő összeg, nem más, mint a két fokozatra számított eredő redukált zajhőmérséklet:

$$T_{red} = T_{1red} + \frac{T_{2red}}{A_1} \quad (34)$$

Több fokozatra a kifejezés a következőképpen alakul:

$$T_{red} = T_{1red} + \frac{T_{2red}}{A_1} + \frac{T_{3red}}{A_1 A_2} + \dots + \frac{T_{nred}}{A_1 A_2 \dots A_{n-1}}, \quad (35)$$

amelyből a zajtényező a (29) egyenlet alapján:

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{A_1} + \frac{F_3 - 1}{A_1 A_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{A_1 A_2 \dots A_{n-1}}. \quad (36)$$

A (36) egyenlet legfontosabb következtetése, hogy ha az erősítés kellően nagy, zaj szempontjából az első fokozat dominál [25], tehát egy rendszer zajra való optimalizálásának a kritikus paramétere az előerősítő zajtényezője.

3.3. A prototípus összeállítása

A következőkben ismertetem az egyes egységek kiválasztási szempontjait illetve megvizsgálom, miként befolyásolják tulajdonságaik a rendszer detektálási képességét.

3.3.1. Szcintillátor kristály kiválasztása

A következő 3. táblázatban összefoglaltam a kereskedelemben könnyen beszerezhető, viszonylag olcsó szcintillátor kristályok legfontosabb tulajdonságait.

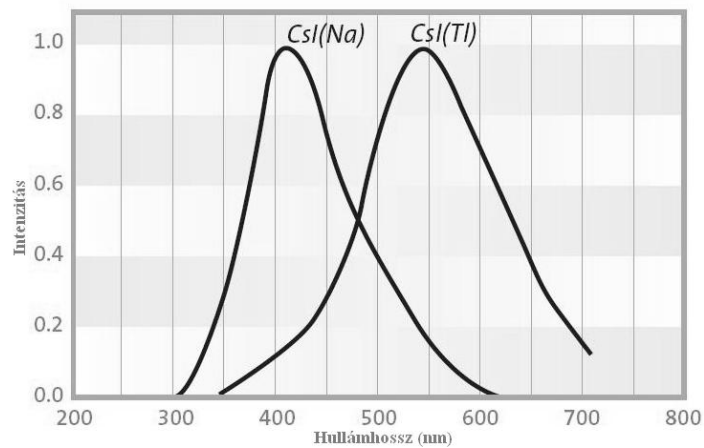
3. táblázat: Szcintillátor kristályok összehasonlítása

<i>Kristály</i>	<i>NaI(Tl)</i>	<i>CsI(Tl)</i>	<i>CsI</i>	<i>BGO</i>
<i>Sűrűség</i> [g/cm ³]	3.67	4.51	4.51	7.13
<i>Higroszkópos</i>	<i>igen</i>	<i>nem</i>	<i>nem</i>	<i>nem</i>
<i>Emisszió</i> <i>maximuma</i> [nm]	410	550	315	480
<i>Lecsengési</i> <i>ideje [s]</i>	2.5*10 ⁻⁷	0,1*10 ⁻⁷	160*10 ⁻⁷	3*10 ⁻⁷
<i>Fényhozam</i> [foton/MeV]	38*10 ³	57*10 ³	2*10 ³	8*10 ³

(megjegyzés: BGO = Bizmut-Germanát, Bi₄Ge₃O₁₂)

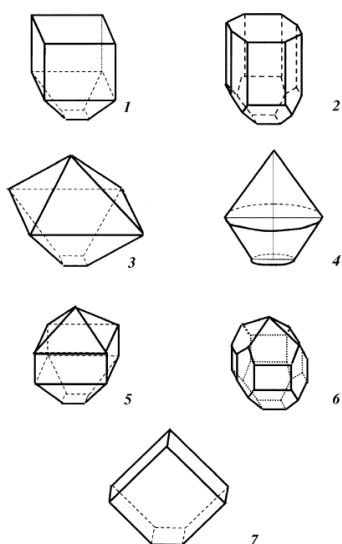
Az 3. táblázatból kiderül, hogy a CsI(Tl) kristálynak az emissziós maximuma magasabb (550nm) hullámhossznál van, közelebb esik a kiválasztott PIN dióda legérzékenyebb hullámhosszához (920nm). Nagy előnye a NaI-al szemben, hogy nem higroszkópos, azaz levegőn nem folyósodik. Ez a terepi igénybevételnél fontos a kialakítás illetve a hordozhatóság miatt. Láthatjuk, hogy fényhozamban is a legkedvezőbb.

CsI kristály elérhető többféle szennyezéssel előállítva. Leggyakrabban a talliummal vagy nátriummal szennyezett kristályokat alkalmazzák. A higroszkóposság, valamint a nagyobb hullámhossznál lévő emissziós csúcs miatt a talliummal szennyezett jobb választás.



50. ábra. CsI emissziós spektrum [26]

Szcintillátor kristályok alkalmazásánál figyelni kell a megfelelő méret illetve térfogat megválasztásához. A nagyobb térfogatú kristályoknak kisebb a fényhozamuk, mivel a szcintillátor anyag elnyeli a saját maga keltett fotonokat. Azonban a nagyobb térfogathoz nagyobb detektálási térfogat is tartozik. Vizsgálatok készültek a különféle geometriák összehasonlításáról. A vizsgálatoknál a fotoelektron-sokszorozót a 51. ábrán látható kristály kialakítások alsó, polírozott oldalára helyezték.



51. ábra. Különféle térfogatú kristály kialakítások [27]

4. táblázat: Kristályforma és a fényhozam összehasonlítása ^{137}Cs izotóppal vizsgálva [27]

<i>Kristályforma</i>	<i>Fényhozam (beütésszám)</i>	<i>Energia felbontás (%)</i>
1	2859	6.2
2	2865	6.2
3	2839	6.3
4	2901	6.0
5	2919	5.9
6	2925	5.8
7	2867	5.9

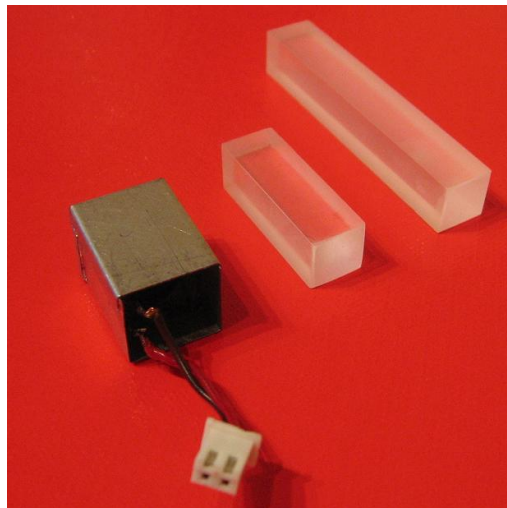
5. táblázat: Kristály magasság és a relatív fényhozam összehasonlítása ^{137}Cs izotóppal vizsgálva [27]

<i>Kristály magasság (mm)</i>	<i>Fényhozam</i>
10	1.315
20	1.31
30	1.3
40	1.28
50	1.2
60	1.15
70	1.0

6. táblázat: Térfogat és a relatív fényhozam összehasonlítása ^{137}Cs izotóppal vizsgálva [27]

<i>Térfogat (mm^3)</i>	<i>Fényhozam</i>
<i>10x10x20</i>	<i>1.00</i>
<i>15x15x20</i>	<i>0.95</i>
<i>20x20x20</i>	<i>0.86</i>
<i>25x25x20</i>	<i>0.71</i>
<i>30x30x20</i>	<i>0.65</i>
<i>35x35x20</i>	<i>0.54</i>
<i>40x40x20</i>	<i>0.45</i>

A legmagasabb fényhozamot a legkisebb térfogatú, legegyszerűbb kialakítású kristály hozta, emellett a további geometriák kialakítása nagyon jelentős költség többletet jelent, ezért vizsgálataimat egyszerű téglatest kialakítású különböző magasságú kristállyal végeztem.



52. ábra. Általam alkalmazott szcintillátor kristályok (1cm^3 (tokozott), 3cm^3 , 6cm^3)

3.3.2. PIN dióda kiválasztása

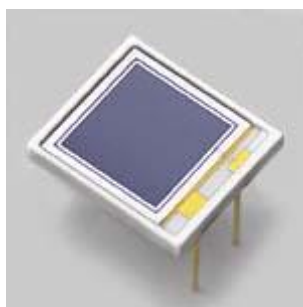
A PIN dióda kiválasztásánál elsődleges szempont a minél nagyobb érzékelő felület valamint, hogy a szcintillátor kristály által kibocsátott fény hullámhossz maximuma minél jobban közelítse a dióda érzékenységi maximumát.

7. táblázat: különböző gyártmányú PIN diódák összehasonlítása

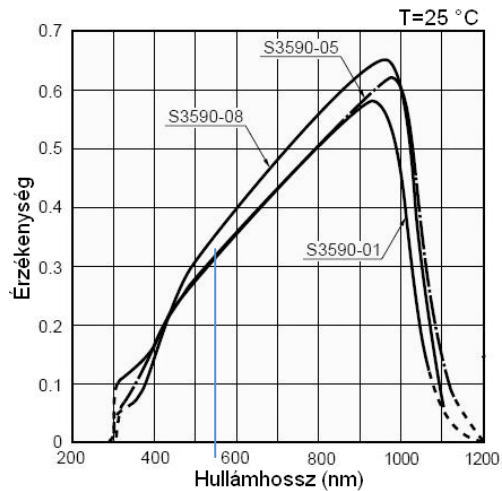
<i>Dióda</i>	<i>Aktívméret</i> (mm)	λ_{min} (nm)	λ_{max} (nm)	$\lambda_{csúcs}$ (nm)	<i>Sötétáram</i> (nA)	<i>Kapacitás</i> (pF)
S3590-08	10x10	320	1060	920	5	40
S3584-08	28x28	320	1100	960	20	300
S3204-03	18x18	320	1100	960	20	130
OPF420	Ø2.54	500	1100	880	0.1	3
QSE773	7.9x3.2	600	1100	940	30	60

A különböző tulajdonságok összehasonlításával a Hamamatsu S3590-08 dióda lett a legmegfelelőbb:

- CsI(Tl) emisszió maximuma 550nm, a dióda érzékenysége 0.36 A/W ezen a hullámhosszon,
- alacsony sötétáram,
- alacsony kapacitás,
- zaj teljesítménye $NEP = 3.8 \times 10^{-14} \text{ (W/Hz}^{1/2}\text{)}$.

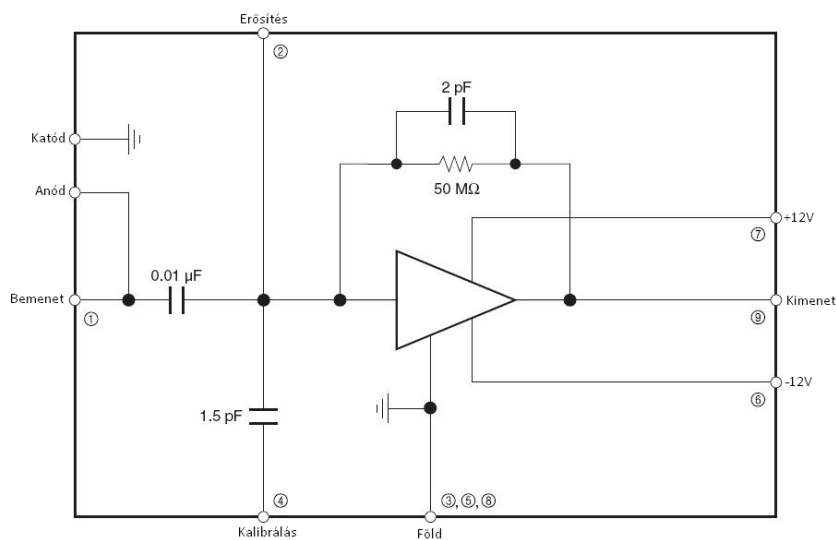


53. ábra. S3590-08 PIN dióda



54. ábra. Érzékenységi spektrum, illetve a bejelölt CsI(Tl) emisszó maximuma (550nm) [28]

3.3.3. A töltés érzékeny erősítő kialakítása

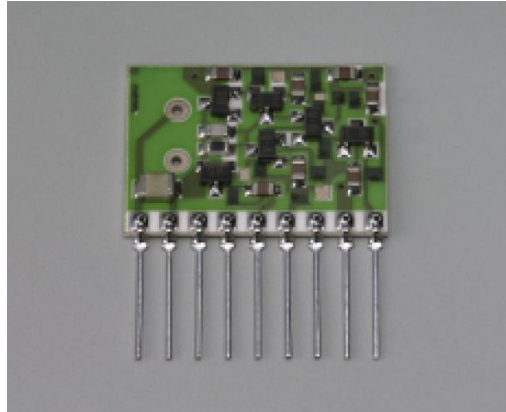


55. ábra. Töltés érzékeny erősítő vázlata

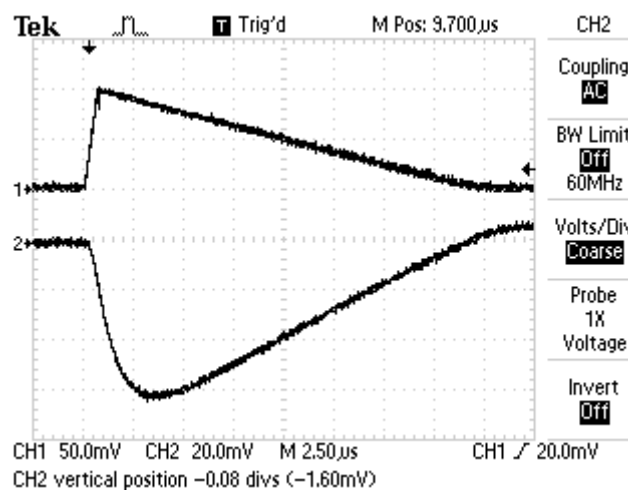
A 3.2. fejezet alapján erősítő kialakításánál figyelembe vett szempontok:

- az erősítő alacsony bemeneti áram- illetve feszültségzaj értékkel rendelkezik ($e_{na}=4,8$ $\implies i_{na}=1,3$);
- erősítés: 22mV/MeV
- a kialakított integráló kapcsolás időállandója 10 μ s, ami elegendő a szcintillátor kristályban fellépő fotonok begyűjtéséhez;

- az eszköz úgy lett kialakítva, hogy dióda nélkül is tesztelni, illetve kalibrálni lehessen;
- a nyomtatott áramkörön a parazita kapacitások, illetve a külső zavaró elektromos hatások miatt teljes föld kitöltéssel rendelkezik;



56. ábra. Töltés érzékeny előerősítő megvalósítása

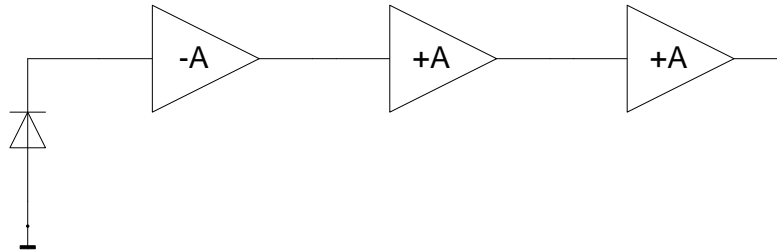


57. ábra. Töltés erősítő generátor által előállított bemeneti (felső) és a kimeneti jele (alsó)

A vizsgáló jel segítségével ellenőriztem a töltés erősítő működését, fázisfordítást, erősítést illetve áramfelvételét. Az ábrán látható, hogy a $\sim 100\text{mV}$ -os bemeneti amplitúdójú jelből az erősítő egy $\sim 60\text{mV}$ -os kimeneti jelet produkál. A töltés érzékeny erősítőknél leírtak alapján, itt nem a nagy jelerősítés kívánatos hanem, hogy az összes töltést kinyerjük, ami itt a visszacsatoló kondenzátoron jelenik meg.

3.3.4. Jelformáló főerősítő kialakítása

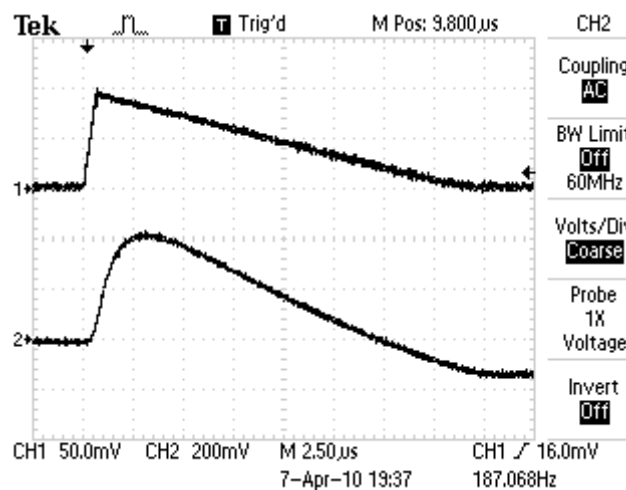
Az előerősítő tulajdonságainál látható, hogy a kijövő jel nagysága alacsony (mV-os nagyságrendű). Az spektrum analízátorok viszont 1-2V-os tartományban képesek mérni. Tehát a jelet megfelelő jelformálással fel kell erősíteni. Erre szolgál a jelformáló erősítő.



58. ábra. Fázis viszonyok

Az 58. ábráról leolvasva láthatjuk, hogy egyszeri fázisfordítást alkalmaztam, így kevésbé volt gerjedékeny az áramkör. A 3.1.3 fejezetben leírtak alapján, az ideálisabb jel/zaj viszony miatt, az egyes erősítő fokozatok időállandója egyforma volt.

Az előerősítő közel egyszeres erősítése után egy alacsony zajú kis erősítéssel rendelkező integrált áramkört választottam ($A=4$).

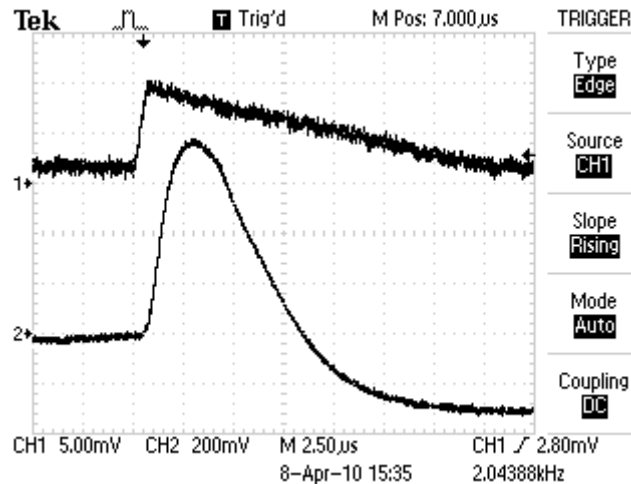


59. ábra. Bemeneti teszt jel (felső) illetve a második erősítő kimenete

A főerősítő kivitelezése során a bipoláris tranzisztorok mellett döntöttem, az integrált áramkörökkel szemben, mint erősítő eszköz. Ugyan zaj szempontjából kedvezőbb az integrált áramkör, azonban mint utolsó erősítő fokozat ez már nem befolyásolja nagymértékben az

eredő zajt. A bipoláris tranzisztorból felépített áramkör jobban paraméterezhető illetve a szimmetrikus tápfeszültség miatt a kimenő jel is bipoláris.

A főerősítő erősítését 10x-re állítottam, így a teljes kapcsolás erősítése 40x-es lett.



60. ábra. Bemeneti teszt jel (felső) illetve a válaszjel (alsó)

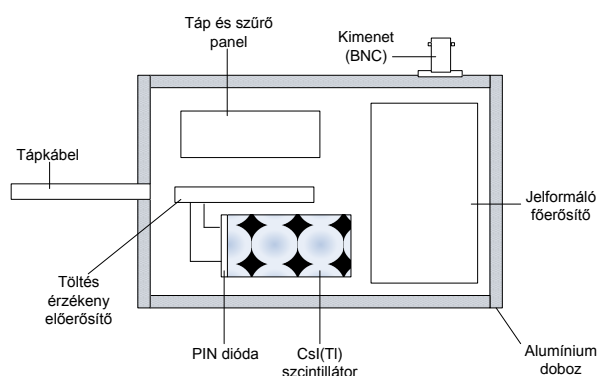
Következtetések

A fejezetben vázoltam az általam vizsgált PIN diódás detektor rendszer felépítését, és elemeztem az egyes részeket, úgymint töltés érzékeny előerősítő és jelformáló főerősítő, elektromos tulajdonságai alapján. Levezettem, hogy miért alkalmas a töltés érzékeny előerősítő a szenzorként használt PIN diódában a szcintillátor kristály által gerjesztett fény energiájának kinyerésére. Megvizsgáltam az előerősítő egyes elemeit, miként befolyásolják a hasznos jel teljes információ tartalmának feldolgozását. Mivel a detektor által szolgáltatott jel amplitúdója a mV-os tartományba esik, ami már az elektromos és a külvilág felől érkező zajforrások amplitúdó szintje, nagy szükség van a rendszer pontos zaj analízisére. Ezért teljes zajszámítást végeztem a rendszeren, így eljutva a megfelelő időállandóig és az elektronikus paraméterekig. A fejezet végén, alkalmazva az előbb említett paramétereket, konkrét áramköri megvalósításon keresztül bebizonyítottam, hogy egy CsI(Tl) szcintillátor kristály és egy PIN dióda összekapcsolásával képesek vagyunk gamma-spektrum felvételére.

4. FEJEZET

PIN DIÓDÁS DETEKTORRENDSZER, MINT IZOTÓPSZELEKTÍV ESZKÖZ

4.1. A teljes rendszer elektromos tulajdonságainak meghatározása



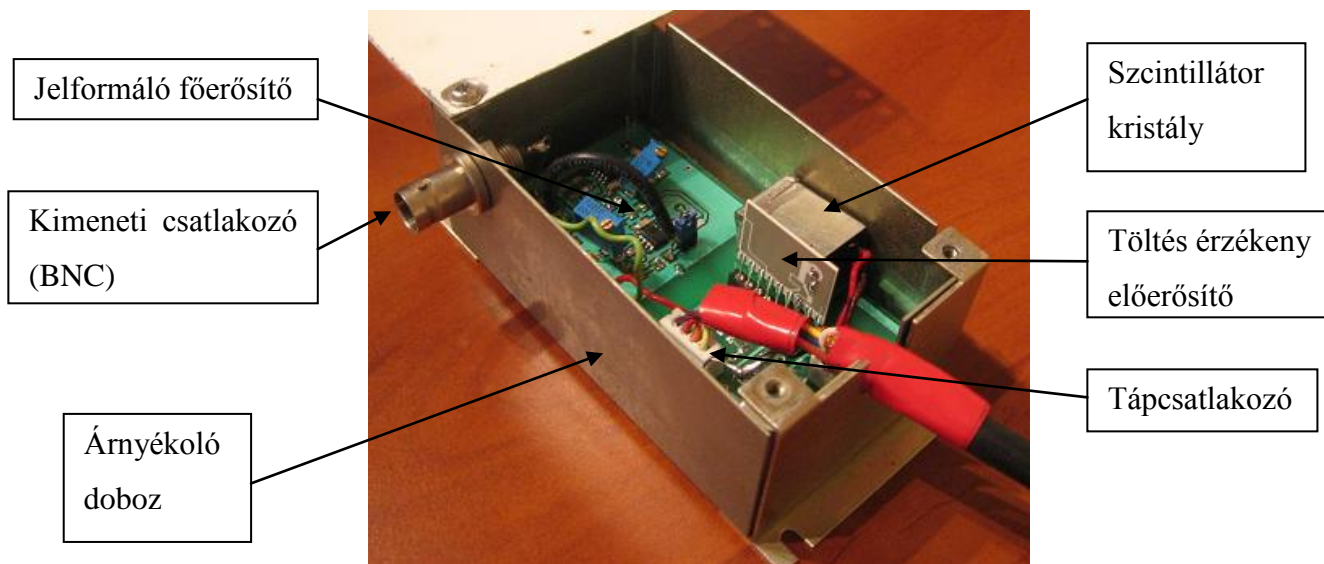
61. ábra. Az elkészült detektorrendszer bloksémája

A 61. ábrán az elkészült prototípus bloksémája látható. A rendszer összeállításánál több fontos szempontot is figyelembe kellett venni, elsősorban a zajcsökkentés miatt. Ilyen például, hogy az árnyékoló doboz felületét a lehető legkevesebb helyen szakítsuk meg, legyen minél folyamatosabb a felülete. Az elkészült példányon két helyen törtem meg a felületet, egyszer a bejövő tápkábelnél, illetve a kimeneti BNC csatlakozónál.

A töltés érzékeny előerősítő kivitelezésénél nagyon fontos, hogy a PIN dióda minél közelebb legyen a bemeneti FET erősítőhöz. Ezt figyelembe véve a nyomtatott áramkör kialakításánál a dióda csatlakozóját közvetlen a bemenet elé helyeztem.

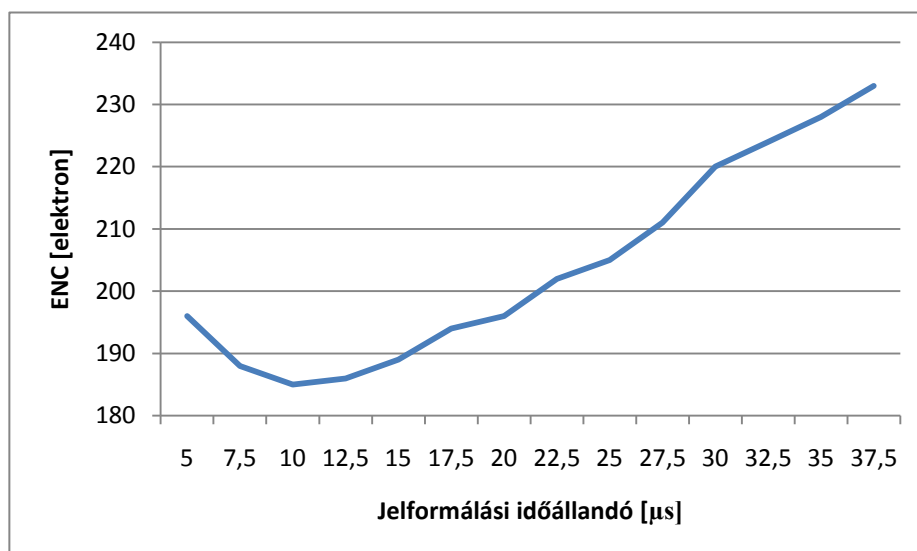
8. táblázat: Detektor paraméterei

PIN dióda érzékeny felülete	10mm x 10mm
CsI(Tl) kristály csatlakozó felülete	10mm x 10mm
Előfeszítés	24V
Detektor mérete [mm]	10x10x60



62. ábra Megvalósított eszköz belső felépítése

A 3.2.3 fejezetben található (25) egyenlet, az ekvivalens zajtöltés mérésel történő meghatározásánál, az előerősítő kalibráló kivezetését használtam, ahol az 1,5pF-os kondenzátor szimulálta a detektort. Az ideális jelformálási időállandó, azaz a teljes kapcsolás által termelt legalacsonyabb zaj a 10 μ s-os időállandónál adódott. Itt az ekvivalens zajtöltés 185 elektron nagyságú.

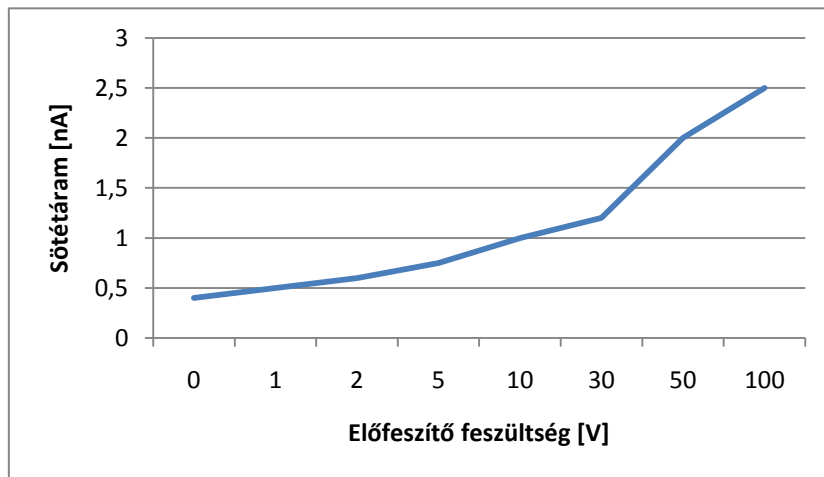


63. ábra. Megvalósított előerősítő ekvivalens zajtöltése a jelformálási idő függvényében

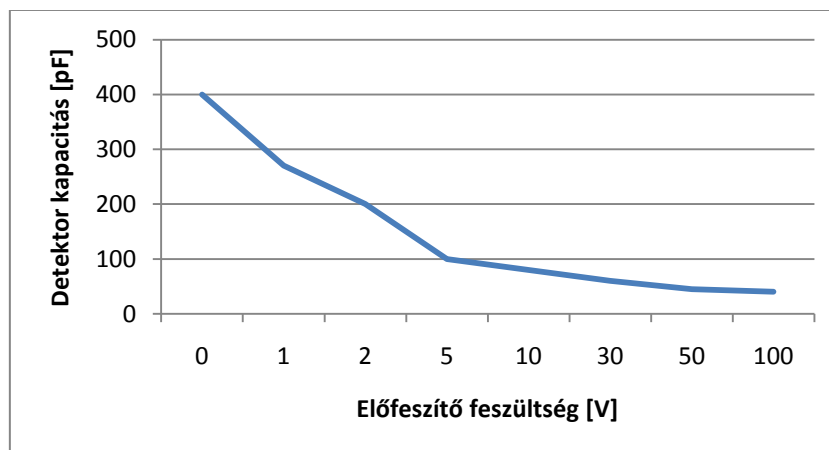
A teszt jellel történő vizsgálat után a szcintillátor kristály illesztése következett a PIN diódához. A diódát és a szcintillátor kristály polírozott felületét szilikon olaj felvitelével csatoltam egymáshoz a jobb fényvezetés miatt, valamint a kristály köré fényvisszaverő réteg

gyanánt teflon szalagot raktam. A megfelelő fényzárást több, fekete színű ragasztóval oldottam meg.

A dióda előfeszítést a sötétáram mérésével tudjuk megfelelő értékűre választani. A nagyobb feszültség nagyobb sötétáramot eredményez, ami növeli a zajt. Ugyanakkor nagyobb előfeszítés kisebb detektor kapacitást von maga után, ami csökkenti a bemenetre redukált kapacitást, tehát csökken a zaj.



64. ábra. Sötétáram változása az előfeszítés változásával



65. ábra. Detektor kapacitás változása az előfeszítés változásával

Figyelembe véve a sötétáram és a kapacitás mért értékeit, az előfeszítő feszültséget 24V-ra választottam. Ez 1nA körüli sötétáramot és 70pF kapacitást eredményezett.

4.1.1. A kialakított moduláris rendszer tulajdonságai

Az 1. fejezet 1.5.1. pontjában leírt detektor tulajdonságait a kialakított moduláris rendszer az alábbiak szerint teljesíti:

- *gyorsan telepíthető, használható*

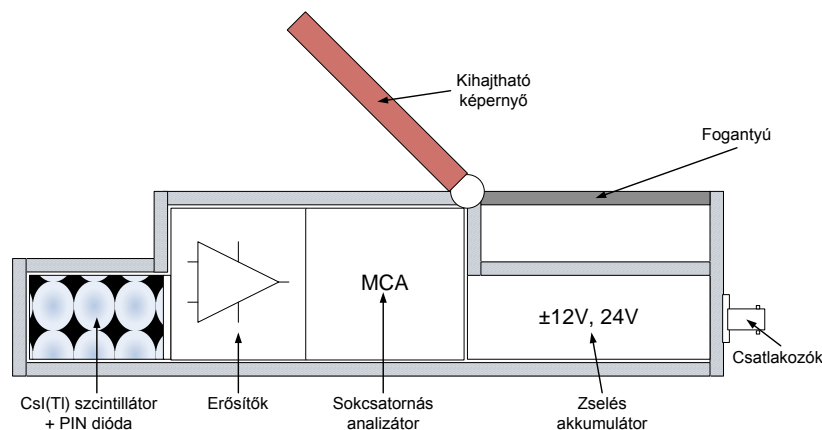
A rendszer nem igényel semmilyen telepítést, semmilyen előkészületet a használata előtt.

- *alacsony fogyasztású*

A rendszer $\pm 12V$ -os tápfeszültséggel működik. Így a szcintillátor kristályt, PIN diódát, előerősítőt, főerősítőt magába foglaló detektor rendszer fogyasztása 50mA lett. Ami azt jelenti, hogy egy a kereskedelemben is kapható 24V-os ólomakkumulátorról akár 1 napig is működhet a készülék. Ehhez azonban hozzá kell fűzni, hogy ez csak a detektor. Az ehhez tartozó spektrum analízátor többletfogyasztást jelent, ami csökkenti a használati idejét az akkumulátornak.

- *alacsony tömegű*

A detektor rendszer egy 10cm x 5cm-es fém dobozban kapott helyett, még hozzá jön az akkumulátor, azonban ezek súlya elhanyagolható. Persze itt is igaz, hogy ehhez még csatlakoztatni kell az analízátort illetve a kijelzőt, de úgy vélem, hogy például a Berkeley kialakítását követve egy kényelmes és jól használható kézi felderítő eszközt alkothatunk.

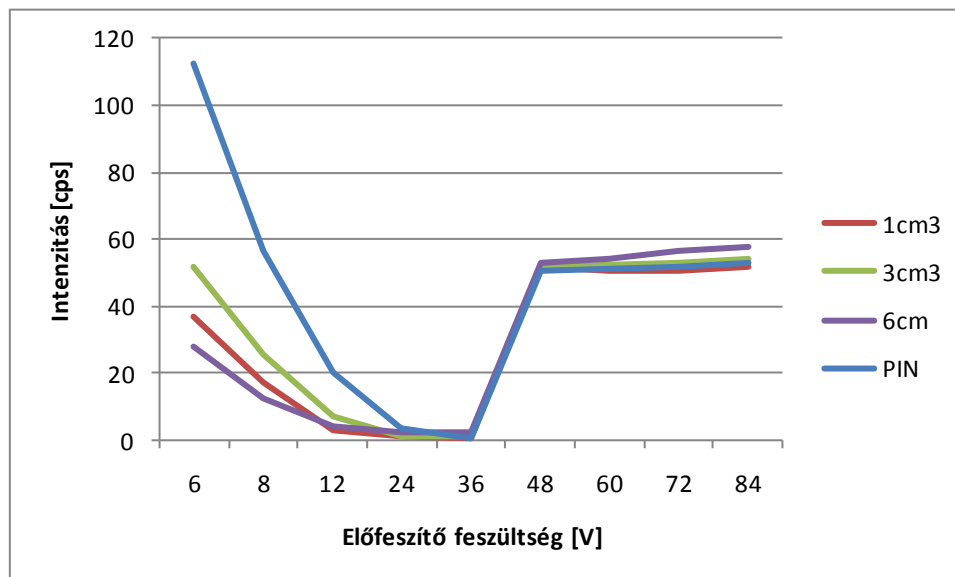


66. ábra. Egy lehetséges kialakítás vázlata kézi felderítő eszközre

4.2. A kialakított rendszer radioaktív forrásokkal történő vizsgálata

A rendszer elektromos tulajdonságainak vizsgálatai után következett a radioaktív izotópokkal történő vizsgálat. Ahhoz, hogy viszonylag széles γ -spektrumot átfogjak, három féle izotópot használtam. Az alacsony energiatartományban ^{133}Ba -ot (jellemző gamma foton energia: 356keV), közepes energiánál a ^{137}Cs -ot (662keV), míg az 1MeV feletti tartományban a ^{60}Co -ot (1173 és 1332keV).

Itt is, mint az elektromos tulajdonságoknál, azt vizsgáltam, minként hat az előfeszítő feszültség változtatása a mérhető jel intenzitására. Az alábbi függvényeket különböző feszültség értékeknél vettem fel, miközben az intenzitást mértem. Ennél a mérésnél nem használtam semmilyen forrást, csak a háttérbeütéseket regisztráltam. A méréseket mindhárom különböző térfogatú (1cm^3 , 3cm^3 , 6cm^3) kristálnál, valamint külön a PIN diódánál ugyanúgy végeztem.

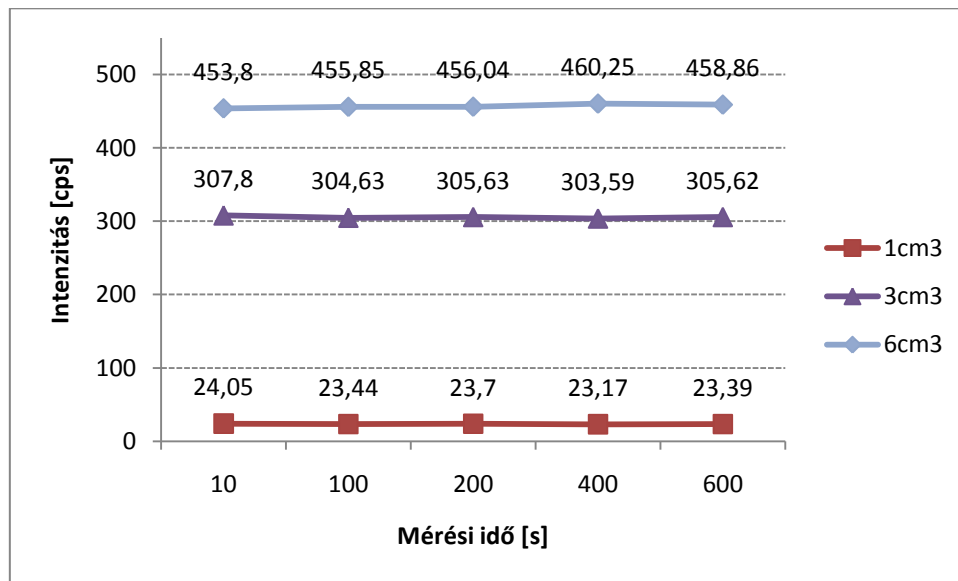


67. ábra. Háttér beütésszám az előfeszítő feszültség függvényében, különböző kristály térfogatoknál

Az 67. ábrán leolvasható, hogy a három függvény együtt futása miatt az előfeszítés nagyságának mind három térfogat esetén egyenlő hatása van a beütésszámmra. A grafikon alapján egyértelműen látszik, hogy a háttér beütésszám a 12V-36V-os tartományban a legalacsonyabb, tehát ebben a tartományban a legkisebb a háttérsugárzásból illetve az elektromos zajból származó zavaró jelek hatása. A viszonylagos linearitás miatt, nincs

jelentősége, hogy az ideális tartományból pontosan melyik feszültséget választjuk. A pontosabb feszültség értéket a később ismertett vizsgálatok alapján választottam.

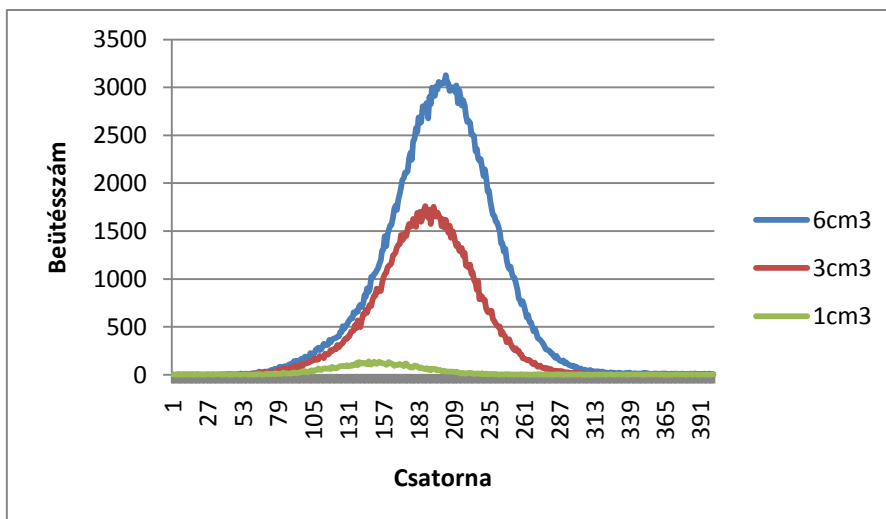
Miután meghatároztam a háttér intenzitás előfeszítés függését, próba spektrumokat vettem fel. Ahhoz, hogy megbizonyosodjunk arról, hogy adott forrásra kapott válasz függvény nem csak valamiféle véletlen zaj, hanem valóban a forrásból származó, a detektor által mért jel, a beütésszámok linearitását, azaz az intenzitás állandóságát vizsgáltam.



68. ábra. Linearitás vizsgálata, ¹³⁷Cs izotóppal, 24V-os előfeszítéssel, különböző kristály térfogatoknál

Mint azt a 68. ábrán is jól láthatjuk, a kapott intenzitások hibahatáron belül állandóak, nem függenek a mérési időtől.

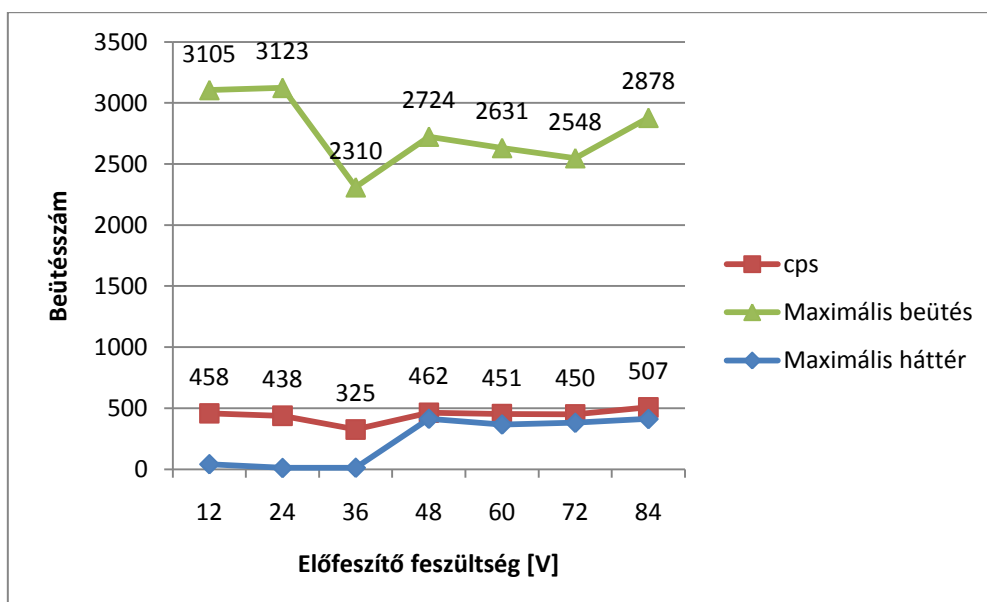
Ez után állandó mérési idő mellett vizsgáltam, hogy miként változik a jelszám, a kristály térfogatának változtatásával (hatásfok vizsgálat).



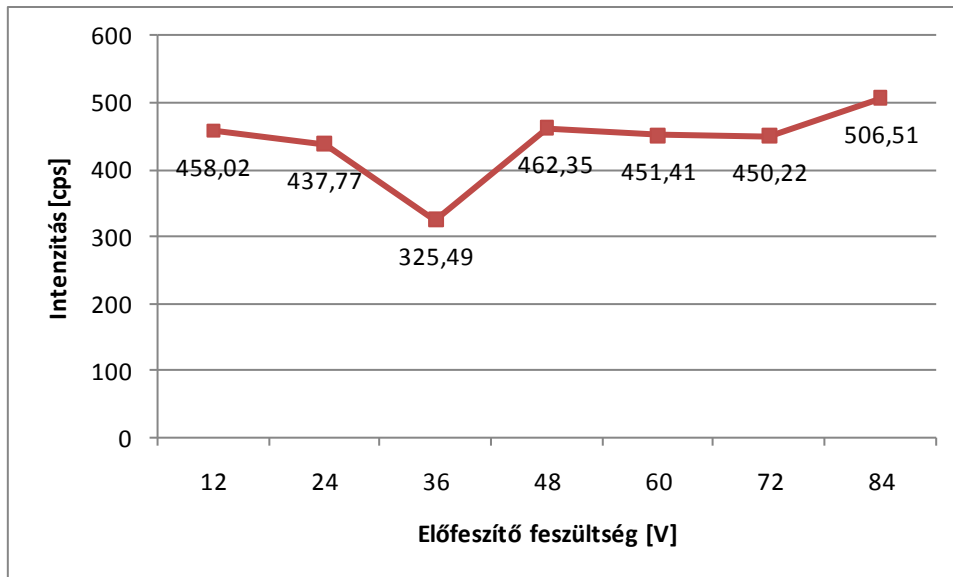
69. ábra. Beütésszám változása a térfogat függvényében, ¹³⁷Cs forrással vizsgálva

Látható, hogy a hatásfok nő a kristály méretének a növelésével.

Hogy megvizsgáljam miként hat az előfeszítés nagysága a forrással mért jelszámára nézve, egy ¹³⁷Cs izotóppal méréseket végeztem. Regisztráltam a beütések számát 600 másodperc alatt, illetve a legnagyobb beütés értékét, az előfeszítés nagyságának függvényében. Mivel az előző grafikonon látszik, hogy a 6cm³-es kristálynak van a legmagasabb jelszáma, ezért rögtön azzal próbálkoztam.



70. ábra. 6cm³ térfogatú kristálynak jelszámának függése az előfeszítő feszültség nagyságától, ¹³⁷Cs izotóppal vizsgálva

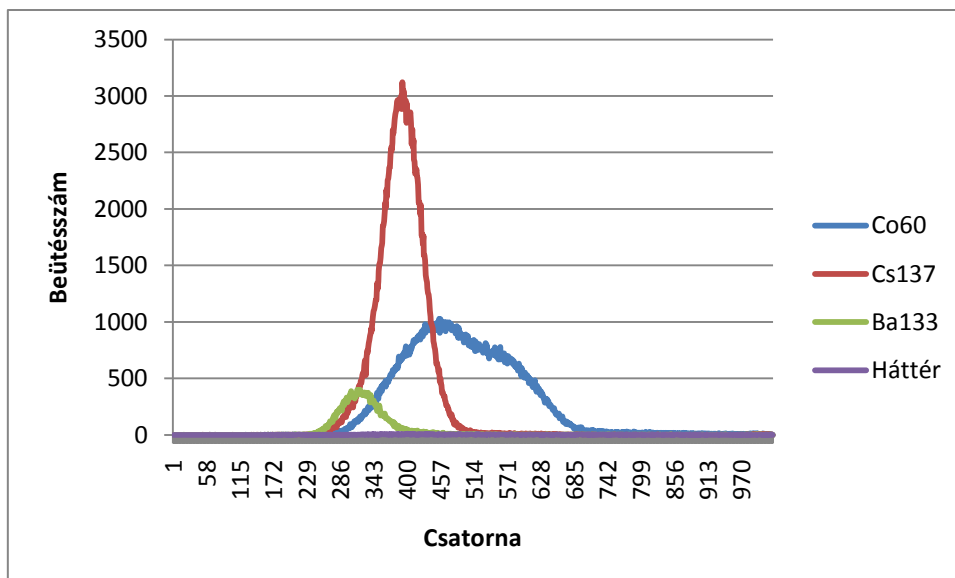


71. ábra. 6cm^3 térfogatú kristálynak intenzitás függése az előfeszítő feszültség nagyságától, ^{137}Cs izotóppal vizsgálva

Itt a vártnak megfelelő eredményt kaptam, mivel a forrással történő mérés során a jelszám nem függ az előfeszítés mértékétől, ellentétben a háttér beütésekkel. Tehát láthatjuk, azzal, hogy kisebb előfeszítést alkalmazunk, nem szenvedünk hátrányt a beütésszámban, viszont kisebb feszültségnél jóval nagyobb a jel/zaj viszony.

Az energia-kalibráció lényege, hogy a csatornához (feszültségtartományokhoz) energiákat rendelünk. Az energia-kalibrációnak azt az energiatartományt kell lefednie, amelyben a vizsgálandó radioizotópok előfordulhatnak. Az energia-kalibráció ideális esetben lineáris.

Három különböző forrással felvett spektrumokhoz tartozó beütésszám-csatorna eloszlásokat a 72. sz. ábra szemlélteti.

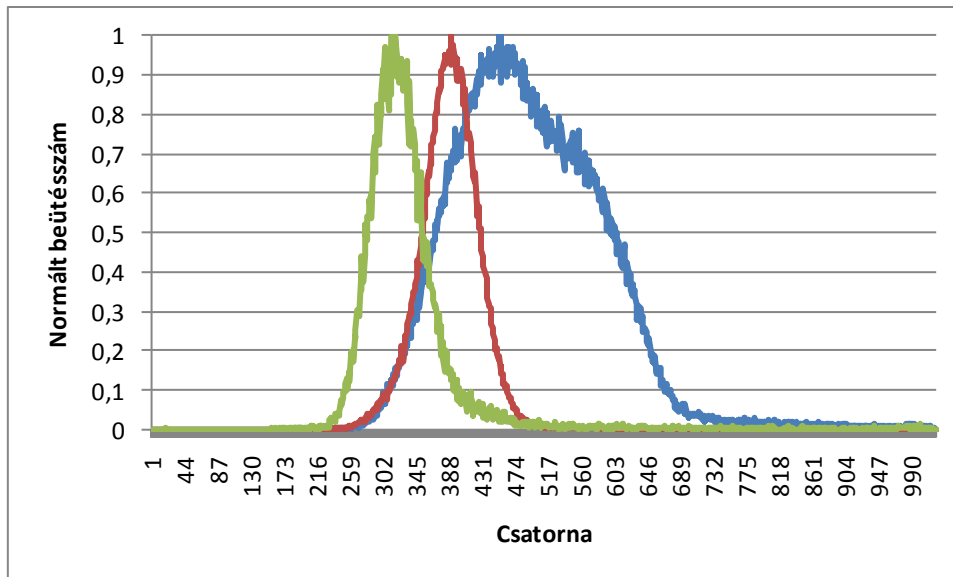


72. ábra. 6cm³-es kristály, 24V-os előfeszítésnél felvett spektrumok

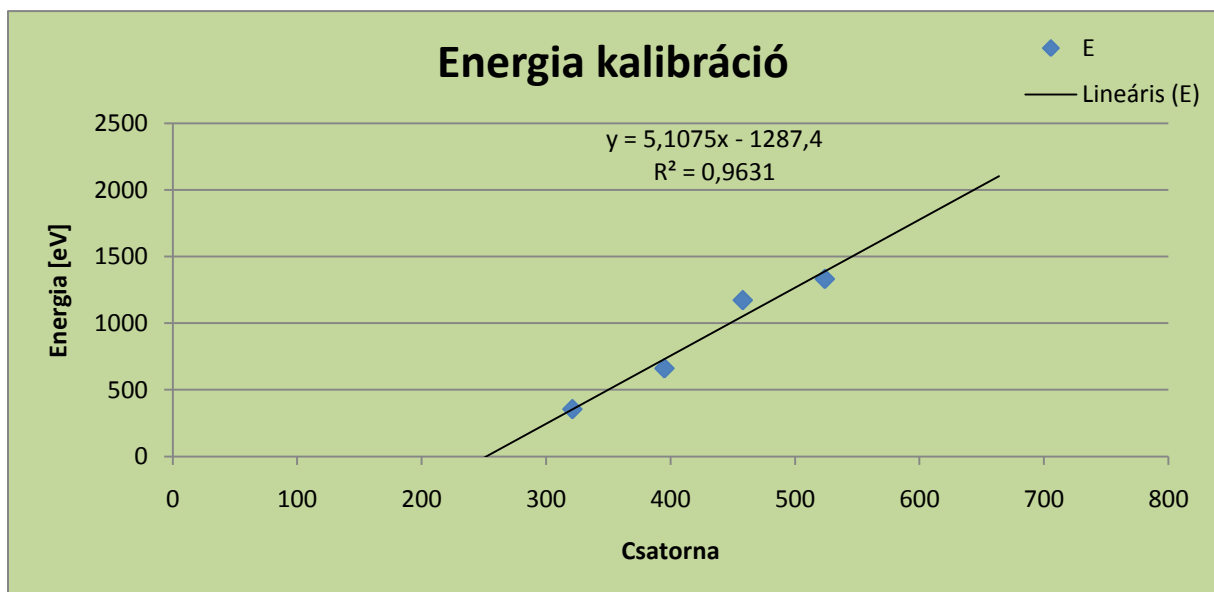
A 72. ábrán látható, hogy a 3 izotóphoz tartozó maximális beütésszámok jól elkülönülő csatornában jelentkeznek, tehát egyértelműen különválasztható a 3 különböző energiájú forráshoz tartozó csúcs, így tehát az energiaszelektivitás teljesül. A kapott normált spektrumokon egyértelműen szétválnak a csúcsok (73. ábra), amelyeket felhasználva a 74. ábrán található energia kalibrációs görbét kapjuk.

9. táblázat: Kalibrációs források adatai

	¹³³ Ba	¹³⁷ Cs	⁶⁰ Co
Referencia aktivitás [Bq]	37000	37000	37000
Referencia időpont	1995.06.01	1995.06.01	1995.06.01
Pillanatnyi aktivitás [Bq]	13694	26181	1923

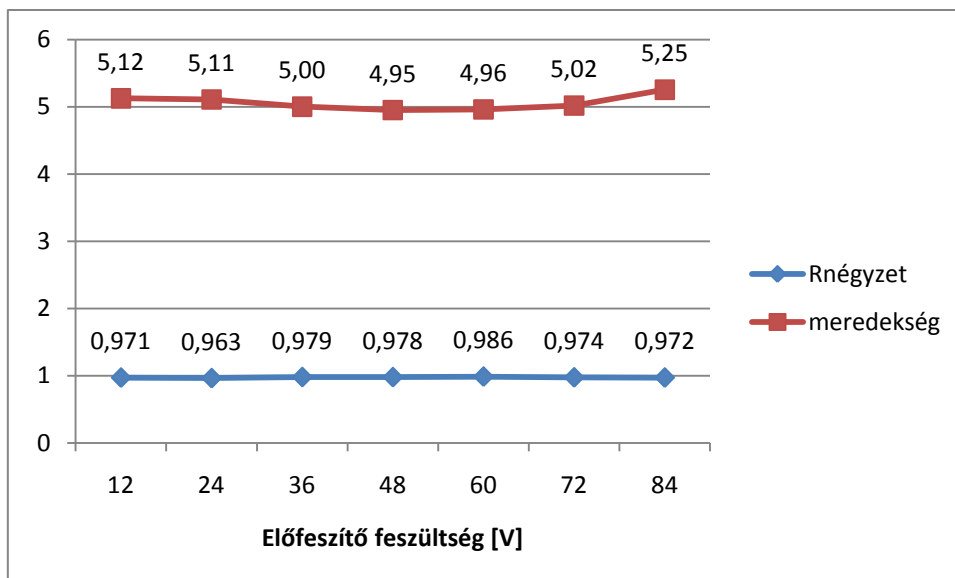


73. ábra. 6cm^3 -es kristály, 24V-os előfeszítésnél felvett, normált spektrumok



74. ábra. Energia kalibráció (6cm^3 -es kristály, 24V előfeszítés)

A kalibrációs egyenlet első tagja, az egyenes meredeksége, nem más, mint a detektor felbontása. Minél alacsonyabb ez a szám, tehát minél laposabb az egyenes, annál jobb az eszköz felbontó képessége. Az illesztés jóságát jellemző hibanégyzet 1-hez közeli, a mért energiakalibrációs görbe tehát közelít az ideális, lineáris egyeneshez.



75. ábra. 6cm^3 -es kristály energia kalibrációs egyenesének meredeksége, illetve az illesztés jóságának függése az előfeszítő feszültségtől

A diagramokról leolvasható, hogy ebben a feszültség tartományban (12-84V) sem a kalibrációs egyenes meredeksége, sem az illesztés jósága nem függ az előfeszítés nagyságától.

Detektorok fontos tulajdonsága a félértékszélesség, ami a detektor energia felbontóképességének mértéke. Értéke a fotocsúcs szélessége a maximális beütésszám felénél. A szcintillációs detektoroknál a teljes energiacsúcsokhoz tartozó félértékszélességek a gamma-energia függvényében változnak. Matematikailag levezethető, hogy a Gauss görbe félértékszélessége nem más, mint annak a két pontnak a távolsága, ahol a függvény második deriváltja 0.

Mielőtt az egyes csúcsok félértékszélességét meghatároztam volna, a spektrumokat simítani kellett, tehát a zajt minél jobban eltüntetni az egyes spektrumokról. Simításra egy konvolúciós szűrőt alkalmaztam, Savitzky-Golay simítással. A szűrés lényege, hogy a zajos jelet egy megfelelő függvénnyel konvolválják [29]. A szűrt pontok az alábbi módon adódnak:

$$(37)$$

ahol

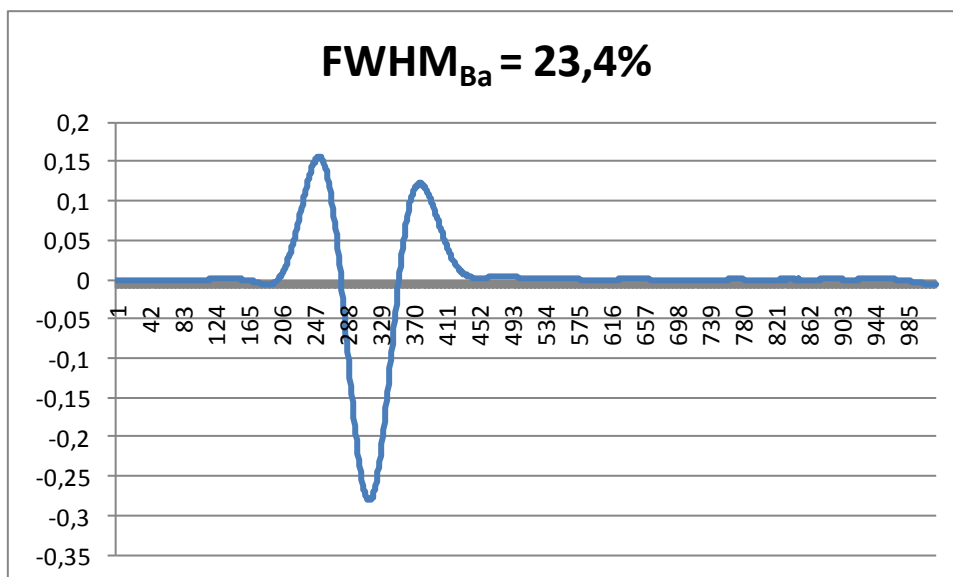
$y_s(k\Delta t)$ – a k-adik szűrt pont

$y(k\Delta t)$ – a k-adik eredeti, mért pont

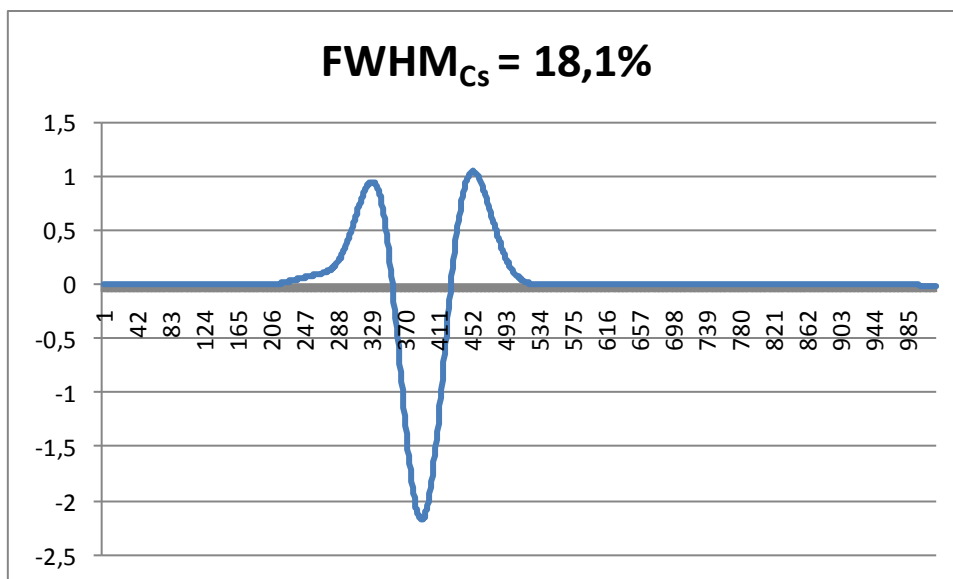
$c_j^{(2n)}$ – a simító függvény, amely $2n+1$ pontból áll.

Különböző alakú függvényeket lehet használni, szimmetrikusakat és nem szimmetrikusakat egyaránt. Az egyik legelterjedtebben használt a Savitzky és Golay által közölt szimmetrikus simító függvény. Az algoritmus alapján egy y_k eredeti adatpont zajszűrésére olyan simító függvényt használnak, amellyel konvolválva az adatpont $2n$ környezetében lévő zajos adatsort, az eredmény egyenértékű azzal, mintha adott rendű polinomot illesztettek volna a kérdéses számú zajos pontra a legkisebb négyzetek módszerével. A függvényablakot tovább léptetve (mozgatva) az y_{k+1} adatpontra is lefuttatható az algoritmus, mely a többi adatpontra is hasonlóan megismételendő.

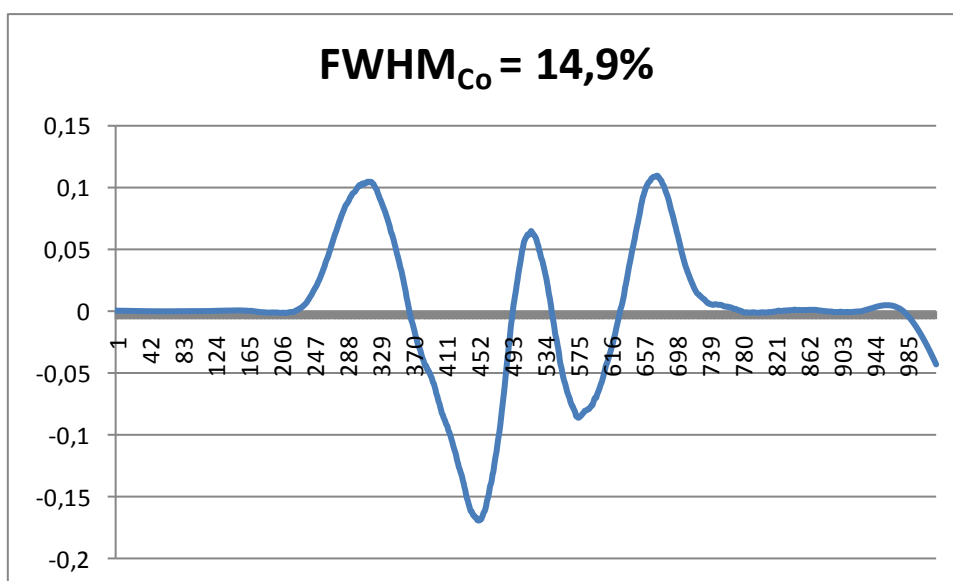
Az általam felvett spektrumokat kétszer deriváltam, majd a kapott spektrumokat a Savitzky-Golay algoritmussal simítottam. Ennek eredménye látható a 76-79 ábrán.



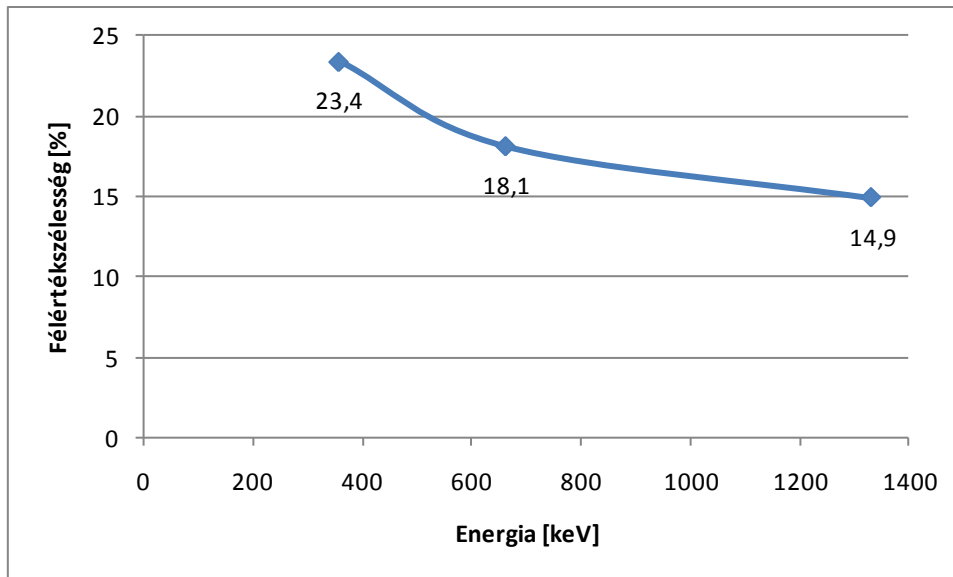
76. ábra. ^{133}Ba spektrum második deriváltja



77. ábra. ¹³⁷Cs spektrum második deriváltja

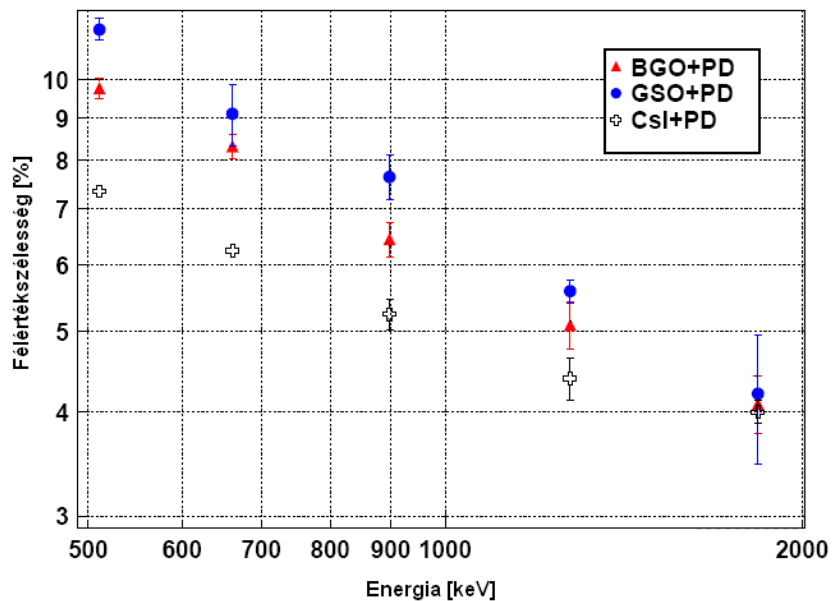


78. ábra. ⁶⁰Co spektrum második deriváltja



79. ábra. A félértékszélesség energia függése

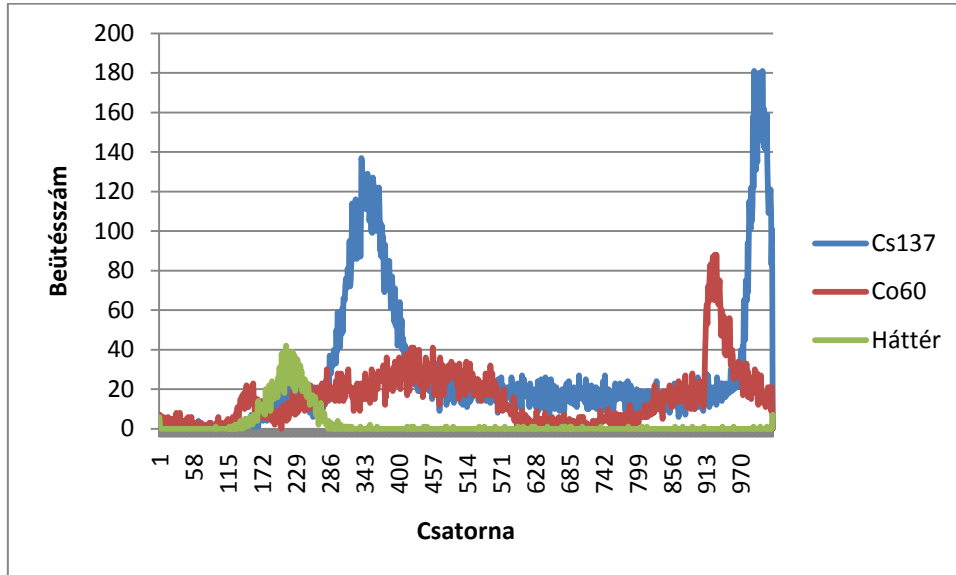
A 79. ábrán látható, hogy az általam készített eszköz félértékszélessége energiafüggése hasonló az irodalomban publikált detektorokéhoz (80.ábra). Sajnos ezek az értékek, az irodalomban ismertetett detektorok félértékszélességéhez képest valamivel magasabbak, azonban úgy gondolom, hogy további konstrukciós megoldásokkal, illetve a kristály és a dióda jobb fényillesztésével ez tovább javítható. Erre a továbbfejlesztésre szükség van a mennyiségi kiértékelés bizonytalanságának csökkentésére.



80. ábra. Különböző szcintillációs detektorok félértékszélességeinek energiafüggése [30]

4.2.1 A PIN dióda saját háttérének vizsgálata

Miután meghatároztam a rendszer főbb paramétereit, ugyanezen beállításokkal, számos mérést végeztem szcintillátor kristály nélkül, csak PIN diódát alkalmazva.



81. ábra. PIN dióda által detektált spektrum

A 81. ábrán. jól látszik, hogy az előzetes várakozásnak megfelelően, egy nagyságrenddel kevesebb bejövő jel volt detektálható ugyanakkora mérési idő mellett. A 70. ábráról leolvasható, hogy kristállyal a ^{137}Cs izotópra 3123 beütés érkezett, míg a PIN diódával 137 beütés 600s-os mérés időnél. A ^{133}Ba forrás esetében nem volt értékelhető spektrumot mérhető. Ebből megállapíthatjuk, hogy ebben a konfigurációban szcintillátor kristály nélkül a PIN dióda önmagában csak, mint rateméter működhet, nem alkalmas spektrometriai mérésekre.

Következtetések

A fejezet első pontjában radioizotóp nélkül meghatároztam azokat az elektromos tulajdonságait a rendszernek, amelyek a detektáló képességét befolyásolják. Elvégeztem a detektor ekvivalens zajtöltés vizsgálatát. Az így megállapított jelformálási időt használva számos mérést végeztem sugárforrással, és ezekből levontam a következtetéseket, melyek segítségével összeállt a legideálisabb rendszer, amely képes megkülönböztetni az egyes izotópokat. Ennek bizonyítására elvégeztem a detektor energia kalibrációját.

A mérések során bebizonyosodott, hogy a teljes detektor rendszer az izotópszelektív mennyiségi kiértékeléshez szükségesnél nagyobb félértékszélességgel rendelkezik. Ennek oka lehet az elektronikából származó zaj, a nem megfelelő árnyékolás illetve az analizátor nem megfelelő illesztése is. Ezért az általam alkotott prototípus példány csak minőségi analízisre alkalmas és csak egyszerű összetételű minták esetében mennyiségire. Utóbbiak miatt az eszköz ebben a formában csak célfeladatokra alkalmazható (ahol a lehetséges izotópok köre behatárolható). Mivel azonban alacsony fogyasztású, kis tömegű és a környezeti behatásoknak jól ellenálló felépítésről van szó, már a jelenlegi kivitelezésben is alkalmas terepi (katonai) izotópszelektív mérésekre.

ÖSSZEFOGLALÁS

Az I. fejezet első részében definiáltam, hogy mit értünk izotópszелеktiv mérési eljárás alatt. Bemutattam azt a két, a NATO-ban is használatos méréstechnikát, ami alkalmas gammasugárzó izotópok terepi körülmények közötti azonosítására. A fejezetben megállapítottam, hogy a Magyar Honvédség, különböző alegységei rendelkeznek ugyan terepi körülményekhez igazodó izotópszелеktiv eszközökkel, azonban ezen eszközök részletes elemzése után arra a következtetésre jutottam, hogy az egyes eszközök kialakításuk, hordozhatóságuk, mérési eljárásaik miatt bizonyos hátrányokkal rendelkeznek. Megállapítottam, hogy szükség van egy olyan kompakt, terepi körülmények között is helyt álló izotópszелеktiv eszközre, amely kezelése egyszerű, nem igényel hálózati tápellátást, spektrum kiértékeléshez nem szükséges számítógépet csatlakoztatni a detektorhoz és könnyen hordozható, telepíthető.

A II. fejezetben összefoglaltam a félvezető eszközök azon fizikai tulajdonságait, amik alkalmassá teszik a magsugárzások detektálására. Megvizsgáltam, hogy mi történik, ha egy töltött részecske csapódik a félvezető kiürített rétegébe. Megállapítottam, hogy a PIN dióda is, mint speciális félvezető, alkalmas izotópszелеktiv detektor készítésére. Összehasonlítottam a szcintillációs méréstechnikában használt fotoelektron-sokszorozót és a PIN diódát, ismertetve előnyeiket illetve hátrányaikat. Ezen tulajdonságokat figyelembe véve megállapítottam, hogy a PIN dióda alkalmasabb nagyobb (terepi) igénybevétel mellett a szcintillációs kristályból érkező fotonok erősítésére.

A III. fejezetben vázoltam az általam vizsgált PIN diódás detektor rendszer felépítését, és elemeztem az egyes részeket, úgymint töltés érzékeny előerősítő és jelformáló főerősítő, elektromos tulajdonságai alapján. Levezettem, hogy miért alkalmas a töltés érzékeny előerősítő a szenzorként használt PIN diódában sugárzás által gerjesztett töltés kinyerésére. Megvizsgáltam az előerősítő egyes elemeit, miként befolyásolják a hasznos jel teljes információ tartalmának feldolgozását. Mivel a detektor által szolgáltatott jel amplitúdója a mV-os tartományba esik, ami már az elektromos és a külvilág felől érkező zajforrások amplitúdó szintje, nagy szükség van a rendszer pontos zaj analizésére. Ezért teljes zajszámítást végeztem a rendszeren, így eljutva a megfelelő időállandókig és elektronikus paraméterekig. A fejezet végén, alkalmazva az előbb említett paramétereket, konkrét áramköri

megvalósításon keresztül bebizonyítottam, hogy egy CsI(Tl) szcintillátor kristály és egy PIN dióda összekapcsolásával képesek vagyunk izotópszelektív magsugárzás detektálásra.

A IV. fejezet első pontjában meghatároztam azokat az elektromos tulajdonságait a rendszernek, amik a detektáló képességét befolyásolják. Elvégeztem a detektor ekvivalens zajtöltés vizsgálatát, és az így megállapított jelformálási időt használva sugárforrásokkal ellenőriztem a rendszer válasz jeleit. Oszilloszkóp segítségével megállapítottam, hogy a rendszer a beállított időállandóval különböző amplitúdójú jeleket produkál, valamint a sugárforrás mérésénél jelentős beütésszám növekedés volt tapasztalható. A fejezetben radioaktív forrásokkal elvégeztem a rendszer bemérését. Spektrumokat vettem fel, elvégeztem az energia kalibrációt, és megvizsgáltam az eredmények függését a különböző beállításoktól. Igazoltam, hogy a rendszer alkalmas szennyezettség minőségi elemzésére.

ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

- 1) A Magyar Honvédség HAVÁRIA készenléti szolgálatánál alkalmazott radionuklid azonosításra alkalmas eszközök részletes elemzésével megállapítottam, hogy szükség van egy olyan hordozható, kompakt, terepi körülmények között is alkalmazható izotópszelektív mérést megvalósító eszközre, melynek kezelése egyszerű, nem igényel hálózati tápellátást és könnyen telepíthető. A PIN dióda fényérzékelő tulajdonságait elemezve megállapítottam, hogy kiváltva a szcintillációs gamma-spektrométerek fotoelektron-sokszorozó egységét, a fenti célra alkalmas eszköz alapjául szolgálhat.
- 2) Kialakítottam egy CsI(Tl) szcintillátorból és PIN diódából álló detektoregység elvi felépítését, meghatároztam a detektor és a hozzá kapcsolódó rendszer elektromos paramétereit, és teljes zajszámítást végeztem az egyes részegységeken. Az így optimált elektromos paraméterek alapján megalkottam egy terepi viszonyok között is használható detektor rendszertervét.
- 3) Elkészítettem egy CsI(Tl) szcintillátorból és PIN diódából álló detektor mintapéldányát. Radioaktív forrásokkal történt mérésekkel bizonyítottam, hogy a detektor energiaszelektivitása megfelelő izotópszelektív mérések kivitelezésére.

AJÁNLÁSOK, JAVASLATOK

Az értekezésem végeredménye egy terepi körülmények között használható, energiaszelektív detektorrendszer. Úgy vélem, hogy az előállt rendszer minden olyan helyen bevethető lehet, ahol a méret, a fogyasztás, a kompakt kivitel fontosabb a vizsgálandó minta pontos, mennyiségi izotóp összetételének meghatározásánál. Ha a későbbiek folyamán az általam megvalósított detektorrendszert összekapcsolnánk egy kompakt, kisméretű többcsatornás analízátorral (digitális jelfeldolgozóval), kijelzővel látnánk el, és mindez a katonai körülményekhez igazodó külső borítást kapna, létre jönne egy olyan eszköz, amely robusztusságát és energiaszelektivitását tekintve felveszi a versenyt a jelenleg használatos terepi eszközökkel.

A munkám eredményeként előállt eszköz alkalmazható lehet:

- a Magyar Honvédség helyszínre vonuló, izotópszelektív terepi eszközzel nem rendelkező egységeinek, illetve a HAVÁRIA készenléti szolgálat detektoraként;
- mint változtatható geometriájú detektor, a kis mérete és fogyasztása miatt, több detektor összekapcsolásával. Kiválóan lehetne használni olyan helyzetekben, amikor a szennyezett tárgyat nehézkesen tudjuk megmérni, esetleg nemcsak a tárgy összeszennyeződésére vagyunk kíváncsiak, hanem a sugárforrás pontos elhelyezkedésére is. Ehhez a méréshez már bonyolult kiértékelő rendszer kell, hogy csatlakozzon, így ezt csak laboratóriumban lehetséges;
- szellőzőrendszerek beáramló levegőjének ellenőrzésére, szennyezettség és izotóp összetétel vizsgálatára. A kis méretének előnyei kihasználhatók olyan szűk helyeken, mint például védett objektumok szellőzőrendszere;
- szárazföldi robot felderítő képességének kiterjesztésére. Manapság előtérbe kerülnek a robotok alkalmazása mind katonai, mind katasztrófavédelmi feladatkörben. Egy ilyen szárazföldi eszközt (UGV) felszerelve az ismertett detektorral hatékony eszközt kapnánk, amely élő erő veszélyeztetése nélkül képes a felderítésre.

HIVATKOZÁSOK

- [1] NATO AEP-49 Handbook for Sampling and Identification of Radiological Agents (SIRA), 2004
- [2] Nagy Lajos György – Nagyné László Krisztina: Radiokémia és izotóptechnika, Műegyetemi Kiadó, 1997
- [3] http://ric.uthscsa.edu/personalpages/lancaster/DI2_Projects_2003/Photodiode_vs_PMT.pdf, letöltés dátuma: 2010.08.08
- [4] L.J. Meng, D. Ramsden: An inter-comparison of three spectral-deconvolution algorithms for gamma-ray spectroscopy, IEEE Transactions on nuclear science, vol. 47, NO. 4, 2000
- [5] http://www.hm.gov.hu/honvedseg/mh_93_petofi_sandor_vegyivedelmi_zaszloalj, letöltés dátuma: 2010.08.08
- [6] Szombati Zoltán, Földi László: A Magyar Honvédség katasztrófavédelmi feladatokra kijelölt erői, különös tekintettel az MH 93. Petőfi Sándor vegyivedelmi zászlóalj lehetőségeire, Hadmérnök, III. évfolyam 3. szám, 2008
- [7] http://heprev.hu/index.php?option=com_content&task=view&id=25&Itemid=47, letöltés dátuma: 2010.08.08
- [8] Nagy Gábor: A hazai légi sugárfelderítés története, Vegyivedelmi szolgálat létrehozásának 60. évfordulója konferencia, 2010, Budapest
- [9] Bihari Hunor, Urbán László: Aggasztó kihívások, professzionális válasz, Vegyivedelmi szolgálat létrehozásának 60. évfordulója konferencia, 2010, Budapest
- [10] http://www.hm.gov.hu/honvedseg/mh_gorgei_artur_vegyivedelmi_informacios_kozpont, letöltés dátuma: 2010.08.08
- [11] http://www.berkeleyneutronics.com/resources/SAM940_datasheet.pdf, letöltés dátuma: 2010.08.08
- [12] http://www.canberra.com/pdf/Products/Detectors_pdf/C36151-GermDet-SS.pdf, letöltés dátuma: 2010.08.08
- [13] GAMMA MŰSZAKI ZÁRTKÖRŐ RÉSZVÉNYTÁRSASÁG, Műszaki leírás és Kezelési utasítás, IH-111L Laboratóriumi radiológiai élelmiszerszennyezettség vizsgáló műszer, 2005
- [14] Deme Sándor: Félvezető detektorok magsugárzás mérésére, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1968
- [15] Szentiday Klára: Félvezető fotodetektorok, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977

- [16] G. J. Gruber, W.S. Choong, W.W. Moses, S.E. Derenzo, S.E. Holland, M. Pedrali-Noy, B. Krieger, E. Mandelli, G. Meddeler, N.W. Wang (2002): A compact 64-pixel CsI(Tl) Si PIN photodiode imaging module with IC readout, IEEE Transactions on nuclear science, Vol. 49, NO.1
- [17] V.N. Potapov, O.P. Ivanov, V.M. Chirkin, S.M. Ignatov (2001): A DIP detector for in-situ measuring of Cs-137 specific soil activity profiles, IEEE Transactions on nuclear science, Vol. 48, NO.4
- [18] Sascha Wüstling, Torsten Armbrust, Markus Steidl, Sergeij Zadorozhny (2006): A large, 64-pixel PIN diode detector for low-energy beta-electrons, Nuclear Instruments & Methods In Physics Research Section A 568: 382-387
- [19] http://www.szinkrotron.hu/Anyagok/Rend/Xfel_workshop_Kalinka.pdf, letöltés dátuma: 2010.08.08
- [20] Y. Eisen, L.G. Evans, R. Starr, J.I. Trombka (2002): CdWO₄ scintillator as a compact gamma ray spectrometer for planetary lander missions, Nuclear Instruments & Methods In Physics Research Section A 490: 505-517
- [21] <http://www.detectors.saint-gobain.com/uploadedFiles/SGdetectors/Documents/Product-Configurations/Compact-CsI-Photodiode.pdf>, letöltés dátuma: 2010.08.08
- [22] http://www.eurorad.com/PDF/UG_CSI_1010_1515_1530_2525.pdf, letöltés dátuma: 2010.08.08
- [23] Helmuth Spieler: Semiconductor Detector Systems, Oxford University Press, Oxford, 2005, ISBN 0-19-852784-5
- [24] C. D. Motchenbacher, F. C. Fitchen: Kis-zajú elektronikus áramkörök tervezése, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977
- [25] Géher Károly: Híradástechnika, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1993, ISBN 963-160173-0
- [26] <http://www.detectors.saint-gobain.com/uploadedFiles/SGdetectors/Documents/Product-Data-Sheets/CsI%28Na%29-CsI%28Tl%29-Data-Sheet.pdf>, letöltés dátuma: 2010.08.08
- [27] V.P. Semynozhenko, B.V. Grinyov, V.V. Nekrasov, Yu.A. Borodenko: Recent progress in the development of CsI(Tl) crystal–Si-photodiode spectrometric detection assemblies, Nuclear Instruments & Methods In Physics Research Section A, vol. 537 (2005), pp. 383-388
- [28] http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/parts_S/s3590-08_etc_kpin1052e07.pdf, letöltés dátuma: 2010.08.08

[29] Savitzky A., Golay M.J.E: Smoothing and differentiation of data by simplified least square procedures, 1964, Analytical Chemistry, vol. 36, pp. 1627-1639

[30] T. Nakamoto, Y. Fukazawa, T. Ohsugi, T. Kamae, J. Kataoka: BGO readout with photodiodes as a soft gamma-ray detector at -30°C, Nuclear Instruments & Methods In Physics Research Section A, vol. 536 (2005), pp. 136-145

TÉMAKÖRKBŐL KÉSZÜLT PUBLIKÁCIÓIM

Cikkek

1. Nagy Gábor, Vincze Árpád, Solymosi József, Gujgiczer Árpád: Digitális jelfeldolgozós (DSP) nukleáris spektrométer lehetséges katonai alkalmazásai, Bólyai Szemle, 2004 Különszám, ISSN 1416-1443
2. Nagy Gábor, Kovács Tibor: A szcintillációs detektorok jelene és jövője, Hadtudomány, 2005 3. szám, ISSN 1215-4121
3. Nagy Gábor, Vincze Árpád: A radioizotópok gyakorlati alkalmazása, Kard és Toll, 2005 2. szám, 164-168 oldal, ISSN 1587-558X
4. Nagy Gábor, Vincze Árpád: Félvezető eszközök, mint sugárzásérzékelő detektorok, Hadmérnök, II. Évfolyam 1. szám - 2007. március, ISSN 1788-1919
5. Nagy Gábor, Vincze Árpád: A PIN dióda alkalmazása napjainkban, Hadmérnök, II. Évfolyam 4. szám - 2007. december, ISSN 1788-1919
6. Nagy Gábor, Bäumlér Ede, Csurgai József, Molnár László, Pintér István, Vincze Árpád, Zelenák János, Solymosi József: PIN dióda alkalmazhatósága pilóta nélküli légi sugárfelderítésben, Repüléstudományi konferencia, 2009 április 24., 12 oldal
7. Zelenák János, Nagy Gábor, Csurgai József, Molnár László, Pintér István, Bäumlér Ede, Solymosi József: A légi sugárfelderítés képességei alkalmazhatóságának vizsgálata elveszett, vagy ellopt sugárforrások felkutatása, illetve szennyezett terepszakaszok felderítése során, Repüléstudományi konferencia, 2009 április 24., 14 oldal
8. Nagy Gábor, Vincze Árpád, Pintér István, Csurgai József, Sarkadi András, Solymosi József: A PIN dióda alkalmazhatósága terepi sugárfelderítésben, XXXIV. Sugárvédelmi Továbbképző Tanfolyam, Hajdúszoboszló, 2009 április 28.-30.
9. Gábor Nagy, Árpád Vincze, Tibor Ranga, Ottó Zsille, József Solymosi: Environmental impact assessment of radioactive water pipe leakage at NPP Paks, Periodica Polytechnica, Chemical Engineering, 53/2, 2009, 87-91

Előadások

1. Nagy Gábor, Vincze Árpád, Solymosi József, Gujgiczter Árpád: Digitális jelfeldolgozós (DSP) nukleáris spektrométer lehetséges katonai alkalmazásai, IIIrd International Symposium on Defence Technology, 2004, Budapest
2. Nagy Gábor, Bäumlér Ede, Csurgai József, Molnár László, Pintér István, Vincze Árpád, Zelenák János, Solymosi József: PIN dióda alkalmazhatósága pilóta nélküli légi sugárfelderítésben, Repüléstudományi konferencia, 2009, Szolnok
3. Nagy Gábor: A hazai légi sugárfelderítés története, Vegyivédelmi szolgálat létrehozásának 60. évfordulója konferencia, 2010, Budapest