

Nagy Gábor
gabor.nagy@mail.somos.hu

Vincze Árpád
vincze.arpad@zmne.hu

A PIN DIÓDA ALKALMAZÁSA NAPJAINKBAN

Absztrakt

Nukleáris sugárzások mérésére az élet számtalan területén szükség van, úgy mint laboratóriumokban, kórházakban, környezetvédelemben, űrtechnikában, stb. Bizonyos nukleáris, radioaktív sugárzások mérésére kitűnő eszköz a szcintillátor kristály, amihez azonban csatlakoztatni kell egy ún. „kiolvasó” eszközt, amely a szcintillátorban a sugárzás hatására keletkező fényt elektromos jellé alakítja. Ez az eszköz általában a fotóelektron sokszorozó, azonban az utóbbi években intenzív kutatás folyik a PIN dióda ilyen célú alkalmazásáról. A PIN dióda egy olyan speciális félvezető, ahol a p és n rétegek között egy kiürített „intrinsic” réteg található. Ezen rétegben a rekombináció valószínűsége kicsi, tehát nagyobb fotóáram érzékelhető, mint a hagyományos félvezető eszközökben. Jelen cikkben a legelterjedtebb alkalmazásokat és a kutatásokat mutatjuk be, különös tekintettel a PIN dióda katonai alkalmazásával kapcsolatos szempontokra.

The measurement of nuclear radiation is necessary at numerous areas of life, such as in laboratories, hospitals, environment protection, space research, etc. The scintillator crystal is an excellent instrument of measuring some radioactive radiation, to which a so-called "reading" device must be connected as well. This device is usually the photoelectron multiplier; however, in recent years numerous articles have been published in relation to the application of scintillator crystal with pin diode. The PIN diode is a special semiconductor, where there is an emptied "intrinsic" layer between the p and n layers. In this layer, the chance of recombination is low, and therefore, higher photo electricity can be detected, than in regular semiconductors. In this article we intend to introduce the most common areas of usage and researches. Below we describe only the results and remarks in accordance with applying the PIN diode.

Kulcsszavak: PIN dióda, szcintillátor kristály, gamma kamera, DIP detektor

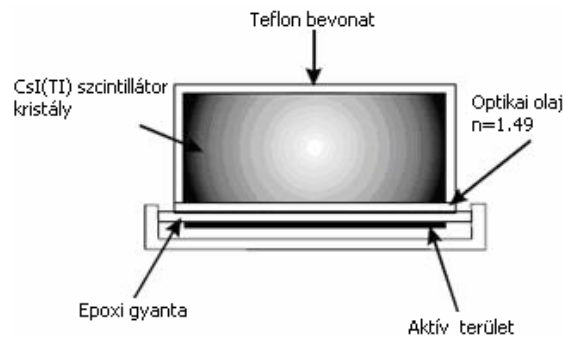
PIN DIÓDA ÉS A SZCINTILLÁTOR KRISTÁLY A GAMMA SZONDÁKBAN

A PIN diódákat legtipikusabban valamilyen szcintillátor kristály után helyezik, a foton-elektron átalakítás céljából, a fotóelektron sokszorozók (PMT) kiváltására. A szcintillátor kristályok anyaga nagyban befolyásolja az alkalmazhatóságot.

A PIN dióda használatának előnyei, hogy nem igényel nagy tápfeszültséget és érzéketlen a mágneses mezőre. Azonban nincs belső erősítése, mint a PMT és lavina dióda (APD) eszközöknek.

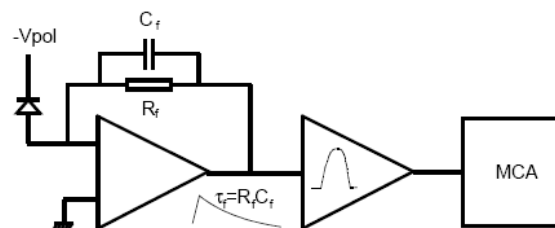
Az egyik leggyakoribban alkalmazott szcintillátor kristály a CsI(Tl) a magas fény kibocsátása miatt. A nagy fényhozam alkalmassá teszi közvetlenül a PIN dióda használatát, azonban különböző kialakításokkal és anyagokkal még hatékonyabbá tudják tenni a kiolvasását.

Ilyen kialakítás például az 1. ábra által bemutatott konfiguráció [1]. Itt egy 10x10x5 mm²-es és egy 5x5x5 mm²-es szcintillátor kristály kiolvasását egy 10x10 mm²-es PIN szilíciumdiódával. A dióda jelét egy ultra alacsony zajú előerősítő és egy alakformáló tag fogadja. (2. ábra) A kis zaj érdekében a dióda kapacitása kicsi, a maradékárama kisebb, mint 1nA. A szonda energia felbontása szoba hőmérsékleten 15% 140keV-nál és 8.38% 365keV-nál.

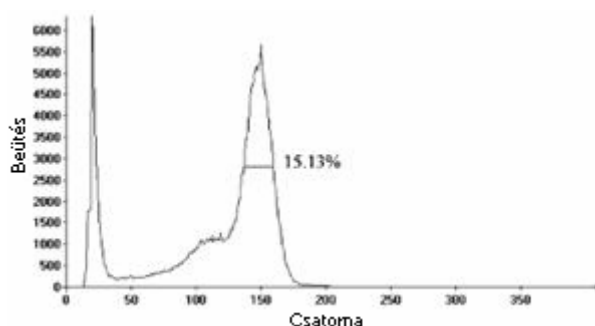


1. ábra Detektorfej keresztmetszete

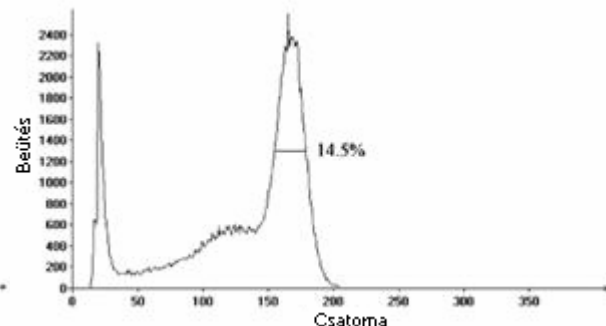
A teflon réteg maximalizálja a fénygyűjtést. A megfelelő optikai csatolás érdekében optikai zsír réteg helyezkedik el a dióda és a szcintillátor között. A kis maradékáram érdekében (1nA) „guard ring” technológiával van ellátva, a kapacitása 50V-on kisebb, mint 50pF.



2. ábra Pulzus erősítő és detektáló áramkör

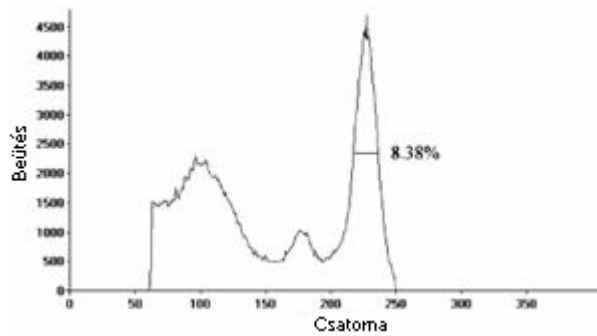


3. ábra ^{99m}Tc spektrum, 5x5x5 mm³ kristály



4. ábra ¹²³I spektrum, 5x5x5 mm³ kristály

Az első csúcs (kb. 30keV) az elektronika zaja.



5. ábra ^{131}I spektrum, 5x5x5 mm³ kristály

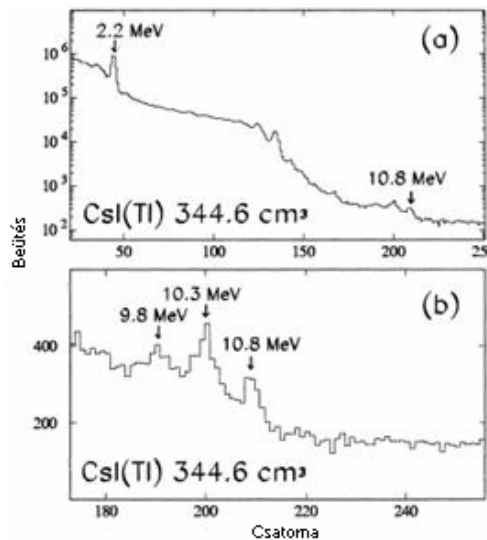
A 3. és 4. ábrákon látszik, hogy a félértékszélessége lehetne kisebb is, azonban egy ilyen kialakítás tökéletesen megfelel egy minőségi felderítésnek, ahol nem a pontosság, hanem a gyors reagálás és a kis tömeg a mérvadó.

Az egyik ilyen kialakítás lehet az, amely képes azonosítani a titkos robbantásokat a TNA (Thermal Neutron Analysis) technikát alkalmazva. A robbantási anyagok felismerhetők a magas nitrogén koncentrációból és a 10.8 MeV-es γ részecskékből, melyek a termikus neutronok nitrogén nuklidok általi elfogásából keletkeznek. A kísérleteket számos konfigurációval elvégezték (6.ábra).

A kísérleteket kiértékelve úgy találták, hogy a 344cm³-es CsI(Tl) szcintillátor, persze megfelelő geometriával, és a PIN dióda a legalkalmasabb eszköz [2]

Size (cm)	Vol. (cm ³)	Number of PD
Ø 2,5 × 2,5	12,8	1
		1
		1
5 × 5 × 1,5	37,5	1,2,3,4
		1
		1
5 × 5 × 1,5	37,5	1
		Ø 7,6 × 7,6
Ø 7,6 × 7,6	344,6	1,2,3
		1
Ø 7,6 × 7,6	344,6	1
Ø 10,2 × 10,2	833	1,2,3
		3
Ø 10,2 × 10,2	833	1

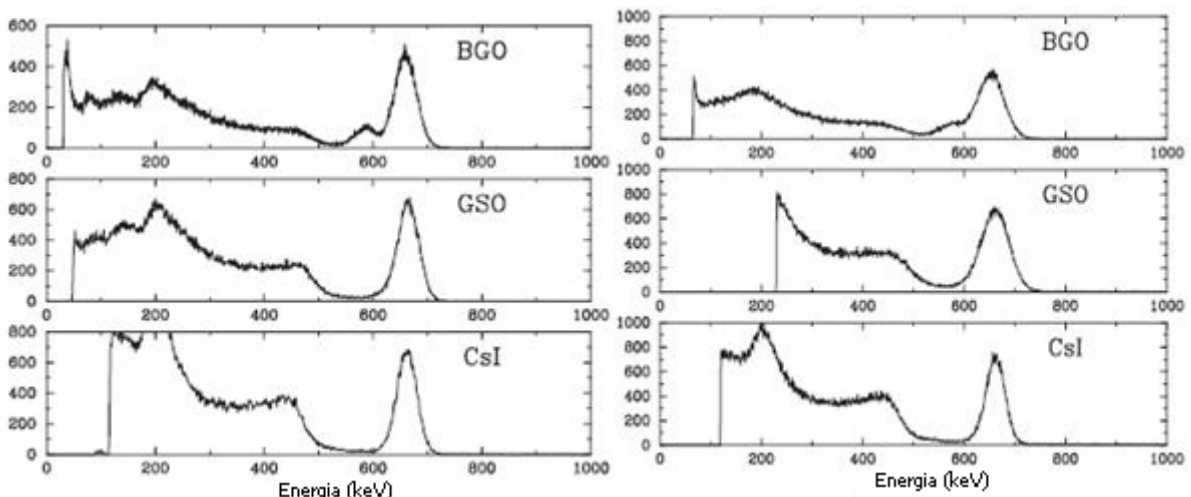
6. ábra A kísérleteknél használt konfigurációk



7. ábra Egy 800g-os melamine minta
(a) teljes spektruma, (b) nagyított ROI

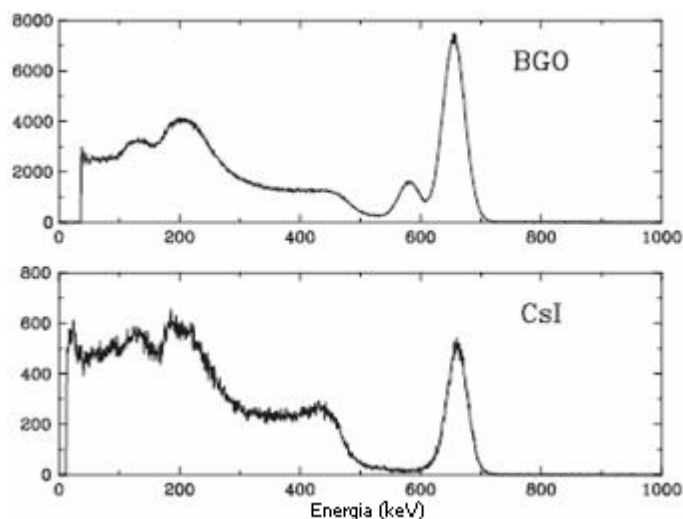
Mint fentebb említettük a szcintillátor anyag nagyban befolyásolja a mérés eredményét. Ezért számos anyaggal kísérleteznek, hogy minél jobb felbontást és érzékenységet érjenek el. Az egyik ilyen ígéretes anyag a $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO) szcintillátor kristály, mely alkalmas lágy gamma sugárzás detektálására.

A PIN diódánál nagyobb felbontást és nagyobb érzékenységet szolgáltat a PMT fotóelektron sokszorozó és az APD lavina dióda. Azonban ezek mind árban mind kiszolgáló elektronikában nem versenyképesek a PIN diódával. A következő ábrákon különféle szcintillátor kristályok összehasonlítása látható mind a három eszközzel [3].



8. ábra ^{137}Cs forrás detektálása PMT-vel

9. ábra ^{137}Cs forrás detektálása fotódiódával



10. ábra ^{137}Cs detektálása lavina diódával (APD)

	PMT	PD	APD
BGO	7.04 ± 0.10	8.33 ± 0.28	6.24 ± 0.07
GSO	6.69 ± 0.06	9.10 ± 0.78	—
CsI	6.13 ± 0.03	6.24 ± 0.15	5.85 ± 0.11

11. ábra Energia felbontás 662keV-es gamma sugárnál

Megállapítható tehát, hogy a PIN dióda egy megfelelő szcintillátor kristállyal (például CsI) kitűnő eszköz lehet esetleges felderítő tevékenységeknél, ahol a hordozhatóság és a kisméret a lényeg, ugyanakkor nem szeretnénk lemondani a viszonylagos pontosságról sem.

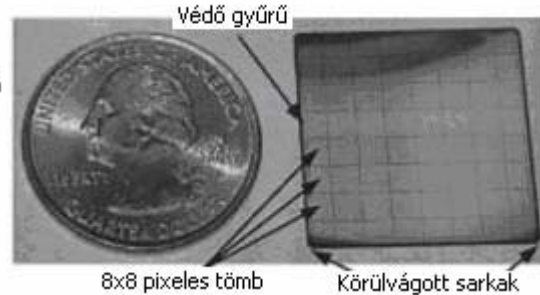
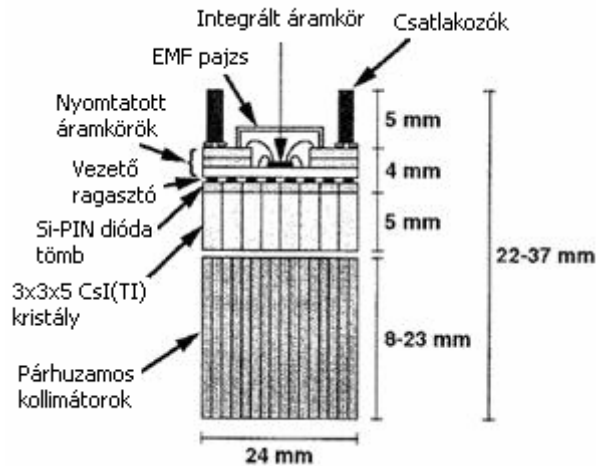
GAMMA KAMERA

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 s képszerű formában történő megjelenítését megvalósító eszközök a nukleáris képalkotó berendezések a gamma (Anger) kamera (2D), SPECT (3D), PET (3D).

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 ún. kompakt gamma kamerák fejlesztéséhez, amelyek kisebb mérettel és nagyobb érzékenységgel rendelkeznek.

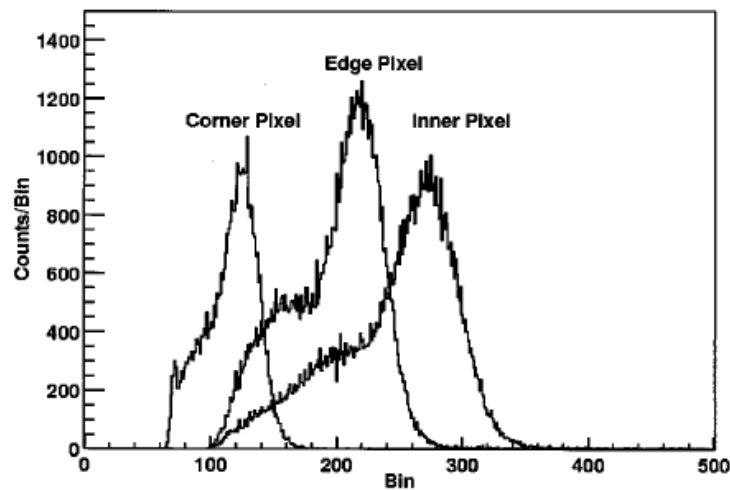
Kifejlesztettek egy olyan 64-pixeles gamma kamera rendszert, amely egy optikailag teljesen elszigetelt $3 \times 3 \times 5 \text{ mm}^3$ -es CsI(Tl) kristályból, egy alacsony zajú Si PIN fotodiódából és egy, a kiolvasásra szolgáló integrált áramkörből. 50V-os előfeszítésnél a 64-pixeles fotodióda tömb maradékáram kb. 28pA, 98,5%-os teljesítménynél kisebb, mint 100pA, a kvantum határfoka 540nm-nél 80% [4].

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”.



12. ábra A képképző rendszer legfontosabb egységei

13. ábra Alacsony zajú Si PIN tömb fotódióda



14. ábra Szoba hőmérsékleten 140keV ^{99m}Tc
FWHM 23%, 19.8%, 20.4%

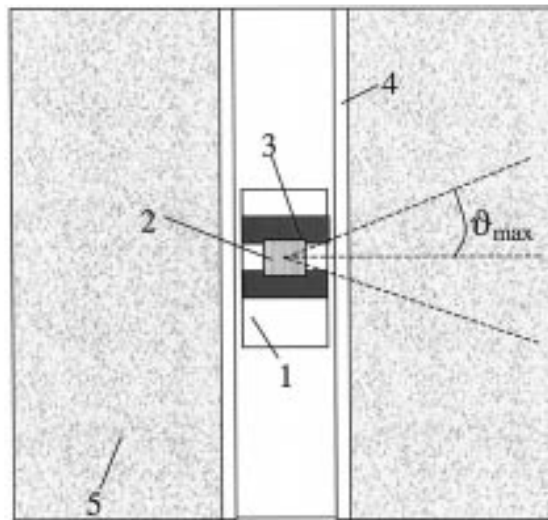
A gamma kamera használható radiológiai fegyverek, balesetek esetén szennyezettség ellenőrzésére. Képet kaphatunk a szerves anyagok elváltozásairól, esetleges szennyezettségéről.

TALAJSZENNYEZETTSÉG MÉRÉS

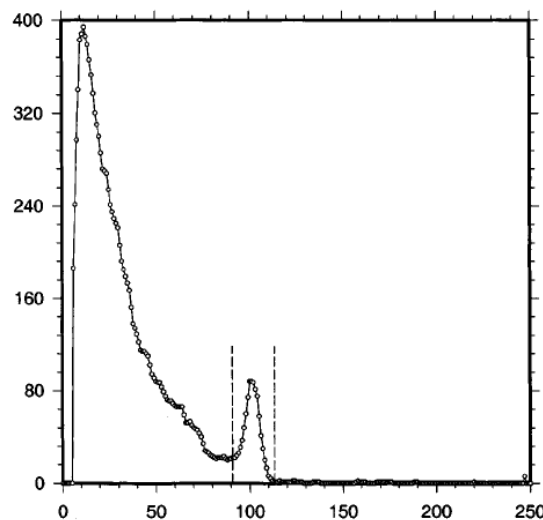
A legjelentősebb gamma sugárzó izotóp a csernobili és dél-uráli katasztrófák során a Cs-137. Radioaktív szennyező anyagok szivárgása a reprocesszáló erőművekben szintén nagy kontaminációt jelent.

Nagyon fontos tehát ezen szennyeződések nyomon követése a talajban és más „élő” rendszerekben. 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 [5], mellyel mélységi felderítést végezhetünk a talajban, Cs-137 szennyeződésre. A detektor rendszer CsI(Tl) szcintillátor kristályból, PIN fotodiódából és kiértékelő elektronikából áll.



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



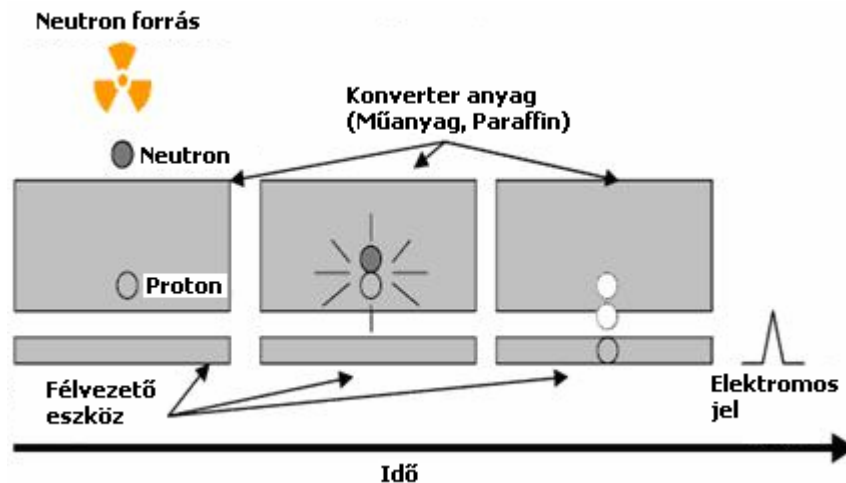
16. ábra DIP detektor energia spektruma ^{137}Cs forrással

A 16.ábrán jól látható, hogy a detektor egyértelműen kimutatja a Cs-137 forrást, így alkalmas talajszennyezettség helyszíni mérésére.

NEUTRON DETEKTÁLÁS

A hasadási erőművekben, részecske gyorsítóknál keletkezett neutronok kb. 20MeV energiájúak, gyors neutronok. Egyéb eszközök, például a részecske gyorsítók és az AmBe források is képesek gyors neutronok előállítására. A neutron detektorok fejlesztése alapvető a nukleáris technikában, mivel ezek képesek a reaktor környezetének és az ott dolgozó személyek monitorozására. Mivel a neutron források gamma sugárzást is keltenek, így a detektoroknak képesnek kell lenni meghatározni a zavaró gamma sugárzást.

Mivel a neutronok töltés nélküli részecskék, valamilyen anyaggal a detektorok számára érzékelhetővé kell alakítani. Az ilyen anyagok, mint például a hidrogén képesek ionizáció keltésére. Ilyen anyagok egyes szcintillátor kristályok illetve a félvezető detektorok. Ezek a félvezető detektorok azonban magas tömegszámú anyagokból (Si, Ge, stb.) készültek, melyek a neutronsugárzást nem alakítják megfelelő ionizáló sugárzássá. Ennek felismerése vezetett egy ún. konverter anyag kifejlesztéséhez, amelyet a félvezető érzékeny felületére visznek fel.

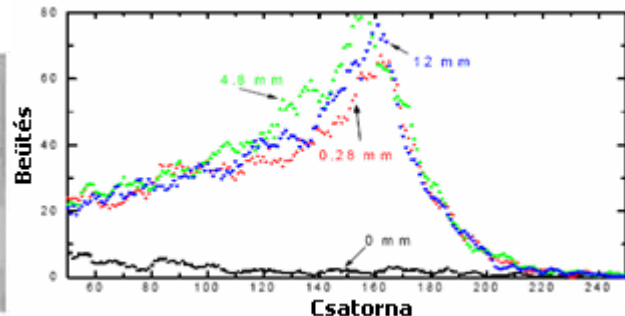


17. ábra Félvezető (n,p) konverterrel

A 17. ábrán neutron detektornak egy Si PIN diódát alkalmaztak, melyre polietilén réteget vittek fel a neutron-proton reakció kiváltásához [6].



18. ábra Egy konkrét megvalósítás



19. ábra AmBe spektrum, különféle polietilén rétegvastagságoknál

A 19. ábrán látható, hogyan függ a polietilén vastagság és a beütés szám. Megállapíthatjuk, hogy minél vastagabb a réteg, annál érzékenyebb a detektor.

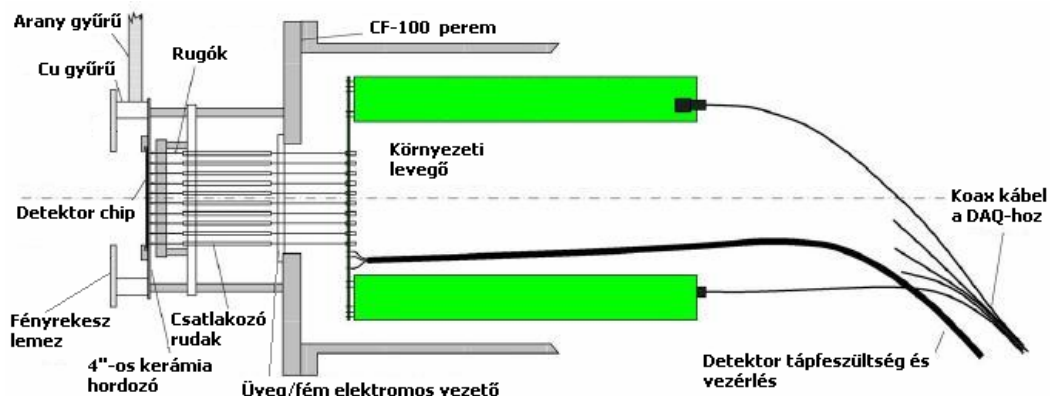
ALACSONY ENERGIÁJÚ BÉTA RÉSZECSKÉK DETEKTÁLÁSA

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

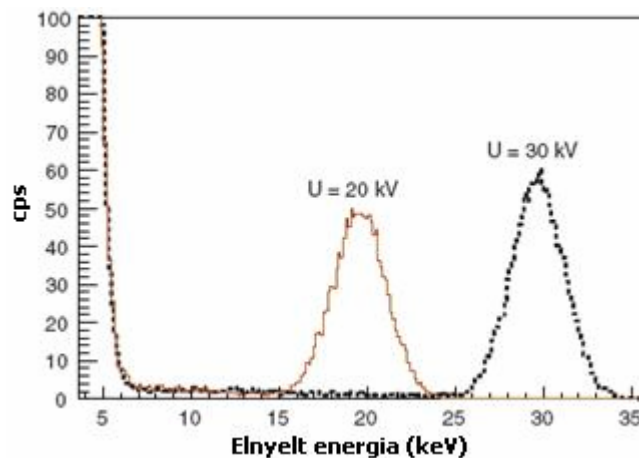
A Karlsruhe Trícium Neutrínó Kísérlet (KATRIN) alapja a trícium béta bomlásakor keletkező elektronok pontos, precíz mérése [7]. Ez egy nagy elektrosztatikus spektrométerrel történik, amit egy elektron detektor követ. A detektor legfőbb jellemzői a nagy érzékeny felület ($\sim 80\text{cm}^2$), a jó energia felbontás ($\Delta E = 600\text{eV}$ 18.6keV-nél) és a multi-pixel felépítésnek köszönhető térbeli felbontás ($\sim 3\text{mm}$). A cikkben egy új fajta PIN diódás detektor

rendszert ismertetnek, amely redukált felülettel (~16cm²) és redukált pixel számmal (64) rendelkezik.

A detektor rendszer érzékelője egy nagy szilícium PIN dióda tömbből (4444mm²) áll, amely 88 szegmensből (pixelből) áll. A szegmentált PIN dióda chip egy folyékony nitrogénnel hűtött kerámiahordozóra 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 (EMI, indukciós, mikrofonhatás) zavaró hatását. Hátránya a JFET közös drain vezérlésű fokozat alkalmazásának, hogy a feszültség erősítése kisebb 1-nél.



20. ábra A detektor hosszirányú keresztmetszete



21. ábra A detektor válasz függvénye

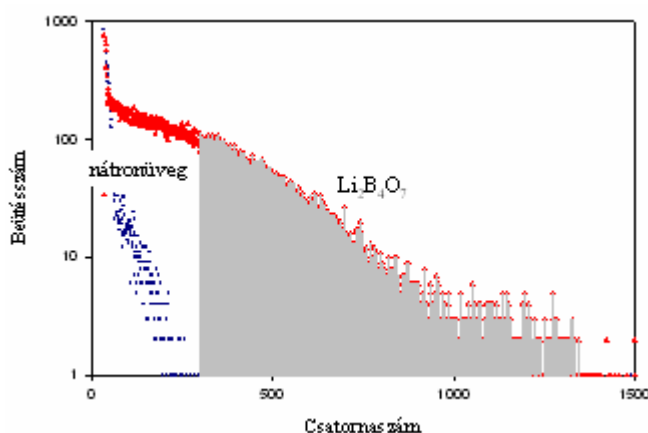
ALFA RÉSZECSKÉK DETEKTÁLÁSA

Mint az előzőleg tárgyalt detektálási módszereknél, itt is az egyik legfontosabb dolog a detektorelrendezés. AZ ATOMKI-ben kifejlesztettek egy részecskedetektálásra alkalmas nagy térszögű detektor rendszert, mely alkalmas ¹¹B(p,α)2α magreakcióból származó α-részecskék detektálására [8]. A fejlesztés előtt felületi záróréteges gyűrűdetektorokat használtak, azonban alacsonyabb árfekvése miatt a PIN dióda került szóba. A kísérletek bizonyították, hogy több PIN diódából álló detektorelrendezés konstrukciójával elérhető a gyűrűdetektorokéval megegyező, sőt, azt meghaladó nagyságú detektálási térszög.



22. ábra A μ -NRA mérőelrendezés

A detektor kalibrálását bórral és egy macusanit standarddal végezték.



23. ábra Lítium-borát és nátronüveg α -spektruma ($E=675$ keV)

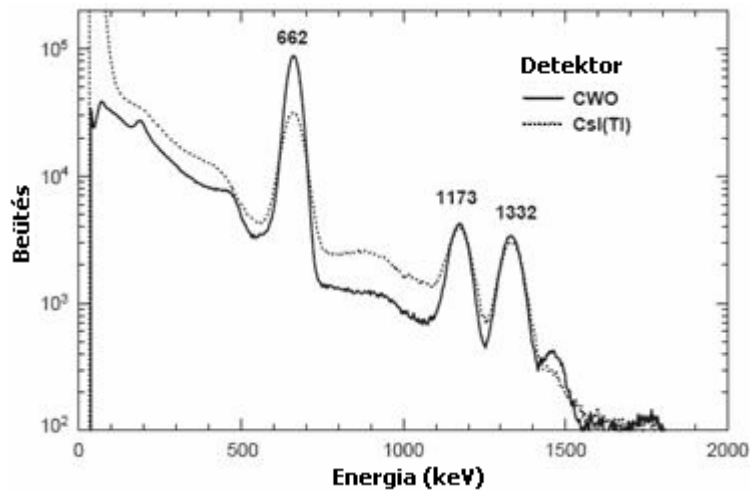
Látható tehát, hogy a PIN dióda alfa részecskék detektálására is alkalmas, azonban itt is a megfelelő elrendezésen van a hangsúly.

PIN DIÓDA AZ ŰRKUTATÁSBAN

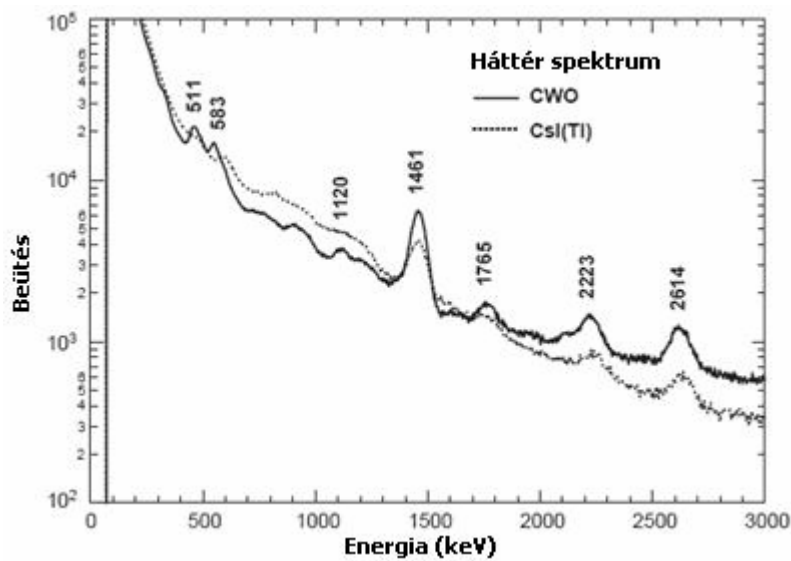
A múltban, az űrkutatásban NaI(Tl), CsI(Tl), BGO szcintillátor kristályokat valamint HPGe félvezető detektorokat használtak. Méretük és egyéb hátrányaik miatt új anyagok és rendszerek kifejlesztésén dolgoznak. A PIN diódák felé kismérete és alacsony fogyasztása miatt fordultak.

2007-ben a NASA egy „mobil tudományos laboratórium” indítását tervezi a Marsra. Ennek a laboratóriumnak része lenne egy gamma spektrométer (GRS).

A legfőbb követelmény ezen detektor rendszerénél az alacsony súly, alacsony fogyasztás és az ellenállás az állandó kozmikus sugárzásnak. Két felépítést vizsgáltak [9], CdWO₄ szcintillátor után egy fotóelektron sokszorozót és egy CsI(Tl) szcintillátor után egy PIN fotodiódát.

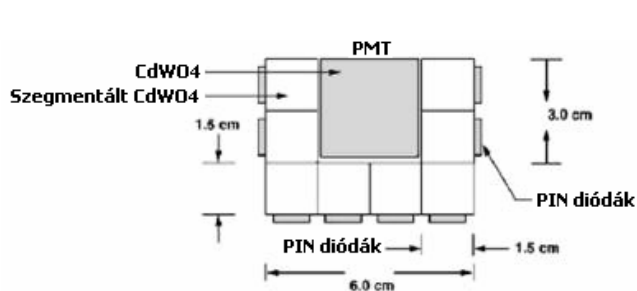


24. ábra ^{137}Cs és ^{60}Co forrás energia spektruma, CWO és CsI(Tl) kristállyal

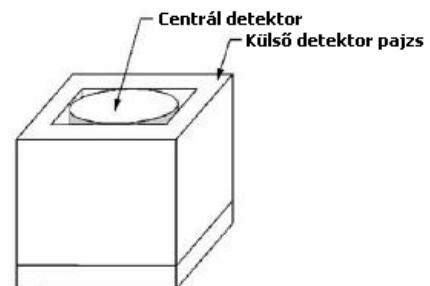


25. ábra Gamma háttér spektrum

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



26. ábra A detektor felülnézeti ábrája



27. ábra A detektor 3D képe

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

BEFEJEZÉS

A cikk célja az volt, hogy bemutassuk a PIN dióda sokoldalú alkalmazását. Megállapíthatjuk, hogy a PIN dióda alkalmas alfa-, béta-, gamma-, neutronsugárzások detektálására, illetve az irodalomban találunk példát a röntgen sugárzás detektálására is.

A leírásból kiderül, hogy a PIN dióda hatékony alternatívája lehet a fotóelektron sokszorozónak és a lavina diódának, egyrészt a kismérete miatt, másrészt a relatíve alacsony költsége miatt. Láttunk olyan alkalmazást, ahol a diódát magában illetve olyat ahol több formában használták, az esetleges korrekciók kiszámításához.

Természetesen nem szabad megfeledkezni, a dióda után elhelyezkedő elektronikáról sem. A PIN diódánál jól bonyolultabb és kifinomultabb elektronikára van szükség, mivel a keltett áram pikó illetve mikro nagyságrendbe esik. Egy detektor tervezésénél, tehát nagyon kell ügyelni a környezeti zajokra (elektromos, termikus, stb.), illetve a megfelelő fényszigetelésre, nehogy a környezeti fényforrások befolyásolják a mérési eredményeket. Léteznek ma már olyan algoritmusok, amelyek kiszűrik a számunkra értéktelen zajokat, ezek elvégzéséhez már egy komolyabb elektronikai eszközre a DSP-re van szükség.

Összefoglalva, a PIN diódát egy megfelelően kiválasztott szcintillátor kristállyal összeillesztve és az ehhez tartozó elektronikával összekapcsolva, egy olyan komplett detektor rendszert kapnánk, amely képes lenne egy esetleges nukleárisbaleset vagy egy környezeti mérés „in-situ” elvégzéséhez, mind gyalogos mind járműves felderítésnél, amit később laboratóriumi körülmények között pontosítani lehetne.

IRODALOM

- [1] J. Chavanelle, M. Parmentier (2003): A CsI(Tl)-PIN photodiode gamma-ray probe. Nuclear Instruments & Methods In Physics Research Section A 504:321-324
- [2] E. Fioretto, F. Innocenti, G. Viesti, M. Cinausero, L. Zuin, D. Fabris, M. Lunardon, G. Nebbia, G. Prete (2000): CsI(Tl) photodiode detectors for γ -ray spectroscopy, Nuclear Instruments & Methods In Physics Research Section A 442: 412-416
- [3] T. Nakamoto, Y. Fukazawa, T. Ohsugi, T. Kamae, J. Kataoka (2005): BGO readout with photodiodes as a soft gamma-ray detector at -30°C , Nuclear Instruments & Methods In Physics Research Section A 536: 136-145
- [4] 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
- [5] 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
- [6] Carlos H. Mesquita, Tufic Madi Filho, Margarida M. Hamada (2002): Development of neutron detector using the PIN photodiode with polyethylene (n,p) converter, Nuclear Science Symposium Conference Record, IEEE Vol. 1, 416-419
- [7] 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
- [8] Szíki Gustáv Áron: Magreakció-analitikai fejlesztések és interdiszciplináris ionnyaláb-analitikai vizsgálatok, Doktori (PhD) értekezés, Debreceni Egyetem TTK-ATOMKI, 2004
- [9] 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