

PIN dióda felhasználása energiaszelektív szcintillációs detektorrendszerhez

Nagy Gábor*¹, Sarkadi András², Zagyvai Péter³

¹SOMOS Kft., 1118 Budapest Sasadi út 70., ²Gamma Műszaki Zrt., 1097 Budapest Illatos út 9.,

³KFKI Atomenergia Kutatóintézet, 1121 Budapest Konkoly-Thege Miklós út 29-33.
gabor.nagy@somos.hu

Title – Application of PIN diode for energy selective scintillation detector system

Abstract - Rapid qualitative and quantitative radioanalysis of environmental fallout on soil can be appropriately performed by means of portable and/or easily installable gamma spectrometers in mobile survey units making use of solid state scintillation detectors. Reproducible operation of these devices requires a photosensor insensitive to ambient conditions (temperature, mechanical effects, magnetic field etc.) PIN diodes are capable substitutes for photomultiplier tubes due to their several advantageous features.

In order to obtain a device with suitable energy selectivity a series of electronic and mechanic problems should be solved. Most important examples are noise reduction and improvement of resolution, respectively. The analytical problem owing to the poor resolution of scintillation crystal detectors can be tackled by specially designed data processing algorithms. Our paper describes the difficulties of constructing a gamma spectrometer containing scintillation detector and PIN diode which is applicable for field surveys as well as the offered solutions.

Keywords – PIN diode, scintillation crystal, noise analysis

Kivonat - A talajra kihullott gamma-sugárzó radioaktív izotópok gyors, helyszíni izotópszелеktív kimutatására alkalmasak a szilárd szcintillációs detektorokat alkalmazó hordozható, illetve mobil mérőállomásra is telepíthető spektrométerek. Ezek reprodukálható működéséhez azonban egy, a környezeti körülményekre (hőmérséklet, mechanikai igénybevétel, mágneses tér, stb.) nem érzékeny fotoérzékelőre van szükség. A fotoelektron-sokszorozó kiváltására ígéretes eszköz a PIN dióda, amely számos előnyös tulajdonsággal rendelkezik.

Ahhoz, hogy megfelelő energiaszelektivitással rendelkező eszközt kapjunk, számos elektronikai, mechanikai problémát kell megoldanunk. Két ilyen fontos probléma a zajcsökkentés illetve a felbontás javítása. A szcintillációs detektor gyengébb felbontásából eredő analitikai probléma speciális, célorientált kiértékelési algoritmusokkal kiküszöbölhető.

Cikkünkben egy terepi körülmények közötti is használható, szcintillátor kristályból és PIN diódából álló detektor kialakításának nehézségeit mutatjuk be, illetve megoldást adunk ezekre.

Kulcsszavak - PIN dióda, szcintillátor kristály, zaj analízis

BEVEZETÉS

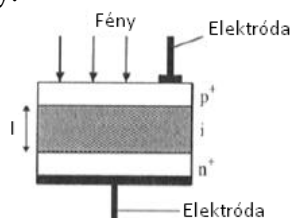
A talajra kihullott gammasugárzó radioaktív izotópok gyors, helyszíni kimutatására alkalmas eszközök már ismertek. A félvezető detektort és sokcsatornás analizátort alkalmazó eszközök drágák, óvatos kezelést és speciális szakértelmet igényelnek, katonai alkalmazhatóságuk gyakran nehézségekbe ütközik. A másik eszközcsoport szcintillációs detektorokat alkalmaz, ennek működéséhez azonban egy, a környezeti körülményekre (hőmérséklet, mechanikai igénybevétel, stb.) érzékeny fotóelektron-sokszorozóra van szükség [1]. A fotoelektron-sokszorozó (PMT) kevésbé érzékeny komponenssel történő kiváltásával és a hozzá tartozó elektronikának a miniatürizálásával jelentős méretbeli, fogyasztásbeli és mechanikai érzékenységbeli csökkenés érhető el.

A fotóelektron-sokszorozó kiváltására ígéretes eszköz lehet egy speciális félvezető eszköz, a PIN dióda [2]. A PIN dióda a fotóelektron-sokszorozóhoz képest számos előnyös tulajdonsággal rendelkezik, melyek közül a legfontosabbak a kis fogyasztása és mérete, kvantumhatásfoka és a mágneses térrel szembeni érzéketlensége. Mivel a PIN dióda is egy egyszerű p-n átmenet, ezért, ha a rétegek nem sérülnek, gyakorlatilag tönkreterhetetlen. Ha optikai csatolást létesítünk a PIN dióda és egy szcintillátor kristály között, a dióda segítségével érzékelhetjük a kristályban létrejött fény impulzusokat. Megfelelő elektronika és sokcsatornás analízátor segítségével a sugárforrás gamma-spektrumának felvételére van lehetőség, így a gyakoribb gammasugárzó izotópok azonosíthatóak lennének.

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.

Viselkedésének jellegzetességeit szerkezete adja meg, mivel olyan a felépítése, hogy a p és az n réteget egy széles és viszonylag nagy ellenállású szakasz választja el egymástól: a sajátvezetésű („intrinsic”) tartomány.



1. ábra. PIN dióda sematikus ábra

A PIN dióda működése közben adott zárófeszültségnél a kiürített réteg fajlagos ellenállása nő. 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, ami nagyban térerosság függő [3].

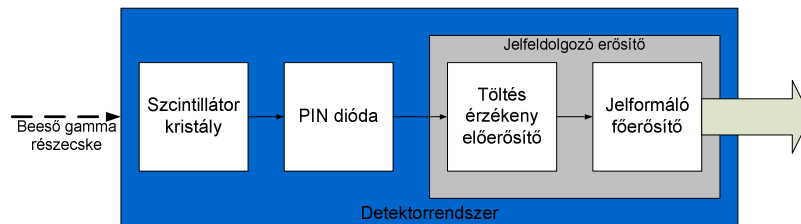
1. táblázat. PMT és a PIN dióda összehasonlítása

	PMT	PIN dióda
Méret [cm]	Ø1 -10	1x1
Működési feszültség [V]	~1000	24
Kvantum hatásfok [%]	~25	90
Mágneses mező hatására	érzékeny	érzéketlen
Elektromos zaj	érzékeny	érzékeny
Hőmérsékletváltozásra	érzékeny	érzékeny
Belső erősítés	van	nincs

ZAJ ANALÍZIS

Ahhoz, hogy minél pontosabb információt kapjunk az egyes gammasugárzó izotópokról, az érzékelőkben keltett jeleket amplitúdó szerint szét kell válogatni. A környezetben található különböző zavarforrások (elektromos, elektromágneses) nagyban nehezítik ezt.

A feladat, hogy megkülönböztessük a számunkra hasznos jelet a zavarjeltől. A feladatot megvalósító rendszer rendszertervét a 2. ábrán láthatjuk



2. ábra. A detektorrendszer terve

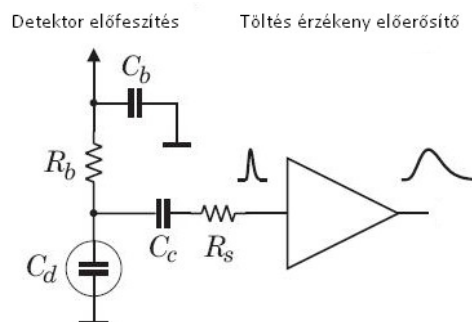
A 2. ábra szerint a tervezett detektorrendszert három fő egységre oszthatjuk:

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

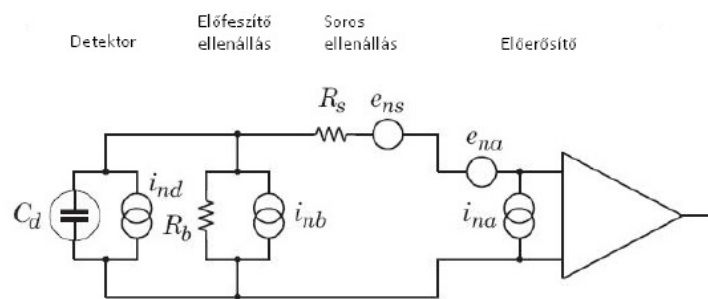
A szcintillátor kristály és a PIN dióda a zaj szempontjából adott tulajdonságokkal rendelkeznek, amiket legfeljebb konstrukciós megoldásokkal (jobb fényzárás, jobb fényillesztés, stb.) tudunk javítani. A teljes rendszer megértéséhez azonban ezeket a zaj tulajdonságokat is ismernünk kell.

A szcintillátor kristály fontos tulajdonsága a lecsengési időállandója, amit a töltés érzékeny erősítő illetve a jelfeldolgozó elektronika időállandójának meghatározásánál figyelembe kell venni. Ha valamelyik időállandót ennél kisebbre vesszük, az amplitúdó csökkenést okoz [4]. Ez az időállandó a CsI(Tl) szcintillátor kristálynál kb. $1\mu\text{s}$. Az általunk alkalmazott töltés érzékeny előerősítő időállandója $\tau_F = R_F \cdot C_F = 50\text{M}\Omega \cdot 2\text{pF} = 100\mu\text{s}$, ami lényegesen nagyobb, így elhanyagolható hibát okoz.

A detektor és az előerősítő zajanalízisét a zaj ekvivalens áramkör vizsgálatával végezhetjük.



3. ábra. A detektor és előerősítő egyszerűsített kapcsolási rajza



4. ábra. A bemeneti áramkör zaj ekvivalens áramköre

Az egyes elemeket a zaj szempontjából 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 4. 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 előfeszítő 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 az eszköz adatlapja tartalmaz

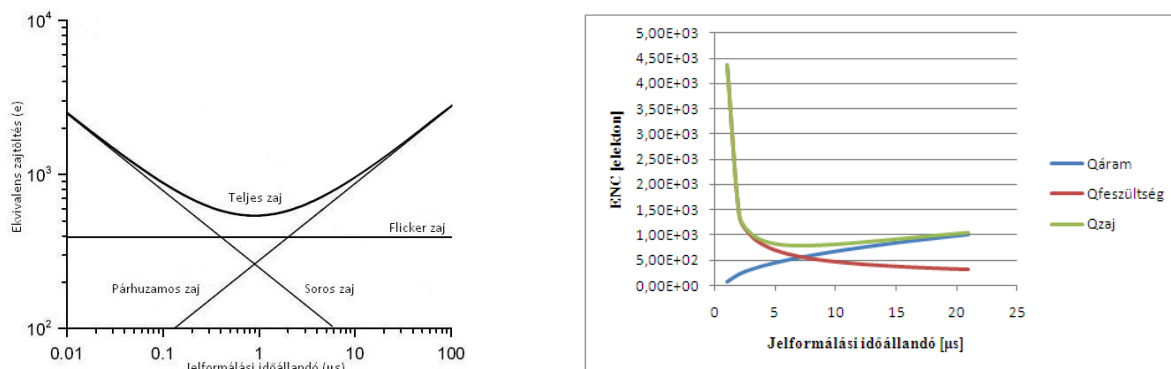
Habár a zajforrások feszültség- illetve áram jellegűek, mivel a sugázmérő detektorok töltést mérnek, a rendszer zajszintjét szokás az ún. Q_n ekvivalens zajtöltéssel kifejezni. Az ekvivalens zajtöltés nem más, mint annak a detektorból érkező jelnek a nagysága, ami egységnyi jel/zaj viszonyt eredményez.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

A fenti áramkör ekvivalens zajtöltésének négyzetes hibaösszege (ENC – equivalent noise charge) [5]

$$Q_n^2 = ENC_p^2 + ENC_s^2 + ENC_{\frac{1}{f}}^2 = \left[\left(2eI_d + \frac{4kT}{R_b} + i_{na}^2 \right) \cdot \tau + (4kTR_s + e_{na}^2) \cdot \frac{C_d^2}{\tau} + 4A_f C_d^2 \right] \quad (1)$$

A kifejezés első tagja az áram jellegű zajok összege, az erősítő időállandójával együtt nő. A második tag a feszültség jellegű zajok összege. A kapacitás növekedésével nő, az időállandó növekedésével viszont csökken. A harmadik tag a *flicker zaj*, ami a félvezető eszközök gyártástechnológiájából adódik, a technológia fejlődése miatt, elhanyagolható a szerepe.

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, 5. ábra egy optimális időállandójú illetve a megvalósított rendszer zaját ábrázolja.



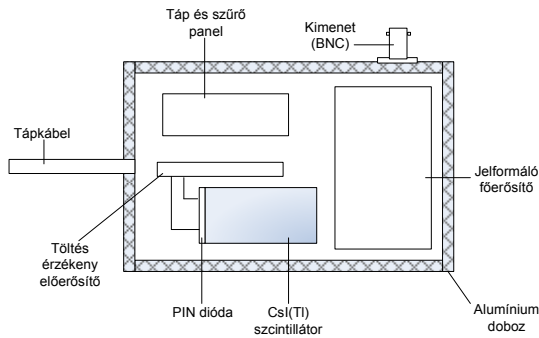
5. ábra. Ekvivalens zajtöltés a jelformálási idő függvényében (elméletben, valóságban)

A valós értékekkel kiszámított ábráról leolvasható, hogy kb. 6 μs körül kell keresni a legoptimálisabb időállandót, ami a legnagyobb jel-zaj viszonyt adja.

Fontos megemlíteni, hogy jelformáló főerősítőnek nem csak egy integrálási illetve differenciálási időállandóval rendelkező erősítőt szoktak alkalmazni, hanem több erősítőt kapcsolnak egymás után. Ezek feladata, az analizátor számára megfelelő jelszint és jelforma biztosítása, a jel-zaj viszony kellő szinten tartásával.

SUGÁRFORRÁSOKKAL VÉGZETT MÉRÉSEK

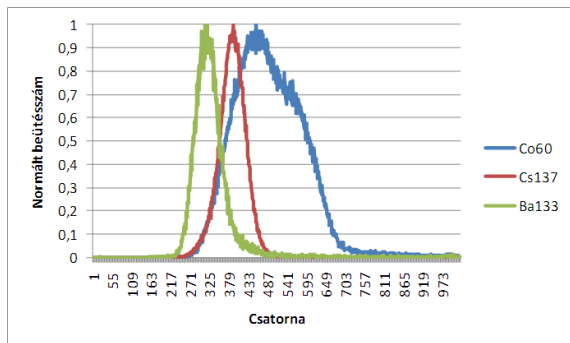
A megvalósított rendszert egy S3590-08 PIN dióda és egy 6cm³ térfogatú CsI(Tl) szcintillátor kristály alkotja. A vizsgálatokhoz 3 sugárforrást használtunk, ¹³³Ba, ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co.



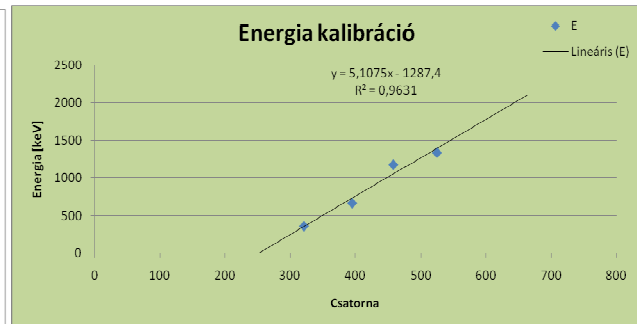
6. ábra. Az elkészült detektorrendszer prototípus blokk-sémája

2. táblázat. A detektorrendszer paraméterei

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



7. ábra. 6cm³-es kristály, 24V-os előfeszítésnél felvett, normált teljesenergia-csúcsok



8. ábra. Energia kalibráció simítás illetve második derivált meghatározása után (6cm³-es kristály, 24V előfeszítés)

A spektrumok felvétele egy 1024 csatornás spektrum analízátorral történt. Fontos megemlíteni, hogy a mérés során a diszkriminációs szintet mindig a főcsúcs alá, azaz a Compton-él végére állítottuk. Valamint a kirajzolt spektrumok háttérlevonással készültek, azaz levontuk a csúcs alatti alapvonal trapézzal közelített hozzájárulását a beütésekből.

JELFELDOLGOZÁS

A detektorok fontos tulajdonsága a félértékszélesség, ami a detektor energia felbontóképességének mértéke. Értéke a teljesenergia-csúcs szélessége a maximális beütésszám felénél. A szcintillációs detektoroknál a teljes energiacsúcsokhoz tartozó félértékszélességek a gamma-energia függvényében változnak.

Mielőtt az egyes csúcsok félértékszélességét meghatároznánk, a spektrumokat simítani kell, hogy a nukleáris bomlás statisztikus szórásának hatását csökkentsük. A simításra kiválóan alkalmas a konvolúciós szűrés, Savitzky és Golay módszere szerint. Lényege, hogy a nyers adatsort egy megfelelő függvénnyel konvolválják [7]. A simított pontok az alábbi módon adódnak:

$$y_s(k) = \sum_{j=-n}^{+n} c_j^{(2n)} y(k+j) \tag{3}$$

ahol

$y_s(k)$ – a k-adik szűrt pont

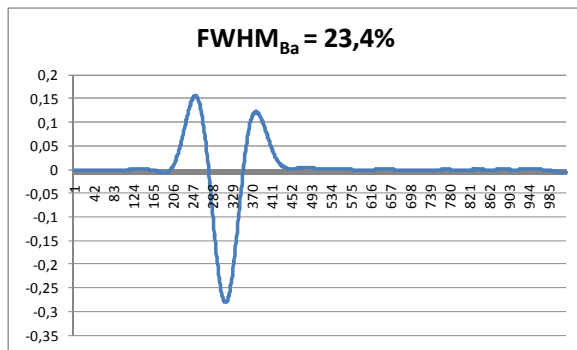
$y(k)$ – a k-adik eredeti, mért pont

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

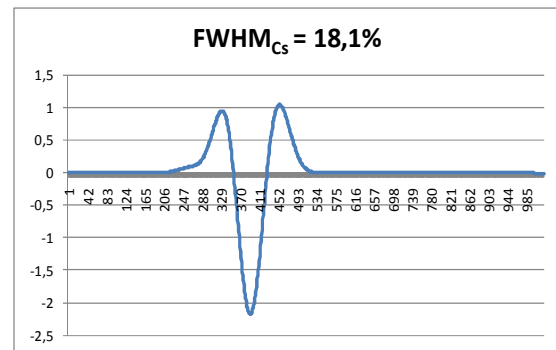
$2n$ – a simítás ún. ablakszélessége

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 szűrésére 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.

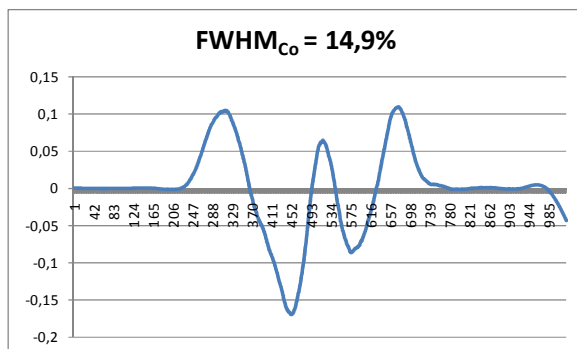
Az eredeti spektrumoknak a csúcsok tartományában (ROI, region-of-interest) végzett simításával és kétszeres deriválásával kapott adatsorok láthatók a 9-11 ábrán.



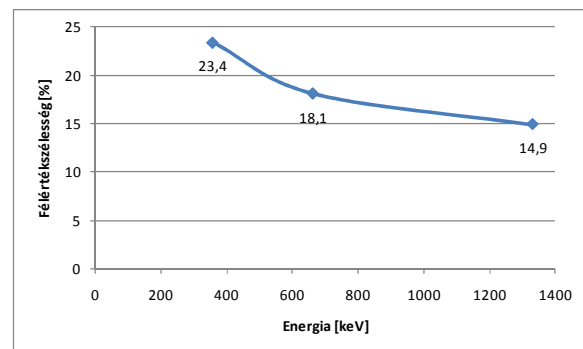
9. ábra. ^{133}Ba spektrum második deriváltja



10. ábra. ^{137}Cs spektrum második deriváltja



11. ábra. ^{60}Co spektrum második deriváltja



12. ábra. A félértékszélesség energiafüggése

A csúcsok félértékszélessége jellemző a detektálási folyamatok révén kialakuló vonalszélesedésre. A grafikonon kiírt félértékszélesség a maximális nettó beütésszám felét képező beütésszámok között mérhető távolság, a csúscentrumra vonatkoztatott relatív számként kifejezve. Gauss-csúcsalakot feltételezve a félértékszélesség pontjai kb. 1,18-szor távolabb vannak a centrumtól, mint a 9.-11. ábrákon látható második deriváltak zérushelyei által is jelzett szórás pontjai. A 12. ábrán látható, hogy a PIN diódás eszköz prototípusával kapott félértékszélesség energiafüggése hasonló az irodalomban publikált detektorokéhoz. Sajnos ezek az értékek, az irodalomban ismertetett detektorok félértékszélességénél valamivel nagyobbak, azonban véleményünk szerint további konstrukciós megoldásokkal, illetve a kristály és a dióda jobb fényillesztésével ez tovább javítható. Erre a továbbfejlesztésre szükség van a mennyiségi kiértékelés bizonytalanságának csökkentésére.

ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben felvázoltunk egy terepi körülmények között is használható, energiaszelektív detektorrendszert. Az eszköz várhatóan 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 a megvalósított detektorrendszert összekapcsolnánk egy kompakt, kisméretű többcsatornás analizátorral (digitális jelfeldolgozóval), kijelzővel látnánk el, és mindez a terepi körülményekhez igazodó külső borítást kapna, létre jönne egy olyan eszköz, amely robusztusságát és energiaszelektivitását tekintve felveszi a versenyt a jelenleg használatos terepi eszközökkel.

IRODALOM

- [1] [1] Nagy Lajos György – Nagyné László Krisztina: Radiokémia és izotóptechnika, Műegyetemi Kiadó, 1997
- [2] [2] http://ric.uthscsa.edu/personalpages/lancaster/DI2_Projects_2003/Photodiode_vs_PMT.pdf, letöltés dátuma: 2010.08.08
- [3] [3] Szentiday Klára: Félvezető fotódetektorok, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977
- [4] [4] John Valentin, Valentin Jordanov, David Wehe, Glen Knoll: Charge calibration of CsI(Tl)/photodiode spectroscopy systems, 1992, Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section A, Vol A314, pp. 119-124
- [5] [5] Helmuth Spieler: Semiconductor Detector Systems, Oxford University Press, Oxford, 2005, ISBN 0-19-852784-5
- [6] [6] C. D. Motchenbacher, F. C. Fitchen: Kis-zajú elektronikus áramkörök tervezése, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977
- [7] [7] Savitzky A., Golay M.J.E: Smoothing and differentiation of data by simplified least square procedures, 1964, Analytical Chemistry, vol. 36, pp. 1627-1639

A közlemény a SOMOS Alapítvány támogatásával készült