

# ZAAWANSOWANE TECHNOLOGIE DETEKCJI PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO W URZĄDZENIACH PRZENOŚNYCH

## *Advanced technologies of ionizing radiation detection in portable devices*

Andrzej Nowicki

**Streszczenie:** Zasygnalizowano aktualne tendencje w konstrukcji przenośnych urządzeń do pomiaru promieniowania jonizującego pozwalające na miniaturyzację detektorów przy równoczesnym zwiększeniu ich możliwości pomiarowych. Przedstawiono kilka rozwiązań technicznych, w tym radiometru MKS-11GN SPECTRA ze względu na internetowe wzmianki o jego stosowaniu w Polsce.

**Abstract:** The current tendencies in the construction of portable counters for measuring ionizing radiation including miniaturization of detectors while increasing their measuring capabilities have been indicated. A number of technical solutions were presented, including the MKS-11GN SPECTRA radiometer due to its probably use in Poland.

**Słowa kluczowe:** detekcja promieniowania gamma, detekcja neutronów, scyntylatory, diody PiN, SiPM

**Keywords:** gamma and neutron radiation detection, scintillators, PiN diodes, SiPM

Współczesny świat niesie dla nas wiele zagrożeń związanych zarówno z postępem technicznym, rozwojem diagnostyki i metod leczenia w medycynie, jak i z działaniami łamiącymi prawo, takimi jak przemyt, zorganizowana przestępczość, a także zagrożenie terrorystyczne i lokalne konflikty zbrojne. Wśród tych niebezpieczeństw szczególną uwagę zwraca się na zagrożenia ogólnie określane mianem zagrożenia radiacyjnego, od nieuprawnionego użycia materiałów promieniotwórczych po zagrożenia związane z zapobieganiem rozprzestrzenianiu się jądrowych broni masowego rażenia. W Polsce od strony prawnej przepisy regulujące produkcję i wykorzystanie energii atomowej oraz bezpieczeństwo jądrowe i ochronę radiologiczną zawarte są w ustawie – Prawo atomowe [1] i wydanymi do niego rozporządzeniami właściwych organów administracji państwowej [2]. Działania kontrolne i profilaktyczne w zakresie problematyki objętej tymi aktami wymagają stosowania różnego typu urządzeń sygnalizujących obecność, typ i natężenie promieniowania jonizującego.

Najpopularniejszym, produkowanym i stosowanym w milionach egzemplarzy, ze względu na swoją prostotę budowy i aplikacji, detektorem do sygnalizacji i pomiarów promieniowania jonizującego jest licznik gazowy nazywany licznikiem, lampą, rurką bądź tubą

Geigera-Müllera (G-M), początkowo skonstruowany do detekcji promieniowania  $\alpha$  [3], później zmodyfikowany, aby wykrywał również promieniowanie  $\beta$  i  $\gamma$  [4]. Ma on pewne wady, przy czym największe to konieczność zasilania prądem o napięciu kilkuset V oraz brak zdolności identyfikacji energii wykrywanego kwantu bądź cząstki promieniowania jonizującego.

Energię kwantu bądź cząstki o dużej energii można wyznaczyć między innymi przy zastosowaniu gazowych liczników proporcjonalnych, scyntylatorów czy detektorów CdZnTe<sub>2</sub>. Scyntylatory są następcami spintaryskopu, najprostszego, obok galwanoskopu, przyrządu do detekcji promieniowania jonizującego. Scyntylatory mogą być ciałami stałymi (kryształy soli nieorganicznych czyste bądź domieszkowane, związki organiczne, odpowiednio domieszkowane polimery) lub roztworami; bardzo rzadko stosuje się gazy (Tabela 1). Scyntylator zamienia energię absorbowanego promieniowania jonizującego na sygnał w postaci krótkiego błysku światła ( $\sim$ ns do  $\sim$  $\mu$ s) w zakresie widzialnym lub zbliżonym do widzialnego, o amplitudzie (intensywności) proporcjonalnej w szerokim zakresie energii do energii kwantu bądź cząstki promieniowania jonizującego. Niestety, sygnał jest tak słaby, że wymaga wzmocnienia o wiele rzędów wielkości, aby mógł być poddany obróbce i zliczaniu w typowych

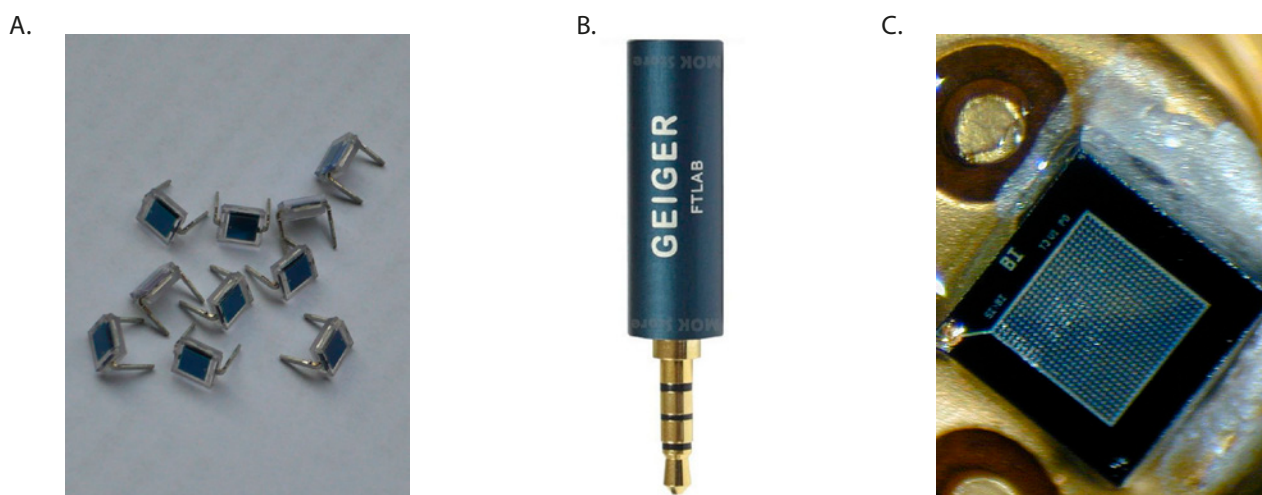
układach elektronicznych. Do niedawna jedynym sposobem wzmocnienia było stosowanie fotopowielaczy, lamp próżniowych o wieloelektrodowej konstrukcji. Fotopowielacz, nie dość, że wymaga zasilania prądem o napięciu ponad 1 kV, to jeszcze jest wrażliwy na pola magnetyczne i nieostrożne obchodzenie się z nim, czego w spektakularny sposób dowiodła awaria detektora neutron Super-Kamiokande w Japonii w 2001 r., gdy w ciągu niewielu sekund nastąpiła implozja ponad 7 tys. klasycznych fotopowielaczy.

Postęp w dziedzinie budowy elementów półprzewodnikowych w ostatnich latach pozwolił jednak na zastąpienie fotopowielaczy specyficznymi, czułymi na światło diodami krzemowymi PiN (silicon P- intrinsic-N diode) lub zbliżonymi do nich strukturą, znacznie lepszymi pod względem parametrów fotopowielaczami krzemowymi SiPM (Silicon PhotoMultiplier), sprzężonymi optycznie ze scyntylatorami. Co więcej, sama dioda PiN jest również detektorem promieniowania jonizującego [5] i może być samoistnie użyta do jego wykrycia z możliwością określenia jego energii [6]. Przy jej użyciu zbudowano robiący furorę gadżet o nazwie SmartGeiger, który z rurką G-M nie ma nic wspólnego, składa się z fotodiody PiN jako detektora, prostego układu elektronicznego i wtyku słuchawkowego do połączenia z telefonem typu SmartPhone. Odpowiednia aplikacja dostępna jest, zwykle bezpłatnie, na stronie producenta telefonu. Co najdziwniejsze, przy czasie pomiaru ok. 5 minut zestaw telefon + czujnik pozwala zmierzyć równoważnik mocy dawki promieniowania  $\gamma$  w zakresie 0,1 – 200  $\mu\text{Sv/h}$  z błędem rzędu  $\pm 30\%$ , choć czasami pokazuje „dziwne” wyniki.

Na zagranicznych portalach aukcyjnych można spotkać wiele takich przyrządów o podobnym przeznaczeniu. Jako przystawki do telefonu oferowane są typowe rurki G-M (typ SBM-20) pod nazwą **AtomSimple**, bądź

też pod prawie identyczną nazwą i w identycznej obudowie (120 mm x 20 mm x 13 mm) dostępny jest w pełni profesjonalny detektor **AtomFast** wyposażony w scyntylator CsI(Tl) + SiPM. Wybór tego drogiego scyntylatora podyktowany jest jego emisją w zielonym zakresie światła widzialnego, co odpowiada zakresowi wysokiej czułości fotodetektora. Rozmiary scyntylatora 8 mm x 8 mm x 50 mm zapewniają czułość 130 impulsów $\cdot\text{h}\cdot\mu\text{Sv}^{-1}$  i szeroki zakres rejestracji równoważnika mocy dawki promieniowania jonizującego 0,01  $\mu\text{Sv/h}$  – 100  $\mu\text{Sv/h}$  z błędem  $\pm 15\%$ , przy anizotropii detekcji (ze względu na kształt scyntylatora) promieniowania izotopu  $^{137}\text{Cs}$  wynoszącej do 30%. Detektor wykrywa również promieniowanie  $\beta$  o energii powyżej 0,5 MeV. Z telefonem łączy się via Bluetooth® na odległość do 15 m.

Od takiego zestawu – telefon + detektor (sam detektor to „tylko” 420 US\$ + cło + VAT) niewiele już brakuje do w pełni profesjonalnego przenośnego radiometru o możliwościach rozbudowanej aparatury laboratoryjnej. Przyrządy takie zostały opisane w normie ANSI N42.48 D4 jako grupa SPRD – Spectroscopic Personal Radiation Detectors, stosowane są głównie w obszarze bezpieczeństwa państwowego, a więc w zapobieganiu nielegalnemu obrotowi materiałami radioaktywnymi i jądrowymi, w kontroli obszarów granicznych, do inspekcji składowisk odpadów radioaktywnych oraz inspekcji radioaktywnych skażeń środowiska. Urządzenia tej grupy służą do wykrywania radionuklidów, w tym materiałów jądrowych – rozszczepialnych. Podstawowym wymaganie względem tych przyrządów jest możliwość identyfikacji radionuklidów z obowiązkowej i opcjonalnej listy, podzielonych umownie na 4 grupy według występowania lub stosowania. Bardzo pożądaną cechą jest detekcja promieniowania neutronowego emitowanego zawsze w minimalnych ilościach przez



**Fot. 1.** A – Fotodiody PiN BPW34 [7], powierzchnia światłoczuła 7,5 mm<sup>2</sup>, odstęp między wyprowadzeniami 5 mm; B – Smart Geiger [8], wymiary: średnica 10 mm, długość bez/z wtykiem 30/47 mm; C – struktura SiPM [9]

**Photo 1.** A – Type BPW34 PiN photodiodes [7], photo sensitive area (in mm<sup>2</sup>): 7.5, distance between connectors is 5 mm; B – Smart Geiger [8], dimensions: diameter 10 mm, 30/47 mm long; C – structure of SiPM array [9]

izotopy rozszczepialne. Przykładem może być przyrząd **MKS-11GN Spectra** [10], z dwóch powodów:

- znacząco różni się możliwościami pomiarowymi od typowych dozymetrów wykorzystujących rurki G-M (za 60 US\$), choć z daleka wyglądają one podobnie,
- w Internecie są notki, że te radiometry trafiły do Polski, m.in. na potrzeby służb celnych do wykrywania jądrowej kontrabandy<sup>1</sup>.

Radiometr **MKS-11GN Spectra** zawiera aż 3 detektory:

- scyntylator CsI(Tl) z fotodetektorem SiPM do wyznaczenia przestrzennego równoważnika mocy dawki  $H^*(10)$  promieniowania  $\gamma$  w zakresie od 0,01  $\mu\text{Sv/h}$  do 100  $\mu\text{Sv/h}$ . Ze względu na czułość detekcji wynoszącą ponad 200 cps przy równoważniku mocy dawki promieniowania  $\gamma$  od izotopu  $^{137}\text{Cs}$  równym 1 mSv/h wymiary scyntylatora można szacować na 10 mm x 10 mm x 50 mm. Amplituda sygnału z tego detektora w szerokim zakresie energii promieniowania  $\gamma$  jest do niej proporcjonalna, co dzięki zastosowaniu 2048-kanalowego analizatora pozwala wyznaczać widmo promieniowania, a na jego podstawie wykrywać radionuklidy. Prawdopodobny wygląd scyntylatora można zobaczyć na zagranicznym portalu aukcyjnym [11];
- małogabarytową rurkę G-M do pomiarów równoważnika mocy dawki promieniowania  $\gamma$  powyżej 100  $\mu\text{Sv/h}$  aż do 1 Sv/h; w tym zakresie wyłączeniu ulegają: pomiar scyntylatorem CsI(Tl), zliczanie impulsów (cps) i zaawansowane funkcje radiometru, jak analiza widma energetycznego promieniowania  $\gamma$  oraz identyfikacja izotopów;
- scyntylator  $^6\text{LiI}(\text{Eu})$  z fotodetektorem SiPM do detekcji równoważnika mocy dawki promieniowania neutronowego w zakresie od 0,01  $\mu\text{Sv/h}$  do 10 mSv/h. Bardzo ciekawe problemy związane z pomiarem promieniowania neutronowego przy pomocy radiometru **MKS-11GN Spectra** zostaną omówione dalej;

przy czym wszystkie te detektory, razem z mikroprocesorem, pamięcią, systemem lokalizacji satelitarnej GPS/GLONASS, akumulatorem litowym, systemem kompensacji temperaturowej, interfejsem komputerowym i kolorowym wyświetlaczem LCD wysokiej rozdzielczości mieszczą się w bryzgoodpornej (klasa IP67) obudowie o wymiarach 127 mm x 67 mm i grubości 30 mm, o masie (bez sprężystego klipsa) tylko 280 g (fot. 2).

Radiometr zabezpieczony jest przed nieuprawnionym użyciem za pomocą haseł Użytkownika i Administratora.

Podstawowe tryby pracy dozymetru, to:

- pomiar równoważnika mocy dawki promieniowania  $\gamma$  i neutronowego, w oddzielnych kanałach (fot. 2. A) z wyświetlaniem wartości w  $\mu\text{Sv/h}$  i cps oraz wyświetlaniem histogramu dawki w funkcji czasu

<sup>1</sup> Kontrabanda ma się dobrze, o czym świadczy zniknięcie niektórych tematów z forów internetowych.



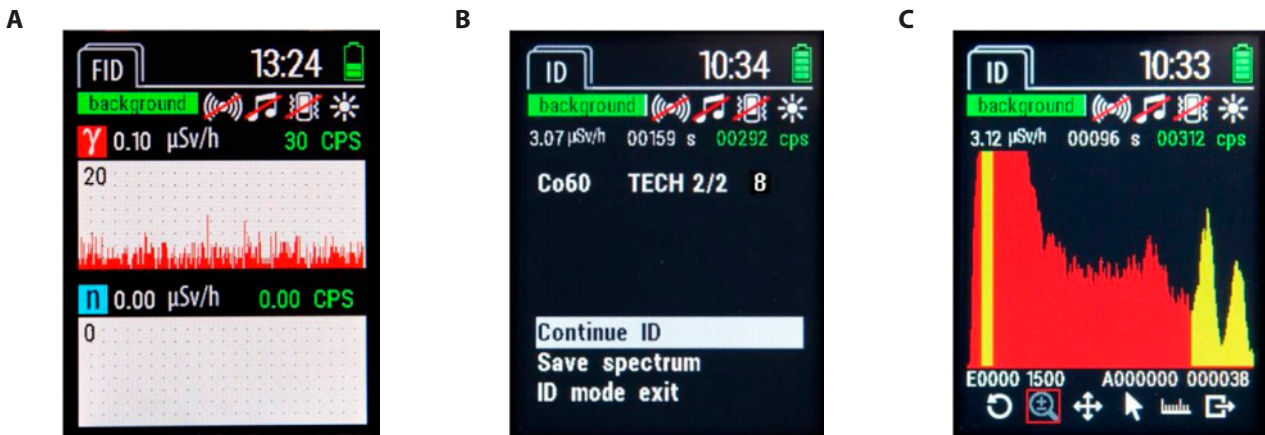
**Fot. 2.** A – widok z przodu, B – z boku i C – z tyłu radiometru MKS-11GN Spectra. Znaki „+” z tyłu obudowy odpowiadają geometrycznemu środkowi poszczególnych detektorów

**Photo 2.** A – front view, B – side view and C – view on the back of the Spectra MKS-11GN radiometer. The “+” signs on the back of the case correspond to the geometrical center of the individual detectors type

(280 wartości zmierzonych w 100-ms odcinkach czasu, fot. 3. A). Przed rozpoczęciem pomiarów radiometr samoczynnie kalibruje się na aktualny poziom promieniowania tła, znacząca statystycznie odchyłka od wyznaczonego w trakcie kalibracji poziomu tła skutkuje alarmem (jednym z kilku nastawianych);

- identyfikacja radionuklidów na podstawie ich widm  $\gamma$  (fot. 3. B) oraz przeglądanie widm i ich analiza (fot. 3. C). Radiometr identyfikuje automatycznie 32 izotopy podzielone umownie na 4 grupy: medyczne, stosowane przemysłowo, materiały jądrowe ( $^{239}\text{Pu}$  wykrywany jest tylko w postaci materiału zawierającego ponad 6%  $^{240}\text{Pu}$ , militarny  $^{239}\text{Pu}$  nie jest wykrywany) oraz radionuklidy występujące w przyrodzie. Bazę widm można rozszerzyć do 128 izotopów za pomocą dodatkowego oprogramowania.

Należy zwrócić uwagę, że dzięki analizie widma energetycznego promieniowania  $\gamma$  pomiar przestrzennego równoważnika mocy dawki  $H^*(10)$  jest wyjątkowo



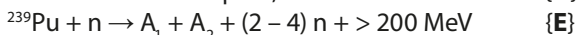
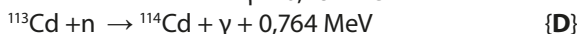
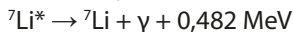
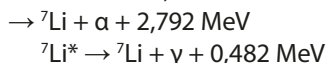
**Rys. 1.** Widok ekranu dozymetru w trybie: A - wyświetlania histogramu równoważnika mocy dawki za ostatnie 28 s; B - identyfikacja znalezionych radionuklidów; C - analiza zapisanego widma

**Fig. 1.** View of the dosimeter's screen in mode: A - display of dose equivalent rate histogram for the last 28 s; B - identification of found radionuclide; C - analysis of the recorded spectrum

precyzyjny. Przeglądając w Internecie fotografie radiometru z przykładowymi, różnymi wartościami  $H^*(10)$  można zauważyć, że zależność pomiędzy zliczeniami (cps) i  $H^*(10)$  nie jest proporcjonalna, a wynika z algorytmu oprogramowania radiometru.

Pełne możliwości radiometru wymagają zapoznania się z instrukcją [10], natomiast trochę więcej uwagi zostanie poświęcone detekcji promieniowania neutronowego przez radiometr. Jest to rzadko spotykana funkcja w radiometrach przenośnych<sup>2</sup>, jej implementacja wymaga rozwiązania wielu problemów, a interpretacja otrzymywanych odczytów – sporego doświadczenia. Trudno w tym miejscu nie wspomnieć o doniesieniu Fleischmana, Ponsa i Hawkinsa [13] z roku 1989 o anomalii energetycznych podczas elektrolizy  $D_2O$ . Informacja trzech uczonych spowodowała istny potop pomiarów neutronowych, w tym wykonywanych przez laików w tym temacie, co skutkowało wręcz humorystycznymi zdarzeniami [14]. Poniższe informacje przedstawiają najbardziej podstawowe fakty na temat detekcji neutronów, zwłaszcza, że w instrukcji obsługi radiometru **MKS-11GN Spectra** można zauważyć znaczące przemilczenia.

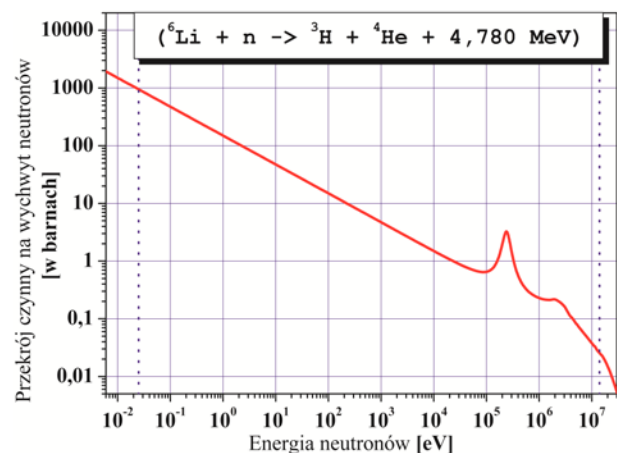
W przeciwieństwie do detekcji promieniowania  $\gamma$  lub strumienia naładowanych cząstek, które oddziałują z elektronami atomów detektora, detekcja neutronów polega na wykryciu wysokoenergetycznych produktów ich reakcji z jądrami atomów detektora, jak w poniższych przykładach:



<sup>2</sup> Prymitywne rozwiązania typu owijania rurki G-M blachą kadmową nie zasługują na wzmiankę, bo nie odróżniają promieniowania  $\gamma$  i neutronowego.

W opisywanym radiometrze wykorzystano reakcję  $\{\text{B}\}$  stosując scyntylicator  ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$  – Tabela 1.

Rys. 2. przedstawia zależność przekroju czynnego jądra  ${}^6\text{Li}$  na wychwyty neutronów w funkcji ich energii.



**Rys. 2.** Przekrój czynny jądra  ${}^6\text{Li}$  na wychwyty neutronu w funkcji jego energii [15]; pionowe linie wskazują zakres detekcji neutronów przez radiometr

**Fig. 2.** The cross-section of  ${}^6\text{Li}$  nucleus on neutron capture as a function of its energy [15]; vertical blue lines are limits of neutrons detection by radiometer

W zaznaczonym na wykresie zakresie pomiarowym radiometru zmienia się on  $>10^4$  razy, natomiast instrukcja podaje dla tego zakresu tylko 10-krotną zmianę czułości radiometru w ilości impulsów przy detekcji strumienia neutronów na  $1 \text{ cm}^2$  w funkcji ich energii. Tu pierwsza, **bardzo ważna** uwaga: scyntylicator  ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$  (dotyczy to również pozostałych wyżej wymienionych reakcji jądrowych) **nie mierzy** energii neutronów, rejestruje tylko, czy reakcja miała miejsce i wysłała impuls światła o amplitudzie proporcjonalnej do **energii produktów reakcji jądrowej**. Sygnał ten ma typowy rozkład Gaussa o szerokości połówkowej  $< 7\%$ . Przykład sygnału ze scyntylicatora  ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ , w tym również przy zastosowaniu fotodiody  $\text{PiN}$ , w mieszanym polu promieniowania  $\gamma$  od  ${}^{60}\text{Co}$  i  ${}^{137}\text{Cs}$  ra-

zem ze strumieniem neutronów termicznych, zaprezentowano w [16]. Pomiędzy zakresem rejestracji **energii kwantów**  $\gamma$ , a zakresem rejestracji **energii produktów reakcji jądrowej** neutronów z jądrami  ${}^6\text{Li}$ , występuje przerwa energetyczna  $> 1,5$  MeV. Wystarczy więc prosty jednokanałowy selektor amplitudy i dyskryminator szumów, aby otrzymać doskonałą separację i ograniczyć wpływ promieniowania  $\gamma$  na detekcję neutronów. W omawianym radiometrze w polu promieniowania  $\gamma$   ${}^{137}\text{Cs}$  i  ${}^{60}\text{Co}$  o równoważniku mocy dawki do  $100 \mu\text{Sv/h}$  nie występują błędne wskazania obecności promieniowania neutronowego. Ponieważ minimalne wskazanie promieniowania neutronów odpowiada  $0,01 \mu\text{Sv/h}$ , oznacza to wysoką selektywność  $\geq 10^4$ , porównywalną z profesjonalnymi laboratoryjnymi sondami neutronów [17]. Jest tylko jeden problem – takich parametrów nie da się uzyskać bez moderacji energii wykrywanych neutronów, gdyż już dla neutronów o energii wyższej niż  $10$  keV ilość wykrywanych neutronów spadłaby do wartości  $0,1\%$  w stosunku do ilości wykrywanych neutronów termicznych ( $0,0253$  eV,  $T=293\text{K}$ ,  $v=2200$  m/s) dla identycznego strumienia neutronów w  $\text{cm}^{-2}$ . Efektywne „schłodzenie” neutronów szybkich ( $10^5$  eV -  $10^7$  eV) wymaga warstwy moderatora o wysokiej zdolności spowalniania (np. parafina, HDPE, z możliwym dodatkiem kilku procent grafitu) o grubości ok.  $13$  cm. Taki moderator w postaci dookolnej w żaden sposób nie zmieściłby się w radiometrze, dlatego zastosowano cienki moderator

polimerowy, przy czym funkcję moderatora pełni również obudowa radiometru. W tym miejscu powstaje pytanie: skoro scyntylator  ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$  mierzy także energię promieniowania  $\gamma$ , dlaczego w radiometrze zastosowano dwa scyntylatory? Wynika to z faktu, że do wychwytu  $> 90\%$  neutronów termicznych wystarczy scyntylator  ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$  o grubości  $\sim 3$  mm, dlatego rozmiary scyntylatora w radiometrze można szacować na  $\Phi = \sim 4$  mm, długość  $\sim 6$  mm. Taki scyntylator ma niską wydajność detekcji promieniowania  $\gamma$ , zwłaszcza w jego wysokoenergetycznej części, a jego powiększenie byłoby absurdem technicznym i ekonomicznym.

I na koniec najważniejsza sprawa: jak skalibrowano radiometr?

- przy kalibracji na neutrony szybkie radiometr wskazywałby strumień neutronów termicznych z błędem ponad  $+1000\%$ , co nie stanowi zagrożenia dla użytkownika,
- przy kalibracji na neutrony termiczne radiometr zaniżałby strumień neutronów szybkich nawet do dziesięciu razy, co stanowiłoby skrajne zagrożenie dla użytkownika w sytuacjach ekstremalnych.

Dlatego radiometr kalibrowany jest na niemodulowane źródło  ${}^{239}\text{Pu}/\text{Be}$  (przeliczenie w cps na  $\mu\text{S}/\text{h}$ ). Oznacza to błąd ok.  $\pm 25\%$  przy pomiarze równoważnika mocy dawki strumienia neutronów z takich źródeł, jak  ${}^{241}\text{Am}/\text{Be}$ ,  ${}^{226}\text{Ra}/\text{Be}$  czy  ${}^{252}\text{Cf}$  oraz niewielką przydatność radiometru do pomiarów neutronów reaktoro-

**Tabela. Właściwości najpopularniejszych scyntylatorów.**  
**Table. Properties of most used scintillators.**

Rodzaj scyntylatora	NaI(Tl)	CsI	CsI(Na)	CsI(Tl)	ZnS(Ag)	Scyntylatory polimerowe	${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$
Detekcja promieniowania	$\gamma, X, (\beta)$	$\gamma, X, (\beta)$	$\gamma, X, (\beta)$	$\gamma, X, (\beta)$	$\alpha$	$\beta, \gamma, X$	<b>neutrony</b> $\gamma, (\beta)$
Gęstość, $\text{g}/\text{cm}^3$	3,67	4,51	4,51	4,51	4,09	1,03	4,10
Współczynnik załamania światła	1,85	1,95	1,86	1,84	-	1,57	1,96
Maksimum emisji przy długości fali, nm	410 - 415	310	420	565	450	350 - 480 (580)	440
Wydajność emisji (jednostki arbitralne, antracen = 100)	240	500 at 77 K	244	375		45 - 65	70
Wydajność emisji, fotonów/keV	55	2	41	54		7,2 - 10,5	11
Amplituda impulsu światła, (jednostki arbitralne) *	100	5	85 (110)	46	130	15 - 20	30 - 35
Uwagi	higrosko-pijny	słabo higrosko-pijny		słabo higrosko-pijny	jako warstwa na folii	niehigrosko-pijny, b. szybkie narastanie/zanik impulsu światła	Min. 96% ${}^6\text{Li}$

\* detekcja fotopowielaczem

wych, poza stwierdzeniem, że są obecne. Nie powinno to dziwić, gdyż profesjonalne sondy neutronowe do pomiarów naukowych mają masę po kilkanaście kilogramów i kalibrowane są oddzielnie na każdy rodzaj źródła neutronów. Pomiary strumienia neutronów mają więc charakter detekcyjny, a nie ilościowy, ale najważniejszą zaletą jest jednoznaczna identyfikacja strumienia neutronów. Ponieważ nie występuje on jako sygnał tła, każde, najmniejsze nawet wskazanie w kanale detekcji neutronów jest sygnałem alarmowym i wymaga dokładnego sprawdzenia.

Nie można w tym miejscu pominąć ważnej kwestii. Poszukując źródeł neutronów skrajnym błędem byłoby trzymanie radiometru w wyciągniętej ręce przed sobą. Ponieważ ciało człowieka zawiera ponad 60% wody oraz sporo węgla, stanowi ono doskonały naturalny moderator. Należy zatem wsunąć radiometr za pasek spodni z tyłu, a do sygnałów alarmowych używać słuchawki.

### Podsumowanie

Prezentowane w tekście rozwiązania techniczne w zakresie detekcji promieniowania jonizującego, w tym neutronowego, umożliwiają budowę przenośnych przyrządów radiometrycznych o niespotykanych wcześniej możliwościach pomiarowych, w wielu wariantach i rozwiązaniach koncepcyjnych. Przykładem takiego radiometru w najbardziej rozbudowanej wersji jest przyrząd **MKS-11GN Spectra**. Pamiętać jednak należy, że żaden przyrząd nie jest mądrzejszy od jego użytkownika. Z tego powodu Autor tekstu widziałby takie radiometry np. w Zakładzie Unieszkodliwiania Odpadów Jądrowych, choćby ze względu na zakres prowadzonych w tej jednostce prac oraz doświadczenie personelu gwarantujące pełne wykorzystanie jego możliwości. Z powodu zaawansowanych rozwiązań technicznych urządzenia takie nie mogą być tanie [18,19].

### Podziękowanie

Autor dziękuje firmie EcoTest® (Ukraina) za udostępnienie materiału ilustracyjnego i konsultacje szczegółów technicznych konstrukcji radiometru.

Andrzej Nowicki,  
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,  
Warszawa

### Literatura:

[1] Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. - Prawo atomowe, Dz. U. 2001 Nr 3 poz. 18 z późn. zm., tekst jednolity Dz. U. (tekst jednolity - Dz. U. z 2019 r. poz. 1792 oraz z 2020 r. poz. 284, poz. 322)

- [2] Przykładowo Rozporządzenia Rady Ministrów: wymagania dla sprzętu dozymetrycznego (Dz. U. z 2002 r. poz. 2032), stacje kontroli i ostrzegania dozymetrycznego (Dz.U. z 2002 r. poz. 2030). Rozporządzenia te, w związku z nowelizacją z dnia 13 czerwca 2019 r. Ustawy [1], (Dz. U. 2019, poz. 1593), powinny zostać zaktualizowane, przykładem jest Rozporządzenie Ministra Zdrowia o zagrożeniu radonem z dnia 18 czerwca 2020 r. (Dz. U. z 2020 r. poz. 1139).
- [3] E. Rutherford and H. Geiger: *An Electrical Method of Counting the Number of  $\alpha$ -Particles from Radio-Active Substances*. Proc. R. Soc. Lond. A, 81(546), 141-161, 1908. DOI: 10.1098/rspa.1908.0065.
- [4] H. Geiger and W. Müller: *Elektronenzählrohr zur Messung schwächster Aktivitäten*. Naturwissenschaften, 16(31), 617-618, 1928. DOI: 10.1007/BF01494093.
- [5] L. Andreani, M. Bontempi, P.L. Rossi, L.P. Rignanese, M. Zuffa and G. Baldazzi: *Comparison between a silicon PIN diode and a CsI(Tl) coupled to a silicon PIN diode for dosimetric purpose in radiology*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 762, 11-15, 2014. DOI: 10.1016/j.nima.2014.05.072.
- [6] Ch. N.P. Oliveira, S.H.J. Khoury and J.P. Edval: *PiN photodiode performance comparison for dosimetry in radiology applications*. Physica Medica, 32(12), 1495-1501, 2016. DOI: 10.1016/j.ejmp.2016.10.018.
- [7] Zbiory własne Autora, karta katalogowa: <https://www.vishay.com/docs/81521/bpw34.pdf>
- [8] Materiały reklamowe firmy Smart FTLab, <http://allsmarftlab.com/eng/smart-geiger/>, test na polskim blogu: <http://promieniowanie.blogspot.com/2017/08/smart-geiger-dozymetr-w-telefonie.html>
- [9] [https://en.wikipedia.org/wiki/Silicon\\_photomultiplier](https://en.wikipedia.org/wiki/Silicon_photomultiplier)
- [10] <https://ecotestgroup.com/wp-content/uploads/2016/10/MKS-11GN-SPECTRA-Manual.pdf>, producent: EcoTest®, 33 V.Velykoho Str., Lviv, 79026, Ukraine
- [11] [https://www.ebay.com/usr/maxim.madmax?\\_trksid=p2047675.l2559](https://www.ebay.com/usr/maxim.madmax?_trksid=p2047675.l2559)
- [12] *Geiger Counter Nuclear Radiation Detector Tester Beta Gamma X-ray Dosimeter Tool* – do wpisania w wyszukiwarkę na zagranicznych portalach aukcyjnych.
- [13] M. Fleischmann, B.S. Pons and M. Hawkins: *Electrochemically induced nuclear fusion of deuterium*. J. Electroanal. Chem., 261(2), 301-308, 1989. DOI/10.1016/0022-0728(89)80006-3
- [14] Z.P. Zagórski: *Zimna fuzja deuteru czyli nieustająca rewitalizacja błędnej idei*, Wiad.Chem. 61(11-12), 963-984, 2007.
- [15] Wykres Autora na podstawie danych: <http://www.oecd-nea.org/janisweb/>
- [16] <https://scionix.nl/wp-content/uploads/2017/07/LiLEu-thermal-neutron-detectors.pdf>
- [17] <https://www.berthold.com/en/neutron-probe-lb-6411>
- [18] Przyrząd pojawia się sporadycznie na największym światowym portalu aukcyjnym.
- [19] Pod koniec 2017 r. NCBJ zawarło umowę na dostawę dwóch ręcznych radiometrów Kromek RayMon10 w cenie po 16.000 US\$ (+ cło i podatek VAT) za sztukę.