

Analiza właściwości elektrycznych urządzeń tandemowych na bazie krzemowych ogniw słonecznych i scyntylatorów nieorganicznych

Streszczenie. Celem artykułu było wytworzenie wstępnej wersji urządzenia tandemowego (detektora promieniowania jonizującego) na bazie krzemowych ogniw słonecznych i scyntylatorów nieorganicznych oraz określenie jego wybranych parametrów elektrycznych, takich jak wartość napięcia obwodu otwartego, natężenie prądu zwarcia oraz oporu całkowitego. Kluczowym było określenie wpływu różnicy dopasowania powierzchni scyntylatora w stosunku do powierzchni panelu fotowoltaicznego i analiza zacielenia części ogniw na charakterystyki prądowo-napięciowe panelu.

Abstract. The article aimed to create an initial version of a tandem device (ionizing radiation detector) based on silicon solar cells and inorganic scintillators and to determine its selected electrical parameters, such as the open circuit voltage, short-circuit current and total resistance. The key was to determine the impact of the difference in the fit of the scintillator surface in relation to the surface of the photovoltaic panel and to analyze the shading of some cells on the current-voltage characteristics of the panel. (**Analysis of the electrical properties of tandem devices based on silicon solar cells and inorganic scintillators**).

Słowa kluczowe: urządzenia tandemowe, ogniwa słoneczne, scyntylatory, bezpieczeństwo energetyczne

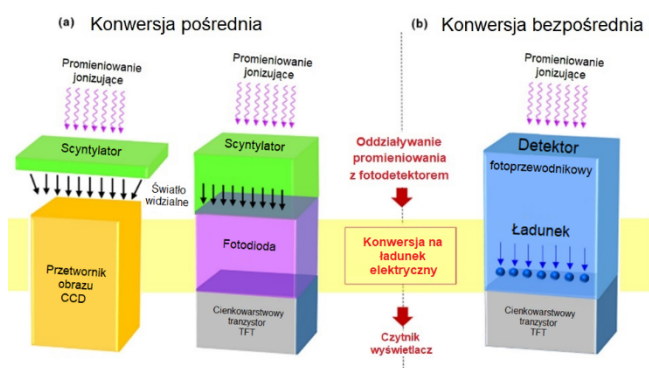
Keywords: tandem devices, solar cells, scintillators, energy security

Wstęp

Detekcja i/lub pomiar online oraz in-situ promieniowania jonizującego wymaga użycia specjalistycznych urządzeń, które muszą być zasilane elektrycznie. Stosowane obecnie pasywne detektory promieniowania jonizującego nie wymagają wprowadzenia bezpośredniego zasilania, lecz uzyskanie informacji o zaabsorbowanej dawce wymaga specjalnego czynnika, który musi być zasilany elektrycznie. Kolejną wadą takiego rozwiązania jest możliwość odczytu dopiero poza miejscem przebywania i po pewnym czasie. Zastosowanie tandemowych urządzeń na bazie krzemowych ogniw słonecznych i scyntylatorów pozwala na wygenerowanie napięcia elektrycznego proporcjonalnego do dawki promieniowania w miejscu i czasie, w którym dokonywany jest pomiar. W proponowanym rozwiązaniu zakłada się, iż panel fotowoltaiczny ma pracować jako źródło zasilania oraz jako detektor promieniowania jonizującego. Rodzaj rejestrowanego przez detektor promieniowania jonizującego determinuje użyty scyntylator.

Główną zasadę działania tandemowych urządzeń detekcyjnych przedstawiono na rys. 1. Dotychczas stosowane rozwiązania technologiczne bazują na dwóch typach konwersji promieniowania jonizującego na mierzalny sygnał elektryczny. W przypadku konwersji pośredniej w objętości scyntylatora następuje zamiana energii promieniowania w fotony światła (scyntyłacje), które bądź to pośrednio, bądź bezpośrednio zamieniane są na ładunek (sygnał) elektryczny i przekazywany na czynniki lub wyświetlacze. W przypadku konwersji pośredniej fotony światła zamieniane są w przetworniku CCD na sygnał elektryczny. Innym wariantem konstrukcyjnym może być zastosowanie fotodiody generującej impulsy elektryczne - wzmacniane następnie w tranzystorze cienkowarstwowym i przekształcane na sygnał elektryczny. Sygnał elektryczny wizualizowany jest w czynniku pośrednim (rejestratorze).

Konwersja bezpośrednia do detekcji promieniowania wykorzystuje zjawisko fotoprzewodnictwa, czyli zwiększenia przewodnictwa materiału w odpowiedzi na padające na niego promieniowanie jonizujące. Fotodetektory są bardzo czułe na promieniowanie i charakteryzują się wysoką rozdzielczością energetyczną, co pozwala na dokładne określenie energii cząstek jonizujących.



Rys. 1. Detektory rentgenowskie z odczytem pośrednim i bezpośrednim, gdzie: CCD (Charge-Coupled-Device – wzmacniacz przetwornikowy); TFT (Thin-Film-Transistor - tranzystor cienkowarstwowo)

Najnowsze doniesienia literaturowe wskazują na zainteresowanie perowskitami jako potencjalnymi materiałami zarówno dla ogniw słonecznych jak i scyntylatorów.

Sangsu i współautorzy [1] przeprowadzili badania nad zastosowaniem perowskitowych ogniw słonecznych ołowiowych (POS - MAPbI₃) jako dozymetry do celów kosmicznych i medycznych. Urządzenia POS wykazywały początkową sprawność na poziomie PCE ~ 14%. Zaobserwowano jednak zwiększoną fluktuację przepływu ładunku (elektronów) w zakresie dawek od 3 do 21 kGy. Zjawisko to powoduje stopniową degradację ogniw POS, charakteryzującą się spadkiem napięcia obwodu otwartego i prądu zwarcia. Po przekroczeniu progu 9 kGy sprawność ogniw POS zmniejszyła się o 52% w porównaniu z PCE początkową. Za przyczynę tego zjawiska autorzy uznali obniżenie współczynnika wypełnienia. Poprzez wykonanie badań za pomocą dyfrakcji rentgenowskiej, fotoluminescencji czasowo-rozdzielczej i symulacjom teorii funkcjonalu gęstości wykazano, że ciągła ekspozycja POS na promieniowanie jonizujące indukuje powstawanie defektów krystalograficznych i płytkich pułapek w perowskicie, co prowadzi do stopniowego pogarszania się sprawności urządzenia POS po napromieniowaniu.

Z kolei Sahin i Kabacelik [2] przedstawili wpływ promieniowania jonizującego na właściwości krzemowych ogniw słonecznych naświetlanych metodą cLINAC (tj. elektronami o energii 8 MeV oraz fotonami Bremsstrahlunga wygenerowanymi z elektronów o energii 18 MeV). Zaobserwowano, iż sprawność krzemowych ogniw słonecznych obniżyła się o 15% z powodu napromieniowania.

Materiały perowskitowe jako scyntylatory promieniowania X zostały dostrzeżone przez badaczy ze względu na ich bardzo dobrą wydajność świetlną. Ponadto ze względu na możliwość przetwarzania w roztworze i niski koszt materiałowy perowskity halogenkowe można wykorzystać do wytwarzania grubych warstw perowskitu na dużych powierzchniach, umożliwiając obrazowanie rentgenowskie przy niskiej dawce. Scyntylatory i detektory na bazie perowskitu mogą w przyszłości zastąpić produkty komercyjne, takie jak jodek cezu domieszkowany talem (CsI:TI) i krzem amorficzny (Si) [3]. Przykładowo, Zhou i współautorzy [4] przeprowadzili badania porównawcze ekranów scyntylacyjnych o wysokiej rozdzielczości na bazie perowskitów ołowiwych i bezolowiwych. Wykazano, że matryce perowskitowe mają wysokie przekroje poprzeczne absorpcji promieni rentgenowskich ze względu na ich ciężki atom (np. Pb^{2+} , Bi^{3+} , I^-). Ponadto można je przetwarzać w niskiej temperaturze, posiadają przestrajalne pasma wzbronione, wysoką wydajność kwantową fotoluminescencji (64000 fotonów/MeV w temperaturze pokojowej dla $MAPbI_3$), niską gęstość pułapek, wysoką ruchliwość nośników ładunku i szybką fotoreakcję. Jak wykazano, scyntylator Rb_2CuBr_3 charakteryzuje się niezwykle wysoką wydajnością świetlną wynoszącą ponad 91000 fotonów/MeV w temperaturze pokojowej. Perowskity halogenkowe takie jak $MAPbI_3$, $MAPbBr_3$ i $CsPbBr_3$ o wysokiej rezystywności ($\sim 10^9 \Omega \text{ cm}$), wpłynęły na znaczny wzrost wydajności detekcji. Także bezolowiwie perowskity halogenkowe, takie jak $Cs_2AgBiBr_6$ i $A_3Bi_2I_9$ ($A = Cs^+$, MA^+ lub NH_4^+) wykazały ogromny potencjał w zakresie wykrywania promieniowania rentgenowskiego ze względu np. na dużą rezystywność ($\sim 10^{11} \Omega \text{ cm}^{-1}$). Z kolei Zhang i współautorzy [5] skonstruowali rentgenowskie detektory scyntylacyjne oparte na nanodrutach metalohalogenków perowskitowych. Jako materiały radioluminescencyjne badane nanodrutki wykazywały doskonałą wydajność świetlną równą $\sim 5300 \text{ ph/MeV}$. Nanodrutki $CsPbBr_3$ o średnicy 30 nm w anodowanym tlenku glinu wykazywały rosnącą wydajność scyntylacji promieniowania X wraz ze zmniejszającą się średnicą. Nanodrutki $CsPbBr_3$ wykazywały również wysoką odporność na promieniowanie rentgenowskie (dawka sumaryczna 162 Gy), ze spadkiem intensywności scyntylacji zaledwie o 20–30% po 24 godzinach ekspozycji na promieniowanie rentgenowskie i prawie bez zmian po przechowywaniu w temperaturze otoczenia przez 2 miesiące.

Podsumowując, na obecnym etapie rozważań wykrywanie promieniowania rentgenowskiego za pomocą perowskitu halogenkowego pozostaje nadal na etapie badań laboratoryjnych. Oczekuje się, że odtwarzalność, przetwarzanie na dużą skalę oraz przyjazność dla środowiska perowskitów halogenkowych zostaną zrealizowane w niedalekiej przyszłości, aby osiągnąć ostateczny cel, jakim jest komercjalizacja.

Oczywiście znane i stosowane są w praktyce scyntylatory takie jak przykładowo $Nal:TI$, $CSI:TI$, $Eu:SrI_2$, $Gd_2O_2S:Tb$, które opisaliśmy szczegółowo w pracach [6, 7], wykazując ich najwyższy potencjał aplikacyjny.

Należy także zaznaczyć, iż oprócz aspektów materiałowych, także czynniki zewnętrzne w tym głównie

zanieczyszczenia i zacinienie mają największy wpływ na wydajność ogniw fotowoltaicznych. W urządzeniach tandemowych zjawisko zacinienia powstaje na skutek niepełnego pokrycia powierzchni ogniwa słonecznego przez powierzchnię scyntylatora. Komercyjnie dostępne panele mają kształt prostokąta, a scyntylatory walca. Powstaje zatem w rogach ogniwa obszar, który nie ma pełnego pokrycia powierzchnią scyntylatora. Konsekwencją takiej konfiguracji jest wpływ na parametry elektryczne badanych ogniw słonecznych.

Dlatego też celem niniejszej pracy było skonstruowanie detektora promieniowania na bazie układu tandemowego paneli fotowoltaicznych – scyntylator. Zapropionowana konstrukcja detektora umożliwi detekcję źródła promieniowania jonizującego poprzez pomiar parametrów elektrycznych ogniwa, takich jak wartość napięcia obwodu otwartego, natężenie prądu zwarcia oraz oporu całkowitego. Aby określić wpływ różnicy w dopasowaniu powierzchni scyntylatora w stosunku do powierzchni panelu fotowoltaicznego wykonano badania na układzie modelowym panelu fotowoltaicznego zakrywając poszczególne ogniwa podczas rejestracji charakterystyk prądowo-napięciowych panelu. Badanie zacinienia panelu miało potwierdzić czy proponowane rozwiązanie konstrukcyjne umożliwi efektywne działanie detektora bez zewnętrznego zasilania.

Materiały

Do konstrukcji detektora promieniowania jonizującego na bazie ogniwa słonecznego i scyntylatora wykorzystano:

(i) panel bazujący na polikrystalicznych krzemowych ogniwach fotowoltaicznych, o parametrach panelu: $V_{oc} = 6,04 \text{ V}$; $I_{sc} = 183,13 \text{ A}$; $FF = 0,87$; $PCE = 14,8\%$, $R_s = 6,60 \Omega$ oraz $R_{sh} = 39,94 \Omega$, gdzie V_{oc} – napięcie obwodu otwartego, I_{sc} – prąd zwarcia ogniwa, FF – współczynnik wypełnienia, PCE – sprawność ogniwa, R_s – rezystancja równoległa i R_{sh} – rezystancja szeregową. Powierzchnia panelu wynosi $90,25 \text{ cm}^2$;

(ii) dwa scyntylatory $Nal(TI)$ o wymiarach kryształów średnica 40 mm i wysokości 25 i 40 mm, gęstości $3,67 \text{ g/cm}^3$, oraz strumieniu świetlnym 38000 ph/MeV .

Rys. 2 przedstawia zdjęcie skonstruowanego detektora z mniejszym (40 x 25 mm) kryształem scyntylatora w rękawie hermetycznym oraz detektor w obudowie polimerowej.

Scyntylator $Nal(TI)$ zazwyczaj przekształca około 11% padającej energii gamma w fotony o średniej energii 3,0 eV. Emisja fotonów ma charakterystyczny czas 0,264 ms i ma maksymalną emisję przy długości fali 415 nm [8-10].

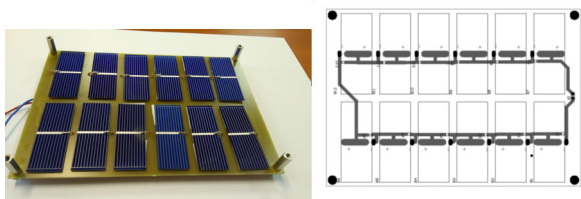
Do badań użyto punktowe - zamknięte źródło promieniowania jonizującego. Zastosowanym izotopem był $Cs-137$ o aktywności 0,7 GBq.

W celu zapewnienia idealnej powierzchni kontaktu pomiędzy kryształem scyntylatora a powierzchnią ogniwa krzemowego wykorzystano cienką warstwę przezroczystego smaru, który umożliwi przepływ promieniowania z scyntylatora do ogniwa fotowoltaicznego. Proponowana konstrukcja detektora promieniowania umożliwi pokrycie ogniwa słonecznego w ok 14 % jego powierzchni. Scyntylator wraz panelem fotowoltaicznym został umieszczony w rękawie próżniowym z wyprowadzonymi przewodami zapewniając brak dostępu do wilgoci z zewnątrz. Skonstruowane urządzenie tandemowe zostało umieszczone w szczelnym pudełku wydrukowanym z polilaktydu (PLA) i zabezpieczone przed przemieszczaniem się.



Rys.2. Zdjęcie detektora na bazie panelu fotowoltaicznego oraz scyntylatora w hermetycznym rękawie oraz w obudowie wykonanej w technice druku 3D.

Układ modelowy dwunastu pojedynczych ogniw słonecznych połączonych szeregowo (Rys. 3) wykazywał następujące parametry elektryczne: $V_{oc}=0,622V$; $I_{sc}=328,4$ mA; $FF=0,726$; $\eta=14,8\%$, $R_s=204,45$ m Ω oraz $R_{sh}=10,02$ Ω . Wymiar pojedynczego ogniwa wynosił 5 cm x 2 cm.



Rys.3. Zdjęcie panelu fotowoltaicznego oraz schemat płytki pod ogniwem.

Wpływ zacienienia na parametry fotowoltaiczne ogniw krzemowych

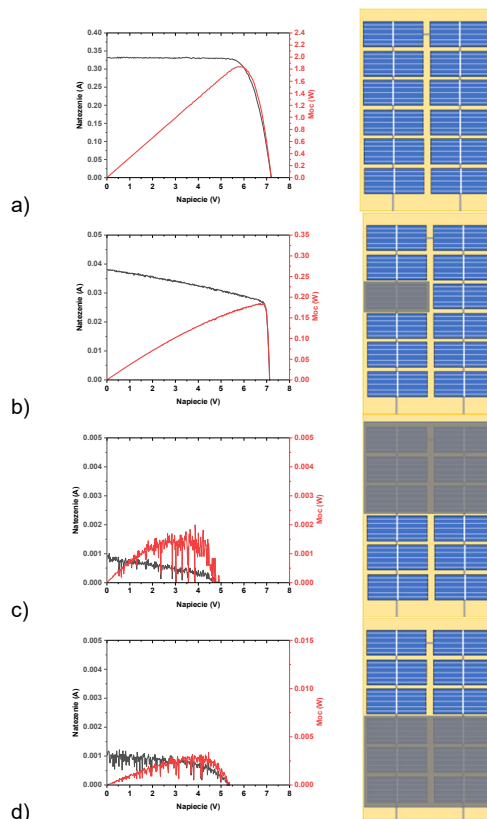
W celu określenia efektywności pracy ogniwa wykonano charakterystykę prądowo-napięciową dla całego panelu oraz przy zasłonięciu części ogniw krzemowych. Wyniki zostały przedstawione na rys. 4. Zaobserwowano istotny wpływ przesłaniania jednego lub części ogniw znajdujących się na panelu fotowoltaicznym. Nie zaobserwowano wyraźnego trendu, który określiłby, czy ogniwa umiejscowione w konkretnym miejscu w panelu (na bokach, środku) wpływają w jakiś znaczący sposób na pracę ogniwa. Już przy przesłonięciu jednego ogniwa obserwuje się niemal 10-krotny spadek natężenia i mocy ogniwa. Zasłonięcie sześciu ogniw powoduje spadek niemal o 2 rzędy wielkości w porównaniu z niezasłoniętym panelem fotowoltaicznym przy intensywności promieniowania 1000 W/m².

W budowie modelowego panelu nie zastosowano diod Schottkie'go dla każdego ogniwa, które zminimalizowałyby straty, gdyż panel zastosowany w detektorze również nie posiadał takich elementów.

Wyniki badań sugerują, że w przypadku niecałkowitego dopasowania powierzchni scyntylatora z panelem słonecznym oczekiwane jest, że parametry napięcia jak i natężenia prądu będą znacząco odbiegać od parametrów wyznaczonych dla panelu podczas naświetlania w warunkach laboratoryjnych z wykorzystaniem symulatora słońca.

Należy mieć również na uwadze aspekt związany z charakterystyką spektralną zastosowanego scyntylatora gdzie poziom konwersji wytworzonego przez scyntylator światła pokrywać będzie wyłącznie zaznaczony wycinek spektrum absorpcji panelu słonecznego na bazie krzemu polikrystalicznego, co w istotny sposób będzie miało wpływ na parametry charakterystyk prądowo-napięciowych. A zatem najdokładniejszy pomiar wpływu źródła promieniowania na generowanie odpowiedzi detektora będzie możliwy poprzez pomiar oporu całkowitego ogniwa.

Podsumowując, przeprowadzone badania wpływu zacienienia na parametry elektryczne krzemowych ogniw słonecznych wykazały, że przy braku idealnego dopasowania powierzchni styku scyntylatora z ogniwem krzemowym nie jest możliwe generowanie prądu wystarczającego do zasilenia detektora.



Rys. 4. Charakterystyka prądowo-napięciowa, charakterystyka mocy (lewa strona) oraz schematyczny rysunek: nieprzesłoniętego panelu (a), panelu z 1 przesłoniętym ogniwem (b), z 6 górnymi przesłoniętymi ogniwami (c) i z 6 dolnymi przesłoniętymi ogniwami (d).

Tandemowe urządzenie na bazie scyntylatora i ogniw krzemowych

W celu weryfikacji postawionej hipotezy dotyczącej oczekiwanych zmian wartości wybranych parametrów elektrycznych układu tandemowego wykonano pomiary napięcia obwodu otwartego oraz natężenia prądu zwarcia przy ekspozycji na promieniowanie β , γ Cs-137. Podczas pomiaru napięcia obwodu otwartego nie uzyskano stabilnego odczytu, a wskazania miernika oscylowały w okolicy 0 V (z dokładnością $\pm 0,001$ V). Natomiast wskazania przepływu prądu nie były możliwe do zarejestrowania ze względu na zakres pomiarowy wykorzystanego multimetru – pomiar z dokładnością do 0,001 mA. Tak jak oczekiwano, wskazania oporu całkowitego okazały się jedynym mierzalnym parametrem, który wykazywał zmienną wartość pod wpływem obecnego źródła promieniowania.

Pomiar z właściwym źródłem promieniowania został wykonany w specjalnie zabezpieczonym pomieszczeniu, gdzie ograniczony był dostęp do środowiska zewnętrznego.

Parametr oporu całkowitego ogniwa fotowoltaicznego bez scyntylatora w obecności źródła promieniowania jak i przy jego braku wynosił $(0,182 \pm 1)$ M Ω . W przypadku detektora zawierającego większy kryształ scyntylatora wartość bazowa oporu wynosiła ok. 1,8 – 2,0 M Ω . Fluktuacja zależała od umiejscowienia detektora i mogła wynikać z promieniowania tła otoczenia. Dla detektora z małym scyntylatorem wartość oporu całkowitego wynosiła

($0,230 \pm 1$) $M\Omega$. W celu określenia wpływu dawki promieniowania na wartość oporu całkowitego wykonano pomiary z całą ilością dostępnego źródła promieniowania (24 krążki), z połową (12 krążków) oraz z pojedynczym krążkiem w odległości ok. 2 cm pomiędzy obudową detektora a źródłem promieniowania. Wyniki badań zestawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Wartości oporu całkowitego w zależności od dawki promieniowania

Ilość źródła promieniowania	Detektor z małym scyntylatorem 40 x 25 mm	Detektor z dużym scyntylatorem 40 x 40 mm
	Wartość oporu całkowitego [$M\Omega$]	Wartość oporu całkowitego [$M\Omega$]
Cała zawartość źródła (24 krążki)	$0,230 \pm 1$	$2,187 \pm 7$
Półowa źródła (12 krążków)	$0,230 \pm 1$	$2,165 \pm 4$
Pojedynczy krążek	$0,230 \pm 1$	$2,165 \pm 4$

Analiza wyników badań wartości oporu całkowitego pozwala na stwierdzenie, że pomieszczenie, w którym dokonano ekspozycji na promieniowanie jonizujące posiada wystarczające wartości promieniowania tła, które sprawia, że detektor zawierający małą ilość scyntylatora wykazuje stałe wartości oporu niezależnie od ekspozycji na określoną ilość dostępnego źródła promieniowania, jednak większe o ok. 27 % od wartości obserwowanych dla ślepej próby. W przypadku detektora z większym scyntylatorem (o wymiarach 40 x 40 mm) zmniejszenie ilości o połowę wpłynęło na spadek oporu o ok. 1 % co można uznać za marginalną. W celu sprawdzenia jaki wpływ ma odległość na wartość oporu całkowitego ogniwa wykonano pomiary oporu na różnych odległościach od źródła promieniowania unosząc detektor nad pojemnikiem zawierającym źródło promieniowania. Zmiana odległości o kolejne 5 cm spowodowała uzyskanie następujących wyników: 2,090 $M\Omega$, 2,457 $M\Omega$, 2,780 $M\Omega$ oraz 1,785 $M\Omega$ odpowiednio dla odległości 5 cm, 10 cm, 15 cm i 20 cm.

Podsumowanie

Wyniki przedstawionych wstępnych badań potwierdziły możliwość zastosowania zaproponowanej w niniejszej pracy koncepcji tandemowego połączenia panelu fotowoltaicznego oraz scyntylatora w celu konstrukcji detektora promieniowania jonizującego. Pomiary jednoznacznie wskazują, że wykonana konstrukcja urządzenia wykazuje zdolności detekcji zmiennej dawki promieniowania jonizującego. Wstępne badania wykazały również, że nieoptymalna konstrukcja pozwala na dokonanie detekcji promieniowania jonizującego wyłącznie poprzez rejestrowanie zmiany oporu całkowitego ogniwa, a ilość wykorzystanego scyntylatora pozwala wyłącznie na potwierdzenie obecności źródła promieniowania (mniejszy scyntylator o wymiarach 40 x 25 mm) lub określenia położenia centrum promieniowania w funkcji odległości.

Podziękowania dla Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR) za wsparcie finansowe projektu „Wydajne i lekkie

układy zasilające złożone z ogniwa słonecznego i baterii litowo-jonowej oraz ogniwa słonecznego i superkondensatora przeznaczone do zastosowań specjalnych” otrzymane w ramach Strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych „Nowoczesne technologie materiałowe”. (Nr TECHMATSTRATEG1/347431/14/NCBR/2018).

Autorzy: dr hab. inż. Witalis Pellowski, Akademia Wojsk Lądowych imienia generała Tadeusza Kościuszki, Wydział Nauk o Bezpieczeństwie, ul. Czajkowskiego 109, 51-147 Wrocław, e-mail: witalis.pellowski@awl.edu.pl; prof. dr hab. Agnieszka IWAN, Akademia Wojsk Lądowych imienia generała Tadeusza Kościuszki, Wydział Nauk o Bezpieczeństwie, ul. Czajkowskiego 109, 51-147 Wrocław, e-mail: agnieszka.iwan@awl.edu.pl; dr Krzysztof A. BOGDANOWICZ, Wojskowy Instytut Techniki Inżynierskiej im. profesora Józefa Kosackiego, ul. Obornicka 136, 50-961 Wrocław, e-mail: bogdanowicz@witi.wroc.pl

LITERATURA

- [1] Kim S., Lee C. M., Shah S. H. U., Jung M. C., Lee S. G., Kim C. H., Lee H. J., Park C., Yeom J. Y., Ryu S. Y., Kim H., Park H., Jeong W. Y., Cho S. Radiation Tolerance of Organohalide-Based Perovskite Solar Cells under 6 MeV Electron Beam Irradiation, *Journal of Physical Chemistry C*, 128 (2024), 2, 885-893
- [2] Sahin R., Kabacelik I. Effects of ionizing radiation on the properties of mono-crystalline Si solar cells, *Radiation Physics and Chemistry*, 150 (2018), 90-94
- [3] Jana A., Cho S., Patil S.A., Meena A., Jo Y., Sree V. G., Park Y., Kim H., Im H., Taylor R. A. Perovskite: scintillators, direct detectors, and X-ray imagers, *Materials Today* 55 (2022) 110-136
- [4] Zhou Y., Chen J., Bakr O.M., Mohamed O.M. Metal Halide Perovskites for X-ray Imaging Scintillators and Detectors, *ACS Energy Lett.* 6 (2021), 739-768
- [5] Zhang Z., Dierks H., Lamers N., Sun C., Nováková K., Hetherington C., Scheblykin I. G., Wallentin J. Single-Crystalline Perovskite Nanowire Arrays for Stable X-ray Scintillators with Micrometer Spatial Resolution, *ACS Appl. Nano Mater.* 5 (2022), 881-889
- [6] Pellowski, W., Iwan A., Bogdanowicz K. Scyntylatory nowej generacji do konwersji fotonów światła wygenerowanego poprzez wzbudzoną radiacyjnie fotoluminescencję na energię elektryczną w ogniwach izo-fotowoltaicznych jako element wzmocnienia systemu bezpieczeństwa energetycznego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 99, 10 (2023) 265-268
- [7] Iwan A., Pellowski W., Bogdanowicz K. A. Conversion of Radiophotoluminescence Irradiation into Electricity in Photovoltaic Cells. A Review of Theoretical Considerations and Practical Solutions, *Energies* 14 (2021) 6186
- [8] Ahmadi S., Ashrafi S., Yazdanesad F. A method to calculate the gamma ray detection efficiency of a cylindrical NaI (TI) crystal, *Journal of Instrumentation*, 13 (2018), P05019
- [9] Sathi S. Characterization study of NaI(Tl) γ -summing spectrometer; *Journal of Instrumentation*, 18 (2023), P12014
- [10] Lee H.Y., Jeon J.A., Kim K.W., Kim W. K., Lee H. S., Lee M. H. Scintillation characteristics of a NaI(Tl) crystal at low-temperature with silicon photomultiplier, *Journal of Instrumentation*, 17 (2022), P02027