

Konwersja fotonów światła wygenerowanego poprzez wzbudzoną radiacyjnie fotoluminescencję na energię elektryczną w ogniwach izo-fotowoltaicznych (i-PV) nowym wyzwaniem dla bezpieczeństwa energetycznego

Streszczenie. W artykule przedstawiono aktualny stan wiedzy na temat zastosowania źródeł promieniotwórczych do generowania światła fotonicznego w scyntylatorach, jako konwertery promieniowania jonizującego na elektryczność w ogniwach fotowoltaicznych. Uzyskane w ten sposób fotony światła mogą generować ładunek elektryczny w ogniwach fotowoltaicznych. Zaproponowana w artykule koncepcja nowego typu ogniwa izo-fotowoltaicznego może stanowić przełom w dziedzinie energetyki niekonwencjonalnej. Zero-emisyjność i praktycznie nieograniczona żywotność takich źródeł może stanowić znaczące uzupełnienie globalnego miksu energetycznego.

Abstract. The article presents the current state of knowledge on the use of radioactive sources to generate photonic light in scintillators as converters of ionizing radiation to electricity in photovoltaic cells. The light photons obtained in this way can generate an electric charge in the photovoltaic cells. The concept of a new type of iso-photovoltaic cells proposed in the article may be a breakthrough in the field of unconventional energy. Zero-emissivity and practically unlimited viability of such sources can be a significant complement to the global energy mix. (**Conversion of photons of light generated by radiation excited photoluminescence into electricity in iso-photovoltaic cells a new challenge for energy security**).

Słowa kluczowe: ogniwa fotowoltaiczne; bateria jądrowa; scyntylacja; promieniowanie, bezpieczeństwo energetyczne.

Keywords: photovoltaic cells; nuclear battery; scintillation; radiation, energy security.

Wstęp

Możliwość generowania energii elektrycznej z promieniowania słonecznego jest powszechnie znanym zjawiskiem i jest w XXI wieku wykorzystywana na całym świecie. Aczkolwiek, zarówno zmienność warunków pogodowych jak i globalne ocieplenie są powodem poszukiwania innych źródeł energii dostępnych w naturze.

Niniejszy artykuł prezentuje koncept naukowo-technologiczny poparty przeglądem literaturowym i analizą projektów zrealizowanych w powyższej tematyce. Zespół autorski opublikował artykuł [1], który prezentuje przegląd aktualnych doniesień literaturowych w zakresie konwersji fotonów światła wygenerowanego poprzez wzbudzoną radiacyjnie fotoluminescencję na energię elektryczną w ogniwach fotowoltaicznych. Aby osiągnąć zdolność do wytwarzania energii elektrycznej w ten sposób - niezależny od czynników zewnętrznych (tj. nasłonecznienie lub innego źródła fotonów światła) należy spełnić pięć sugerowanych postulatów:

1. Struktura warstwy scyntylacyjnej powinna zawierać wtrącenia (inkluzyje strukturalne) w postaci np. mikrokapsulek substancji promieniotwórczej. Zwiększy to sferyczną wydajność luminescencji i poprawi współczynnik transmisji światła fotonów do powierzchni izo-ogniwa słonecznego (i-PV). Zewnętrzna warstwa scyntylacyjna powinna być otoczona materiałem lustrzanym odbijającym światło w kierunku panelu fotowoltaicznego.

2. Możliwości zarówno modulacji barw scyntylacyjnych, jak i obserwacji okiem nieuzbrojonym są możliwe dzięki domieszkowaniu materiałów różnymi pierwiastkami. Wstępne obserwacje zwiększonego natężenia i barwy scyntylacji podczas ekspozycji na promieniowanie rentgenowskie zaobserwowano po domieszkowaniu struktury organicznej UO_2^{2+} . Obserwowano wzrost luminescencji w wiązce rentgenowskiej ($E > 20$ keV). Zaobserwowano również zwiększoną odporność na promieniowanie i zmniejszoną higroskopijność w porównaniu z dostępnymi na rynku scyntylatorami CsI:TI lub NaI:TI [2].

3. Wydajność baterii jądrowej zależy w dużej mierze od dopasowania emitera (źródła α , β lub γ) do materiału scyntylacyjnego w procesie przetwarzania energii promieniowania na fotony światła. Baterie jądrowe, które wykorzystują pojedynczy płaski (warstwowy) układ komponentów, będą generalnie miały niską sprawność konwersji energii. Znacznie lepsze efekty dają układy przestrzenne.

4. Według Dujardin [3] zawartość w materiale scyntylacyjnym K, Rb i Lu jako domieszki, ze względu na wysoką naturalną radioaktywność, jest wysoce pożądana w zastosowaniach związanych z konwersją promieniowania.

5. Monokryształ perowskitu może być kluczowym materiałem scyntylacyjnym w zastosowaniach technologii fotowoltaicznej. Charakteryzuje się bardzo wysoką wydajnością kwantową fotoluminescencji i konwersją wydajności świetlnej w szerokim zakresie temperatur. Według doniesień literaturowych [4-6] żywotność emisji wynosi $\sim 3,4$ ns, zaś efektywność świetlna wynosi $1,5 \div 3 \times 10^5$ fotonów/MeV i może być proporcjonalna do przerwy energetycznej tych materiałów, która szacowana jest na poniżej 2 eV. Zastosowanie najnowszej technologii wykorzystującej kropki kwantowe i nanokryształy może również poprawić konwersję światła w scyntylatorach perowskitowych.

Artykuł podzielono na poszczególne bloki tematyczne tak aby finalnie udowodnić możliwość konwersji fotonów światła wygenerowanego poprzez wzbudzoną radiacyjnie fotoluminescencję na energię elektryczną w ogniwach fotowoltaicznych. W tym omówiono źródła promieniotwórcze, zasadę działania scyntylatorów oraz przedstawiono obecne trendy w zastosowaniu scyntylatorów w ogniwach słonecznych różnych generacji.

Źródła promieniotwórcze

Przemiany jądrowe zachodzące w jądrach niestabilnych izotopów są źródłem różnych rodzajów promieniowania. W badaniach naukowych, przemyśle i medycynie najczęściej wykorzystywane są źródła (emitery) promieniowania: α , β , γ

(X) i n. Istotnym, z praktycznego punktu widzenia, parametrem charakterystycznym dla każdego izotopu jest czas zdolności do emisji promieniowania. Do jego opisu stosuje się wielkość nazywaną czasem połowicznego zaniku ($T_{1/2}$), czyli spadku aktywności promieniotwórczej o połowę. Izotopy klasyfikowane są jako: długo, średnio i krótko żyjące. Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literaturowego wytypowano przykładową grupę izotopów o największym potencjale aplikacyjnym dla proponowanych w niniejszym artykule zastosowań. Charakterystykę wybranych źródeł podsumowano w tabeli 1 [7].

Tabela 1. Parametry wybranych źródeł promieniowania [7]

Izotop	Rodzaj emisji	Czas półtrwania $T_{1/2}$ [lat]	Energia E_α [MeV]	Energia E_β [MeV]	Energia E_γ [MeV]
Co-60	β, γ	5.3	-	0,31	1,33
Cs-137	β, γ	30.1	-	0,52	0,66
Am-241	α, γ	433	5,49	-	0,06
Ra-226	α, β, γ	1600	4,87	1,03	0,93
U-238	α, β, γ	$4,5 \times 10^9$	4,27	4,54	0,02

Zasada działania scyntylatorów

Scyntylacja jest procesem kwantowym opisanym rozkładem prawdopodobieństwa jej występowania w czasie. Jeśli naładowana cząstka (α i/lub β) lub foton energii (γ i/lub X) przechodząc przez materiał scyntylacyjny wzbudza określoną liczbę atomów, to gdy atomy przechodzą do stanu podstawowego zgodnie z relaksacją stochastyczną, uwalniają liczbę fotonów, która maleje wykładniczo, zgodnie z zależnością opisaną wzorem (1):

$$(1) \quad I = e^{-t/\tau}$$

gdzie: I – liczba fotonów, t – czas, τ – stała czasowa.

Liczba fotonów zależna od czasu to jeden z kluczowych parametrów przy wyborze typu scyntylatora. Zwykle czas ten wynosi mniej niż 10^{-8} s, co oznacza, że takie detektory mogą być stosunkowo szybkie. Materiał scyntylacyjny musi mieć w swojej strukturze co najmniej trzy poziomy energetyczne: podstawowy, wzbudzony i trzeci pośredni, ale zbliżony do poziomu wzbudzenia. Następnie proces relaksacji przebiega dwuetapowo (zgodnie ze schematem Jabłońskiego): najpierw do poziomu pośredniego, bez emisji światła, a następnie do stanu podstawowego, z rzeczywistą emisją fotonu w postaci światła. Dlatego istnienie trzeciego poziomu jest kluczowe. W konfiguracji z tylko dwoma poziomami wszystkie wyemitowane fotony zostałyby natychmiast ponownie wchłonięte; scyntylator byłby nieprzezroczysty dla własnego promieniowania.

Rodzaje ogniw słonecznych – zalety i wady

Klasyczny podział ogniw słonecznych uwzględnia rodzaj zastosowanego materiału aktywnego i dzieli ogniwa na nieorganiczne i organiczne. W każdej z tych grup można wyróżnić różnego rodzaju ogniwa słoneczne, które klasyfikowane są jako cztery generacje. Ogniwa słoneczne pierwszej i drugiej generacji to ogniwa nieorganiczne, w tym oparte na krzemie monokrystalicznym, polikrystalicznym (ogniwa I generacji), ogniwa typu CIGS oparte na związkach miedzi, indu, galu, selenu (ogniwa II generacji), oraz ogniwa słoneczne na bazie arsenku galu GaAs i innych materiałach AIIIIV (ogniwa II generacji).

Z kolei ogniwa trzeciej i czwartej generacji to organiczne ogniwa słoneczne zarówno polimerowe, jak i oparte na związkach małowartościowych oraz ogniwa barwnikowe (tzw. ogniwa DSSC, ang. dye-sensitized solar cell, ogniwa Grätzela) i ogniwa słoneczne perowskitowe. Należy wspomnieć, iż ogniwa fotowoltaiczne czwartej generacji powstały jako kontynuacja prac nad ogniwami trzeciej

generacji ze względu na wciąż niską sprawność (PCE) w porównaniu z ogniwami nieorganicznymi. Proponowano dodatek różnego rodzaju domieszek takich jak nanoinkluzje metaliczne (Ag, Au, Pt), grafen, nanorurki węglowe, TiO_x, ZnO czy kropki kwantowe w celu poprawy sprawności ogniwa poprzez umiejscowienie domieszki w różnych warstwach w ogniwie oraz modyfikację ich stężenia [8]. Należy wspomnieć, iż rozwój ogniw perowskitowych w ostatnich latach wzbudził ogromny entuzjazm wśród naukowców i przedsiębiorców ze względu na możliwość otrzymania wydajnych i tanich ogniw słonecznych, które mogłyby być zintegrowane z budownictwem. Aczkolwiek, ogniwa perowskitowe pomimo wielu zalet borykają się wciąż z kilkoma problemami co powoduje, iż proponowane są hybrydowe rozwiązania, czyli ogniwa nieorganiczno-organiczne, krzemowo-perowskitowe czy CIGS-perowskitowe. Pytanie o treści: *Ile nieorganiki w fotowoltaice organicznej czy organiki w fotowoltaice nieorganicznej?* pozostaje nadal otwarte.

Pomimo osiągniętych sukcesów na kanwie rozwoju fotowoltaiki wciąż naukowcy dążą do udoskonalenia istniejących rozwiązań i eliminacji wad ogniw słonecznych. W tabelach 2 i 3 przedstawiono analizę porównawczą wybranych zalet i wad ogniw słonecznych nieorganicznych i organicznych mając świadomość iż rekordy PCE wciąż ulegają poprawie.

Tabela 2. Zalety i wady ogniw słonecznych nieorganicznych

Zalety	Wady
Ogniwa na bazie krzemu monokrystalicznego	
PCE = 25,6 %, Trwałość do 25 lat, Mała ilość zajmowanej powierzchni w stosunku do sprawności.	Wysoka cena ogniwa związana z kosztownością technologii, Spadek sprawności w świetle rozproszonym.
Ogniwa na bazie krzemu polikrystalicznego	
Niższa cena niż ogniwa monokrystalicznych, Brak spadku sprawności w świetle rozproszonym.	PCE = 21 %
Ogniwa na bazie krzemu amorficznego	
Nawet 25-letnia trwałość, Niskie koszty produkcji (mniejsze zużycie krzemu), Niska cena, Brak toksycznych metali ciężkich, Możliwość nanoszenia na podłoża w temperaturze ok. 75 °C.	PCE = 12 %, Stosunkowo duża ilość zajmowanej powierzchni w stosunku do sprawności.
Ogniwa typu CIGS (związki miedzi, indu, galu, selenu)	
PCE = 22 %, Mała waga, Możliwość absorpcji światła z różnych kierunków.	Skomplikowany i trudny proces technologiczny, Obecność kadmu.
Ogniwa na bazie arsenku galu (GaAs)	
PCE = 32 %, Doskonała trwałość (odporność na wilgoć oraz promieniowanie UV), Doskonała absorpcja światła (szerokie pasmo wzbudzone), elastyczność, lekkość.	Wysoka cena, Toksyczność odczynników chemicznych używanych przy produkcji (co ogranicza zakres aplikacji do zasilania statków i sond kosmicznych).
Kesterytowe ogniwa słoneczne (Cu₂ZnSnS₄)	
Wykonane są z tańszych, dostępnych i bardziej przyjaznych dla środowiska materiałów niż w przypadku ogniw typu CIGS czy CdTe.	PCE = 9,6 %.

Tabela 3. Zalety i wady ogniw słonecznych organicznych

Zalety	Wady
Małowartościowe/polimerowe ogniwa słoneczne	
Niższa toksyczność, Elastyczność, Lekkość, Łatwiejsza i tańsza produkcja na wielką skalę niż ogniw nieorganicznych.	Krótko żywotności, Brak dostatecznej stabilności w atmosferze powietrza, PCE = 8-9%, PCE _{max} = 17%, Problem z przeskalowaniem

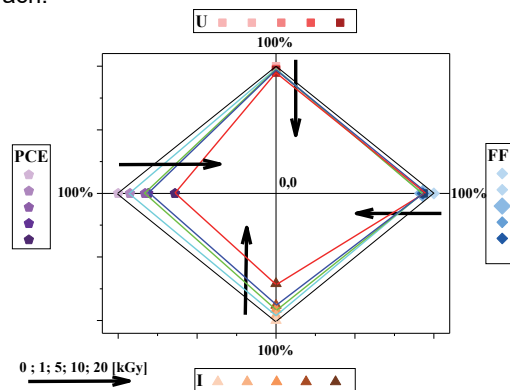
Różnorodność stosowanych związków chemicznych (polimery, dendrimery, oligomery, czy ciekłe kryształy)	technologii ze skali laboratoryjnej na półtechnologiczną czy technologiczną.
Ogniwa barwnikowe (DSSC)	
PCE = 15 %, Niski koszt wytwarzania, Małe zużycie materiałów organicznych, Przezroczystość (szyby). Mała wrażliwość na kąt padania promieniowania słonecznego (mogą działać efektywnie zarówno pod wpływem promieniowania odbitego jak i załamane i przy częściowym zaciemnieniu), Mniejsza ilość wytwarzanego CO ₂ podczas produkcji ogniwa DSSC niż krzemowego, Krótki okres zwrotu energii zużytej na wyprodukowanie pojedynczego modułu DSSC (ang. <i>Energy Payback Time</i>).	Problemy z elektrolitem ciekłym (elektrolity żelowy lub stały), Wysoki koszt platyny i rutenu (poszukiwanie tańszych materiałów), Problem ze stabilnością długoterminową (zastąpieniem jodu w ogniwie np. kobaltem).
Ogniwa perowskitowe	
Możliwość absorbowania światła o bardzo szerokim spektrum długości fali, PCE = 25 %, Niski koszt produkcji, Elastyczność, Mała waga, Możliwość aplikacji na różnej powierzchni.	Obecność ołowiu w perowskitach (CH ₃ NH ₃ PbI ₃), który zanieczyszcza środowisko (zastąpienie ołowiu w perowskitach np. rubidem), Problem ze stabilnością w atmosferze powietrza (rozkładają się pod wpływem wilgoci).

Znaczenie efektu radiacyjnego w krzemowych i GaAs ogniwach słonecznych

Badania przeprowadzone na dostępnych handlowo krzemowych ogniwach słonecznych ujawniły, iż podczas napromieniowywania ogniw zmienną dawką promieniowania gamma w zakresie od 1 kGy do 20 kGy zaobserwowano zmiany większości kluczowych parametrów fotowoltaicznych ogniw, co można zaobserwować na rys. 1. Największe zmiany były widoczne dla generowanego prądu zwarcia, pokazując spadek o niemal 40%, a tym samym sprawność ogniwa spadła o podobną wartość. Napięcie obwodu otwartego wykazało nieznaczny spadek w granicy 5%, natomiast współczynnik wypełnienia (FF) nie uległ zmianie. Dalsze badania nad strukturą krystaliczną krzemu w ogniwach ujawniły powstawanie nowych defektów, w tym wakatów, samoinsercji zanieczyszczeń i domieszek wywołując niepożądane efekty jak rekombinacje czy centra kompensacyjne [9]. Z drugiej jednak strony, dawka energii o wartości 100 Gy/h w odległości 150 mm od źródła promieniowania byłaby zdolna do wytworzenia pary elektron-dziura w ogniwie. Zaobserwowano również, że negatywny efekt wpływu promieniowania na ogniwo słoneczne można uzyskać poprzez wygrzanie w warunkach izotermicznych w temperaturze pokojowej [10].

Z badań porównawczych pomiędzy ogniwami krzemowymi amorficznymi i monokrystalicznymi, ogniwa amorficzne okazały się mniej wrażliwe na bezpośrednie działanie promieniowania gamma (γ). Stosując natomiast układ sprzężony scyntylatora z ogniwo słonecznym możliwe jest generowanie prądu, z przetworzonego promieniowania gamma. Zaobserwowano również, że ogniwa amorficzne przewyższyły ogniwa krystaliczne pod względem wartości generowanego napięcia (niemal 100-krotnie) oraz wykazały liniową odpowiedź na promieniowanie o dużej intensywności. Możliwość konwersji przenikliwego promieniowania gamma daje możliwość zastosowania układów wielowarstwowych

tandemu scyntylator-ogniwo słoneczne nawet do trzech warstwach.



Rys. 1. Zobrazowanie wpływu promieniowania radiacyjnego na parametry fotowoltaiczne ogniwa krzemowego

Alternatywą do ogniw krzemowych w kontekście układów generujących prąd mogą okazać się ogniwa na bazie GaAs i ich pochodne, mniej podatne na zniszczenie przez wysokoenergetyczne protony i elektrony w odróżnieniu do tradycyjnych ogniw krzemowych. Pod wpływem naświetlania promieniowaniem (wysokoenergetycznymi neutronami i elektronami), obserwuje się spadek sprawności ogniwa GaAs o zaledwie 15-25%. Właśnie ta szczególna właściwość tych warstw półprzewodnikowych oraz możliwość modyfikowania strukturalnie poziomów energetycznych przyczyniła się do wykorzystania głównie tych materiałów do konstrukcji fotowoltaicznej baterii jądrowej. Baterie tego typu składają się ze źródła promieniowania folia z np. ⁶³Ni, ¹⁴⁷Pm lub ¹⁰⁹Cd, warstwy półprzewodnikowej oraz elektrod.

Mimo wielu udanych prób konstrukcji fotowoltaicznej baterii jądrowej, urządzenia te borykają się z wieloma problemami. Najlepsze wyniki zareportowane w literaturze donoszą o uzyskaniu sprawności w granicach 0,0638 – 0,289 % dla architektury ⁶³Ni/ZnS:Cu,Al/InGaP. Mimo uzyskania jednej z najwyższych raportowanych wartości autorzy zwrócili uwagę na problemy związane z nierównomierną generacją promieniowania β [11]. W przypadku wykorzystywania promieniowania X lub γ sprawności baterii uzyskano na poziomie niemal 10-20 krotnie mniejszym. W celu zwiększenia sprawności można zastosować układy warstwowe, mając na względzie, iż promieniowanie takie jak X i γ są bardziej przenikliwe, mogąc zniwelować różnicę sprawności do wartości jedynie 2-krotnie mniejszych [12].

Znaczenie efektu radiacyjnego w organicznych i perowskitowych ogniwach słonecznych

Badania nad wytrzymałością metyloamoniowych perowskitowych ogniw słonecznych na działanie promieniowania α i β wykazały znaczną wytrzymałość tych ogniw na wysoko energetyczne dawki promieniowania, aż do 68 MeV, o dużej intensywności dochodzącej nawet do 10¹³ cząsteczek na cm². Dowodzi to wyższej wytrzymałości niż w przypadku ogniw krzemowych [13].

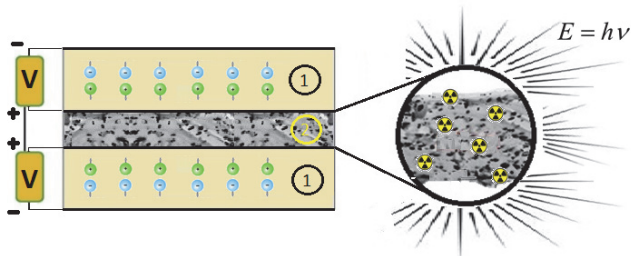
Największym problemem związanym z wytrzymałością ogniw perowskitowych jest możliwy rozkład termiczny lub nieszczelności, szczególnie problematyczne w warunkach rzeczywistych. Badania morfologiczne ogniw perowskitowych, które testowane były w warunkach stratosfery ziemskiej ujawniły, że obecność elektrody wykonanej ze złota może stanowić dodatkową warstwę zabezpieczającą przed rozszczelnieniem ogniwa [14]. Badania odporności ogniw perowskitowych na wzrastającą dawkę promieniowania γ ze 100 na 500 krad pokazują

zdecydowany spadek parametrów fotowoltaicznych podobnie jak dla ogniwa krzemowego, jednak maksymalnie o 25% w przypadku prądu zwarcia. Szczegółowe badania wykazały wystąpienie przejścia fazowego w warstwie perowskitu oraz wystąpienie załócenia podłoża szklanego, które bezpośrednio wpłynęło na obniżenie sprawności [13]. Obserwowany efekt generowania mikroprądów po napromieniowaniu warstwy perowskitu zainspirowały naukowców do zastosowania tych materiałów jako detektorów promieniowania [15] oraz jako elementy scyntylatorów [16].

Ogniwo fotowoltaiczne połączone ze scyntylatorem inkludowanym izotopem promieniotwórczym

Koncepcję nowego typu ogniwa izo-fotowoltaicznego (i-PV) oparto na dwuwarstwowym modelu płasko-powierzchniowym. Schemat koncepcyjny ogniwa przedstawiono na rys. 2.

Ogniwo i-PV składa się z: „1” - w warstwy fotowoltaicznej i „2”- mieszaniny materiału scyntylacyjnego i izotopu promieniotwórczego (patrz tabela 1). W warstwie „2” następuje zamiana energii promieniowania jonizującego na energię świetlną, która następnie konwertowana jest w warstwie „1” na energię elektryczną.



Rys. 2. Schemat konceptu ogniwa izo-fotowoltaicznego (i-PV)

Podsumowanie

Konwersja promieniowania jonizującego na fotony światła wygenerowane w strukturze scyntylatora może być – przy doborze odpowiedniego materiału - wystarczającym źródłem światła do wygenerowania ładunku elektrycznego w ogniwach fotowoltaicznych. Nowe podejście do uzyskania źródła fotonów polegające na objętościowym rozmieszczeniu izotopu promieniotwórczego w strukturze scyntylatora przedstawia racjonalne przesłanki do zwiększenia intensywności świecenia. Opisywane dotychczas w literaturze warstwowe rozmieszczenie modułu „odpowiedzialnego” za źródło światła było mało efektywne i wydajność ogniw izotopowych była niewielka. Zaproponowana w artykule koncepcja nowego typu ogniwa izo-fotowoltaicznego (i-PV) może stanowić przełom w dziedzinie energetyki niekonwencjonalnej. Zero-emisyjność i praktycznie nieograniczona żywotność takich źródeł energii może stanowić znaczące uzupełnienie globalnego miksu energetycznego. Zagrożenie radiacyjne proponowanych ogniw może być z powodzeniem zredukowane poprzez umieszczenie ich w hermetycznych kapsułach, pod warstwą ziemi, która bezwzględnie może pełnić funkcję osłony absorbującej promieniowanie jonizujące.

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] 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
- [2] Wang, Y.; Yin, X.; Liu, W.; et al. Emergence of Uranium as a Distinct Metal Center for Building Intrinsic X-ray Scintillators. *Angew. Chem. Int. Ed.* 57 (2018) 7883–7887
- [3] Dujardin, C.; Auffray, E.; Bourret-Courchesne, et al. Trends, and Advances in Inorganic Scintillators. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 65 (2018) 8
- [4] Gandini, M., Villa, I., Beretta, M., et al. Efficient, fast and reabsorption-free perovskite nanocrystal-based sensitized plastic scintillators, *Nature Nanotechnology*, 15 (2020) 462-468
- [5] Budakovsky, S.V., Galunov, N.Z., Karavaeva, N.L. et al. New effective organic scintillators for fast neutron and short-range radiation detection, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 54 (2007) 2734-2740
- [6] Witkiewicz-Lukaszek S., Gorbenko V., Zorenko T., et al. New types of composite scintillators based on the single crystalline films and crystals of $Gd_3(Al,Ga)_5O_{12}:Ce$ mixed garnets, *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 264 (2021) 114909
- [7] Browne, E.; Firestone, R.B. Table of Radioactive Isotopes; Shirley, V.S., Ed.; Wiley Interscience Publication: New York, NY, USA, 1986
- [8] Jayawardena K.D.G.I., Rozanski L.J., Mills C.A., Beliatz M.J., Nisny N.A., Silva S.R.P., Inorganics-in-organics: recent developments and outlook for 4G polymer solar cells, *Nanoscale*, 5 (2013) 8411–8427.
- [9] Tobnaghi, D.M., Rahnamaei, A., Vajdi, M. Experimental Study of Gamma Radiation Effects on the Electrical Characteristics of Silicon Solar Cells. *Int. J. Electrochem. Sci.* 9 (2014) 2824–2831
- [10] Stepowicz, W. Influence of Ionization Radiation on Semiconductor Devices and Integrated Circuits. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni* 75 (2012)
- [11] Russo, J.; Litz, M.; Ray, I.I.W.; Smith, B.; Moyers, R. A radioluminescent nuclear battery using volumetric configuration: ^{63}Ni solution/ $ZnS:Cu,Al/InGaP$. *Appl. Radiat. Isot.* 130 (2017) 66–74
- [12] Xu, Z.; Jin, Z.; Tang, X.; Liu, Y.; Guo, X.; Peng, C.; Wang, H. Designing performance enhanced nuclear battery based on the $Cd-109$ radioactive source. *Int. J. Energy Res.* 44 (2020) 508–517
- [13] Yang, K., Huang, K., Li, X., Zheng, S., Hou, P., Wang, J., Guo, H., Song, H., Li, B., Li, H., Liu, B., Zhong, X., Yang, J. Radiation tolerance of perovskite solar cells under gamma ray. *Organic Electronics* 71 (2019) 79–84.
- [14] Cardinaletti, I., Vangerven, T., Nagels, S.; Cornelissen, R., Schreurs, D., Hruby, J.; Vodnik, J., Devisscher, D., Kesters, J., D’Haen, J., et al. Organic and perovskite solar cells for space applications. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 182 (2018) 121–127
- [15] Tan, R., Dryzhakov, B., Charest J., Hu, B., Ahmadi, M., Lukosi, E. Improved Radiation Sensing with Methylammonium Lead Tribromide Perovskite Semiconductors. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, A 986 (2021) 164710.
- [16] Wu, H., Ge, Y., Niu, G., Tang, J. Metal Halide Perovskites for X-Ray Detection and Imaging. *Matter*. 4 (2021) 144-163.