

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

Streszczenie. W artykule przedstawiono aktualny stan wiedzy na temat scyntylatorów nowej generacji w celu inicjowania światła fotonicznego wykorzystywanego do konwersji promieniowania jonizującego na potencjał elektryczny w ogniwach fotowoltaicznych. Scyntylacyjne źródło światła może generować ładunek elektryczny w ogniwach fotowoltaicznych. Odpowiednie zestawienie elementów nowego typu ogniwa izo-fotowoltaicznego (i-PV) pozwala na uzyskanie energii elektrycznej z praktycznie niewyczerpalnego źródła – jakim jest promieniowanie jonizujące. Zaproponowana koncepcja może być alternatywą na drodze globalnej transformacji energetycznej.

Abstract. The article presents the current state of knowledge on new-generation scintillators for initiating photonic light used to convert ionizing radiation into the electrical potential in photovoltaic cells. A scintillation light source can generate an electrical charge in photovoltaic cells. Appropriate alignment of the elements of a new type of iso-photovoltaic (i-PV) cell allows obtaining electricity from a practically inexhaustible source - which is ionizing radiation. The proposed concept can be an alternative on the way to global energy transformation. **(New generation scintillators for the conversion of light photons generated by radiation-induced photoluminescence into electricity in iso-photovoltaic cells as an element of strengthening the energy security system).**

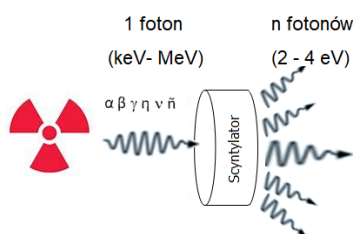
Słowa kluczowe: ogniwa fotowoltaiczne; scyntylatory; promieniowanie jonizujące, bateria jądrowa; bezpieczeństwo energetyczne.
Keywords: photovoltaic cells; scintillators; ionizing radiation, nuclear battery; energetic safety.

Wstęp

Zastosowanie promieniowania jonizującego jako źródła „niewyczerpalnej” energii dla materiałów scyntylacyjnych – zamieniających je na fotony światła - stanowić może realną alternatywę, jako źródło światła dla paneli izo-fotowoltaicznych (i-PV). Literatura przedmiotu pozwala na zidentyfikowanie wielu potencjalnie możliwych rozwiązań proponowanych przez różnych badaczy [1-3].

W warunkach braku lub znacznego ograniczenia światła słonecznego (noc lub w bardzo pochmurne dni) ogniwa PV nie wytwarzają energii elektrycznej.

Kreatywne (alternatywne) podejście do szeroko rozumianego bezpieczeństwa energetycznego wymaga badań i poszukiwań w zakresie optymalizacji procesu generowania „sztucznego” światła (energii świetlnej). Jak wykazano w [4] zjawiska: fluorescencji i fosforescencji wykazują niski potencjał aplikacyjny w rozpatrywanym rozwiązaniu technologicznym. Badania wstępne i analiza doniesień literaturowych [5-7] pozwalają na wyłonienie luminescencji radiacyjnej (scyntytacji) jako potencjalnego źródła światła dla ogniw i-PV. Mechanizm scyntytacji przedstawiono graficznie na rys. 1.



Rys. 1. Schemat konwersji energii promieniowania jonizującego na fotony światła w materiale scyntylacyjnym

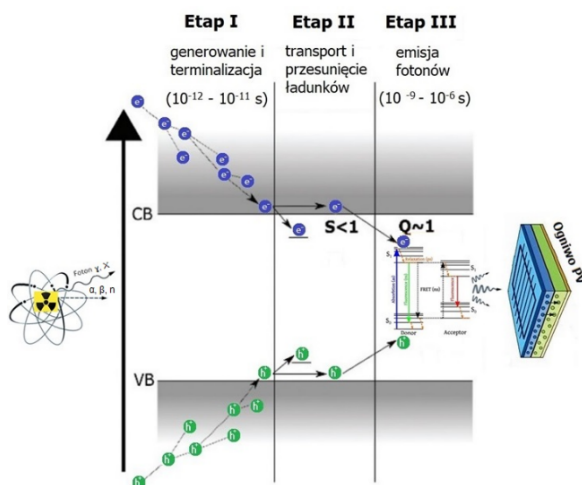
Scyntytlacja i scyntylatory

W objętości materiału scyntylacyjnego fotony (γ , X) lub cząstka (α , β , n) w wyniku:

- efektu fotoelektrycznego;
- zjawiska Comptona;
- wytworzenia par (pozyton – negaton);
- zderzeń koherentnych (sprężystych), tzn. gdy energia fotonu lub cząstki nie zmienia się - zjawisko Delbruka i niekoherentnych (niesprężystych) - gdy wywołują oscylacje energetyczne;
- wzbudzenia promieniowania hamowania;
- anihilacji cząstek β , etc.

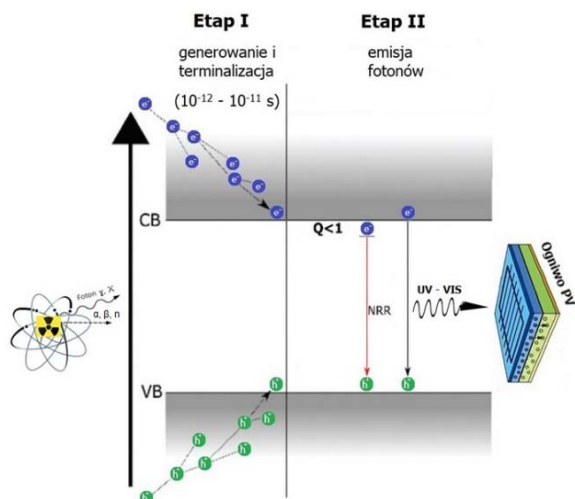
dokonują konwersji energii jonizacyjnej na fotony światła.

Na rys. 2 przedstawiono proces generowania scyntytacji (efemerycznych rozbłyśków światła), który można podzielić na trzy następujące etapy [8]: (i) pobudzenie molekuly przez foton lub padającą cząstkę naładowaną (czas pobudzenia 10^{-12} - 10^{-10} s), (ii) migracje energii wzbudzenia (10^{-9} s), (iii) właściwą luminescencję (10^{-8} - 10^{-9} s).



Rys. 2. Schemat procesu konwersji promieniowania jonizującego na scyntytlację wzbudzające ogniwo PV. Opracowanie własne na podstawie [8]

Procesowi temu może również towarzyszyć potencjalnie użyteczne generowanie promieniowania UV-VIS (rys. 3).



Rys. 3. Schemat procesu generowania promieniowania UV-VIS. Opracowanie własne na podstawie [8]

W tabeli 1 zestawiono kluczowe parametry luminescencyjne - istotne dla działania ogniw izo-fotowoltaicznych [9-13].

Tabela 1. Parametry wybranych scyntylatorów o najwyższym potencjale aplikacyjnym. Opracowanie własne na podstawie [9-13]

Scyntylator	Wydajność świetlna [ph/MeV]	Czas luminescencji [ns]	Poświata [ms]	Poz. Lit.
SPF 32	56000	440	0,0025	[9]
NaI:TI	43000	230	0,0023	[10]
CsI:TI	60000	1000	0,001	[11]
Eu:SrI ₂	74000	400	0,082	[12]
BGO	85000	380	0,00002	[9]
Gd ₂ O ₂ S:Tb	60000	3000	0,006	[13]

Wydajność świetlna L_R (*scintillation yield lub relative light yield*) definiowana jest jako:

$$L_R = \frac{N_{ph}}{E_{(\alpha,\beta,\gamma)}} \left[\text{ph} / eV \right]$$

gdzie: N_{ph} – liczba fotonów, $E_{(\alpha,\beta,\gamma)}$ – energia promieniowania.

Nie mniej ważnym parametrem jest również poświata (*afterglow*), będąca metatrwałym efektem pułpowania elektronów w paśmie zabronionym. Cecha ta jest pożądana ze względu na dodatkową fotoluminescencję wtórną o czasie ekspozycji rzędu ms.

Istotnym aspektem jest również stabilność temperaturowa scyntylatorów. W zależności od specyfiki zastosowań mogą one pracować w bardzo szerokim zakresie temperatur od

-20°C do nawet 60°C [14].

Wongwan i wsp. [14] zaproponowali nowatorskie połączenie szkła Gd₂MoB₂O₉:CeF₃ domieszkowanego ZnO:BaO: B₂O₃ do zastosowań w materiałach scyntylacyjnych. Obserwowano w temperaturze pokojowej nakładanie się widm wzbudzenia i emisji w zakresie od 300 do 450 nm. Jako materiał scyntylacyjny badane materiały wykazywały interesujące właściwości do zastosowania w ogniwach i-PV.

Niestety duża część scyntylatorów nieorganicznych wykazuje niekorzystną cechę właściwości fizycznych, jaką jest wysoka higroskopijność - powodująca drastyczny wzrost współczynnika samoabsorbpcji światła. Zjawisko to powoduje zmniejszenie wydajności luminescencji, co

eliminuje możliwość generowania ładunków elektrycznych przez ogniwo PV. Zmętnienie struktury materiału pod wpływem wody stanowi poważną barierę technologiczną w przyszłych zastosowaniach przemysłowych.

Ogniwa barwnikowe

Barwnikowe ogniwo słoneczne (ang. *dye-sensitized solar cel*, DSSC) to rodzaj organicznego ogniw słonecznego (trzecia generacja ogniw) składającego się z fotoanody na bazie mezoporowatego tlenku tytanu (IV) impregnowanego barwnikiem (fotosensybilizatorem), elektrolitu redoks I³⁻/I⁻ i platynowej przeciwelektrody. Zasadę działania barwnikowego ogniw słonecznego można opisać w czterech etapach:

- w etapie pierwszym, padające fotony promieniowania słonecznego są absorbowane przez fotosensybilizator, który powoduje, że elektrony w barwniku przechodzą ze stanu podstawowego do stanu wzbudzonego. Zakres absorpcji promieniowania barwnika mieści się w zakresie 400 - 700 nm, co odpowiada około 1,72 eV energii;
- w etapie drugim, wzbudzone elektrony przechodzą do pasma przewodnictwa nanoporowatej elektrody TiO₂. W rezultacie barwnik ulega utlenieniu;
- w etapie trzecim zachodzi transport elektronów tlenku tytanu (IV) do elektrody, trafiając do odbiornika;
- w etapie czwartym elektrony przechodzą z przeciwelektrody I³⁻ do I⁻, umożliwiając powrót barwnika do stanu podstawowego, poprzez przyjęcia elektronów z mediatora redoks migrującego w elektrolicie [15].

WITI posiada doświadczenie w opracowaniu nowych wydajnych elektrolitów żelowych dla zastosowań w ogniwach DSSC. We współpracy z firmą ML System skonstruowano ogniwo barwnikowe z elektrolitem żelowym uzyskując PCE = 5,07%, porównywalną z komercyjnie dostępnymi ogniwami barwnikowymi, ale z elektrolitem ciekłym. Zaletą zastosowania w ogniwie DSSC elektrolitu żelowego było zwiększenie trwałości ogniw powyżej 110 dni z wysokim poziomem sprawności. Szczegóły dotyczące konstrukcji i charakterystyki ogniw DSSC z elektrolitem żelowym można znaleźć w [16].

Ogniwa DSSC z luminoforem jako przykład ogniw na każdą pogodę

Niestety podobnie jak wszystkie ogniwa słoneczne, działanie ogniw barwnikowych uzależnione jest od dostępności promieniowania słonecznego. Rozwiązanie problemu czasowego wykorzystania barwnikowych ogniw słonecznych, które umożliwiło funkcjonowanie ogniw w warunkach zacinienia lub w nocy zaproponowała grupa profesora Tanga [17]. Idea polega na inkorporacji dodatkowego składnika – luminoforu, w warstwę mezoporowatą TiO₂. Było to możliwe z uwagi na fakt, przepuszczalności promieniowania słonecznego do warstwy nieorganicznej poprzez światło-przepuszczalny elektrolit. Luminofor pełni rolę magazynu fotonów, poprzez absorpcję promieniowania słonecznego podczas ekspozycji słonecznych i poprzez efekt fosforescencji. Autorzy [17] przedstawili działanie luminoforów o różnej barwie: fioletowej, niebieskiej, cyjanowej, zielonej, czerwonej lub białej, wytworzonych poprzez dobór odpowiednich kompozycji domieszkowanych tlenków z bloku metali przejściowych. Zaobserwowano, iż zastosowanie dodatkowej warstwy luminoforu pomiędzy warstwą barwnika i elektrodą w ogniwie DSSC poprawia proces przenoszenia ładunku i przyczynia się do otrzymania sprawności ogniw PCE ~ 10%. Niestety zastosowanie luminoforu w ogniwie DSSC obniża dwukrotnie wartości napięcia obwodu otwartego oraz obniża o mniej niż 10% współczynnika wypełnienia w porównaniu z ogniwem DSSC bez luminoforu.

Zasada działania barwnikowego ogniwa słonecznego wspomaganego luminoforem opiera się na doborze odpowiedniego materiału. Luminoforami w takich przypadkach są związki nieorganiczne, głównie tlenki, które stanowią tzw. materiał gospodarza, aktywatora w postaci jonów metali z bloku aktywności i lantanowców [18]. Oczywiście ze względu na zakres absorpcji określonego barwnika zastosowanego w ogniwie DSSC, zakres absorpcji dobiera się w taki sposób aby pochłaniał jak największy zakres promieniowania niewykorzystany przez barwnik w ogniwie. Poza parametrem jakim jest długość fali wzbudzenia, istotne są długość fali fosforescencji oraz czas jej trwania. W celu jak najlepszej optymalizacji uzysku energetycznego procesu generowania energii elektrycznej z fosforescencji istotnym jest, aby materiał luminoforu był zdolny do zaabsorbowania możliwie jak największej ilości dawki promieniowania słonecznego, oraz aby proces fosforescencji trwał możliwie jak najdłużej.

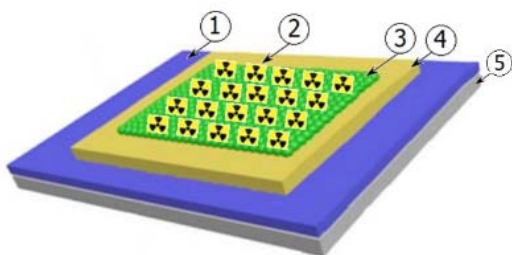
Ta zasada ma jednak zastosowanie w przypadku gdy ekspozycja na zewnątrz źródło promieniowania (słońce) jest ograniczona czasowo, wówczas etap magazynowania energii i okres wydzielania promieniowania wtórnego przez luminofor jest stosunkowo długi.

W przypadku koncepcji wykorzystania scyntylatora mówimy o scyntylacji, czyli całkiem innym procesie generowania wtórnego fotonów o określonej energii pod wpływem promieniowania radiacyjnego. W tym aspekcie istotnym jest, aby proces generowania zachodził w scyntylatorze jak najszybciej i na jak najwyższym poziomie konwersji, gdyż zakłada się, iż ekspozycja na promieniowanie radiacyjne będzie ciągła. Zatem czas pomiędzy absorpcją, rekonwersją i wydzieleniem fotonu o odpowiedniej energii powinny zachodzić spontanicznie i jak najszybciej, gdyż będzie to czynnik limitujący sprawność ogniwa słonecznego.

Scyntylator-ogniwo słoneczne: nowa koncepcja oraz wstępne badania

Aktualne informacje odnośnie konwersji fotonów światła wygenerowanego poprzez wzbudzoną radiacyjnie fotoluminescencję na energię elektryczną w ogniwach fotowoltaicznych oraz analizę obecnych trendów w zastosowaniu scyntylatorów w ogniwach słonecznych różnych generacji można znaleźć w naszych poprzednich pracach [19, 20].

W niniejszym artykule zaproponowano nową ogólną koncepcję budowy ogniwa i-PV przedstawioną na rys. 4. Ogniwo składa się z pięciu warstw: izotopu promieniotwórczego, nośnika immobilizującego izotop, światłowodu, scyntylatora (SPF-32) i ogniwa fotowoltaicznego.



Rys. 4 Schematyczna architektura nowej koncepcji ogniwa i-PV, gdzie: 1 – światłowod, 2 – izotop, 3 – nośnik immobilizujący izotop, 4 – scyntylator, 5 – ogniwo PV

Ze względu na ochronę radiologiczną (zbędne generowanie odpadów promieniotwórczych) we wstępnej fazie badań zaniechano immobilizacji izotopów na

powierzchni scyntylatora. Na czas eksperymentu źródło Cs-137 zbliżano do powierzchni scyntylatora w celu zainicjowania fotoluminescencji. W wyniku przeprowadzonych badań zweryfikowano słuszność założeń teoretycznych popartych analizą doniesień literaturowych. Potencjał elektryczny zmierzony na zaciskach ogniwa i-PV fluktuował w zależności od ilości promieniowania docierającego do scyntylatora. Wygenerowane światło pobudzało ogniwo do pracy – dając w efekcie zmienny potencjał elektryczny. Badania wstępne wykazały, że z chwilą zbliżania źródła promieniowania do ogniwa i-PV zarejestrowano mierzalną różnicę potencjału, co świadczy o wygenerowaniu w ogniwie ładunku elektrycznego [21].

Na zakończenie przedstawiamy dwa ciekawe przykłady połączenia efektu luminescencji i fotowoltaicznego:

1. Ogniwo tandemowe o architekturze ITO/TiOx/PCDTBT:PC70BM/(PEDOT:PSS):alkohol izopropylowy/PEDOT:PSS/Super Yellow/Ca/Al wykazywało sprawność konwersji światła słonecznego na energię elektryczną PCE = 3,1 % oraz luminancję 8000 cd/m². Warstwę aktywną w ogniwie stanowiła mieszanina donorowo-akceptorowa na bazie polimeru PCDTBT (*poly[N-9'-heptadecanyl-2,7-carbazole-alt-5,5-(4',7'-di-2-thienyl-2',1',3'-benzothiadiazole)]*) i pochodnej fullerenu PC70BM (*[6,6]-Phenyl-C71-butyric acid methyl ester*). Kopolimer PEDOT:PSS (*poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate*) zastosowano jako domieszkę do alkoholu izopropylowego lub jako warstwę transportującą ładunki dodatnie. Związek o nazwie Super yellow zastosowano jako materiał luminescencyjny w ogniwie i był nim polimer PPV (*poly(1,4-phenylenevinylene)*) o dużej wydajności luminescencyjnej. Funkcjonalność tego urządzenia jest podwójna, jako ogniwo słoneczne lub sterowana dioda luminescencyjna i może być zastosowane do produkcji parasoli plażowych, elektroniki zintegrowanej z tekstyliami (świejących T-shirtów gromadzących energię słoneczną np. do zasilania telefonu komórkowego czy przenośnego radia) [22].

2. Panele słoneczne AuREUS (Borealis Solar Window i Astralis Solar Wall) wykorzystujące promienie ultrafioletowe UV słońca, przenikające przez chmury, poprzez zastosowanie cząsteczek luminescencyjnych z odpadów owocowych i warzywnych, które zamieniają UV w światło widzialne wykorzystywane następnie do generowania energii. Wynalazek opracował w roku 2022 Carveya Ehrena Maigue, student Uniwersytetu Mapua na Filipinach. Wytworzony i zainstalowany w oknie mieszkania prototyp panelu słonecznego o wymiarach ok 90 × 60 cm generował ilość energii elektrycznej wystarczającą do naładowania dwóch telefonów dziennie.

Podsumowanie

Analiza najnowszych doniesień literaturowych skłania do postawienia tezy o wysokim potencjale aplikacyjnym koncepcyjnego ogniwa i-PV opisanego w artykule.

Materiał scyntylacyjny dla ogniwa i-PV powinien charakteryzować się następującymi parametrami:

- Posiadać dużą wydajność świetlną (dużą efektywność wykorzystania energii promieniowania jonizującego);
- Scyntylacje o długimi czasie luminescencji;
- Długość fali emitowanej zgodną z maksimum czułości fotoogniwa,
- Niską higroskopijność,
- Wykazywać przezroczystość dla własnego światła (minimalne straty na samoabsorbcję),
- Efektywne zbieranie odbitego światła wewnętrznego (duży współczynnik załamania).

Kluczowym dla zrealizowania idei przewodniej pracy jest także dobór odpowiednich ogniwa słonecznych. Pierwsze

próby przeprowadzono z wykorzystaniem ogniw krzemowych, aczkolwiek, perspektywicznymi ze względu na możliwość absorbowania światła o bardzo szerokim zakresie długości fali wydają się być ogniwa perowskitowe oraz ogniwa na bazie arsenku galu wykazujące szerokie pasmo wzbronione. Ogniwa barwnikowe także są atrakcyjną opcją biorąc pod uwagę ich małą wrażliwość na kąt padania promieniowania słonecznego i możliwość działania efektywnie zarówno pod wpływem promieniowania odbitego jak i załamane oraz przy częściowym zaciemieniu. Wśród ostatnich trendów rozwoju fotowoltaiki interesujące wydają się ogniwa hybrydowe typu: perowskitowo-krzemowe czy barwnikowo-krzemowe.

Należy wspomnieć także o znaczeniu dla efektywnego działania ogniw słonecznych w szerokim zakresie spektrum światła słonecznego o modyfikacji zarówno materiałów (absorberów organicznych i nieorganicznych w myśl zasad bezpieczeństwa ekologicznego) jak i architektury ogniwa (ogniwa tandemowe czy potrójne).

Podsumowując, synergia fotowoltaiki ze scyntyllacją jest możliwa i wydaje się, pożądana na kanwie bezpieczeństwa energetycznego XXI wieku. Ochrona radiologiczna związana z eksploatacją ogniw i-PV wymagała będzie zastosowania odpowiednich osłon absorbujących promieniowanie jonizujące. Dyslokacja w gruncie, na odpowiedniej głębokości, stanowić powinna adekwatną osłonę biologiczną.

*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] Li, Y.; Gecevicius, M.; Qiu, J. Long persistent phosphors-from fundamentals to applications. *Chem. Soc. Rev.* 2016, 45, 2090
- [2] Trojan-Piegza, J.; Niittykoski, J.; Hölsä, J.; Zych, E. Thermoluminescence and Kinetics of Persistent Luminescence of Vacuum-Sintered Tb³⁺-Doped and Tb³⁺,Ca²⁺-Codoped Lu₂O₃ Materials. *Chem. Mater.* 2008, 20, 2252–2266
- [3] Van den Eeckhout, K.; Smet, P.F.; Poelman, Luminescence in Eu²⁺-Doped Compounds: A Review. *Materials* 2010, 3, 2536
- [4] Bogdanowicz K. A. Bi-Triggering Energy Harvesters: Is It Possible to Generate Energy in Solar Panel under Any Conditions?, *Energies* 14 (2021) 5796
- [5] Mann, S. E., Schooneveld, E. M., Rhodes, Timing properties of radioluminescence in nanoparticle ZnS:Ag scintillators. *Optical Materials*: 2023, X, 17
- [6] Miyazaki, K., Nakauchi, D., Kato, T., Development of TL-doped KI single crystal scintillators. *Radiation Physics and Chemistry*, 2023, 207
- [7] Nakauchi, D., Kato, T., Kawaguchi, Comparative studies on scintillation properties of Eu-doped CaAl₂O₄, SrAl₂O₄, and BaAl₂O₄ crystals, *Japanese Journal of Applied Physics*, 2023, vol. 62, no. 1
- [8] Moseley, O. D. I., Doherty, T. A. S., Parmee, R., Anaya, M., Stranks, S. D., Halide perovskites scintillators: unique promise and current limitations, *J. Mater. Chem. C*, 2021, 9, pp. 11588–11604
- [9] Gonzalo, A., Nogales, E., Méndez, B., Piqueras, J., Influence of growth temperature on the morphology and luminescence of Ga₂O₃:Mn nanowires, *Phys. Status Solidi Appl. Mater. Sci.*, vol. 211, no. 2, pp. 494–497
- [9] Nguyen L. Q., Tran H. M., Benin A. I., Organic glass scintillator formulations and mold development towards scalable and cast-in-place pixelated fabrications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2022, 1036 (166835)
- [10] Swiderski L., Moszynski M., Syntfeld-Kazuch A., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, 2014, 749, 68–73
- [11] Valentine J. D., Moses W. W., Derenzo S. E., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, 1993, 325, 147–157
- [12] Yanagida, T., Kato, T., Nakauchi, (2023). Fundamental aspects, recent progress and future prospects of inorganic scintillators. *Japanese Journal of Applied Physics*, 62(1)
- [13] Lecoq P., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, 2016, 809, 130–139
- [14] Wongwan W., Yasaka P., Boonin K., A novel amalgamation of Gd₂MoB₂O₉:CeF₃ phosphor with ZnO: BaO: B₂O₃ glass using microwave synthesis for scintillation material applications; 2023, *Radiation Physics and Chemistry*, 207
- [15] Sharma K., Sharma V., Sharma S. S., Dye-Sensitized Solar Cells: Fundamentals and Current Status. *Nanoscale Res Lett.* 2018, 13, 381
- [16] Bogdanowicz K. A., Augustowski D., Dziedzic J., Kwaśnicki P., Malej W., Iwan A. Preparation and Characterization of Novel Polymer-Based Gel Electrolyte for Dye-Sensitized Solar Cells Based on poly(vinylidene fluoride-cohexafluoropropylene) and poly(acrylonitrile-cobutadiene) or poly(dimethylsiloxane) bis(3-aminopropyl) Copolymers. *Materials* 2020, 13, 2721
- [17] Tang Q., Wang J., He B., Yang P. Can dye-sensitized solar cells generate electricity in the dark? *Nano Energy* 2017, 33, 266–271
- [18] Li, Y.; Gecevicius, M.; Qiu, J. Long persistent phosphors-from fundamentals to applications. *Chem. Soc. Rev.* 2016, 45, 2090–2136
- [19] 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* 2021, 14, 6186
- [20] Pellowski W., Iwan A., Bogdanowicz K. A. Konwersja fotonów światła wygenerowanego poprzez wzbudzoną radiacyjnie fotoluminescencję na energię elektryczną w ogniwach izofotowoltaicznych (i-PV) nowym wyzwaniem dla bezpieczeństwa energetycznego, *Przegląd elektrotechniczny R. 98 NR 9/2022* p. 170
- [21] Pellowski W., Bogdanowicz K.A., Iwan A. Nowe ogniwa i-PV, zgłoszenie patentowe w przygotowaniu, 2023.
- [22] Kang H., Kim G., Hwang I-W., Kim Y., Lee K. C., Park S. H., Lee K. High-performance polymer tandem devices combining solar cell and light-emitting diode. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 2012, 107, 148-153