

doi:10.15199/48.2021.04.15

## Możliwości zastąpienia wybranych łączników przez półprzewodnikowe łączniki fotokonduktancyjne

**Streszczenie.** Artykuł ten przedstawia analizę możliwości zastąpienia wybranych, obecnie stosowanych w systemach zasilania i dystrybucji energii, łączników mechanicznych i elektrycznych półprzewodnikowym łącznikiem fotokonduktancyjnym (PCSS). W tym celu dokonano przeglądu literatury obecnie osiągniętych parametrów przez łączniki PCSS, a także zaprezentowano otrzymane wyniki badań prototypu łącznika PCSS zbudowanego na podstawie półizolującego (SI) fosorku galu (GaP). Przedstawiono parametry, zastosowanie i zasadę działania iskiernika i wysokonapięciowego łącznika elektrycznego. Dokonano analizy możliwości zastąpienia tych łączników przez łącznik PCSS, a także możliwość zastąpienia ich przez przedstawiony łącznik PCSS wykonany z fosorku galu.

**Abstract.** This article presents an analysis of the possibility of replacing selected, currently used in power systems, mechanical and electrical switches with a photoconductive semiconductor switch (PCSS). For this purpose, the literature review of the parameters currently achieved by PCSS switches was carried out, and the obtained results of research on the PCSS switch prototype built on the basis of semi-insulating (SI) gallium phosphide (GaP) were presented. The parameters, application and principle of operation of the spark gap and power switch are presented. The possibility of replacing these switches by a PCSS switch was analyzed, as well as the possibility of replacing them with the presented PCSS switch made of gallium phosphide. (**Possibilities of replacing selected switches with photoconductive semiconductor switches.**)

**Słowa kluczowe:** urządzenia elektryczne, łącznik elektryczny, półprzewodnikowy łącznik fotokonduktancyjny, fosforek galu.

**Keywords:** electronic devices, electric switch, photoconductive semiconductor switch, gallium phosphide.

### Wstęp

Analiza literatury wykazała, że w ostatnich latach obserwuje się wzrost zainteresowania zastosowaniem przyrządów optycznych w systemach cywilnych i wojskowych [1 – 5]. Powodem tego są posiadane przez te urządzenia zalety w stosunku do tradycyjnych rozwiązań, takie jak łatwość sterowania i pewność momentu wyzwolenia oraz galwaniczne rozdzielanie układów pracy i sterowania. Cechy te są szczególnie pożądane w systemach zasilania i zasilania impulsowego, których celem jest dostarczanie wysokiej mocy szczytowej, o wartości rzędu megawatów w krótkich impulsach czasowych, rzędu nanosekund z częstotliwością powtarzania na poziomie 1 kHz. Systemy cywilne obejmują generatory impulsów wysokiego napięcia, takie jak generator Marxa, gdzie można je wykorzystać jako łatwiejsze do kontrolowania i bardziej niezawodne wyzwalacze układu. Znajdują one również zastosowanie w systemach elektroenergetycznych, zwłaszcza w dystrybucji i przesyłce energii elektrycznej. Gdzie ich zadaniem jest poprawa niezawodności, zwiększenie wydajności oraz zmniejszenie kosztów konserwacji i eksploatacji tych systemów. Zastosowania wojskowe obejmują anteny wysokiej częstotliwości, broń ukierunkowaną, impulsowe źródła mikrofalowe i lasery impulsowe dużej mocy, gdzie są używane w roli wyzwalacza układu. Jednym z urządzeń optycznych spełniających wymagania tych systemów jest półprzewodnikowy łącznik fotokonduktancyjny (ang. Photoconductive Semiconductors Switch).

PCSS jest łącznikiem elektrycznym, a jego zasada działania opiera się na zjawisku fotoprzewodnictwa. Pobudzenie materiału półprzewodnikowego wiązką światła generuje pary elektron-dziura, które uczestniczą w procesie przewodzenia fotoprądu. Fotony w wiązce muszą mieć energię większą lub równą szerokości przerwy wzbronionej półprzewodnika ( $h\nu \geq E_g$ ), aby bezpośrednio utworzyć nośniki swobodne ładunku. W przypadku energii fotonu mniejszej niż szerokość pasma wzbronionego ( $h\nu < E_g$ ), nośniki ładunku są generowane przez centra defektowe znajdujące się w strukturze materiału [1]. Absorpcja energii fotonu zmienia konduktywność materiału półprzewodnikowego o kilka rzędów wielkości [3] w czasie rzędu nanosekund lub pikosekund [4] z częstotliwościami powtarzania rzędu 1 kHz [6, 7]. W stanie blokującym

łączniki PCSS mogą pracować przy napięciach do 100 kV, natomiast w stanie przewodzenia przepływający prąd może dochodzić do 1 kA [6, 7], co spełnia wymagania wcześniej omawianych układów.

Charakterystyka łącznika PCSS zależy od zastosowanego materiału półprzewodnikowego i jego struktury defektowej [8, 9]. Jedną z metod stosowanych do badań głębokich centrów defektowych w materiałach półprzewodnikowych jest wysokorozdzielcza niestacjonarna spektroskopia fotonowa (ang. High Resolution Photoinduced Transient Spectroscopy), w której parametry centrów defektowych można uzyskać między innymi za pomocą procedury korelacyjnej lub Laplace'a [5, 10]. Głównymi materiałami wykorzystywanymi do produkcji półprzewodnikowych łączników fotokonduktancyjnych są InP, GaAs, 6H-SiC, 4H-SiC. Natomiast materiałem najczęściej wykorzystywanym z nich jest półizolujący arsenek galu (SI GaAs).

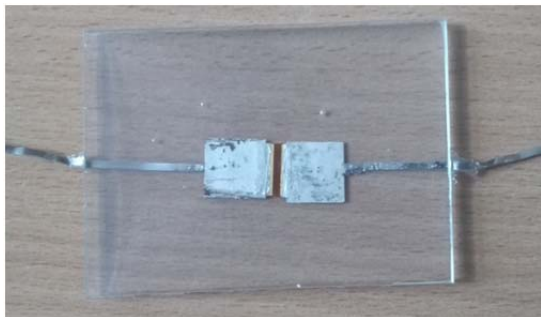
Z analizy literatury wynika, że łącznik PCSS wykonany z GaAs jest w stanie blokować napięcie do 40 kV [7]. Natomiast w stanie przewodzenia prąd może osiągać wartości rzędu 400 A [6]. Inne wymienione materiały półprzewodnikowe posiadają szerszą przerwę wzbronioną, co teoretycznie powinno pozwolić na uzyskanie wyższych wartości napięcia w stanie blokującym oraz na przewodzenie wyższych wartości prądu niż w przypadku łączników wykonanych z SI GaAs. Ostatnie badania wykazały eksperymentalnie, że parametry łączników PCSS wykonanych z SI GaP, SI 6H-SiC, SI 4H-SiC i SI GaN są lepsze w porównaniu z łącznikami wykonanymi z SI GaAs [4, 11, 12].

Zespoły badawcze z Wojskowej Akademii Technicznej i Sieci Badawczej Łukasiewicza – Instytutu Technologii Materiałów Elektronicznych podjęły współpracę w celu skonstruowania łącznika PCSS wykonanego z fosorku galu. W artykule dokonano analizy literatury w celu oceny możliwości zastosowania łącznika PCSS w miejsce powszechnie stosowanych łączników mechanicznych i elektrycznych. W tym celu porównano parametry wybranych łączników z parametrami łącznika PCSS opisanymi w dostępnej literaturze oraz wynikami pomiarów próbki łącznika wykonanego z fosorku galu, skonstruowanego w ramach badań wstępnych w celu produkcji łączników PCSS. Głównymi aspektami jakie brano

pod uwagę były wartości napięcia pracy, przewodzonego prądu, częstotliwość przełączania i łatwość sterowania systemem.

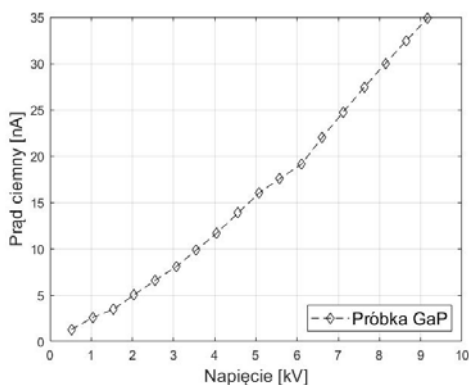
### Badany łącznik PCSS

Przeprowadzone badania są kontynuacją badań opisanych w [13, 14]. W badaniach zastosowano łącznik testowy wykonany z półprzewodzących monokryształów fosorku galu (SI GaP), skonstruowanych w geometrii bocznej. Konstrukcje łączników PCSS zostały dokładnie omówione w [15], natomiast na rysunku 1 przedstawiono wygląd próbki łącznika użytego w badaniach.



Rys.1. Zdjęcie przygotowanej próbki łącznika PCSS.

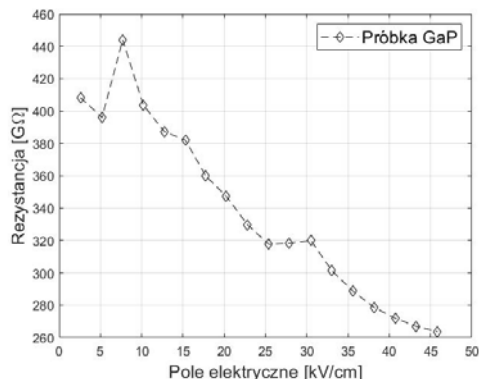
Płytki SI GaP miały postać chipów o powierzchni  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  i grubości 0,5 mm. Dwa styki omowe zostały wykonane nakładając pastę na bazie złota na wypolerowaną powierzchnię materiału SI GaP. Odległość między stykami, zwana przerwą łącznika, wynosiła 2 mm. Do każdego styku omowego przymocowano elektrodę z miedzi elektrolitycznej. Przed zamocowaniem elektrod powierzchnię materiału oczyszczono mechanicznie i chemicznie. Elektrody wykonano w postaci pasków o grubości 0,3 mm, szerokości 10 mm i długości 15 mm, do których dołączono paski wykonane o grubości 0,2 mm, szerokości 2 mm i długości 100 mm, umożliwiające podłączeni próbki do układu pomiarowego. Zarówno elektrody, jak i paski zostały pokryte warstwą srebra. Aby zapewnić ochronę przed czynnikami zewnętrznymi i zmniejszyć szybkość rekombinacji powierzchniowej nadmiarowych nośników ładunku, po podłączeniu elektrod, łącznik został pokryty warstwą  $\text{SiO}_2$  o grubości 200 nm, a następnie zatopiony w przezroczystej żywicy.



Rys.2. Charakterystyka prądowo-napięciowa badanego łącznika PCSS wykonanego z Si GaP. Pomiar dla temperatury 300 K.

Do wykonania pomiarów w stanie blokującym wykorzystano miernik METREL MI 3210 TeraOhm XA jako źródło napięcia stałego oraz jako miernik prądu i rezystancji. Umożliwia on pomiary prądów od 0,01 nA do 5 mA przy napięciu zasilania w zakresie od 50 V do 10 kV. Począwszy od napięcia 500 V z krokiem 500 V wykonano

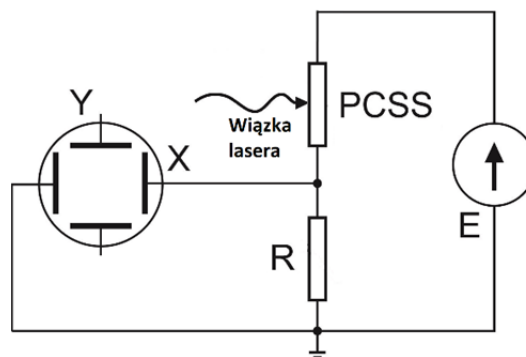
serię trzech pomiarów dla każdej wartości napięcia do 9 kV. Otrzymane wyniki zależności prądu ciemnego od napięcia przedstawiono na rysunku 2. Natomiast zależności rezystancji od natężenia pola elektrycznego na rysunku 3.



Rys.3. Zależność rezystancji w funkcji natężenia pola elektrycznego obszaru aktywnego półprzewodnika, otrzymana na podstawie zmierzonej zależności prądowo-napięciowej badanego łącznika PCSS. Pomiar wykonano dla temperatury 300 K.

Analizując charakterystykę przedstawioną na rysunku 3 można zauważyć, że w całym zmierzonym zakresie napięć uzyskano liniowy przebieg charakterystyki prądu ciemnego dla badanego łącznika PCSS. Na rysunku 4 w zakresie napięć od 0,52 kV do 2,04 kV, odpowiadający natężeniu pola od 2,58 kV/cm do 10,2 kV/cm, można zauważyć duże wahania wartości zmierzonej rezystancji, co jest najpewniej spowodowane faktem otrzymywania wartości rezystancji na podstawie pomiaru prądu ciemnego oraz dokładnością przyrządu pomiarowego w badanym zakresie rezystancji na poziomie  $\pm 5\%$ . Pomimo miejscowej nieliniowości charakterystyki rezystancji badanego łącznika, możemy przyjąć, że w całym badanym zakresie zachowują on się w sposób liniowy. Uzyskane wartości prądu ciemnego i rezystancji w stanie blokującym przy napięciu 9,17 kV wynoszą odpowiednio 34,87 nA i 263,7 GΩ co jest wynikiem zadowalającym.

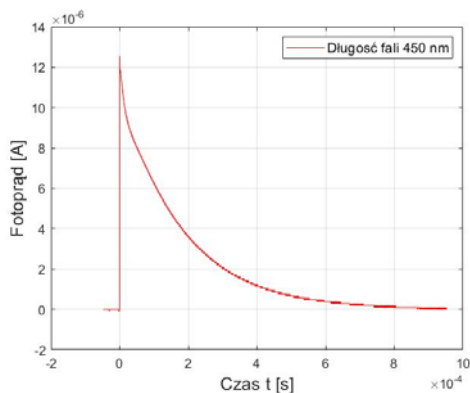
Pomiary w stanie przewodzenia wykonano w układzie składającym się ze wspomnianego wcześniej źródła napięcia i połączonych szeregowo, badanego łącznika PCSS i rezystora o znanej wartości rezystancji wynoszącej 21 MΩ. Za pomocą oscyloskopu rejestrowano spadki napięcia na rezystorze, a także reakcję układu na impuls przełączający próbkę w stan przewodzenia. Wartość fotoprądu obliczono zgodnie z prawem Ohma dla systemu omówionego i zilustrowanego na rysunku 4.



Rys.4. Schemat układu pomiarowego do badań łącznika PCSS w stanie przewodzenia

Optyczny impuls przełączający o szerokości  $\sim 7 \text{ ns}$  został wygenerowany przez przestrajalny laser, a wiązka lasera była emitowana z częstotliwością 10 Hz. Przebiegi

czasu napięcia rejestrowano po uśrednieniu 64 przebiegów wywołanych impulsem optycznym. Badania wykonano przy oświetleniu próbki laserem o mocy  $60 \mu\text{J}$  i długości fali równej  $450 \text{ nm}$ , odpowiadającej energii fotonu  $2,75 \text{ eV}$ , która jest większa niż przerwa energetyczna materiału równa  $2,26 \text{ eV}$ . Pomiary wykonano przy polaryzacji próbki napięciem  $9,16 \text{ kV}$ .



Rys.5. Zarejestrowany przebieg fotoprądu dla energii lasera  $60 \mu\text{J}$ , długości fali  $450 \text{ nm}$  i napięcia  $9,16 \text{ kV}$ . Pomiar dla temperatury  $300 \text{ K}$ . Moment załączenia impulsu optycznego znajduje się w punkcie  $t=0$ .

Analizując przebieg fotoprądu przedstawiony na rysunku 6 można zauważyć, że czas narastania badanego łącznika jest znacznie krótszy niż czas opadania, wynoszące odpowiednio około  $90 \text{ ns}$  i  $870 \mu\text{s}$ , co pozwala na częstotliwość z pracą na poziomie  $1.15 \text{ kHz}$ . Stosunkowo długi czas opadania jest spowodowany procesami termicznymi i rekombinacją nośników przez centra defektowe w materiale półprzewodnikowym. Maksymalna wartość przewodzonego fotoprądu podczas pomiarów wyniosła  $12.6 \mu\text{A}$ , co oznacza że rezystancja łącznika PCSS, obliczona zgodnie z prawem Ohma, spadła do wartości około  $700 \text{ M}\Omega$ , co daje zmianę rezystancji o 3 rzędy wielkości.

Porównując uzyskane wyniki badań i dane literaturowe, należy zauważyć, że badane łączniki pracują przy znacznie niższym napięciu blokującym i przewodzą znacznie mniejsze wartości prądów niż prezentowane w literaturze. Należy przeprowadzić badania przy wyższym napięciu pracy układu, a także podjąć starania w celu zwiększenia wartości przewodzonego fotoprądu, gdyż przedstawione wartości znacznie ograniczają możliwości zastosowania badanego łącznika.

W dalszej części artykułu przedstawiono parametry i zasadę działania iskierników oraz wysokonapięciowych łączników elektrycznych. Urządzenia te znajdują szerokie zastosowanie i są obecnie powszechnie wykorzystywane w układach zasilania i dystrybucji energii. Systemy, w których wzrasta zainteresowanie możliwościami wykorzystania przyrządów optycznych, takich jak opracowywane łączniki PCSS.

### Iskiernik

Jest to urządzenie elektryczne składające się z dwóch elektrod z przerwą między nimi, które jest wypełnione wybraną cieczą, próżnią lub gazem pod ciśnieniem, takim jak  $\text{FS}_6$  i  $\text{N}_2$  [15]. Wytrzymałość dielektryczna suchego powietrza w normalnych warunkach wynosi około  $30 \text{ kV/cm}$ .

Iskierniki są często używane w aplikacjach zasilania impulsowego, takich jak lasery i generatory Marxa. Ma on prostą zasadę działania. Gdy różnica potencjałów między dwiema elektrodami przekroczy napięcie przebicia danego

ośrodka, powstaje iskra, która jonizuje ośrodek i znacznie zmniejsza jego rezystancję, tworząc ścieżkę przepływu prądu. Gdy różnica potencjałów między elektrodami maleje, medium przestaje być zjonizowane, a iskra gaśnie. Ze względu na to, że urządzenia te są stosowane w powielaczach napięcia, można powiedzieć, że maksymalne napięcie jest ograniczone jedynie wytrzymałością materiału elektrod. Obecnie produkowane iskierniki mogą pracować pod napięciem do  $150 \text{ kV}$  i przewodzić prądy do  $100 \text{ kA}$  przy częstotliwości roboczej do  $10 \text{ Hz}$ . Testowane są urządzenia pracujące z częstotliwościami do  $1 \text{ MHz}$ , jednak modele te pracują przy znacznie niższych wartościach przewodzonego prądu, w granicach  $1 \text{ kA}$ . [17]. Rysunek 6 przedstawia iskiernik z elektrodami płaskimi. Zastosowana tam izolacja powietrzna jest regulowana odległością pomiędzy elektrodami.

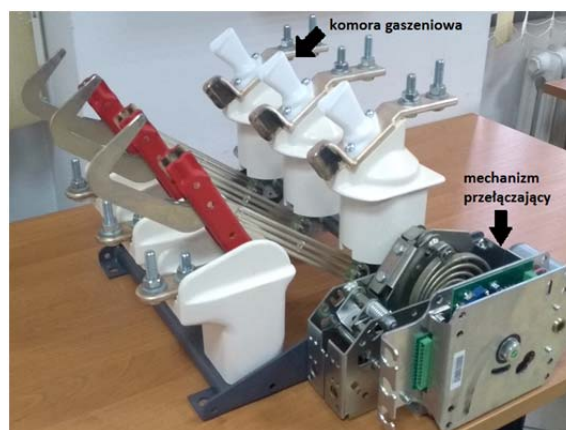


Rys.6. Zdjęcie iskiernika z elektrodami płaskimi. Laboratorium podstaw techniki wysokich napięć WAT.

Ponieważ żywotność iskiernika zmniejsza się wraz z odległością elektrod, a napięcie przebicia jest ograniczone właściwościami zastosowanego medium, aby je zwiększyć bez zmniejszania całkowitej żywotności, iskiernik jest zwykle umieszczany w szczelnej obudowie pod ciśnieniem, dzięki czemu cała konstrukcja staje się dość obszerna. Czas narastania tego łącznika mierzony jest w nanosekundach, jednak nie można kontrolować dokładnie momentu załączenia [18].

### Wysokonapięciowy łącznik elektryczny

Jest to urządzenie mechaniczne powszechnie stosowane w dystrybucji i przesyłce energii elektrycznej w sieciach dużej i średniej mocy. Łącznik ten składa się z dwóch styków elektrycznych, zazwyczaj jednego stacjonarnego i drugiego ruchomego. Prąd płynie przez łącznik po zetknięciu się obu styków.



Rys.7. Wysokonapięciowy łącznik elektryczny firmy ABB z komorami do gaszenia łuku elektrycznego.

Obecnie produkowane wysokonapięciowe łączniki elektryczne mogą pracować pod napięciem do  $500 \text{ kV}$ . Prąd roboczy może osiągać wartość nawet do kilku  $\text{kA}$ , a w momencie włączenia może przekraczać  $100 \text{ kA}$ . Typowa

częstotliwość pracy jest na poziomie 50 Hz. Specyficznym dla tego typu łączników problemem jest rozrzut czasu i proces odrzutu styków podczas załączania oraz ryzyko powstania łuku elektrycznego przy jego załączaniu i odłączaniu [19, 20]. Aby zapobiec tworzeniu się łuku elektrycznego, łączniki tego typu są często wyposażone w komory gaszeniowe. Rysunek 7 przedstawia przykład konstrukcji wysokonapięciowego łącznika elektrycznego z komorami gaszenia łuków elektrycznych.

### Podsumowanie

W artykule dokonano analizy dostępnej literatury dotyczącej parametrów i możliwości zastosowania łącznika PCSS. Przedstawiono wyniki badań testowego łącznika PCSS wykonanych z fosforu galu. Opisano wybrane łączniki mechaniczne i elektryczne oraz przedstawiono ich aktualne zastosowania i osiągnięte parametry.

Półprzewodnikowe łączniki fotokonduktancyjne mają wiele pozytywnych cech w porównaniu z omawianymi łącznikami. Pracują z wyższą częstotliwością niż wysokonapięciowe łączniki elektryczne. Zapewniają dobrą kontrolę czasu załączania i zwartą konstrukcję w porównaniu z iskiernikami i wysokonapięciowymi łącznikami elektrycznymi. Ich zaletą, której nie posiadają omawiane w artykule łączniki jest galwaniczna separacja układu pracy i sterowania. Z przeprowadzonych analiz wynika, że istnieje możliwość szerokiego zastosowania technologii łączników PCSS w układach zasilania, a także w systemach przesyłania i dystrybucji energii elektrycznej.

Badany łącznik wykonany z fosforu galu w stanie blokowania wytrzymałe napięcie do 9,16 kV, osiągając przy nim wartości prądu ciemnego 35 nA i rezystancji na poziomie 263,7 GΩ. W stanie przewodzenia dla napięcia 9,16 kV osiągnięto wartość przewodzonego prądu równą 12,6 μA, natomiast wartość rezystancji w stanie przewodzenia spada do wartości ~ 700 MΩ. Oznacza to, że wartości przewodzonego prądu i rezystancja próbki uległy zmianie o 3 rzędy wielkości, co jest wynikiem zadowalającym w przypadku prototypu. Czas narastania wynosił około 90 ns, jednak długi czas opadania wynoszący 870 μs ogranicza możliwą częstotliwość pracy do 1,15 kHz. Pomimo to czas narastania rzędu nanosekund i częstotliwość pracy na poziomie kiloherca są satysfakcjonującymi wynikami dla prototypu, zgodnymi z oczekiwaniami.

W tej chwili wyprodukowany i przetestowany łącznik może być używany tylko w układach impulsowych wysokiego napięcia, takich jak generator Marxa w pierwszym stopniu powielania napięcia, gdzie mogą zapewnić lepszą kontrolę momentu załączania powszechnie stosowanych iskierników lub w układzie hybrydowym wraz z wysokonapięciowym łącznikiem elektrycznym, gdzie zastosowanie łącznika PCSS pozwoli wyeliminować wady wysokonapięciowego łącznika elektrycznego, przy zachowaniu zdolności do pracy dla wysokich wartości napięć [2].

Celem dalszych badań będzie zwiększenie wartości napięcia pracy łącznika i prądu w stanie przewodzenia, a także przetestowanie łącznika o geometrii pionowej.

### Literatura i autorzy

**Autorzy:** mgr. inż. Karol Piwowarski, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: [karol.piwowarski@wat.edu.pl](mailto:karol.piwowarski@wat.edu.pl); mgr. inż. Bogdan Perka, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: [bogdan.perka@wat.edu.pl](mailto:bogdan.perka@wat.edu.pl).

### LITERATURA

- [1] Wolfe T. S. et. al., Integrated Computational Investigation of Photoconductive Semiconductor Switches in Pulsed Power Radio Frequency Applications, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 44 (2016), n.1, 60-70
  - [2] Kulas S.J., et al., Koncepcja jednofazowego łącznika hybrydowego do zastosowań energetycznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), n.1, 37 - 40
  - [3] Mazumder. S. K., An Overview of Photonic Power Electronic Devices, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31 (2016), 6562-6574
  - [4] Xu, M., et al., Transient characteristic of interdigitated GaAs photoconductive semiconductor switch at 1-kHz excitation, *IEEE Electron Device Letters*, 40 (2019), 7, 1136-1138
  - [5] Suproniuk, M., Pawłowski, M., Wierzbowski, M., Majda-Zdancewicz, E., Pawłowski, M. K., Comparison of methods applied in photoinduced transient spectroscopy to determining the defect center parameters: The correlation procedure and the signal analysis based on inverse Laplace transformation, *Review of Scientific Instruments*, 89 (2018), 044702-1-8
  - [6] Tian, L., Shi, W., Analysis and operation mechanism of semi-insulating GaAs photoconductive semiconductor switches, *J. Appl. Phys.*, 103 (2008), 124512-1-7
  - [7] Shi, W., Tian, L., Liu, Z., Zhang, L., Zhang, Z., Zhou, L., Liu, H. and Xie, W., 30 kV and 3kA semi-insulating GaAs photoconductive semiconductor switch, *Appl. Phys. Lett.*, 92 (2008), 043511-1-3
  - [8] Suproniuk M., Kamiński P., Kozłowski R., Pawłowski M., Effect of deep-level defects on transient photoconductivity of semi-insulating 4H-SiC, *Acta Physica Polonica A*, 125 (2014), n.4, 1042-1048
  - [9] Suproniuk M., Kamiński P., Pawłowski M., Kozłowski R., Pawłowski M., An intelligent measurement system for the characterisation of defect centres in semi-insulating materials, *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010), n.12, 247-252
  - [10] Suproniuk, M., Kamiński, P., Kozłowski, R., Pawłowski, M. and Wierzbowski, M., Current status of modelling the semi-insulating 4H-SiC transient photoconductivity for application to photoconductive switches, *Opto-Electronics Review*, 25 (2017), 171-180
  - [11] Luan, C., Feng, Y., Huang, Y., Li, H., Li, X., Research on a novel high-power semi-insulating GaAs photoconductive semiconductor switch, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 44 (2016), n.5, 839-841
  - [12] Mauch, D., Sullivan, W., Bullick, A., Neuber, A., Dickens, J., High Power Lateral Silicon Carbide Photoconductive Semiconductor Switches and Investigation of Degradation Mechanisms, *IEEE transactions on plasma science*, 43 (2015), n.6, 2021-2031
  - [13] Suproniuk M., et.al., Semi-insulating GaP as a material for manufacturing photoconductive semiconductor switches, *Proc. SPIE*, 11055 (2019), 1105503-1-9
  - [14] Suproniuk M., et. al., Blocking characteristics of photoconductive switches based on semi-insulating GAP and GaN, *Elektronika ir Elektrotechnika*, 25 (2019), n.4, 36-39
  - [15] Majda-Zdancewicz, et. al., Current state of photoconductive semiconductor switch engineering, *Opto-Electronics Review*, 26 (2018), 92-102
  - [16] Arsić N., Osmokrović P., Jevtovic B., Kostic D., The influence of the gas insulation parameters on the triggered three-electrode spark gap functioning, *IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2 (1997), 567-570
  - [17] Lee B-J., Rahaman H., Frank K., Nam S. H., High Repetitive Switching of Parallel Micro-Plasma Spark Gaps, *19th IEEE Pulsed Power Conference (PPC)*, (2013). DOI: 10.1109/PPC.2013.6627572
  - [18] Rahaman H., et. al., Investigation of Spark Gap Discharge in a Regime of Very High Repetition Rate, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 38 (2010), n.10, 2752 - 2757
  - [19] Berczyński R., Kulas S. J., Diagnozowanie dynamiki ruchu styków łączników elektrycznych wysokiego napięcia, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), n.1, 24-28
- Berczyński R., Stanowisko pomiarowe do określania parametrów ruchu styków elektrycznego łącznika zwarciowego *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), n.1, 21-23