

## Wybrane aspekty projektowania przełączników fotokonduktancyjnych

**Streszczenie.** Półprzewodnikowy przełącznik fotokonduktancyjny to urządzenie, w którym w wyniku pobudzenia sygnałem optycznym, następuje wzrost koncentracji nośników ładunku powodując zmniejszenie oporności materiału półprzewodnikowego nawet o kilka rzędów wielkości. W artykule przedstawiono wybrane aspekty projektowania przełączników fotokonduktancyjnych uwzględniając m.in. kwestie związane z szybkością włączania elementu, równomiernym rozkładem gęstości prądu, wytrzymałością termiczną, czasem eksploatacji i wysokim lokalnym polem elektrycznym wytwarzanym w miejscu elektrod.

**Abstract.** A photoconductive semiconductor switch is a device in which density of charge carriers increases causes decreases resistivity of semiconductor as a result of optically triggered. This paper shows selected aspects of photoconductive semiconductor switches designing with regards issue related to the switch rise-times, uniform distributed current density, thermal resistance, device lifetime and high local electric field generated at the electrode site. (**Selected aspects of photoconductive semiconductor switches designing**).

**Słowa kluczowe:** przełącznik fotokonduktancyjny, półprzewodnik, fotoprzewodnictwo, HPEM.

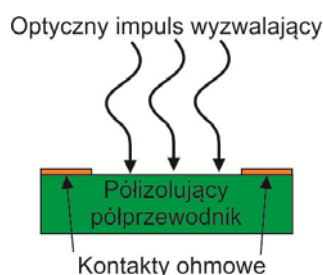
**Keywords:** photoconductive switch, semiconductor, photoconductivity, HPEM.

### Wstęp

Półprzewodnikowy przełącznik fotokonduktancyjny (ang. PCSS *photoconductive semiconductor switch*) to przełącznik elektryczny, którego zasada działania opiera się na zjawisku fotoprzewodnictwa. Podstawowymi cechami powodującymi obecnie szerokie zainteresowanie elementami PCSS są możliwości ich szybkiego włączania (rzędu nanosekund), dzięki czemu znajdują zastosowanie w układach przetworników analogowo-cyfrowych, układach sterowania i naprowadzania. Mogą być również wykorzystane w generatorach sygnałów mikrofalowych i terahercowych, pracujących metodą bezpośredniej konwersji z prądu stałego (DC-RF) [1]. Napięcie pracy łącznika w stanie rozwarcia może sięgać 100 kV, a prąd przewodzony może być rzędu 1 kA [2], stąd przełączniki te mogą znaleźć zastosowanie w aparaturze do przetwarzania wysokich energii, w tym generatorów impulsów energii skierowanej (HPEM).

### Zasada działania

Półprzewodnikowy przełącznik fotokonduktancyjny jest skonstruowany z półprzewodnikowego materiału na którym umieszczone są metalowe kontakty umożliwiające połączenie materiału do obwodu elektrycznego. Przykładowa konstrukcja tego typu urządzenia przedstawiona została na rys. 1.



Rys. 1. Ogólna struktura półprzewodnikowego przełącznika fotokonduktancyjnego

Przełącznik PCSS może pracować w dwóch trybach: liniowym oraz nieliniowym. W trybie liniowym (konwencjonalnym) jeden absorbowany foton generuje jedną parę elektron-dziura. Po wyłączeniu oświetlenia

następują procesy rekombinacji nośników ładunku, które powodują powrót właściwości materiału półprzewodnikowego do stanu przed oświetleniem. W ramach tego trybu nośniki ładunku mogą powstawać w oparciu o absorpcję samoistną (podstawową, międzypasmową) bądź absorpcję pośrednią (absorpcja na domieszkach). W przypadku absorpcji samoistnej poziom do którego może docierać energia optyczna jest bardzo mały – rzędu dziesiątki mikronów. W wyniku tego gęstość energii optycznej powinna być rzędu kilku kJ/cm<sup>2</sup> aby doprowadzić do zmniejszenia rezystancji przełącznika. W konsekwencji przełączniki tego typu najczęściej konstruowane są w geometrii bocznej [2]. W przypadku absorpcji pośredniej, energia padających fotonów może być mniejsza niż szerokość pasma zabronionego i zależy od położenia poziomów donorowych/akceptorowych w paśmie zabronionym półprzewodnika (może wahać się od kilku do setek mili-elektronowoltów). W konsekwencji energia optyczna może przeniknąć do bardzo głębokich obszarów w zależności od zastosowanych domieszek oraz ich koncentracji.

Pobudzenie w trybie liniowym jest niezależne od wartości pola elektrycznego wzdłuż przełącznika. W konsekwencji przełącznik PCSS może pracować tylko w obwodach niskich napięć (natężenie pola mniejsze od 4 kV/cm). Liniowe przełączniki fotokonduktancyjne charakteryzują się dłuższym czasem eksploatacji ze względu na zmniejszoną gęstość prądu [2].

Tryb nieliniowy, zwany również lawinowym bądź wysokowzmocnieniowym (ang. *high gain mode*) występuje w wyższym polu elektrycznym. Nośniki ładunku, wzbudzone w wyniku oświetlenia, zyskują dodatkową energię z pola elektrycznego wybijając elektrony walencyjne do pasma przewodnictwa i powodując jonizację zderzeniową co w konsekwencji objawia się lawinową generacją nośników ładunku w materiale półprzewodnikowym. Oznacza to że foton może wygenerować więcej niż jeden nośnik ładunku. Zainicjowany proces lawinowego powielania nośników ładunku jest kontynuowany do momentu, gdy pole wzdłuż przełącznika nie spadnie poniżej pewnego progu zależnego od wykorzystywanego materiału półprzewodnikowego (np. 4-6 kV/cm dla GaAs). W tym trybie laser pełni rolę wyłącznika wyzwalacza.

Porównując dwa tryby pracy przełączników PCSS należy zauważyć że lawinowe łączniki wymagają mniejszych energii impulsu wyzwalającego niż łączniki

liniowe. Przykładowo, liniowy PCSS pracujący z napięciem 100kV i o rezystancji  $1 \Omega$  wymaga do włączenia impulsu światła o energii 25 mJ, natomiast łącznik lawinowy wymaga jedynie 90 nJ energii światła ( $1 \text{ J} = 0,62415 \times 10^{19} \text{ eV}$ ). W konsekwencji w przełączniku lawinowym jeden foton może wytworzyć 100 000 razy więcej nośników ładunku niż w takim samym przełączniku pracującym w trybie liniowym [2].

### Wybrane problemy konstrukcyjne

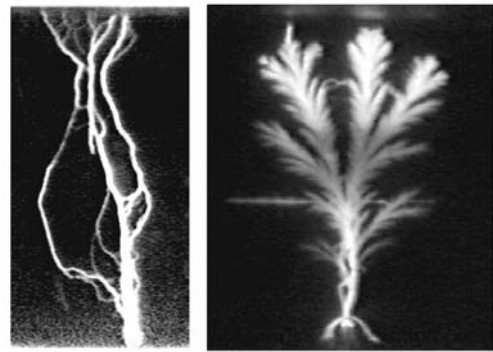
Szerokie możliwości zastosowania przełączników zarówno w nisko-, jak i wysokoenergetycznych urządzeniach lub aparatach, powodują konieczność uwzględnienia m. in. wymagań konstrukcyjnych. W niskoenergetycznych zastosowaniach, w układach przetwarzania informacji i sterowania, istotna będzie szybkość włączania elementu i minimalizacja jego wymiarów, natomiast w wysokoenergetycznych zastosowaniach - równomierny rozkład gęstości prądu w łączniku i jego wytrzymałość termiczna. Szereg problemów występujących przy konstruowaniu tego typu przełączników zaowocował pokaźną liczbą publikacji, głównie anglojęzycznych. W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia uzupełnione o metody pozwalające na ograniczenie ich negatywnego wpływu na pracę przełączników PCSS. Syntetyczny przegląd zjawisk występujący w rzeczywistym urządzeniu pozwoli autorom na zaprojektowanie różnych konfiguracji modelu przełącznika PCSS przy użyciu wybranego środowiska symulacyjnego. W konsekwencji wyniki symulacji różnych konstrukcji układu pozwolą na wybór optymalnej struktury urządzenia z punktu widzenia wymagań związanych z zastosowaniem przełącznika PCSS jako elementu wykorzystywanego w energoelektronice. Badania symulacyjne prezentowane w literaturze w dużej mierze omawiają zmianę konduktancji materiału na skutek oświetlenia jego strumieniem fotonów [3, 4].

#### Filamentowa natura prądu

Głównym problemem przy projektowaniu przełączników fotokonduktancyjnych jest zjawisko rozproszenia prądu przepływającego przez przełącznik. Warto podkreślić, że proces ten występuje wyłącznie w przypadku pracy wysokowzmocnieniowej przełącznika. Badania na całym świecie poświęcają jednak wiele uwagi temu mechanizmowi, ze względu na fakt, iż tryb pracy nieliniowej jest dedykowany w odniesieniu do zastosowań energoelektronicznych. Podczas procesu lawinowego powielania nośników ładunku dochodzi do tworzenia się tzw. włókien prądowych (ang. *current filaments*). W konsekwencji ścieżki prądowe biegnące pomiędzy kontaktami przełącznika rozgałęziają się, powodując rozprzestrzenianie się prądu w kanale przełącznika. Idea zjawiska przedstawiona została poglądowo na rys. 2. W wybranych przypadkach szerokość rozprzestrzeniającego (rozgałęzionego) się prądu w kanale jest rzędu 15 do 300  $\mu\text{m}$ , natomiast gęstość prądu pojedynczej ścieżki może dochodzić do wartości rzędu  $\text{MA}/\text{cm}^2$ .

Duża gęstość prądu w ścieżkach powoduje miejscowe nagrzanie i uszkodzenie na granicy styku przełącznika, przy każdym włączeniu urządzenia. Konsekwencją, jest stopniowa erozja kontaktów prowadząca do uszkodzenia przyrządu. W wyniku tych zjawisk niezbędne jest ograniczanie amplitudy przełączanego prądu oraz szerokości impulsu, w celu zapewnienia bezawaryjnej pracy urządzenia. Mechanizm ten prowadzi do drastycznego zmniejszenia żywotności urządzenia. Obecnie w niektórych zastosowaniach ograniczeniem technologii jest właśnie czas eksploatacji wykorzystywanych przełączników.

Dane literaturowe pozwalają stwierdzić, iż zjawisko to niwelowane jest na wiele różnych sposobów. Część naukowców skupia się na poprawie struktury kontaktów omowych oraz obszarów pomiędzy kontaktem i materiałem półprzewodnikowym umożliwiając tym samym wyższą gęstość prądu, a co za tym idzie zwiększenie żywotności przełączników PCSS. Inne idee skupiają się na metodach tworzenia wielu równoległych ścieżek prądowych wzdłuż szczeliny przełącznika poprzez ingerencję w konstrukcję wewnętrzną przełącznika bądź zastosowanie złożonych optycznych systemów wyzwalania przełącznika. Wybrane rozwiązania przedstawiono poniżej dając syntetyczny opis metod ograniczania tego negatywnego zjawiska.



Rys. 2. Przykładowe wyglądy ścieżek prądowych (tryb pracy wysokowzmocnieniowej przełącznika). Po lewej stronie przełącznik zasilono napięciem 45 kV i popłynął prąd rzędu 350 A po prawej przełącznik zasilono napięciem 100 kV i popłynął prąd rzędu 900 A [5].

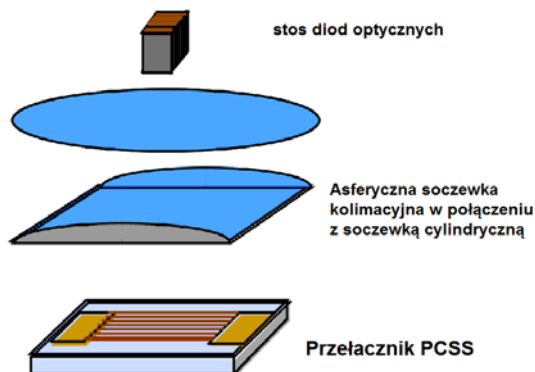
Pierwsze eksperymenty skupiały się głównie na ograniczeniu prądów pojedynczych ścieżek (dla krótkich impulsów  $<100 \text{ ns}$ ), co w konsekwencji powodowało ograniczenie gęstości nośników ładunku na powierzchni pomiędzy materiałem półprzewodnikowym a kontaktem ohmowym. Redukcja prądu pojedynczych ścieżek została osiągnięta poprzez rozproszone oświetlenie szczeliny przełącznika w pobliżu jednego z kontaktów [6]. Ta technika pozwala na tworzenie się wielu równoległych kanałów prądowych, które pozostają rozdzielone w całym okresie przewodzenia. Wyzwalanie takie pozwala na równomierne rozprowadzenie prądu wzdłuż szerokości styku poprzez współużytkowanie prądu przez wiele ścieżek, zmniejszając w ten sposób uszkodzenia w pobliżu styków. Inną możliwością było zastosowanie szklanych pręcików jako soczewek cylindrycznych w celu skupienia światła z wielu włókien w linie wzdłuż przełącznika. Metoda ta charakteryzuje się jednak różnicami natężenia wzdłuż pojedynczych ścieżek i różnicami pomiędzy ścieżkami [7].

W ogólności przedstawione rozwiązania ograniczały całkowitą gęstość prądu i wymagały złożonych, drogiej i mało efektywnych procesów przetwarzania wiązki laserowej na cienkie linie oświetlające powierzchnie przełączników.

Inną metodą zaprezentowaną w 2001 r. było tworzenie domieszkowanych struktur w obszarach pod kontaktami przełącznika (ang. *TDP – Tailored Doping Profiles Zone*) – [8].

Kolejnym podejściem była zmiana struktury układu optycznego przełącznika. Przykładem mogą być prace z 2007 roku [9]. Prezentowana metoda opiera się na wykorzystaniu wieloliniowego wyzwalania optycznego w celu wytworzenia wielu równoległych ścieżek prądowych wzdłuż kontaktów. W ogólności źródło światła składa się z matrycy diod, która zawiera stos diod laserowych (ang. *laser diode bars*). Dodatkowo układ optyczny wyposażono

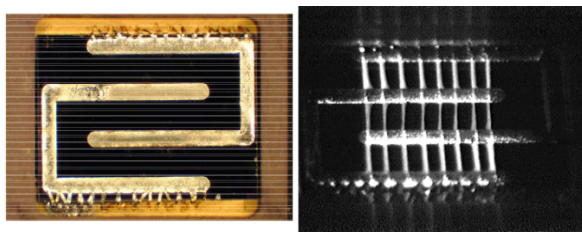
w asferyczną soczewkę kolimacyjną, która w połączeniu z soczewką cylindryczną precyzyjnie ustawia współczynnik powiększenia oraz współczynnik kształtu (obrazu) w taki sposób że linie lasera dokładnie wypełniają szczelinę pomiędzy kontaktami przełącznika – rys. 3. Wyzwalanie tego typu poprawia zdolność tworzenia ścieżek prądowych w wyniku czego są one bardziej spójne, proste, równoległe, niż jest to możliwe przy użyciu wyzwalania rozproszonego lub punktowego. Opisany mechanizm powoduje stworzenie 8 odrębnych ścieżek prądowych. Ponadto pozwala zwiększyć żywotność przełączników dla pracy wysokoprądowej, zwiększając liczbę włókien prądu i zmniejszając gęstość prądu w elektrodach stykowych w kontrolowany sposób [9].



Rys. 3. Idea wieloliniowego wyzwalania przełącznika, z zastosowaniem układu optycznego zawierającego stos diod optycznych, asferyczną soczewkę kolimacyjną w połączeniu z soczewką cylindryczną [10]

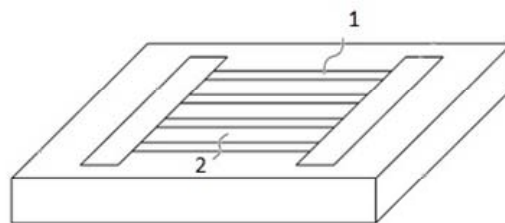
Przykładowo po uruchomieniu urządzenia podczas przełączania prądów rzędu 400 A następuje spadek prądu zaledwie o 2 % (dla 100 włączzeń), dzięki czemu możliwe jest efektywne działanie urządzeń. Ten sam przełącznik dla prądu około 90 A powoduje spadek o 28 % (86 uruchomień), w przypadku zastosowania punktowego źródła światła.

Dalsze zwiększenie czasu eksploatacji urządzenia zostało osiągnięte poprzez zastosowanie tzw. struktury grzebieniowej kontaktów przełącznika. Struktura ta umożliwia wytwarzanie dodatkowych ścieżek prądowych bez znaczącego zwiększenia złożoności zastosowanego układu optycznego. Ponadto metoda ta umożliwia każdej z 28 linii światła na oświetlenie wielu odstępów (szczelin) między ramionami (palcami) dwóch bądź więcej sprzęgniętych elektrod – rys. 4. W omawianym przykładzie zastosowanie takiej samej optyki pozwoliło na potrojenie liczby generowanych ścieżek prądowych oraz pozwoliło na sprawniejszą dystrybucję ciepła w urządzeniu, bez zwiększania złożoności systemu optycznego wyzwalania [9].



Rys. 4. Grzebieniowa struktura kontaktów przełącznika PCSS pozwalająca na utworzeniu dodatkowych równoległych ścieżek prądowych [10]

Jednym z najnowszych rozwiązań (2014) – rys.5 jest zastosowanie tzw. martwych pól (2) w szczelinie przełącznika pomiędzy ścieżkami prądowymi (1). Przestrzeń ta umożliwia formowanie się ścieżek i zapobiega przepływowi prądu pomiędzy sąsiednimi ścieżkami. Obszary tego typu mogą być wytwarzane poprzez wprowadzenie do sieci krystalicznej krysztalu półprzewodnikowego defektów w wyniku implantacji jonów o wysokiej energii. Odległość i szerokość kanałów są zaprojektowane w sposób pozwalający na zapewnienie wysokiego poziomu przełączanego prądu przy jednoczesnym wydłużeniu okresu eksploatacji przełącznika PCSS. Kontrolowanie procesu tworzenia się ścieżek prądowych powoduje zmniejszenie się gęstości maksymalnego prądu co w konsekwencji prowadzi do redukcji uszkodzenia urządzenia [11].

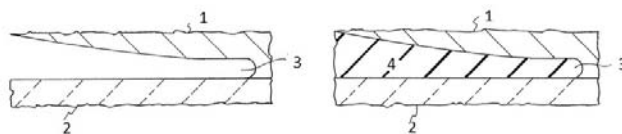


Rys. 5. Idea martwych pól (2) pomiędzy ścieżkami prądowymi (1) w szczelinie przełącznika PCSS [11]

#### Menisk kontaktowy

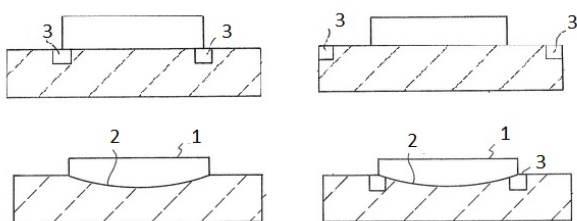
Innym szeroko opisywanym zagadnieniem jest problem związany z gwałtownymi zmianami natężenia pola elektrycznego wytwarzanego na granicy pomiędzy elektrodą a fotoprzewodzącym podłożem. Pomiedzy tymi dwoma powierzchniami tworzy się tzw. *menisk kontaktowy* (3) – rys. 6. Mechanizm tego typu powoduje, że nawet węgiel krzemu charakteryzujący się dużą odpornością na wysokie pole elektryczne może ulec uszkodzeniu, dlatego też badacze poszukują sposobów niwelowania wspomnianego problemu.

Jednym ze sposobów łagodzenia skutków tego zjawiska jest wypełnianie szczeliny pomiędzy elektrodą a podłożem materiałem o wysokiej przenikalności elektrycznej (4) – rys. 6, co w konsekwencji zmniejsza gwałtowny charakter zmian pola elektrycznego.

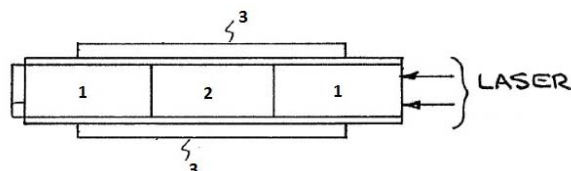


Rys. 6. Przykład menisku (3) tworzącego się pomiędzy elektrodą (1) a materiałem półprzewodnikowym (2) [12]

Inne metody to m. in: tworzenie wklęsłego podłoża oraz wypukłej elektrody, czego następstwem jest bezpośrednie stykanie się tych obszarów. Ponadto w literaturze światowej można natknąć się na zastosowanie tzw. wkładek (ang. *liners*) umieszczonych bezpośrednio w podłożu na styku powierzchni podłoża- elektrody bądź na krańcach podłoża. Elementy te pozwalają na profilowanie i wyrównywanie pola elektrycznego na granicy obszarów oraz na separowanie elektrody od podłoża. Wybrane realizacje tych konstrukcji przedstawiono na rys 7 [12].



Rys. 7. Wybrane realizacje konstrukcji przełącznika PCSS pozwalające na zmniejszenie skoków pola elektrycznego na granicy obszarów elektroda-podłoże; 1 – wypukła elektroda, 2 – wklęsłe podłoże, 3 – dodatkowe elementy konstrukcyjne (wkładki) [12]



Rys. 8. Schematyczna idea konstrukcji przełącznika PCSS utworzona z podłoża, którego środkowa część stanowi materiał fotoprzewodzący (2) natomiast zewnętrzna część wykonana jest z materiału nieprzewodzącego (1) [13]

Elektrody przewodzące (3) są uformowane na przeciwnych stronach podłoża, przy czym elementy te rozciągają się poza centralną część podłoża a ich krawędzie położone są na zewnętrznej części podłoża. W konsekwencji pole elektryczne wytwarzane na krawędziach elektrod leży na zewnątrz dzięki czemu jest odizolowane od centralnej części, która jest aktywnym elementem przełączającym urządzenia. Materiał użyty do konstrukcji powinien charakteryzować się następującymi właściwościami: duża wytrzymałość na przebicie w stosunku do materiału wypełniającego środkową część podłoża, transparentność optyczna (dla wyzwalanego światła), dobra przewodność cieplna w celu usunięcia nadmiaru ciepła z środkowej części podłoża. Optymalnie materiał ten nie powinien być materiałem fotoprzewodzącym, w wyniku czego aktywna część urządzenia ma możliwość manipulowania i obsługi polem elektrycznym na krawędziach elektrod i kierowaniem światła do aktywnej części przełącznika.

#### Inne problemy

Innymi problemami pojawiającym się podczas projektowania przełączników PCSS są defekty materiałów półprzewodnikowych. Niedoskonałości te mogą obejmować m. in. puste przestrzenie, pęknięcia, czy też mikrorurki. Dla przykładu mikrorurki to długie i wąskie puste przestrzenie w kształcie rury ciągnące się przez całą długość podłoża. Zmiany w strukturze podłoża mogą powodować szereg niekorzystnych zjawisk w pracy urządzenia. Dlatego też próbuję się niwelować tego typu zjawiska, wykonując podłoże w technologii kaskadowej, która pozwala na wzmocnienie izolacji pustych miejsc oraz zmniejszenie wymiaru mikrorurek [12].

#### Wnioski i podsumowanie

Głównymi problemami z jakimi spotykają się konstruktorzy przełączników fotokonduktancyjnych są m.in. kwestie związane z szybkością włączania elementu, minimalizacją

jego wymiarów, równomiernym rozkładem gęstości prądu, wytrzymałością termiczną, czasem eksploatacji, wysokim lokalnym polem elektrycznym wytwarzanym w miejscu elektrod i niedoskonałością użytego materiału półprzewodnikowego jako podłoże w przełącznikach PCSS. W artykule zaprezentowano wybrane problemy w zakresie projektowania przełączników fotokonduktancyjnych. Ten syntetyczny przegląd pozwoli na uwzględnienie występujących realnie zjawisk podczas procesu symulacji pracy tego typu urządzeń, która będzie kolejnym krokiem badań autorów.

**Autorzy:** dr inż. Marek Suproniuk, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Kaliskiego 2a, 00-908 Warszawa, E-mail: [Marek.Suproniuk@wat.edu.pl](mailto:Marek.Suproniuk@wat.edu.pl); dr inż. Ewelina Majda-Zdanczewicz, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Kaliskiego 21, 00-908 Warszawa, E-mail: [Ewelina.Majda@wat.edu.pl](mailto:Ewelina.Majda@wat.edu.pl); dr hab. inż. Michał Pawłowski, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Kaliskiego 2a, 00-908 Warszawa, E-mail: [Michal.Pawlowski@wat.edu.pl](mailto:Michal.Pawlowski@wat.edu.pl); dr inż. Mariusz Wierzbowski, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Kaliskiego 2a, 00-908 Warszawa, E-mail: [Mariusz.Wierzbowski@wat.edu.pl](mailto:Mariusz.Wierzbowski@wat.edu.pl)

#### LITERATURA

- [1] M. B. Kuppam, RF signal processing using ultrafast optoelectronics devices and related terahertz spectroscopy experiments, *PhD Thesis*, Université Grenoble Alpes, 2013, Francja
- [2] J. S. Sullivan, Wide Bandgap Extrinsic Photoconductive Switches, *Lawrence Livermore National Laboratory, Report*, 2013
- [3] M. Suproniuk, P. Kamiński, M. Pawłowski, R. Kozłowski, Ma. Pawłowski, "An intelligent measurement system for characterisation of defect centres in semi-insulating materials", *Electrical Review* 86, 11a, 247-252 (2010).
- [4] M. Suproniuk, P. Kamiński, R. Kozłowski and M. Pawłowski, "Effect of deep-level defects on transient photoconductivity of semi-insulating 4H-SiC", *Acta Physica Polonica A* 125, 4, 1042-1048 (2014)
- [5] F. J. Zutavern et al., A compact, Repetitive Accelerator for Military and Industrial Applications, *Sandia Report, Sandia National Laboratories*, 1998
- [6] J. Zutavern, et al., High Gain GaAs Photoconductor Switches (PCSS): Device Lifetime, High Current Testing, Optical Pulse Generators," *SPIE Vol. 2343 Optically Activated Switching IV*, s. 146-154, 1994
- [7] F. J. Zutavern et al., Properties of High Gain GaAs Switches for Pulsed Power Applications, *Proc. 11th IEEE Pulsed Power Conf.*, Baltimore, Md., June, 1997
- [8] A. Baca et al, High gain photoconductive semiconductor switch having tailored doping profiles zones, *US Patent No. US6248992B1*, 2001
- [9] A. Mar, F. J. Zutavern, G. Loubriel, Multi-line triggering and interdigitated electrode structure for photoconductive semiconductor switches, *US Patent No. US7173295B1*, 2007
- [10] A. Mar, L. Bacon, G. Loubriel, Device Technology Investigation. Subsystems Packaging Study: Feasibility of PCSS – Based Pulser for Highly Portable Platforms, *Sandia Report*, 2002
- [11] R. S. Bhattacharya, H. B. Evans JR, Photoconductive semiconductor switch, *US Patent No. US20140264684A1*, 2014
- [12] G. J. Caporaso, S. E. Sampayan, J. S. Sullivan, D. M. Sanders, Optically-initiated silicon carbide high voltage switch, *US Patent No. US8125089B2*, 2012
- [13] G. J. Caporaso, Photoconductive switch package, *US Patent No. US20140038321A1*, 2014