

Joanna ĆWIRKO¹
Robert ĆWIRKO²

BADANIA TEMPERATUROWE FOTODEKTORÓW UV Z WĘGLIKA KRZEMU

Detektory UV są stosowane w pracach badawczych, przemyśle i aplikacjach wojskowych oraz w systemach bezpieczeństwa. Fotodetektor jest podstawowym elementem każdego czujnika promieniowania i decyduje o jego podstawowych parametrach. W artykule przedstawiono badania nad zależnością charakterystyk detektorów UV wykonanych z SiC od długotrwałego wygrzewania w podwyższonej temperaturze.

TEMPERATURE EXAMINATIONS OF UV PHOTODETECTORS FROM THE SILICON CARBIDE

UV detectors are applied in research works, the industry and applications of military and in security systems. The photodetector is a basic component of every sensor of the radiation and is deciding on his basic parameters. In the article a research on the relation of characterizations of UV detectors made from SiC from long-term warming up in the high temperature was described.

1. WSTĘP

Podstawowym parametrem konstrukcyjnym opisującym właściwości fotodetektora jest jego czułość widmowa. Parametrem, pozwalającym na obiektywne porównywanie detektorów jest znormalizowana wykrywalność (detekcyjność) widmowa uwzględniająca szumy ograniczające możliwości detektora. Często bywa stosowany parametr NEP (noise equivalent power) - moc równoważna szumowi, który jest odwrotnością wykrywalności (bez normalizacji względem pasma i powierzchni). Fotonowe detektory promieniowania optycznego wykazują selektywną zależność czułości od długości fali padającego promieniowania i w porównaniu z detektorami termicznymi charakteryzują się wyższymi wykrywalnościami i większymi szybkościami odpowiedzi.

Fotodetektory półprzewodnikowe [1][2] na zakres promieniowania UV, VIS i IR są stosowane niemal we wszystkich dziedzinach życia: przemyśle, automatyce, aplikacjach AVT i medycynie a także na coraz większą skalę w monitoringu zagrożeń bezpieczeństwa. Aby przeciwdziałać zagrożeniom terrorystycznym w ruch lotniczym stosowane są

¹Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych, Polska;
00-908 Warszawa; gen. S. Kaliskiego 9.Tel: +48 22 6837-626, E-mail: jcwirko@wat.edu.pl

²Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych, Polska;
00-908 Warszawa; gen. S. Kaliskiego 9.Tel: +48 22 6837-123, E-mail: robert.cwirko@wat.edu.pl

różnorodne zabezpieczenia, w tym systemy rozpoznania wielospektralnego: aktywne systemy radarowe, pasywne systemy podczerwieni oraz pasywne systemy nadfioletu. Inne zastosowanie detektorów UV to szeroko pojęta ochrona zdrowia - przykładowo radiometri UV z dalmierzami laserowymi pozwalają na pomiar sumarycznego natężenia promieniowania UV na stanowiskach pracy.

Detektory UV są wykonywane z półprzewodników o szerokiej przerwie zabronionej (GaN, AlGaIn, GaP, InP, TiO₂, SiC) [3,4]. Przez odpowiednią zmianę procentowego składu związków półprzewodników, np. Al(GaN), można uzyskać detektory UV charakteryzujące się selektywną czułością tylko w określonych zakresach promieniowania UV (UVA, UVB lub/i UVC).

Podstawowym parametrem konstrukcyjnym opisującym właściwości fotodetektora jest jego czułość widmowa. Parametrem, pozwalającym na obiektywne porównywanie detektorów jest znormalizowana wykrywalność (detekcyjność) widmowa uwzględniająca szumy ograniczające możliwości detektora. Często bywa stosowany parametr NEP (*noise equivalent power*) - moc równoważna szumowi, który jest odwrotnością wykrywalności (bez normalizacji względem pasma i powierzchni) [5][6].

2. BADANIA DETEKTORÓW

Przedstawiana praca dotyczy problemu długoczasowego wpływu podwyższonej temperatury na parametry fotodetektorów UV wykonanych z SiC, a głównie ich charakterystyki widmowe. Celem badań było określenie wpływu temperatury na czułość detektora zarówno w przedziale temperatury zalecanej przez producenta jak i w temperaturach wyższych.

Przyjęto, że badania powinny obejmować:

- długoczasowe (ponad miesiąc) wygrzewanie badanych detektorów w podwyższonej temperaturze;
- pomiary charakterystyk widmowych detektorów - w określonych odstępach czasowych - podczas wygrzewania. Pomiary są wykonywane w temperaturze pokojowej.

Fotodetektory półprzewodnikowe charakteryzują się właściwościami, których kompleksowe poznanie wymaga badań w funkcji temperatury [7][8]. Zakres temperatury powinien być możliwie szeroki, gdyż tylko w takim przypadku można badać nie tylko wpływ uwarunkowań środowiskowych, w jakich pracuje dany detektor, ale i identyfikować oddziaływania elektrofizyczne mające przykładowo wpływ na charakterystyki widmowe detektora.

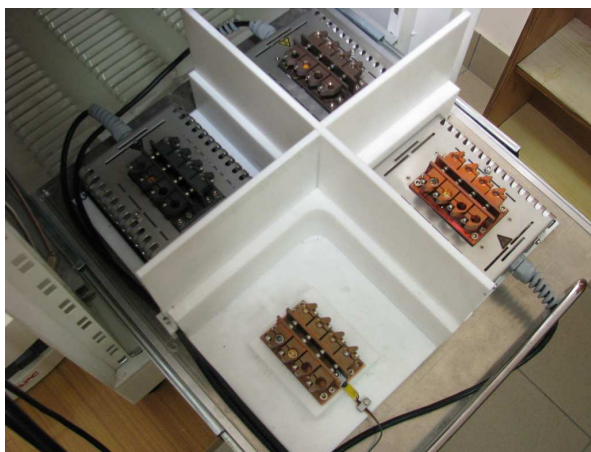
Dotyczy to zwłaszcza detektorów wykonanych z węgliku krzemu. Powszechnie stosowaną technologią produkcji kryształów objętościowych węgliku krzemu jest wzrost kryształu z fazy gazowej. Otrzymywane tą metodą monokryształy SiC charakteryzują się obecnością wielu defektów strukturalnych. Istnienie defektów może mieć istotny wpływ na parametry wytworzonych przyrządów półprzewodnikowych. Charakterystyczną cechą defektów strukturalnych jest możliwość ujawnienia się ich obecności dopiero po pewnym czasie eksploatacji elementu elektronicznego.

Z drugiej strony SiC charakteryzuje się znakomitymi właściwościami: szeroką przerwą energetyczną, wysokim napięciem przebicia, dużą ruchliwość elektronów. W konsekwencji SiC wypiera powoli z części aplikacji do tej pory stosowane materiały

półprzewodnikowe takie jak krzem (Si), arsenek galu (GaAs), azotek galu (GaN), czy fosforek indu (InP).

2.1 Stanowisko badań długoczasowych

Opracowano i wykonano stanowisko do długoczasowego wygrzewania detektorów w regulowanej temperaturze – przedstawione na rysunku 1. Stanowisko umożliwia jednocześnie poddanie badaniom czterech zestawów fotodetektorów. Wartość temperatury wygrzewania dla każdego zestawu może być deklarowana niezależnie w zakresie od 50°C do 200°C. Każdy z czterech zestawów jest odizolowany termicznie od pozostałych ściankami wykonanymi z teflonu. W każdym zestawie może zostać zamocowanych od jednego do maksymalnie ośmiu fotodetektorów - wykonanych na przykład z różnych materiałów półprzewodnikowych. W zależności od wymiarów obudowy fotodetektora jest on mocowany w odpowiednim miedzianym uchwycie. Poszczególne uchwyty są przykręcane do miedzianej podstawy danego zestawu z zachowaniem jak najmniejszej rezystancji termicznej przez zastosowanie odpowiednich past. Regulacja temperatury jest możliwa po przykręceniu zestawu z fotodetektorami do płyty podgrzewającej typ WSD 80 firmy Weller. Płyta podgrzewająca zawiera 80 W grzejnik i rezystor platynowy, jako czujnik temperatury. Maksymalna temperatura osiągalna przy zastosowaniu 80 W grzejnika wynosi 450°C, jednakże ze względu na wytrzymałość termiczną obudów badanych fotodetektorów nie przekracza się w pomiarach temperatury 200°C.



Rys. 1. Fragment stanowiska wygrzewania fotodetektorów w badaniach długoczasowych

Ponieważ w stanowisku pomiarowym regulacja temperatury jest przewidziana dla trzech zestawów fotodetektorów, dlatego też trzy płyty podgrzewające WSD 80 są podłączone do trójkanałowego sterownika WD 3W firmy Weller. Maksymalna moc sterownika dla trzech kanałów to 420 W, zakres regulacji temperatury od 50°C do 450°C, zaś stabilność temperaturowa wynosi $\pm 5^\circ\text{C}$.

Nastawy wartości temperatury dla każdego z kanałów można deklarować ręcznie z pulpitu przyrządu lub za pośrednictwem interfejsu USB. Sterownik utrzymuje zadaną

wartośc temperatury korzystając z cyfrowego algorytmu regulacji PID. Poniewaz przerwanie zasilania energetycznego sterownika może doprowadzic do rozprogramowania nastaw poszczególnych kanalw, sterownik podlcza sie do sieci za pośrednictwem 650 W zasilacza awaryjnego. Pozwala to na ochrone sterownika przed zanikami zasilania energetycznego do 10 minut. Na ogól w czasie wygrzewania fotodetektory nie są polaryzowane. Możliwe jest dolczenie odpowiednich obwodów polaryzacji fotodetektorów, przy czym trzeba pamitac o użyciu specjalnych lutów o podwyższonej temperaturze topnienia np. obwodów polaryzacji detektorów zamocowanych w zestawach pracujących w temperaturze 200.

2.2 Stanowisko do pomiarów charakterystyk widmowych

Podstawowymi modułami stanowiska pomiarowego są:

- zespól monochromatora z wymiennymi owietlaczami,
- zespól pomiaru fotoprądu detektora.

W stanowisku pomiarowym do selektywnego wyboru długości fali świetlnej padającej na badany fotodetektor zastosowano monochromator Cornestone 260 typ 74100 firmy Oriel. Monochromator jest zbudowany w układzie Czerny – Turnera o ogniskowej $\frac{1}{4}$ m i umożliwia badanie fotodetektorów w zakresach zdeterminowanych wymiennymi siatkami dyfrakcyjnymi i zastosowanymi źródłami promieniowania optycznego. Stanowisko pomiarowe przeznaczone jest do badan detektorów w zakresach UV, VIS do bliskiej IR. Monochromator może wsplpracowac z dwoma typami rdel promieniowania optycznego. Podstawowe rdo wykorzystuje 150 W ksenonowa lamp typ XBO150 W/CR OFR o bardzo małym poziomie emisji ozonu. Charakterystyka widmowa tej lampy rozciąga sie od 200 nm do 1100 nm a wiec przy zastosowaniu odpowiednich siatek dyfrakcyjnych umożliwia badanie fotodetektorów w szerokim zakresie widmowym. W przypadku pomiarów detektorów pracujących tylko w zakresie UV o użytkowym zakresie charakterystyki widmowej od 200 nm do 400 nm - można zastosowac także inny typ oświetlacza z 30 W lamp deuterową typ 6006 firmy Oriel.

Przebieg zmierzonej charakterystyki widmowej nie odzwierciedla rzeczywistego przebiegu charakterystyki widmowej badanego detektora, gdyz jest ona odkształcona na skutek składowych widmowych oświetlacza, monochromatora, interfejsu optycznego itp. Dlatego konieczne jest zarejestrowanie w tych samych warunkach pomiarowych przebiegu charakterystyki widmowej dla fotodetektora wzorcowego co pozwala opracowac tablice poprawek. W stanowisku pomiarowym, jako detektora wzorcowego używa sie krzemowej fotodiody S120VC firmy Thorlabs skalibrowanej według procedur National Institute of Standards and Technology – USA.

Sygnl prądowy z wyjscia detektora jest dla większości konfiguracji pomiarowych wzmacniany w niskoszumowym wzmacniaczu transimpedancyjnym I/U typ 428 firmy Keithley. Pomiar fotoprądu przy użyciu przetwornika I/U typ 428 firmy Keithley jest najbardziej zbliżony do testowych konfiguracji pomiarowych podawanych przez producentów detektorów. W przypadku niektórych fotodetektorów sygnl prądowy z badanego detektora znajduje sie poniżej średniego poziomu szum - dla takich pomiarów konieczne jest zastosowanie nanowoltomierza fazoczułego. Pomiar przy użyciu nanowoltomierza fazoczułego wymaga modulacji strumienia promieniowania świetlnego. Modulacja dokonywana jest za pomocą wirującej tarczy przelcznika mechanicznego typ SR549 firmy Stanford. Z transoptora szczelinowego tego modulatora otrzymuje sie sygnl

referencyjny o częstotliwości i fazie, względem których odbywa się w nanowoltomierzu fazoczułym proces analizy sygnału z badanego detektora w bardzo wąskim (około 0,01 Hz) paśmie częstotliwości. Z kolei pomiar fotoprądu przy użyciu źródła wymuszająco-pomiarowego typu 236 firmy Keithley jest wskazany dla detektorów UV. Takie detektory charakteryzują się bardzo małymi wartościami fotoprądu (rzędu pojedynczych nA).

Na rysunku 2 przedstawiono zdjęcie stanowiska pomiarowego w części toru optycznego przeznaczonego do rejestracji charakterystyk widmowych fotodetektorów.



Rys. 2. Widok stanowiska pomiarowego w części toru optycznego

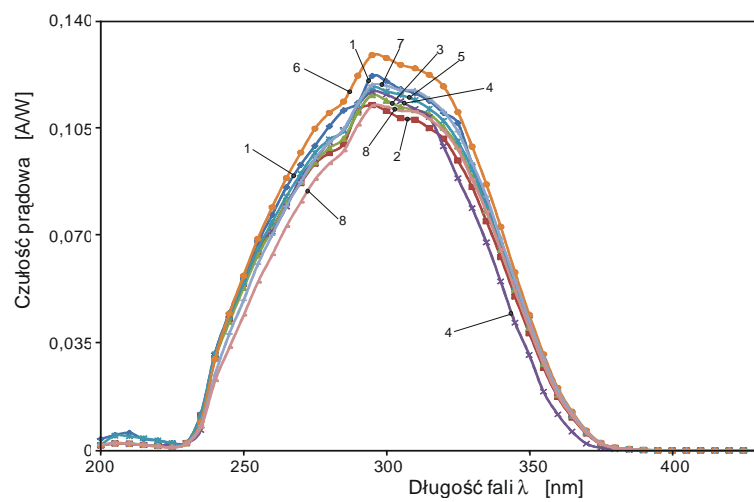
3. WYNIKI BADAŃ

W ramach pracy przeprowadzono badania fotodetektorów wykonanych z SiC. Węglik krzemu jest jednym z najbardziej perspektywicznych materiałów półprzewodnikowych.

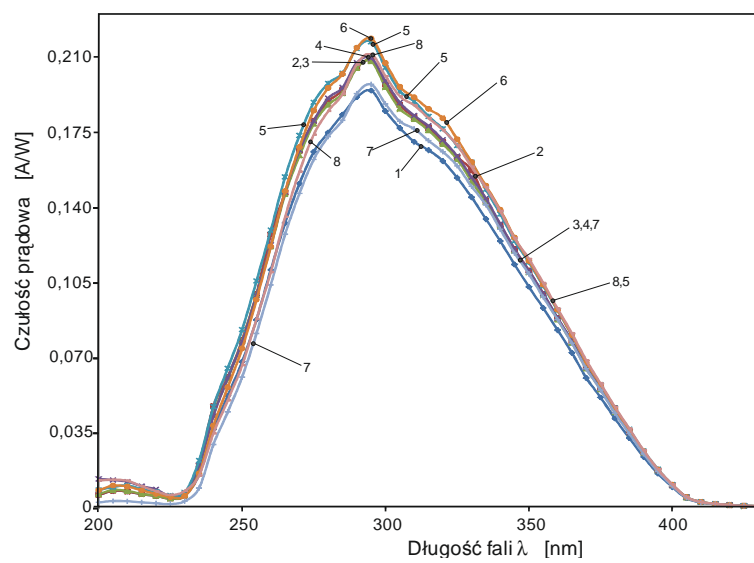
Badane detektory były wygrzewane w czterech temperaturach: pierwszy detektor – 50°C, drugi detektor – 90°C, trzeci detektor – 150°C, czwarty detektor – 200°C. Detektory były wygrzewane przez 42 dni.

Podczas wygrzewania wykonano 8 pomiarów charakterystyk detektorów w różnych odstępach czasu. Na czas pomiaru detektory były wyjmowane i przenoszone na stanowisko pomiarowe. Przedstawione - na kolejnych 4 rysunkach - charakterystyki widmowe były mierzone w temperaturze pokojowej. Chodziło o to, aby uwzględnić w badaniach jedynie wpływ wygrzewania w podwyższonej temperaturze na strukturę detektora.

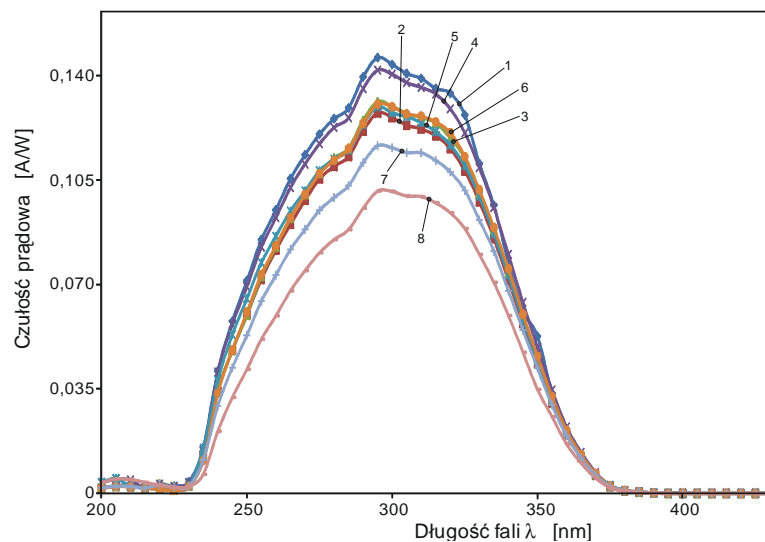
Na rysunkach kolejne charakterystyki są oznaczone narastająco cyframi: 1 - to pierwszy pomiar przed wygrzewaniem, 2 - pomiar po 24 godz., 3 - pomiar po 40 godz., 4 - pomiar po 72 godz., 5 - pomiar po 216 godz., 6 - pomiar po 360 godz., 7 - pomiar po 672 godz. oraz 8 - ostatni pomiar po 42 dniach.



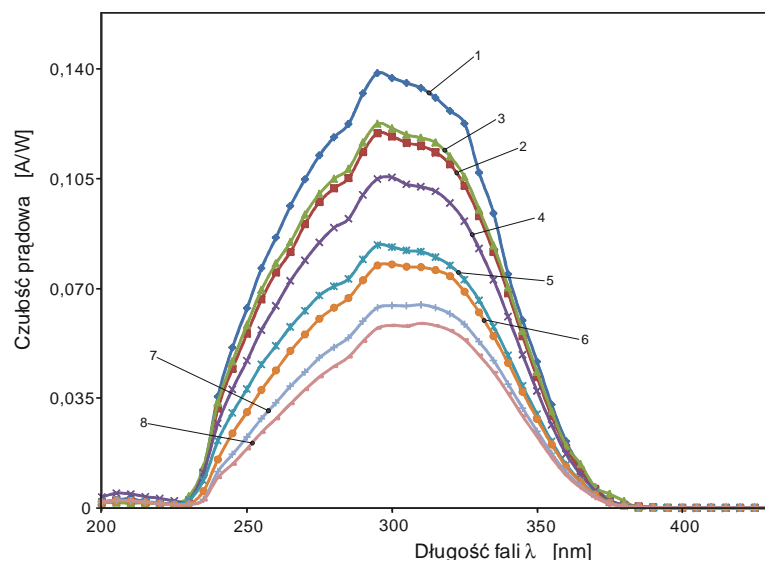
Rys. 3. Charakterystyki widmowe detektora - 50 °C



Rys. 4. Charakterystyki widmowe detektora - 90 °C



Rys. 5. Charakterystyki widmowe detektora - 150 °C



Rys. 6. Charakterystyki widmowe detektora - 200 °C

Jak widać z przedstawionych pomiarów – zgodnie z oczekiwaniami ogólnie czułość prądowa maleje w funkcji czasu wygrzewania w podwyższonej temperaturze. Najbardziej

jest to widoczne w temperaturach wyższych - 150°C i 200 °C. Jednakże przy wygrzewaniu w temperaturach poniżej 100 °C zmiany są znacząco niższe – kilka procent i są odchylenia od tej reguły. Można zaobserwować taki okres czasu wygrzewania, gdy czułość detektorów rośnie o kilka procent. Efekt wzrostu czułości związany jest to prawdopodobnie z istnieniem defektów w monokryształe SiC – krótkotrwałe wygrzewanie eliminuje niektóre z nich.

4. WNIOSKI

Właściwości detektora promieniowania optycznego określa się głównie z przebiegu jego charakterystyk widmowych. Na podstawie tych charakterystyk wyznaczane są jego parametry – czułość widmowa, wykrywalność czy parametr NEP. W zastosowaniach militarnych czy specjalnych znajomość parametrów detektora tylko w temperaturze pokojowej może być niewystarczająca.

Opracowana metodyka badań i dedykowane stanowiska badawcze pozwalają na badanie wpływu długoczasowego wygrzewania w podwyższonej temperaturze na charakterystyki widmowe detektorów.

Przeprowadzone badania detektorów z SiC pozwoliły określić zmiany ich czułości w wyniku długotrwałego wygrzewania w temperaturach z zakresu od 50°C do 200°C. Po wygrzewaniu w temperaturze 200°C przez 42 dni czułość maleje o około 60%. Dodatkowo okazało się w wyniku badań, że korzystne jest kilkudniowe wygrzewanie detektora z SiC w temperaturze nieprzekraczającej 100°C, gdyż uzyskuje się kilkuprocentowe zwiększenie jego czułości

Praca naukowa, w ramach, której powstał ten artykuł, jest finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2012 jako projekt badawczy własny nr 0540/B/T00/2009/37.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Hari Sing Nalwa – editor, *Photodetectors and Fiber Optics*. Academic Press, 2001, ISBN 0-12-513908-X
- [2] Shur M. S. (editor), Zakauskas A. (editor). *UV Solid-State Light Emitters and Detectors*. NATO Science Series. Series II, vol. 144. ISBN 1-4020-2103-8 (e-book)
- [3] www.thorlabs.com. Detectors. Calibrate Photodiodes
- [4] Dahay R. i in. *AIN MSM and Schottky Photodetectors*. Phys. Stat. Solid. © 5, no. 6, 2145-2153 (2008)
- [5] Omnes F, Manroi E. *Ultraviolet Photodetectors*. Optoelectronics Sensor. (2010), pp. 181-222
- [6] Liu H-D. i in. *Demonstration of Ultraviolet 6H-SiC PIN Avalanche Photodiodes*. IEEE Photonics Technology Letters, vol. 18. No. 23, December 1, 2006, pp. 2508-2510
- [7] Liu H. i in. *4H-SiC PIN Recessed-Window Avalanche Photodiode with High Quantum Efficiency*. Photonics Technology Letters, IEEE, vol. 20, issue 18, 2008, pp. 1551-1553
- [8] Chang W-R. i in. *The hetero-Epitaxial SiCN/Si MSM Photodetector for High-Temperature Deep-UV Detecting Applications*. IEEE Electron Device Letters, vol. 24, No. 9, September 2003, pp. 565-567