doi:10.15199/48.2017.11.21

Wpływ długoterminowych wymuszeń optycznych na charakterystyki widmowe detektorów UV

Streszczenie. Detektory UV są używane w pracach badawczych, przemyśle i aplikacjach wojskowych. W pracy przedstawiono wyniki eksperymentalnych badań półprzewodnikowych detektorów UV. Omówiono zrealizowane stanowisko badawcze umożliwiające poddawanie detektorów długoczasowym wymuszeniom optycznym oraz system pomiarowy do rejestracji charakterystyk widmowych.

Abstract. UV detectors are used in research, industry, and military applications. The paper presents the results of experimental investigations semiconductor UV detectors. The research stand to allow long-term optical exposure on detectors has been described and the measurement system. for recording spectral characteristics. Long-term optical exposure of semiconductor UV detectors.

Słowa kluczowe: półprzewodnikowe detektory UV, charakterystyki widmowe, długoterminowe pobudzenia optyczne Keywords: semiconductor UV detectors, spectral characteristics, long-term optical excitation

Wstęp

Ostatnio, ze względu na powszechne zagrożenie międzynarodowym terroryzmem, wzrosło znaczenie systemów miejscowego i zdalnego wykrywania zagrożeń i skażeń, w których jednym z podstawowych sensorów są detektory UV [1]. Detektory UV są stosowane coraz powszechniej w sprzęcie wojskowym: w konstrukcjach broni inteligentnych, stacjonarnych i indywidualnych środkach ochrony chemicznej i biologicznej, a także systemach detekcji rakiet balistycznych i sterowaniem ogniem artyleryjskim. Powszechnie stosowane są również w czujkach płomienia zarówno w systemach ochrony przeciwpożarowych jak i automatyki przemysłowej.

Ze względu na zastosowane materiały półprzewodnikowe detektory UV można podzielić na detektory bazujące na modyfikowanym krzemie oraz na materiałach półprzewodnikowych o szerokiej przerwie zabronionej [2], [3], [4].

Dla konstruktorów półprzewodnikowych detektorów UV, oprócz uzyskania jednorodnej powierzchni aktywnej, ważne jest zapewnienie wymaganego kształtu charakterystyki czułości widmowej i dużej czułości detektora [5].

Kształtowanie charakterystyk widmowych detektorów odbywa się przeważnie przez zmianę składu procentowego związków półprzewodników. Przykładowo, dla diody Schottky'ego z Al_{0,37}Ga_{0,63}N szerokość przerwy zabronionej wynosi 4,4 eV, co odpowiada maksymalnej czułości fotodetektora dla 280 nm. Ta długość fali leży w obszarze UV-C. Dla związku Al_{0,17}Ga_{0,83}N maksimum czułości detektora będzie dla 320 nm, a więc dla zakresu UV-B.

Badania detektorów

Podstawowym parametrem konstrukcyjnym opisującym właściwości fotodetektora jest jego *czułość widmowa* na promieniowanie - określająca stosunek zmiany sygnału elektrycznego na wyjściu detektora do wywołującej ją zmiany wartości mocy promieniowania [6], [7]. Parametrem pozwalającym na obiektywne porównywanie detektorów jest znormalizowana *wykrywalność (detekcyjność) widmowa* uwzględniająca szumy ograniczające możliwości detektora

W materiałach półprzewodnikowych na szum wypadkowy, oprócz szumu cieplnego składają się głównie szumy generacyjno-rekombinacyjne, szumy typu 1/f i w niektórych przypadkach szum śrutowy i wybuchowy.

Przy wyborze detektorów UV do konkretnej aplikacji należy uwzględnić, że ich parametry optyczne i elektryczne mogą się zmieniać w znacznym stopniu podczas eksploatacji, w wyniku zachodzenia w ich strukturze różnorodnych procesów degradacyjnych [9], [10].

Najczęstszymi źródłami tych procesów są długoczasowe poddawania struktury półprzewodnikowej detektora UV wpływowi silnego promieniowania termicznego lub/i optycznego, znacznie przewyższających nominalne warunki pracy.

Degradacyjny efekt silnego promieniowania termicznego i optycznego zależy w znacznym stopniu od rodzaju i jakości materiału półprzewodnikowego, z którego został wykonany detektor. Oddziaływania te mają bardzo często miejsce w przypadku zastosowania detektorów w sprzęcie wojskowym, kosmicznym, badaniach struktury atomu, astronomii itp.

prowadzić Może to od odwracalnych lub parametrów nieodwracalnych zmian podstawowych detektorów UV i musi być brany pod uwagę przez konstruktorów różnorodnych systemów dla optoelektronicznych, szczególnie zastosowań specjalnych, militarnych i aplikacji kosmicznych [11], [12].

Stanowisko badawcze – długoczasowe pobudzenia optyczne

Badania wpływu długotrwałych wymuszeń optycznych jest realizowane na dedykowanym stanowisku badawczym.



Rys. 1. Stanowisko do realizacji długoczasowych pobudzeń detektorów UV wymuszeniami optycznymi z lampą ksenonową 450 W;

Stanowisko zostało zainstalowane w specjalnie zaprojektowanej i wykonanej obudowie. Na jednej ścianie obudowy jest zamocowany specjalny moduł dla detektorów – na przeciwległej - oświetlacz. Takie rozwiązanie zostało pokazane na rys.1, gdzie jako oświetlacz użyta została 450 W lampa ksenonowa.

Przy badaniu wpływu długoczasowych wymuszeń optycznych na strukturę fotodetektora używa się alternatywnie:

- lampy ksenonowej o mocy 450 W;
- lampy ksenonowej o mocy 150 W;
- zespołu lamp fluorescencyjnych.

Ponieważ lampa 450 W wydziela znaczna ilość ciepła musi być schładzana 4 wentylatorami, dla zapewnienia właściwych warunków temperaturowych pracy lampy i żeby zbytnio nie podniosła się temperatura otoczenia, w której znajduje się uchwyt z badanymi detektorami. Lampa 450 W jest lampą ciśnieniową i stanowi większe zagrożenie wybuchem niż lampa ksenonowa 150 W, używana, między innymi w oświetlaczach monochromatorów. W temperaturze pokojowej ciśnienie ksenonu w bańce lampy o dosyć cienkich ściankach wynosi 1 at. W czasie pracy temperatura łuku wyładowawczego osiąga przy katodzie 500°C, na skutek czego ciśnienie ksenonu wzrasta do około 4 at. Ponieważ w tych warunkach lampa staje się bardzo czuła na wszelkie udary i naprężenia, bardzo ważne jest właściwe jej mocowanie mechaniczne w oświetlaczu. Szczególną ostrożność należy zachować przy montażu i demontażu tej lampy. Przenosić ją można tylko z pokrywą transportową stosując dodatkowo odpowiednie ubranie i maskę na twarz (rys. 2).



Rys. 2.. Lampa ksenonowa 450 W przygotowana do przenoszenia. Pod lampą pokazano dedykowany dla jej zasilania zasilacz stabilizowany ZXE 450

Lampa ksenonowa 150 W musi pracować w pozycji poziomej i jest zasilana z zasilacza stabilizowanego ZXE 150. Obowiązują te same zasady bezpieczeństwa co w przypadku lampy 450 W, tzn. pokrywa transportowa na czas montażu i demontażu lampy oraz ubiór ochronny. Taki sam typ lampy jest również wykorzystywany w jednym z oświetlaczy monochromatów.

Ostatnim typem oświetlaczy używanych w stanowisku pomiarowym jest zespół pięciu lamp fluorescencyjnych (rys. 3). W skład zespołu wchodzi 5 lamp:

- 3 lampy UV Leo Compact, 36W, UV-A. Model PL-L-36
- 1 lampa UV 36W UV-B. Model PL-L-36W 01
- 1 lampa UV 36W UV-C. Model PL-L 36W UVC



Rys. 3. Oświetlacz z zespołem pięciu lamp fluorescencyjnych (wysunięty na prowadnicach kulkowych z obudowy0

System pomiarowy – pomiary charakterystyk widmowych

Dedykowane stanowisko pomiarowe do rejestracji charakterystyk widmowych detektorów UV poddanych uprzednio długoczasowym pobudzeniom termicznym lub/i optycznym jest zestawiane w oparciu o jeden z dwóch monochromatorów:

- monochromator Cornestone 260 typ 74100 firmy Oriel, - monochromator M250/1800/UV firmy Optel.

Wykorzystywane w systemie badawczym dwa monochromatory mogą, dla pomiarów w zakresach UV, IR i bliskiej podczerwieni, współpracować z dwoma typami lamp ksenonowych. Pierwszy typ to lampa ksenonowa lampę XBO150 W/CR OFR, z bardzo małym poziomem emisji ozonu, średniej luminancją 1800 cd/cm² i trwałości około 3000 h. Charakterystyka widmowa lampy umożliwia pomiary detektorów od około 230 nm do 800 nm, czyli detektorów pracujących w zakresie UV, światła widzialnego i bliskiej podczerwieni. Maksymalny, o prawie stałym natężeniu, strumień świetlny występuje w zakresie od 400 do 800 nm. Jednakże dla fali o długości 230 nm natężenie strumienia świetlnego jest około 100 razy mniejsze od wartości maksymalnej.

Pięciokrotne zwiększenie natężenia strumienia świetlnego dla fali o długości 230 nm można uzyskać zastępując lampę XBO150 W/CR OFR, niestety silnie ozonującą, lampą XBO 150/W1. Wymienione lampy ksenonowe wymagają współpracy z stabilizowanym zasilaczem prądu stałego regulowanym w zakresie od 6 A do 8,5 A z 25 kV układem zapłonowym

Dla pomiarów detektorów mających ograniczony zakres charakterystyki widmowej do 400 nm preferowany jest oświetlacz z 30 W lampą deuterową. Taki oświetlacz jest zalecany do badań detektorów UV wykonanych z półprzewodników o szerokiej przerwie zabronionej.

Monochromator Cornestone 260 typ 74100 firmy Oriel (rys. 4) może współpracować z dwoma typami oświetlaczy: lampą ksenonową i lampa deuterową. W systemie pomiarowym zastosowano fabryczny oświetlacz 70510 firmy Newport z lampą deuterową 63164 z wbudowanym wewnętrznym modułem zasilającym. W oświetlaczu z lampą deuterową o mocy 30 W prawie cała jej moc jest oddawana w zakresie UV, a więc jest ona wydajniejsza w zakresie UV niż 150 W lampa ksenonowa o pięciokrotnie wyższej mocy.

W systemie pomiarowym stosuje się alternatywnie do pomiaru fotoprądu detektora: przetwornik I/U typ 428 firmy Keithley, nanowoltomierz fazoczuły SR 830 firmy Stanford Research Systems (SRS) i źródło wymuszająco-pomiarowe typ 236 firmy Keithley. Pomiar fotoprądu przy użyciu przetwornika I/U typ 428 firmy Keithley jest najbardziej zbliżony do testowych konfiguracji pomiarowych podawanych przez producentów detektorów. Konfiguracja ta nie jest jednak optymalna dla wielu badań.



Rys. 4. Fotografia fragmentu systemu pomiarowego dla rejestracji charakterystyk widmowych z monochromatorem Cornestone 260 typ 74100 firmy Oriel

Z kolei pomiar nanowoltomierzem SR 830 jest szczególnie zalecany w przypadku znacznego zaszumienia sygnału fotoprądu. Pomiar wymaga modulacji strumienia promieniowania optycznego. Modulacja dokonywana jest za pomocą wirującej tarczy przełącznika optomechanicznego typ SR549 firmy Stanford.

Pomiar fotoprądu przy użyciu źródła wymuszającopomiarowego typu 236 firmy Keithley jest wskazany dla detektorów UV wykonanych z półprzewodników z szeroką przerwą zabronioną. Detektory te charakteryzują się bardzo małymi wartościami fotoprądu i niekorzystnymi dla poprzednich konfiguracji wartościami rezystancji źródła sygnału dla prądu ciemnego i oświetlenia. Przyrząd pracuje w trybie wymuszenia napięcia i pomiaru prądu. Detektor jest polaryzowany w praktyce niewielkim napięciem (ok. 0,1 V) w kierunku zaporowym, chociaż przy ustawieniu napięcia wymuszającego na 0 V detektor nie będzie polaryzowany, co odpowiada pracy z przetwornikiem I/U typ 428. W zastosowanej konfiguracji źródło wymuszającopomiarowe może rejestrować fotoprąd począwszy od 1 pA, oczywiście w środowisku o małym poziomie szumów.

Jako detektor wzorcowy zastosowano w systemie pomiarowym fotodiodę krzemową S120VC firmy Thorlabs. Kalibracja tej fotodiody została przeprowadzona przez producenta według procedur National Institute of Standards and Technology – USA. Powierzchnia czynna detektora ma kształt koła o średnicy 9,5 mm.

Wyniki badań

Jako reprezentatywne zostaną przedstawione wyniki badań detektorów, poddanych długoczasowym wymuszeniom optycznym, wykonanych z różnych materiałów półprzewodnikowych – GaN, GaP, SiC i TiO₂.

Detektory poddawane były długoczasowym pobudzeniom - źródłem promieniowania optycznego była lampa ksenonowa o mocy 450 W. Całkowity cykl podawania wymuszenia optycznego wyniósł 880 godzin. Podczas badań wykonano 12 pomiarów w różnych odstępach czasu. Pomiary odbywały się: 1 – 0 godzin (rejestracja charakterystyki widmowej przed włączeniem wymuszenia optycznego), 2 – po 12 godzinach, 3 – po 24 godzinach, 4 – po 36 godzinach, 5 – 48 godzinach, 6 – po 60 godzinach, 7 – po 100 godzinach, 8 – po 180 godzinach, 9 – po 260 godzinach, 10 – po 360 godzinach, 11 – po 560 godzinach i 12 – po 880 godzinach.

Przed rozpoczęciem badań i pomiarów oraz na zakończenie była rejestrowana charakterystyka widmowa detektora wzorcowego.

Ponieważ sygnał fotoprądu dla badanych detektorów UV jest znacznie mniejszy niż w przypadku popularnych detektorów krzemowych pomiary zostały wykonane z zastosowaniem źródła wymuszająco-pomiarowego typu 236 firmy Keithley.

Na rysunku 5 przedstawiono charakterystyki widmowe detektora 17A1 (SG01-HT), wykonanego z SiC, zarejestrowane w interwałach czasowych 1 – 11 (bez 320 godzinnego interwału 12). Z kolei na rysunku 6 przedstawiono charakterystyki widmowe tego samego detektora zarejestrowane po 3 interwałach czasowych 1, 11 i 12 co pozwala lepiej zaobserwować, zmiany w

i 12, co pozwala lepiej zaobserwować zmiany w przebiegach tych charakterystyk.







Rys.6. Charakterystyki widmowe detektora 17A1-SiC (SG01-HT) dla pomiarów 1, 11 i 12

Podobne pary charakterystyk widmowych dla kolejnych badanych detektorów przedstawiono na kolejnych rysunkach:

- detektora 18A2 (AG32S) - rysunki 7 i 8;

- detektora 19A1 (AG38S) - rysunki 9 i 10);

- detektora 07A6 (EDP-365-0.3.6) - rysunki 11 i 12.

Jak wspomniano wcześniej - kształtowanie charakterystyk widmowych detektorów odbywa się przez zmianę składu procentowego związków półprzewodnikowych.

Takim przykładem są dwa badane detektory wykonane z GaN – AG32S i AG38S – mają różną domieszkę Al i w związku z tym inny udział procentowy Ga.

W konsekwencji przebieg ich charakterystyk widmowych znacznie się różni.



Rys. 7. Charakterystyki widmowe detektora 18A2-GaN (AG32S) dla pomiarów 1 – 11



Rys. 8. Charakterystyki widmowe detektora 18A2-GaN (AG32S) dla pomiarów 1, 11 i 12



Rys. 9. Charakterystyki widmowe detektora 19A1-GaN (AG38S) dla pomiarów 1 – 11



Rys.10. Charakterystyki widmowe detektora 19A1-GaN (AG38S) dla pomiarów 1, 11 i 12



Rys. 11. Charakterystyki widmowe detektora 07A6-GaP (EDP-365-0/3.6) dla pomiarów 1 – 11



Rys. 12. Charakterystyki widmowe detektora 07A6 (EDP-365-0/3.6) dla pomiarów 1, 11 i 12

Na rysunku 13 przedstawiono charakterystyki widmowe detektora 02A5 (TW30SX), wykonanego z TiO_2 , zarejestrowane w interwałach czasowych 1 – 11 - ostatni pomiar po 560 godzinach - bez ostatniego 320 godzinnego interwału 12.



Rys. 13. Charakterystyki widmowe detektora 02A5-TiO_2 (TW30SX) dla pomiarów 1 – 11

Podczas wygrzewania w okresie 560 - 880 godzin detektor uległ uszkodzeniu - przy próbie rejestracji charakterystyki widmowej po 880 godzinach wykazywał przepływ prądu stałego 50 nA w całym zakresie pomiarowym.

Wcześniejsze pomiary wykazywały także małą odporność wybranych typów detektorów wykonanych z TiO₂ na długoczasowe, silne wymuszenia termiczne.

Jak wynika z przedstawionych badań - wszystkie detektory, za wyjątkiem detektora wykonanego z TiO₂ - pomyślnie przeszły długoterminowe pobudzenia optyczne.

Jest bardzo ważne, zwłaszcza w aspekcie stosowania detektorów UV w aplikacjach specjalnych, przykładowo w aparaturze kosmicznej.

Dodatkowo, zaobserwowano interesujący fakt – badane detektory nie tylko nie uległy uszkodzeniom (za wyjątkiem detektora wykonanego z TiO_2) ale także ich czułość po tak długim czasie nie uległa pogorszeniu. W przypadku długotrwałego wygrzewania w podwyższonej temperaturze – czułość detektorów - w zależności od materiału półprzewodnikowego, ulega w mniejszym lub większym stopniu pogorszeniu.

W przypadku długotrwałego pobudzenia optycznego czułość nieznacznie wzrasta – jest zwłaszcza widoczne podczas pomiaru 11 i 12 (odpowiednio po 560 i 880 godzinach). Ewentualnie można zalecić długotrwałe pobudzanie optyczne jako metodę kondycjonowanie detektorów UV do zastosowań specjalnych.

Podsumowanie

Badania uwzględniające ekstremalne warunki pracy detektora pozwalają oceniać niezawodność długoczasową detektora. Badania długoczasowe umożliwiają uzyskanie dodatkowych, pozakatalogowych informacji z punktu widzenia wymagań eksploatacji np. sprzętu wojskowego. Badania takie są niezbędne przy praktycznej realizacji koncepcji stosowania w sprzęcie specjalnym i wojskowym komercyjnie dostępnych podzespołów elektronicznych i optoelektronicznych.

W pracy przedstawiono zrealizowane stanowisko badawcze umożliwiające poddawanie detektorów UV długotrwałym narażeniom optycznym oraz system pomiarowy do rejestracji charakterystyk widmowych. Przedstawiono wyniki badań długoczasowych reprezentatywnych typów półprzewodnikowych detektorów UV wykonanych z materiałów o szerokiej przerwie zabronionej.

Autorzy:

dr inž. Joanna Ćwirko, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, ISE, ul. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: joanna.cwirko@wat.edu.pl;

dr inż. Robert Ćwirko, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, ISE, ul. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: robert.cwirko@wat.edu.pl

LITERATURA

- [1] Fraden J., Handbook of Modern Sensors: Physics, Design and Applications, *Springer, Berlin Heidelberg*, New York 2003
- [2] Bielecki Z., Rogalski A., Detekcja sygnałów optycznych, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2001
- [3] Rieke G. H. Detection of Light:From the Ultraviolet to Submillimeter. Cambridge University Press, 2003
- [4] Rogalski A., Advanced Technologies in Development of Optical Detectors, *Elektronika* 12/2004, 5136, 12-19
- [5] Ziętek B., Optoelektronika, Wydawnictwo Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń 2005
- [6] Szweda R., GaN and SiC detectors for radiation medicine. *The Advanced Semiconductor Magazine*, vol. 18, no 7, September/October 2005, .40-41
- [7] Ściana B., Zborowska-Lindert I., Pucicki D. i inni Technology and characterisation of GaAsN/GaAs heterostructures for photodetector application. *Optoelectronics Rev.*, March 2008,Volume 16. 1-7
- [8] Yan F., Zhao J. H., Olsen H.G., Demonstration of the first 4H-SiC avalanche photodiodes. *Solid-State Electronics* 44 (2000), 341 - 346
- [9] Liu H-D. i in. Demonstration of Ultraviolet 6H-SiC PIN Avalanche Photodiodes. IEEE *Photonics Technology Letters*, vol. 18. No. 23,, pp. 2508-2510, Dec. 1, 2006
- [10] Ueda Y., Akita S., Nomura Y., Nakayama Y., Naito H.: Study of high temperature photocurrent of 6H-SiC UV sensors. *Thin Solid Films* 517 (2008), 1471-1473
- [11] Razeghi M., Chen G. i nni. Type-II InAs/GaSb photodiodes and focal plane arrays aimed at high operating temperatures *Optoelectronics Rev.*, September 2011, Volume 19, 361-369
- [12] Li M., Anderson W. A., Si-based metal-semiconductor-metal photodetectors with various modifications. *Solid-State Electronics* 51 (2007), 94 – 101