

Joanna ĆWIRKO, Robert ĆWIRKO

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA,
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

Długoczasowe badania detektorów UV z TiO_2

Dr inż. Joanna ĆWIRKO

Jest adiunktem w Instytucie Systemów Elektronicznych, Wydziału Elektroniki WAT. Specjalizuje się w technologii i diagnostyce półprzewodników, w tym szczególnie w pomiarach szumowych oraz w badaniach detektorów UV zbudowanych na bazie półprzewodników z szeroką przerwą zabronioną. Zajmuje się też tematyką inżynierii ochrony, w tym monitoringu dla systemów sygnalizacji włamania i napadu oraz zagadnieniami dotyczącymi konstrukcji urządzeń elektronicznych.

e-mail: jcwirko@wat.edu.pl



Dr inż. Robert ĆWIRKO

Jest adiunktem w Instytucie Systemów Elektronicznych, Wydziału Elektroniki WAT. Prowadzi badania w zakresie technologii i diagnostyki szerokiego spektrum przyrządów półprzewodnikowych, w tym szczególnie dotyczących pomiarów małosygnałowych w szerokim zakresie zmian wartości temperatury począwszy od pojedynczych stopni Kelwina. Zajmuje się też tematyką inżynierii bezpieczeństwa, w tym technicznymi środkami ochrony, systemami kontroli dostępu i monitoringiem telewizyjnym.

e-mail: rcwirko@wat.edu.pl



Streszczenie

Detektory UV są stosowane w sprzęcie wojskowym - w konstrukcjach broni inteligentnych, stacjonarnych i indywidualnych środkach ochrony chemicznej i biologicznej czy w systemach detekcji rakiet balistycznych i sterowaniu ogniem artyleryjskim. Podstawowym parametrem detektora jest kształt charakterystyki czułości widmowej. W artykule przedstawiono wyniki eksperymentalnych badań detektorów UV wykonanych z TiO_2 . Badania dotyczyły wpływu długoczasowego wygrzewania w podwyższonej temperaturze oraz wpływu pobudeń optycznych na charakterystyki widmowe detektorów. Dla porównania przedstawiono wybrane wyniki badań detektorów wykonanych z SiC oraz GaN. W pracy opisano zrealizowane stanowisko badawcze umożliwiające poddawanie detektorów UV długotrwałym narażeniom termicznym i optycznym oraz stanowisko pomiarowe do rejestracji ich charakterystyk widmowych.

Słowa kluczowe: detektory UV, charakterystyki widmowe, badania długoczasowe.

Long term tests of UV detectors based on TiO_2

Abstract

UV detectors are used in military equipment - in the construction of smart weapons, fixed and individual plant protection chemical and biological detection systems, or in ballistic missile and artillery fire control. The design of the detectors is mainly based on semiconductor materials with a wide gap. In the presented study the authors decided to focus on the effects of elevated temperatures during operation and long-lasting impact of strong optical excitation on the characteristics of spectral detectors. This paper describes the realized research station enabling subjecting the UV detectors to long-term thermal/optical exposures (Fig. 1) as well as measuring and recording the position of their spectral characteristics (Figs. 2, 3). The presented accurate long-term studies are performed as follows: the test detector is thermally and / or optically activated - total stimulation cycle can take up to several weeks. This cycle is divided into periods of time - after this time, in the ambient temperature, there is recorded the spectral characteristic of the detector. This way you can observe how gradually changes the course of the detector spectral characteristic changes gradually in relation to the characteristic recorded before the start of excitation. The paper presents the results of experimental studies of the UV detectors made of TiO_2 (Figs. 4-6). For comparison, there are presented the selected results of investigations of the detectors made of SiC and GaN (Figs. 4, 6). The tested detectors were also subjected to long-term optical excitation - the source of radiation was a xenon lamp of 450 W power (Fig. 9). The basic parameter of the detector is the shape of the spectral sensitivity. Accurate long-term tests allow obtaining additional information in terms of using these detectors in special applications.

Keywords: UV detectors, spectral characteristics, accurate long-term research.

1. Wstęp

Detektory UV są stosowane w sprzęcie wojskowym - w konstrukcjach broni inteligentnych, stacjonarnych i indywidualnych

środkach ochrony chemicznej i biologicznej czy w systemach detekcji rakiet balistycznych i sterowaniu ogniem artyleryjskim [1]. W wyniku obniżenia kosztów produkcji są coraz powszechniej stosowane na rynku komercyjnym - przykładowo, w czujkach płomienia zarówno w systemach ochrony przeciwpożarowych jak i automatyki przemysłowej. Ze względu na wykorzystywane materiały półprzewodnikowe detektory UV można podzielić na detektory bazujące na modyfikowanym krzemie oraz na materiałach półprzewodnikowych o szerokiej przerwie zabronionej [2]. Podstawowym parametrem detektora UV jest kształt charakterystyki czułości widmowej.

Obecnie na rynku komercyjnym dostępnych jest wiele typów półprzewodnikowych detektorów na zakres UV. Przy wyborze detektorów UV do konkretnej aplikacji należy uwzględnić, że ich parametry optyczne i elektryczne mogą się zmieniać w znacznym stopniu podczas eksploatacji na skutek występowania w ich strukturze różnorodnych procesów degradacyjnych. Najczęstszymi źródłami tych procesów jest długoczasowe poddawanie struktury półprzewodnikowej detektora UV wpływowi silnego promieniowania termicznego lub/i optycznego, znacznie przewyższających nominalne warunki pracy [3]. Ma to przykładowo miejsce w przypadku detektorów stosowanych w sprzęcie wojskowym.

W konsekwencji, powinny być prowadzone badania wpływu długoczasowego przebywania detektorów w ekstremalnych warunkach środowiskowych na ich charakterystyki widmowe. Badania tego typu pozwalają również prognozować niezawodność długoczasową detektora.

W przedstawianych badaniach długoczasowych postanowiono skupić się na wpływie podwyższonej temperatury podczas eksploatacji oraz wpływie długotrwałych silnych pobudeń optycznych na charakterystyki widmowe detektorów. W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczące detektorów wykonanych z TiO_2 [4-5]. Celem badań było poznanie ich właściwości podczas długoczasowej eksploatacji. Detektory UV wykonane z tego materiału są popularne na rynku komercyjnym ze względu na niższe ceny niż detektorów wykonanych z GaN i SiC [6-8].

2. Stanowiska badawcze

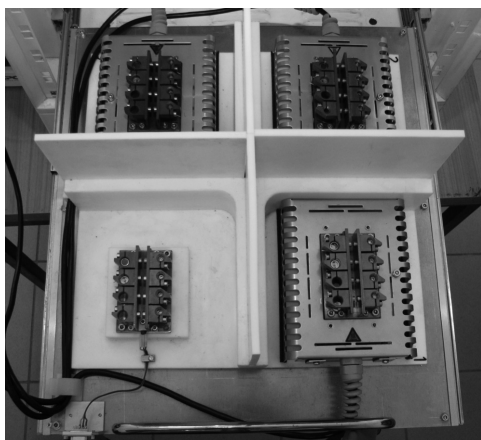
Wyniki badań długoczasowych - uwzględniające ekstremalne środowiskowe warunki pracy, odnośnie warunków termicznych i pobudeń optycznych - pozwalają oceniać niezawodność długoczasową detektora. Przedstawiane w pracy badania długoczasowe są wykonywane następująco: badany detektor jest pobudzany się termicznie lub/i optycznie - cykl badań dzielony jest na okresy czasu - po ich upływie, w temperaturze otoczenia, rejestrowana jest charakterystyka widmowa detektora. W ten sposób można obserwować jak stopniowo zmienia się przebieg charakterystyki widmowej detektora względem charakterystyki zarejestrowanej przed rozpoczęciem pobudeń.

Badania i pomiary były wykonywane w oparciu zrealizowane specjalizowane stanowiska: do badań długoczasowych detektorów UV i pomiarów ich charakterystyk widmowych.

2.1. Stanowisko do badań długoczasowych

Zaprojektowane i wykonane stanowisko pomiarowe umożliwia długoczasowe badania detektorów poddanych zewnętrznym pobudzeniom termicznym lub optycznym.

Badania długoczasowe umożliwiają obserwację jak pod wpływem długotrwałych pobudzeń zmienia się struktura badanego detektora. Stanowisko umożliwia jednoczesne poddanie badaniom czterech zestawów fotodetektorów, zamocowanych w czterech uchwytach. Każdy z czterech zestawów jest odizolowany termicznie od pozostałych ściankami wykonanymi z teflonu – rys. 1.



Rys. 1. Stanowisko do badań długoczasowych - zespół mocowania detektorów
Fig. 1. The position for long-term investigations - group grapple detectors

Pierwszy zestaw służy do badań fotodetektorów w temperaturze otoczenia. Pozostałe trzy uchwyty zestawów fotodetektorów są przykręcane do płyt grzejnikowych WDS80 firmy Weller. Wartość temperatury każdej płyty grzejnikowej może być zadeklarowana niezależnie, przy użyciu sterownika WD3M. Deklaracja pożądanej wartości temperatury może odbywać się ręcznie z poziomu sterownika lub pośrednio z komputera przy wykorzystaniu interfejsu USB. Każdy z trzech kanałów sterownika to oddzielny moduł regulatora PID. Stabilizacja temperatury odbywa się w pętli sprzężenia zwrotnego: grzałka i czujnik platynowy umieszczone w każdej płycie grzejnikowej. Minimalna wartość temperatury, którą można zadeklarować to 50°C, zaś wartość maksymalna to 450°C. Jednakże większość obudów fotodetektorów wraz z zintegrowaną z obudowami optyką nie jest przystosowana do pracy w tak dużych wartościach temperatury. Dlatego też na ogół nie przekracza się w pomiarach temperatury 200°C.

W tej samej obudowie co zespół wymuszeń termicznych, można zainstalować źródła wymuszeń optycznych, co pozwala na niezależne lub współbieżne, termiczne i optyczne pomiary długoczasowe.

Przy pomiarach z wymuszeniami optycznymi można używać, w zależności od potrzeb:

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

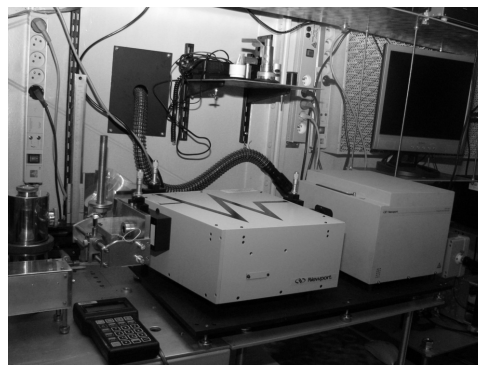
Ze względu na bardzo cienkie ścianki szkła lamp ksenonowych, przy jednocześnie ciśnieniu ksenonu dochodzącego do 4 at. po rozgrzaniu lampy, bezwzględnie muszą być zamontowane odpowiednie osłony BHP. Dotyczy to także ochrony wzroku przed szkodliwym promieniowaniem UV.

W pomieszczeniu, gdzie przeprowadza się badania długoczasowe z wykorzystaniem wymuszeń optycznych powinien funkcjonować sprawny system wentylacyjny zapobiegający nadmiernemu gromadzeniu się ozonu.

Po wykonaniu badań na stanowisku długoczasowych wymuszeń termicznych i/lub optycznych fotodetektory przenosi się, bez wyjmowania z specjalizowanych uchwytów, na stanowisko do pomiarów charakterystyk widmowych i rejestruje się zmiany w charakterystykach widmowych.

2.2. Stanowisko do pomiarów charakterystyk widmowych

Głównym modułem specjalizowanego stanowiska pomiarowego (rys. 2) do rejestracji charakterystyk widmowych detektorów UV jest monochromator Cornestone 260 typ 74100 firmy Oriel. Pozostałe elementy to: układ mocowania specjalizowanych uchwytów z badanymi detektorami UV, układ mocowania detektora wzorcowego, oraz sterownik stanowiska pomiarowego.



Rys. 2. Stanowisko pomiarowe w konfiguracji z monochromatorem Cornestone 260

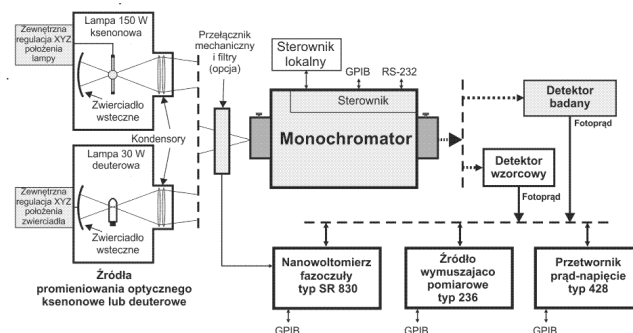
Fig. 2. The measuring position in configuration with a monochromator Cornestone 260

Po prawej stronie fotografii widoczny jest moduł zawierający oświetlacz monochromatora, zaś po lewej stronie znajduje się właściwy monochromator.

Cykl pomiarowy charakterystyk widmowych wymaga:

- rejestracji fotoprądu badanych detektorów, w określonym zakresie widmowym;
- rejestracji fotoprądu detektora wzorcowego w tym samym zakresie widmowym.

Na rysunku 3 przedstawiono schemat funkcjonalny systemu pomiarowego z monochromatorem Cornestone 260. Jako detektor wzorcowy stosuje się w systemie pomiarowym fotodiode krzemową S120VC firmy Thorlabs.



Rys. 3. Schemat funkcjonalny systemu do pomiarów charakterystyk widmowych detektorów UV

Fig. 3. Functional scheme of the test system for measurements of spectral characteristics of UV detectors

Monochromator Cornestone 260 typ 74100 jest przystosowany do pracy z wymiennym zespołem trzech obrotowych siatek dyfrakcyjnych, co pozwala na optymalne zdefiniowanie zakresu rejestracji charakterystyk widmowych. Także moduł oświetlacza jest wymienny i pierwszy oświetlacz może bazować konstrukcyjnie

na 150 W ksenonowej lampie typ XBO150 W/CR OFR (o niskim poziomie emisji ozonu) lub lampie XBO 150/W1, która daje pięciokrotne zwiększenie natężenia strumienia świetlnego dla 230 nm w stosunku do lampy XBO150 W/CR OFR. Pasma widmowe tych lamp obejmuje zakresy UV, VIS i bliskiej podczerwieni. Drugi typ oświetlacza bazuje na 30 W lampie deuterowej i jest przeznaczony do badania fotodetektorów charakteryzujących się relatywnie dużymi wartościami fotoprądu. Pasma widmowe lampy deuterowej jest węższe niż lamp poprzednich i obejmuje głównie zakres promieniowania UV.

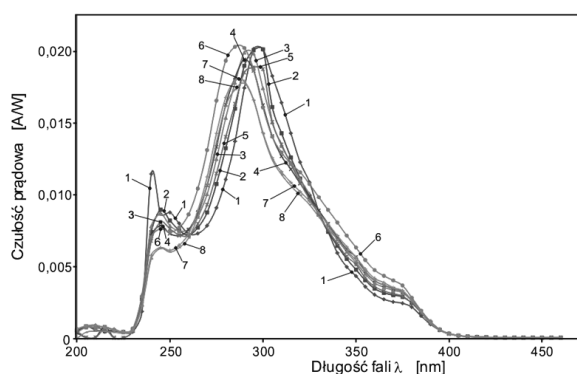
W skład stanowiska wchodzi zespół pomiaru fotoprądu detektora – odpowiednio przetwornik I/U typ 428 firmy Keithley, nanowoltomierz fazoczuły SR 830 firmy Stanford Research Systems lub źródło wymuszająco-pomiarowe typ 236 firmy Keithley. Pomiar fotoprądu przy użyciu przetwornika I/U typ 428 firmy Keithley jest najbardziej zbliżony do testowych konfiguracji pomiarowych podawanych przez producentów detektorów. Z kolei pomiar fotoprądu przy użyciu źródła wymuszająco-pomiarowego typu 236 jest sugerowany dla detektorów UV, głównie wykonanych z półprzewodników z szeroką przerwą zabronioną i ten przyrząd był stosowany podczas przestawianych w artykule badań.

3. Badania – długoczasowe pobudzenia termiczne

Przedstawiane badania długoczasowe trwały blisko dwa miesiące, uwzględniając czas wykonywania pomiarów charakterystyk widmowych w temperaturze pokojowej oraz powtórne umieszczanie detektorów na stanowisku do wygrzewania.

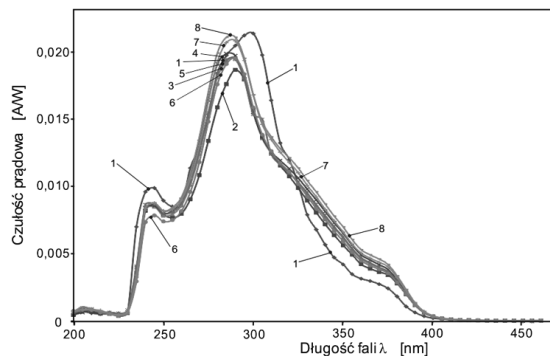
Podczas badań wykonywano 8 pomiarów charakterystyk widmowych detektorów w różnych odstępach czasu - pierwszy przed wygrzewaniem, następnie odpowiednio po 24, 40, 72, 216, 360, 672 oraz ósmy pomiar po 1008 godzinach wygrzewania.

Na poniższych pięciu 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. Na kolejnych trzech rysunkach (rys. 4-6) przedstawiono wyniki badań detektorów z TiO_2 .



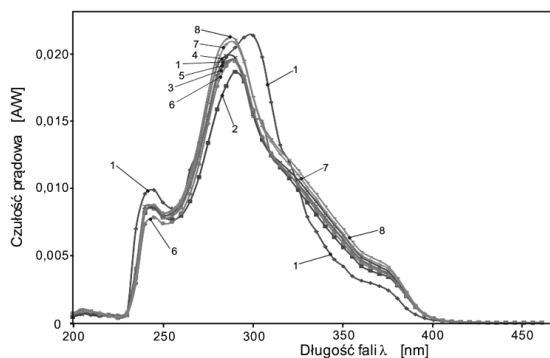
Rys. 4. Charakterystyki widmowe detektora TiO_2 80°C
Fig. 4. Spectral characteristics of the detector TiO_2 80°C

Po każdorazowym cyklu grzania charakterystyki widmowe detektorów są mierzone w temperaturze pokojowej - aby wyniki badań uwzględniały jedynie wpływ wygrzewania detektorów w podwyższonej temperaturze, a nie podwyższoną temperaturę punktu pracy. W przypadku detektorów wykonanych z TiO_2 przy wygrzewaniu w temperaturze wyższej niż 80°C następuje niewielkie przesunięcie maksimum czułości w stronę fal krótszych. Przesunięcie jest bardziej widoczne w wyższych temperaturach i następuje po krótszym okresie wygrzewania.



Rys. 5. Charakterystyki widmowe detektora TiO_2 150°C
Fig. 5. Spectral characteristics of the detector TiO_2 150°C

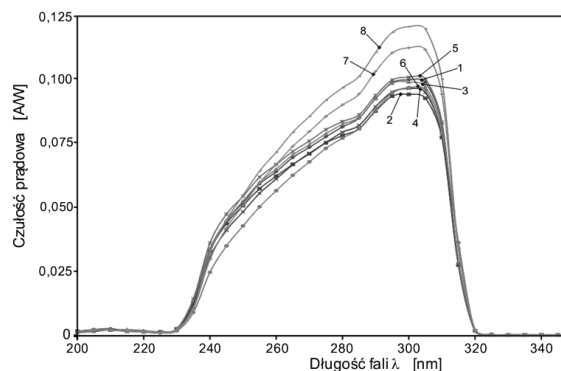
Z kolei czułość detektorów zgodnie z oczekiwaniami maleje nieznacznie w funkcji czasu wygrzewania i zmiana jest największa dla najwyższe temperatury wygrzewania.



Rys. 6. Charakterystyki widmowe detektora TiO_2 200°C
Fig. 6. Spectral characteristics of the detector TiO_2 200°C

Dla porównania, przeprowadzono również badania długoczasowe detektorów wykonanych z innych materiałów półprzewodnikowych - z GaN i SiC [6-8].

Jako reprezentatywne wyniki, przedstawiono na rysunkach 7 i 8 wyniki badań dla najwyższej temperatury wygrzewania 200°C – dla obu typów detektorów - GaN i SiC.



Rys. 7. Charakterystyki widmowe detektora GaN 200°C
Fig. 7. Spectral characteristics of the detector GaN 200°C

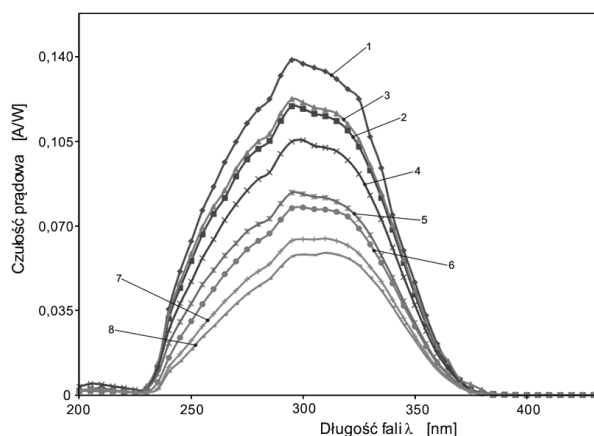
W przypadku detektorów z GaN (rys.7) długoczasowe wygrzewanie nie wpłynęło na położenie maksimum czułości – jest to bez zmian 300 nm. Miało za to wpływ na wartość czułości – wygrzewanie dłuższe niż miesiąc spowodowało wzrost czułości detektorów, przy czym największe zmiany są widoczne dla najwyższej temperatury wygrzewania 200°C.

W przypadku detektorów z SiC oczekiwano niewielkiego wpływu wygrzewania na przebieg charakterystyk widmowych. Przyrządy półprzewodnikowe z tego materiału są dedykowane do aplikacji wysokotemperaturowych.

Jak widać z przedstawionych wyników – zgodnie z oczekiwaniami – długoczasowe wygrzewanie nie wpłynęło na położenie maksimum czułości detektorów – rysunek 8.

Nieoczekiwanie, długotrwałe wygrzewanie w podwyższonej temperaturze miało znaczny wpływ na czułość – zwłaszcza po dłuższym okresie czasu. Po całkowitym czasie wygrzewania – po 42 dniach – czułość zmniejszyła się o ponad 50% (pomiar 8).

Jak wynika z równoległych badań tych detektorów decydujący jest czas wygrzewania, wartość temperatury wygrzewania ma mniejsze znaczenie.

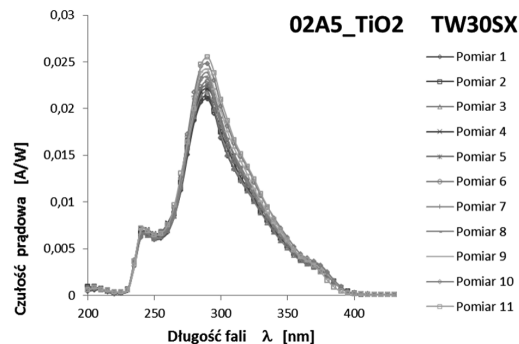


Rys. 8. Charakterystyki widmowe detektora SiC_200°C
Fig. 8. Spectral characteristics of the detector SiC_200°C

Monokryształy SiC charakteryzują się występowaniem znacznie większej ilości defektów w swojej strukturze w porównaniu przykładowo z GaN. Ujawnianie się tych defektów podczas długotrwałego wygrzewania jest przyczyną dużego spadku czułości. Można również zaobserwować taki okres czasu wygrzewania, gdy czułość detektorów wykonanych z SiC rośnie o kilka procent – pomiary 2 i 3. Chwilowy efekt wzrostu czułości związany jest prawdopodobnie z eliminacją, przez krótkotrwałe wygrzewanie, pewnej liczby defektów w monokryształe SiC.

4. Badania – długoczasowe pobudzenia optyczne

Badane detektory poddawane były długoczasowym pobudzeniom optycznym - źródłem promieniowania była lampa ksenonowa o mocy 450 W. Badania odbywały się w następujący sposób: 1 pomiar – rejestracja charakterystyki widmowej przed włączeniem wymuszenia optycznego, 2 pomiar – po 12 godzinach wymuszenia optycznego i kolejne: 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. Po zakończeniu każdego przedziału czasowego rejestrowana była charakterystyka widmowa detektora w temperaturze otoczenia. Na rysunku 9 przedstawiono charakterystyki widmowe detektora 02A5 (TW30SX). 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. W tym przypadku wykonane badanie potwierdziło wcześniejsze spostrzeżenia dotyczące małej odporności wybranych typów detektorów, wykonanych z TiO₂, na długoczasowe, silne wymuszenia optyczne.



Rys. 9. Charakterystyki widmowe detektora TiO₂ przy pobudzeniu optycznym z lampy ksenonowej o mocy 450 W
Fig. 9. Spectral characteristics of the detector TiO₂ at optical stimulation from a xenon lamp of 450 W power

5. Wnioski

W pracy przedstawiono wyniki eksperymentalnych badań detektorów UV wykonanych z TiO₂. Badania dotyczyły wpływu długoczasowego wygrzewania w podwyższonej temperaturze oraz wpływ pobudzeń optycznych na charakterystyki widmowe detektorów. Dla porównania przedstawiono wybrane wyniki badań detektorów wykonanych SiC oraz GaN.

W pracy opisano zrealizowane stanowisko badawcze umożliwiające poddawanie detektorów UV długotrwałym narażeniom termicznym i optycznym oraz stanowisko pomiarowe do rejestracji ich charakterystyk widmowych.

Badania długoczasowe detektorów umożliwiają uzyskanie dodatkowych, pozakatalogowych informacji w aspekcie ich eksploatacji w zastosowaniach specjalnych i sprzęcie militarnym.

6. Literatura

- [1] Koren B. Photodiodes: Ubiquitous components in today's arsenal of smart weapons. Advanced Photonics, Inc. USA, 2003.
- [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] Stambolova I., Blaskov V., Kostova N., Vassilev S., Boevski I., Kostova B., Stefanov P., Peshev P.: Effect of mode of thermal treatment on the phase composition and optical properties of spin-on nanosized TiO₂ films. Nanoscience&Nanotechnology, 7, 287–290, 2007.
- [4] Kong X., Liu C., Dong W., Zhang X., Tao C., Shen L., Zhou J., Fei Y., and Ruan S.: Metal-semiconductor-metal TiO₂ ultraviolet detectors with Ni electrodes. Appl. Phys. Lett., vol. 94, no. 12, pp. 123 502-1–123 502-3, Mar. 1–3, 2009.
- [5] Yu C. and Park J.: Thermal annealing synthesis of titanium-dioxide nanowire-nanoparticle hetero-structures, J. Solid State Chem., vol. 183, no. 10, pp. 2268–2273, Sep. 2010.
- [6] 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.
- [7] Vert A., Soloviev S., Fronheiser J. and Sandvik P.: Solar-blind 4H-SiC single-photon avalanche diode operating in Geiger mode, IEEE Photon. Technol. Lett. 20(18), 1587–1589, 2008.
- [8] Pernot C., Hirano A., Iwaya M., Detchprohm T., Amano H., Akasaki I.: Solar Blind UV Photodetectors Based on GaN/AlGaIn p-i-n Photodiodes, Japanes Journal of Applied Physics. Vol. 39. Part 2. Number 5a. L387, 2000.

otrzymano / received: 10.06.2014

przyjęto do druku / accepted: 01.08.2014

artykuł recenzowany / revised paper