



Joanna ĆWIRKO, Robert ĆWIRKO

KONCEPCJA SELEKCJI DETEKTORÓW UV DO ZASTOSOWAŃ SPECJALNYCH

Streszczenie

Detektory UV są stosowane w pracach badawczych, przemyśle i aplikacjach wojskowych oraz w systemach bezpieczeństwa. Przedstawiono koncepcję selekcji detektorów UV do zastosowań specjalnych. Proponowane procedury charakteryzacji detektorów UV umożliwiają uzyskanie dodatkowych, pozakatalogowych informacji z punktu widzenia wymagań eksploatacji sprzętu w warunkach ekstremalnych. Rozwiązanie takie jest niezbędne przy praktycznej realizacji koncepcji stosowania w sprzęcie specjalnym komercyjnie dostępnych podzespołów elektronicznych i optoelektronicznych. W artykule przedstawiono przykładowe badania nad zależnością charakterystyk detektorów UV, wykonanych z GaN i TiO₂, od długotrwałego wygrzewania w podwyższonej temperaturze.

WSTĘP

Detektory UV są stosowane coraz powszechniej w sprzęcie wojskowym: w konstrukcjach broni inteligentnych, stacjonarnych i indywidualnych środkach ochrony chemicznej i biologicznej, systemach detekcji rakiet balistycznych i sterowaniem ogniem artyleryjskim [1]. W ostatnich latach, 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 [2]. Ze względu na zastosowane materiały półprzewodnikowe detektory UV można podzielić na detektory bazujące na modyfikowanym krzemie oraz na materiałach półprzewodnikowych o szerokiej przerwie zabronionej [3, 4]. Dla konstruktorów półprzewodnikowych detektorów UV, oprócz uzyskania jednorodnej powierzchni aktywnej, ważne jest zapewnienie wymaganego kształtu charakterystyki czułości widmowej i dużej czułości detektora.

Kształtowanie charakterystyk widmowych detektorów odbywa się przez zmianę składu stopu. 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. W niektórych aplikacjach charakterystyka widmowa kształtowana jest dodatkowo na drodze optycznej np. przez zastosowanie odpowiednich filtrów [5, 6].

Z kolei zapewnienie odpowiedniej czułości detektora, sprowadza się do uzyskania największego stosunku sygnału do szumu. 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.

Aby uzyskać mniejszy poziom szumu wypadkowego detektora, stosuje się często obniżanie temperatury detektora (np. przez zintegrowanie układu TEC z detektorem). Takie postępowania jest właściwe, jeżeli głównym źródłem szumu detektora jest szum cieplny. W przypadku dużego udziału szumów generacyjno-rekombinacyjnego i $1/f$, obniżenie temperatury detektora może spowodować wręcz zwiększenie szumu wypadkowego detektora, co wykazały wcześniejsze pomiary prowadzone przez autorów [7]. Należy również uwzględnić, że zmiany i długoczasowość oddziaływań termicznych i optycznych mogą mieć znaczny wpływ na charakterystykę widmowa detektora i jego czułość.

1. SELEKCJA DETEKTORÓW DO ZASTOSOWAŃ SPECJALNYCH

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

Ze względu na specyficzne warunki pracy sprzętu specjalnego (konieczność zapewnienia długotrwałej bezawaryjnej pracy w środowisku wyjątkowo niekorzystnym (zmiany temperatury, wilgotność, zanieczyszczenia, udary, wibracje itp.) badania parametrów detektorów UV powinny być prowadzone także poza zakresami, w których wyznaczone zostały ich parametry katalogowe.

Na rysunku 1 przedstawiono proponowany algorytm selekcji fotodetektorów UV do zastosowań specjalnych.

Etapem początkowym jest sformułowanie oczekiwań odnośnie parametrów fotodetektorów mających być zastosowanych w konkretnej aplikacji.

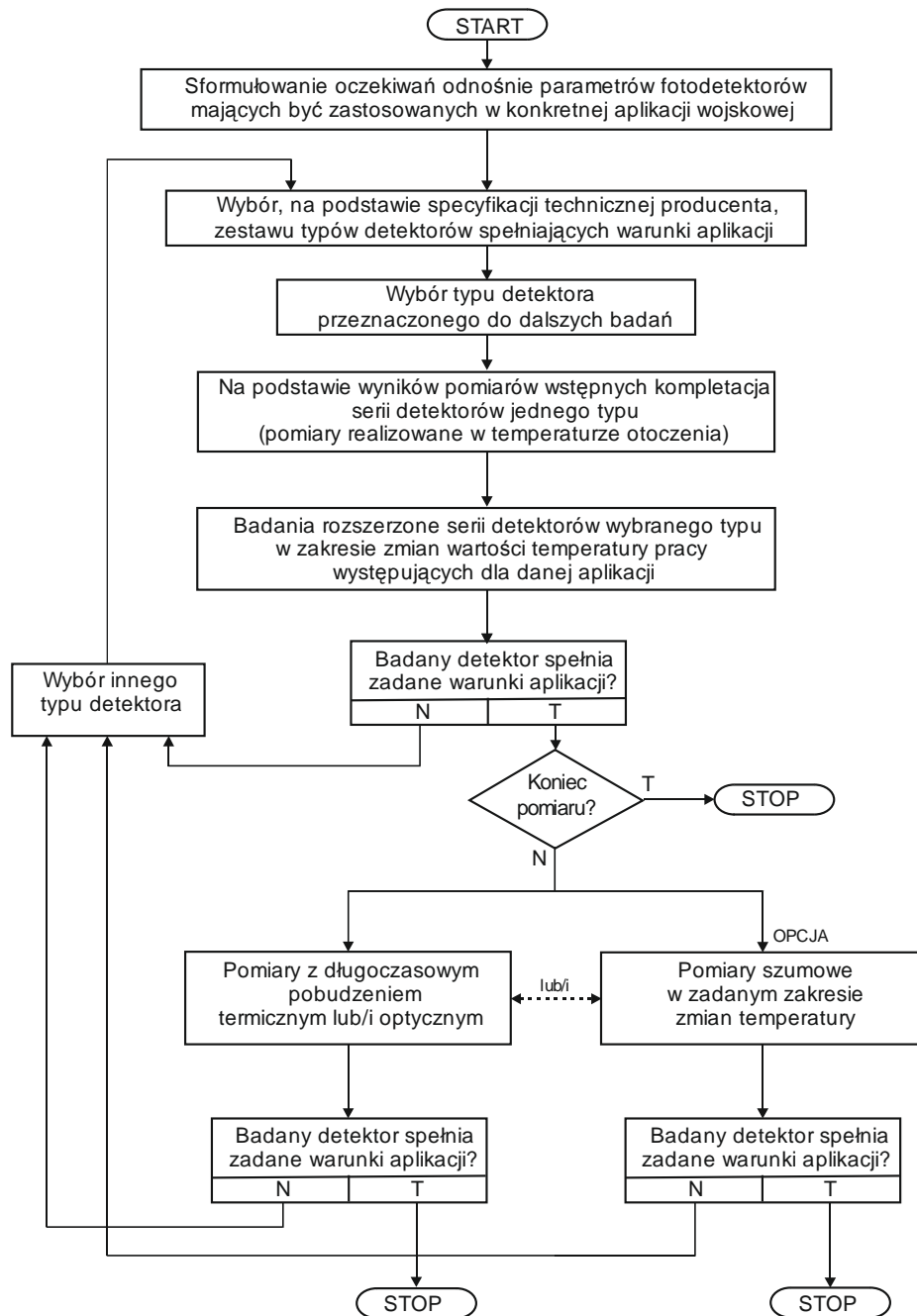
Następnie należy dokonać wyboru, na podstawie specyfikacji technicznych producentów, zestawu typów detektorów spełniających najlepiej warunki aplikacji.

Zaproponowana selekcja detektorów oparta jest głównie o pomiar ich charakterystyk widmowych. Właściwości detektora promieniowania optycznego określa się głównie z przebiegu jego charakterystyk widmowych - na ich podstawie wyznaczane są jego parametry - czułość widmowa, wykrywalność czy parametr NEP. Pomiary charakterystyk widmowych są wykonywane na zrealizowanym stanowisku pomiarowym. W stanowisku pomiarowym do selektywnego wyboru długości fali świetlnej padającej na badany fotodetektor zastosowano monochromator Cornestone 260 typ 74100 firmy Oriol. Przebieg zmierzonej charakterystyki widmowej nie odzwierciedla rzeczywistego przebiegu charakterystyki widmowej badanego detektora, gdyż jest ona odkształcona na skutek oddziaływania składowych widmowych oświetlacza, monochromatora, interfejsu optycznego itp. Dlatego konieczne jest zarejestrowanie, w tych samych warunkach pomiarowych, przebiegu charakterystyki widmowej dla fotodetektora wzorcowego.

Sygnał prądowy z wyjścia detektora jest dla większości konfiguracji pomiarowych wzmacniany w niskoszumowym wzmacniaczu transimpedancyjnym I/U typ 428 firmy Keithley W przypadku niektórych fotodetektorów sygnał prądowy z badanego detektora znajduje się poniżej wypadkowego poziomu szum - dla takich pomiarów konieczne jest zastosowanie nanowoltomierza fazoczułego. W przypadku detektorów charakteryzujących

się bardzo małymi wartościami fotoprądu (rzędu pojedynczych nA) – pomiar fotoprądu jest wykonywany przy użyciu źródła wymuszająco-pomiarowego typu 236 firmy Keithley.

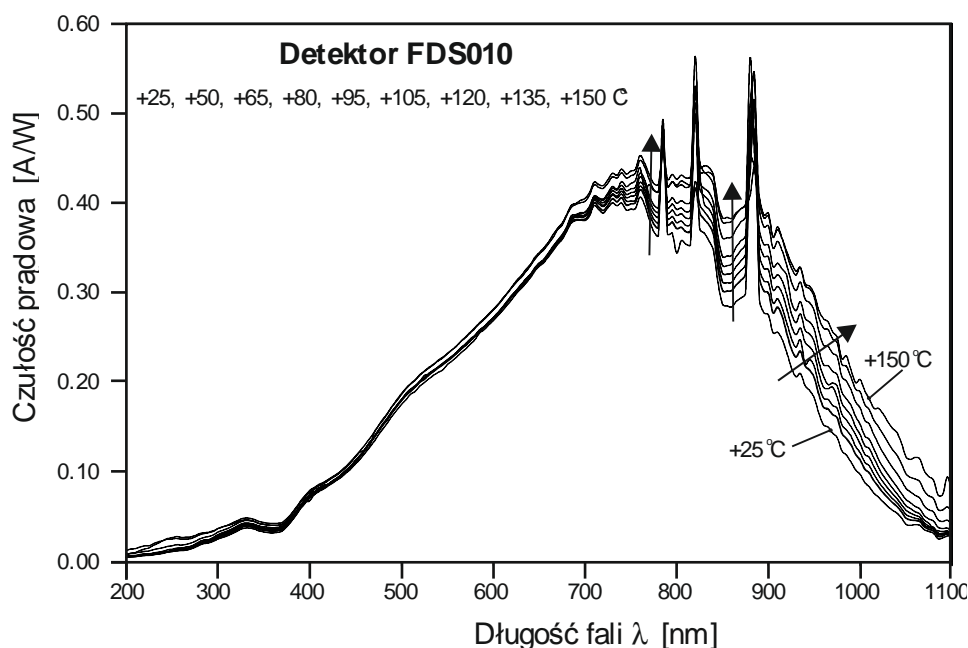
Pierwszym etapem selekcji jest pomiar charakterystyk widmowych detektorów w temperaturze otoczenia. Pomiary mają na celu sprawdzenie i ewentualne odrzucenie detektorów, które nie spełniają wymagań aplikacji. Dla fotodetektorów, które są fotodiodami, zaleca się także wykonanie pomiarów charakterystyk prądowo-napięciowych. Wykonanie tych rutynowych pomiarów jest konieczne ze względu na coraz częstsze pojawianie na rynku elementów i podzespołów elektronicznych będących „podróbkami”. Tylko w latach 2009-10 w amerykańskim uzbrojeniu wykryto zamontowanie ponad miliona „podróbek”, głównie w samolotach myśliwskich i helikopterach.



Rys. 1. Algorytm selekcji fotodetektorów UV do zastosowań specjalnych

Następnym etapem selekcji są pomiary charakterystyk widmowych detektorów w funkcji dodatnich zmian temperatury. Jako kryterium selekcji przyjmowane są dopuszczalne zmiany przebiegu charakterystyk widmowych przy pracy w podwyższonej temperaturze. Jako przykład przedstawiono na rysunku 2 wyniki badań detektora z modyfikowanym krzemem, dzięki czemu jego charakterystyka widmowa rozpoczyna się w zakresie UV.

Górna granica podwyższonej temperatury podczas pomiarów charakterystycznych zależy od materiału półprzewodnikowego detektora i konstrukcji jego obudowy. Detektory wykonane z SiC, dedykowane do zastosowań wysokotemperaturowych, powinny oczywiście być badane w szerszym zakresie temperatury niż na przykład detektory z Si.



Rys. 2. Charakterystyki widmowe fotodetektora FDS010, wykonanego z modyfikowanego krzemem, dla różnych wartości temperatury

Kolejny etap charakteryzacji i selekcji, to badania detektorów w zakresie kriogenicznych zmian temperatury. Jako kryterium selekcji, przyjmuje się dopuszczalne zmiany przebiegu charakterystyk widmowych detektora, w stosunku do przebiegu charakterystyki widmowej w temperaturze otoczenia. W zależności od przewidywanych zastosowań, kryterium to może ulegać wartościowo zmianie.

Detektory, które są przewidywane do zastosowań w aplikacjach specjalnych przewidzianych do eksploatacji w ekstremalnych warunkach (np. wysoka temperatura, duże natężenie promieniowania ultrafioletowego), oraz gdy dodatkowo należy uwzględnić problemy z prawidłowym serwisem sprzętu, powinny podlegać badaniom długoczasowym.

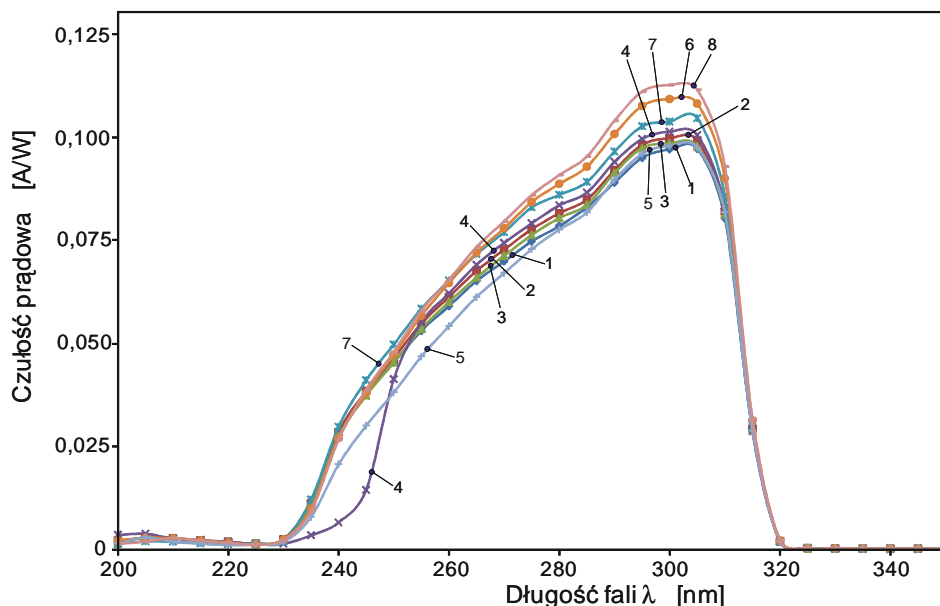
Badania długoczasowe proponuje się podzielić na dwa etapy. W wyniku dotychczasowych doświadczeń zdobytych przy badaniach wielu typów detektorów okazało się, że zmiany ich czułości zależą w większym stopniu od długoczasowego wygrzewania w podwyższonej temperaturze niż od długoczasowego pobudzenia silnym promieniowaniem optycznym.

W konsekwencji, jako pierwsze proponuje się przeprowadzenie długoczasowego wygrzewania w podwyższonej temperaturze. Kryterium selekcyjnym będzie dopuszczalna zmiana charakterystyki widmowej dla danego typu detektora.

Ostatni etap selekcji i charakteryzacji detektorów, to badanie wpływu długoczasowych pobudzeń promieniowaniem optycznym o dużym natężeniu na ich charakterystyki widmowe.

Jako kryterium należy przyjąć dopuszczalne zmiany czułości detektora w wyniku długoczasowego pobudzenia optycznego.

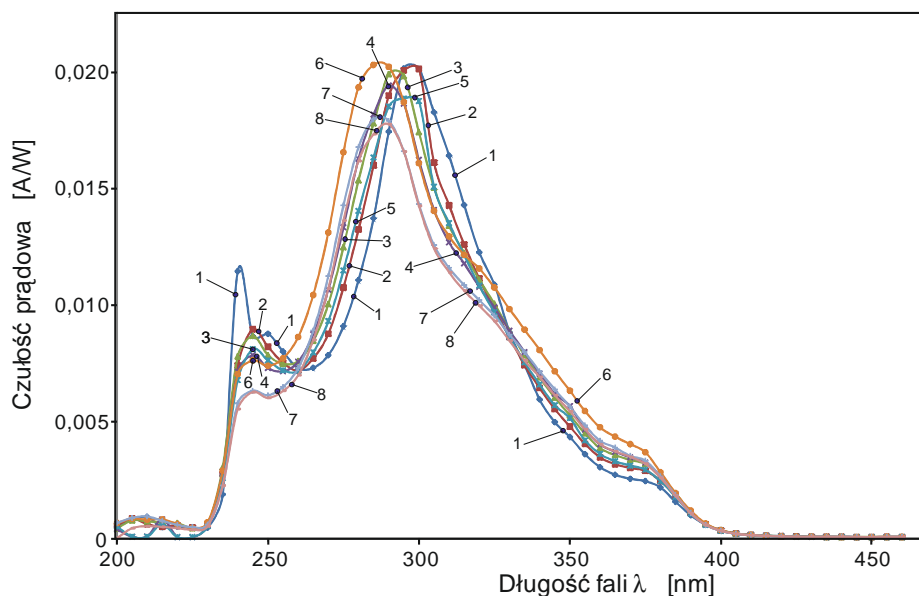
Jako przykładowe zostaną przedstawione wyniki długoczasowych badań temperaturowych detektorów wykonanych z GaN i TiO₂ (rys. 3, 4). Detektory były wygrzewane przez 42 dni. Podczas wygrzewania wykonano 8 pomiarów charakterystyk widmowych detektorów z GaN i TiO₂ w różnych odstępach czasu. Na rysunkach kolejne charakterystyki są oznaczone narastająco liczbami – 1 to pomiar pierwszy przed wygrzewaniem a 8 – pomiar ostatni po 42 dniach.



Rys. 3. Charakterystyki widmowe detektora 18A6_GaN_80°C

Badania detektorów trwały blisko dwa miesiące, uwzględniając czas wykonywania pomiarów oraz powtarne umieszczanie ich na stanowisku temperaturowym.

Po każdorazowym cyklu grzania, charakterystyki widmowe detektorów były mierzone w temperaturze pokojowej. Chodziło o to, aby uwzględnić w badaniach jedynie wpływ wygrzewania poszczególnych typów detektorów w podwyższonej temperaturze. Podczas wygrzewania wykonano 8 pomiarów charakterystyk widmowych detektorów w różnych odstępach czasu - pierwszy przed wygrzewaniem, następne odpowiednio po 24, 40, 72, 216, 360, 672 oraz ósmy pomiar po 1008 godzinach wygrzewania.



Rys. 4. Charakterystyki widmowe detektora 02A5_TiO₂_80°C

Jak wynika z badań, w przypadku detektorów z GaN długoczasowe wygrzewanie nie wpłynęło na położenie ich maksymalnej czułości – jest to bez zmian 300 nm. Miało za to wpływ na wartość czułości – wygrzewanie dłuższe niż miesiąc spowodowało wzrost czułości detektorów.

W przypadku detektorów wykonanych z TiO₂ jest inaczej – następuje niewielkie przesunięcie maksimum czułości w stronę fal krótszych i zmiany są widoczne po stosunkowo krótkim wygrzewaniu – 2 dni. Z kolei czułość detektorów maleje nieznacznie w funkcji czasu wygrzewania i zmiana jest największa dla najwyższej temperatury wygrzewania.

Jako opcję w selekcji detektorów proponujemy przeprowadzenie pomiarów charakterystyk szumowych. Pomiar w temperaturze otoczenia daje informację o zakresach, w których detektor charakteryzuje się nieakceptowalnym poziomem szumów oraz informację o zmianie charakterystyki szumowej detektora w funkcji napięcia polaryzacji. Ważną informacją, szczególnie dla aplikacji specjalnych, jest uzyskanie danych o tym jak zmienia się charakterystyka szumowa detektora w funkcji temperatury - w zakresie temperatur wymaganych do celów militarnych (-55° C do 125°C). Z kolei pomiar rozkładu widmowej gęstości mocy szumów w szerszym przedziale zmian temperatury (np. od 10 K) pozwala ocenić jakość materiału półprzewodnikowego, z którego zastał wykonany dany detektor i prognozować jego niezawodność długoczasową.

PODSUMOWANIE

Jednym z podstawowych warunków wykorzystania w zastosowaniach specjalnych, w tym militarnych, „cywilnych” podzespołów elektronicznych i technologii tzw. „z półki” jest stosowanie procedur charakteryzacji i selekcji tego rodzaju elementów i podzespołów elektronicznych. Procedury charakteryzacji powinny umożliwiać uzyskanie dodatkowych, pozakatalogowych informacji z punktu widzenia wymagań eksploatacji np. sprzętu wojskowego w ekstremalnych warunkach. Rozwiązanie takie jest niezbędne przy praktycznej realizacji koncepcji stosowania w sprzęcie specjalnym komercyjnie dostępnych podzespołów elektronicznych i optoelektronicznych.

Detektory, które stanowią najczęściej tylko kilka procent całkowitego kosztu urządzenia do detekcji promieniowania UV, decydują głównie o jego parametrach.

W artykule przedstawiono koncepcję selekcji detektorów UV do zastosowań specjalnych. Selekcja oparta jest o pomiary i analizy charakterystyk widmowych detektorów w szerokim

zakresie temperatury. Uzupełnieniem są pomiary i analiza charakterystyk szumowych detektorów również w szerokim zakresie temperatury. W zastosowaniach militarnych czy specjalnych znajomość parametrów detektora tylko w temperaturze pokojowej może być niewystarczająca.

Końcowym etapem selekcji są badania długoczasowe - uwzględniające ekstremalne warunki pracy detektora – odnośnie warunków termicznych i pobudzeń optycznych. Badania długoczasowe pozwalają prognozować niezawodność długoczasową detektora.

THE CONCEPT OF UV DETECTORS SELECTION FOR SPECIAL APPLICATIONS

Abstract

UV detectors are applied in research works, the industry and applications of military and in security systems. A conception of selection of UV detectors was presented for special applications. Proposed procedures enable the make-up of UV detectors to get additional, outside catalogue of information from the point of seeing requirements of the use of the equipment in extreme conditions. Such a solution is essential at the practical realization of the concept of applying available electronic components commercially in the special equipment and optoelectronic. In the article a model research on the relation of spectrum characterizations of UV detectors, made from GaN and TiO₂, from long-term warming up in the high temperature was described.

BIBLIOGRAFIA

1. Koren B.: *Photodiodes: Ubiquitous components in today's arsenal of smart weapons*. Advanced Photonics, Inc. USA, 2003.
2. Omnes F, Manroi E.: *Ultraviolet Photodetectors*. Optoelectronics Sensor. (2010), pp. 181-222.
3. Hari Sing Nalwa – editor: *Photodetectors and Fiber Optics*. Academic Press, 2001, ISBN 0-12-513908-X.
4. Dahay R. i in.: *AIN MSM and Schottky Photodetectors*. Phys. Stat. Solid. © 5, no. 6, 2145-2153 (2008).
5. Pikhtin A.N., Tarasov S.A., Orlova T.A., Kloth B.: *Selective and broadband GaP UV photodetectors*. IWRFR1'2000, St. Petersburg, May 29-31,2000; www.ioffe.ru/RT/IWRFR12000/b2.html.
6. Materiały firmy Hamamatsu Photonics: *GaAsP photodiode – diffusion type*. www.hamamatsu.com.
7. Ćwirko R. (kierownik projektu), Bielecki Z., Ćwirko J.: *Optymalizacja stosunku sygnału do szumu w odbiornikach promieniowania optycznego z detektorami UV*. Sprawozdanie końcowe projektu badawczego KBN nr 0T00A00227. Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2006.
8. Chang W-R.: *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.

Autorzy:

dr inż. Joanna Ćwirko – Wojskowa Akademia Techniczna ISE WEL, Warszawa

dr inż. Robert Ćwirko – Wojskowa Akademia Techniczna ISE WEL, Warszawa