

POMIARY CHARAKTERYSTYK SZUMOWYCH JAKO NARZĘDZIE DIAGNOSTYCZNE DETEKTORÓW UV

Joanna ĆWIRKO, Robert ĆWIRKO

Instytut Systemów Elektronicznych, Wydział Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej
00-908 Warszawa, ul. Kaliskiego 2, fax. (0 22) 683 91 25, jcwirko@wel.wat.edu.pl, rcwirko@wel.wat.edu.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono zastosowanie analizy niskoczęstotliwościowych charakterystyk szumowych do diagnostyki detektorów UV. Ze względu na zakres widmowy detektory UV są wykonywane z materiałów o szerokiej przerwie zabronionej, głównie z GaN, AlN, SiC. Detektory UV są głównie stosowane w automatyce przemysłowej, robotyce, medycynie, systemach ochrony środowiska i technologiach militarnych. Charakterystyki szumowe detektorów były mierzone w szerokim zakresie temperatury (80 K – 350 K) oraz w funkcji napięcia polaryzacji. Analiza charakterystyk szumowych umożliwia wybranie optymalnego punktu pracy detektora ze względu na stosunek sygnału użytecznego do szumu oraz pozwala prognozować jego niezawodność.

Słowa kluczowe: detektor UV, GaN, AlGaN, szumy niskoczęstotliwościowe.

NOISE CHARACTERISTIC MEASUREMENT AS A TOOL FOR UV DETECTORS DIAGNOSTIC

Summary

The work is aimed on analyze the low frequency noise characteristics of UV detectors. UV detectors are manufactured from wide band gap materials as GaN, AlGaN, SiC. The most important fields of UV detectors applications are industrial automation, robotics, space technology, medicine, military technology and solar ultraviolet measurements. The noise characteristics of UV detectors were measurement in wide temperature range (from 80 K to 350 K) and as function of polarization. The investigation results should be allowed to optimize the UV detection system providing maximal value of signal-to-noise ratio, selection of the optimal working point and estimate reliability of detectors UV.

Keywords: detektor UV, GaN, AlGaN, low-frequency noise.

1. WSTĘP

Promieniowanie ultrafioletowe (UV) jest to promieniowanie elektromagnetyczne o częstotliwościach pomiędzy zakresem światła widzialnego a promieniowaniem rentgenowskim, co odpowiada długości fali od 390 nm do około 100 nm. Ze względu na oddziaływanie biologiczne stosuje się podział na UV-A (315 nm – 400 nm), UV-B (280 nm – 315 nm), UV-C (200 nm – 280 nm). Wyodrębnia się też zakres VUV (40 nm – 200 nm) od Vacuum -UV.

W aplikacjach przemysłowych UV wykorzystuje się zakres pomiędzy 200 nm - 400 nm.

Detektory UV znajdują zastosowanie w takich aplikacjach jak czujniki ognia, systemy sterylizacji UV, systemy dozowania, systemy analityczne (spektrofotometry). Detektory UV znajdują zastosowanie w systemach ochrony środowiska. Przykładowo, związki olejów i smarów mają w zakresie UV o wiele większy współczynnik odbicia niż woda co pozwala na uzyskanie silnego sygnału z detektora UV będącego czujnikiem w automatycznej stacji monitoringu. Detektory UV

znajdują także wielostronne zastosowanie w systemach analitycznych, gdzie umożliwiają identyfikację i analizę substancji organicznych [1]. Detektory UV znalazły też zastosowanie w bezinwazyjnym pomiarze hemoglobiny, cytochromów i beta-carotenu, w farmakologii do określania koncentracji bakterii w procesach fermentacji, w gemologii do pomiarów absorpcji światła przez diamenty i inne kamienie szlachetne, w optyce do pomiarów widmowych.

Podstawową grupę detektorów UV stanowią detektory półprzewodnikowe. Przy konstrukcji półprzewodnikowych detektorów UV jednym z najważniejszych problemów jest zapewnianie odpowiedniej czułości detektora, co sprowadza się do zapewnienia największego stosunku sygnału użytecznego do szumu [2]. Ze względu na zakres widmowy detektory UV są wykonywane z materiałów o szerokiej przerwie zabronionej, głównie z GaN, AlN, SiC [3]. O właściwościach tych materiałów w dużym stopniu decydują głębokie centra defektowe [4]. Istnienie głębokich centrów defektowych powoduje fluktuacje koncentracji swobodnych nośników ładunku w czasie, co jest

jednym ze znaczących źródeł szumu generacyjno-rekombinacyjnego [5]. W przypadku braku głębokich centrów defektowych w materiale półprzewodnikowym, charakterystyka jego szumu niskoczęstotliwościowego jest na ogół zbliżona do przebiegu charakterystyki szumu $1/f$ [6]. Na podstawie stopnia zdefektowania materiału detektora można prognozować jego niezawodność.

Pomiar charakterystyk szumowych pozwala określić w jakich zakresach częstotliwości detektor charakteryzuje się nieakceptowalnym poziomem szumów, jak zmienia się charakterystyka detektora w funkcji temperatury oraz prognozować jego niezawodność w oparciu o stopień zdefektowania materiału.

2. POMIARY

Pomiary charakterystyk szumowych detektorów UV były przeprowadzone przy pomocy systemu pomiarowego, który umożliwia:

- wykonywanie pomiarów małosygnalowych napięć i prądów (nV i pA) od DC do 100 kHz;
- realizację pomiarów w funkcji temperatury w zakresie temperatury od 77 K do 360 K z rozdzielczością 0,5 K;
- stosowanie różnych konfiguracji pomiarowych (rezystancja badanych detektorów może zawierać się w zakresie od kilkunastu k Ω do setek M Ω);
- minimalizację zakłóceń pochodzenia piezo lub tryboelektrycznego oraz zakłóceń elektromagnetycznych.

System pomiarowy składa się z kriostatu azotowego, modułu wstępnego wzmocnienia sygnału pomiarowego, modułu przyrządów specjalizowanych i oprogramowania. Jako czujnik temperatury stosuje się kalibrowaną diodę krzemowa typu D współpracującą z regulatorem temperatury LCT 60 realizującym algorytm PID. Ponieważ badana próbka może być mocowana na stoliku operacyjnym w różnorodny sposób, różne też mogą być rezystancje termiczne pomiędzy stolikiem operacyjnym a próbką i różne gradienty temperatury między nimi. Dlatego też dla odczytu, z jak najmniejszym błędem, temperatury próbki stosuje się drugi czujnik temperatury (także diodę typu D) mocowany w bezpośredniej bliskości próbki. Dane z tego czujnika są wykorzystywane w obliczeniach matematycznych.

System pomiarowy umożliwia pomiary i charakteryzację detektorów UV jak również próbek materiałów półprzewodnikowych o szerokiej przerwie zabronionej.

Możliwe są pomiary w dwóch konfiguracjach - pomiar prądowy i napięciowy w zależności od rezystywności badanych detektorów. W przypadku pomiarów napięciowych próbek materiałów półprzewodnikowych możliwy jest pomiar symetryczny i niesymetryczny dwu- i czterokońcówkowy.

Moduł wstępnego wzmocnienia sygnału pomiarowego składa się, w przypadku pomiarów

prądowych, z szerokopasmowego, niskoszumowego wzmacniacza prądowego model 428 firmy Keithley lub szerokopasmowego, niskoszumowego wzmacniacza prądowego model 570 firmy Stanford. Przy pomiarach napięciowych sygnał mierzony jest wstępnie wzmacniany w szerokopasmowym, niskoszumowym wzmacniaczu napięciowym model 560 firmy Stanford lub dodatkowo w przedwzmacniaczach 550 oraz 552 firmy Stanford.

Sygnał pomiarowy jest następnie podawany na wejście analizatora sygnałowego FFT model 3665 firmy Hewlett-Packard. Sygnały pomiarowe między przyrządami przesyłane są specjalnymi kablami niskoszumowymi z buforowym wkładem grafitowym. Dla minimalizacji zakłóceń zewnętrznych system pomiarowy jest umieszczony w wielkogabarytowej klatce ekranowanej o wymiarach 2 x 4 x 2 metry. Zdjęcie systemu pomiarowego przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Zdjęcie systemu pomiarowego

Pomiary charakterystyk szumowych są długotrwałe (kilkadziesiąt godzin), dlatego też cały proces sterowania pomiarem i akwizycji danych jest całkowicie zautomatyzowany. Większość przyrządów pomiarowych i urządzeń technologicznych jest połączona z komputerem PC magistralą GPIB. Program sterujący został napisany w środowisku *TestPoint*, który zapewnia realizację zadań w czasie rzeczywistym. W głównym oknie programu deklaruje się następujące parametry: wartość temperatury od której zaczyna się cykl pomiarowy, wartość temperatury na której kończy się cykl pomiarowy, zmiana temperatury między kolejnymi pomiarami. Ponadto wyświetlane są orientacyjne graficzne zobrazowania wyników

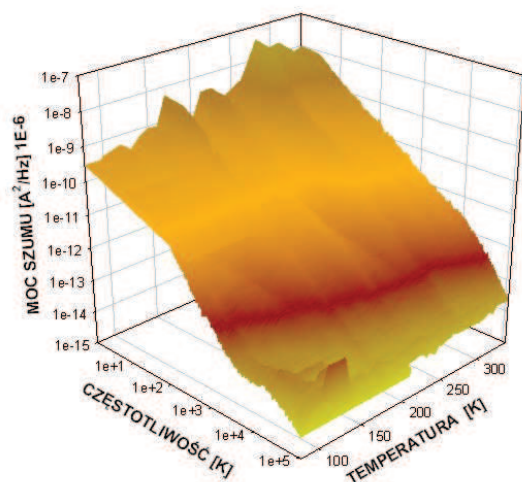
pomiarów oraz stany technologiczne systemu, jak np. włączenie/wyłączenie pompy azotowej kriostatu.

Możliwe jest zdalne sterowanie pracą systemu z dowolnego komputera dołączonego do Internetu lub sieci telefonicznej. Zdalne sterowanie realizowane jest przy użyciu programu PC ANYWARE.

3. WYNIKI POMIARÓW

Tylko detektory UV z AlGaN są detektorami tzw. „solar blind”, tzn. detektorami nie wymagającymi stosowania dodatkowych filtrów optycznych dla uniknięcia wpływu promieniowania widzialnego na ich pracę. Ze względu na swoją charakterystykę optyczną są grupą detektorów o najlepszych perspektywach rozwoju, ale ze względu na materiał – AlGaN należy oczekiwać dużego wpływu szumów związanych z istnieniem głębokich centrów defektowych w przerwie zabronionej. Podstawowy cykl badania detektora UV polegał na zarejestrowaniu charakterystyk szumowych dla różnych wartości temperatury i różnych polaryzacji. Określana była widmowa gęstość mocy szumu niskoczęstotliwościowego. Typowa charakteryzacja badanego detektora polega na wyznaczeniu widmo-

Detektor 7 (polaryzacja - 0,6V)

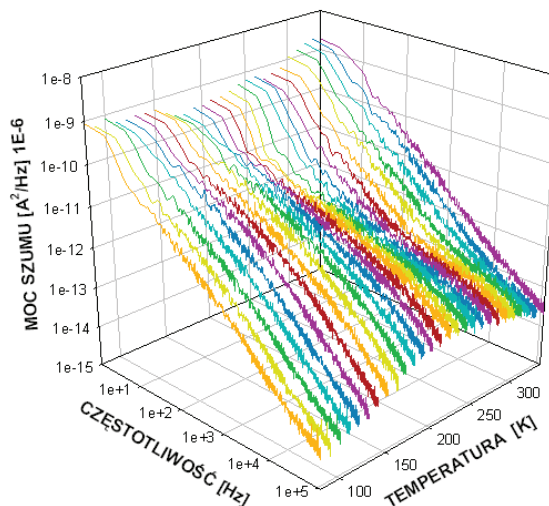


Rys. 2. Widmowa gęstość mocy szumu fotodetektora nr 7 z AlGaN przy polaryzacji -0,6 V

wej gęstości mocy szumu w 2000 punktach pomiarowych w zakresie częstotliwości 1 Hz – 102 kHz (rys. 2). Pomiary były wykonywane w zakresie temperatury 80 K – 350 K z krokiem co 1 K. Interpretacja zjawisk zachodzących w detektorach na podstawie przedstawionego powyżej obrazowania przestrzennego jest zadaniem trudnym i głównym celem takiego obrazowania jest określenie obszarów, które będą podlegać dalszej analizie. Dalsze informacje mogą być uzyskane po przedstawieniu wyników pomiarów w uproszczonej postaci przestrzennej, w sposób przedstawiony na rysunkach 3, 4 i 5. dla fotodiod nr 8, 7 i 2. W tym

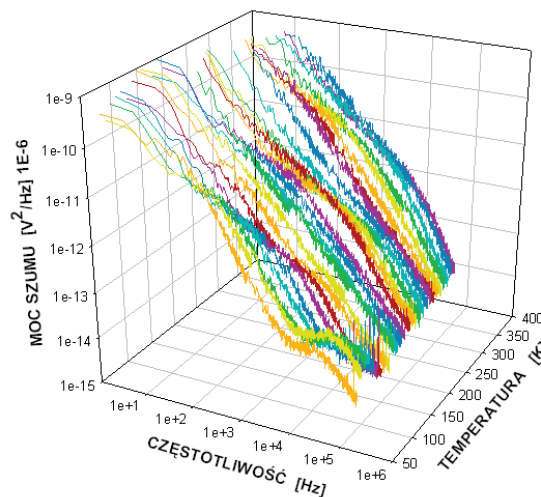
przypadku zostały zobrazowane wybrane wyniki pomiarów, dla kolejnych temperatur różniących się o 10 K, tzn. 80 K, 90 K aż do 350 K. Im większe odchylenie zmierzonej charakterystyki szumowej detektora od przebiegu charakterystyki szumu $1/f$, tym większa jest koncentracja głębokich centrów defektowych w materiale.

Detektor 8 (polaryzacja -1 V)



Rys. 3. Wybrane charakterystyki szumowe fotodetektora nr 8 przy polaryzacji -1 V

Detektor 7 (polaryzacja - 0.6 V)

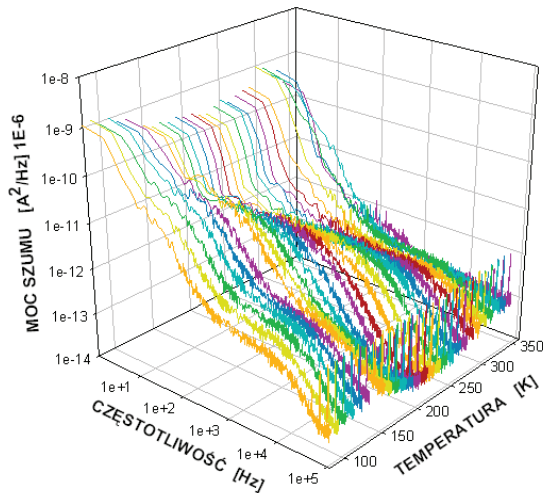


Rys. 4. Wybrane charakterystyki szumowe fotodetektora nr 7 przy polaryzacji -0,6 V

Z rysunków 3, 4 i 5 wynika, że najbardziej zdefektowany jest materiał fotodiody nr 7. Także mocno zdefektowany jest materiał fotodiody nr 2. Dotychczasowe badania dowodzą, że im bardziej materiał półprzewodnikowy jest zdefektowany, tym mniejszy jest stopień niezawodności wykonanego z tego materiału przyrządu półprzewodnikowego, odnosi się to także do detektorów UV. Jeżeli z obrazowań przestrzennych, pełnego i uproszczonego, można określić obszary

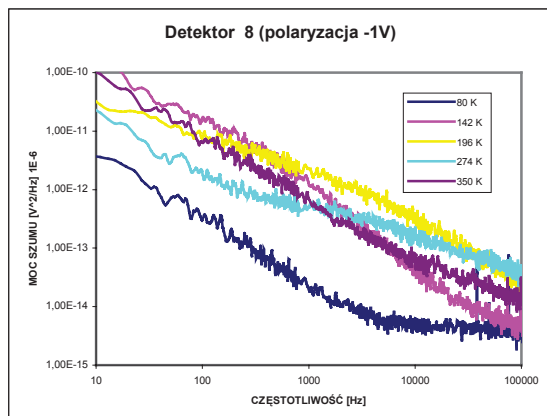
wskazujące na oddziaływanie innych składowych szumowych poza szumem cieplnym to należy przeanalizować je dokładniej w przestrzeni dwuwymiarowej dla wybranych zmian parametrów (napięć polaryzacji, wartości temperatury, zakresu częstotliwości).

Detektor 2 (polaryzacja -1V)



Rys. 5. Wybrane charakterystyki szumowe fotodetektora nr 2 przy polaryzacji -1 V

Przykładowe zobrazowanie dwuwymiarowe dla wybranych wartości temperatury przedstawiono na rysunku (rys. 6).



Rys. 6. Wybrane charakterystyki szumowe fotodetektora nr 8 przy polaryzacji -1 V w zobrazowaniu dwuwymiarowym

Jak wynika z tego rysunku dla dwóch temperatur 196 K i 274 K poziom szumu detektora dla niższej wartości temperatury jest wyższy niż dla wyższej temperatury, decydują o tym głębokie centra defektowe istniejące w strukturze detektora.

Jest to ważne spostrzeżenie, gdyż często stosuje się specjalnie obniżanie temperatury fotodetektora w celu zmniejszenia jego szumów własnych – jak widać w przypadku detektorów wykonanych z materiałów silnie zdefektowanych można uzyskać wręcz zwiększenie poziomu szumów.

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie pomiarów widmowej gęstości mocy szumu można określić w jakich zakresach częstotliwości detektor charakteryzuje się nieakceptowanym poziomem szumów oraz jak zmienia się charakterystyka detektora w funkcji temperatury i polaryzacji. Można również na podstawie przebiegu charakterystyk szumowych w różnych temperaturach, określać stopień zdefektowania materiału z którego został wykonany detektor i na tej podstawie prognozować jego niezawodność długoczasową. Analiza przebiegu charakterystyk szumowych pozwala też na przeprowadzenie selekcji komercyjnie dostępnych detektorów UV dla zastosowań specjalnych.

LITERATURA

- [1] Rieke G. H.: *Detection of Light: From Ultraviolet to the Submillimeter*, (Cambridge: Cambridge University Press), 1994
- [2] Bielecki Z., Rogalski A.: *Detekcja sygnałów optycznych*. WNT, Warszawa 2001
- [3] 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.
- [4] Dobrzański L.: *Detektor promieniowania ultrafioletowego z azotku galu*. II konferencja Optoelektronika 2003 Komunikaty s. 45-48.
- [5] Ćwirko J.: "The Low Frequency Noise Spectroscopy Method for Extracting the Parameters of Deep Level Centers in Semiconductor Materials". *Proceedings of SPIE*, 2002, Volume 5136, pp 133 – 138
- [6] Zaklikiewicz A. M.: *Źródła szumów w przyrządach półprzewodnikowych i ich wykorzystanie*. Prace Instytutu Technologii Elektronowe, Warszawa, Zeszyt 2, 1995.



Dr inż. **Joanna ĆWIRKO** i dr inż. **Robert ĆWIRKO**, są adiunktami w Instytucie Systemów Elektronicznych, Wydziału Elektroniki WAT. Specjalizują się w technologii i diagnostyce półprzewodników, w tym szczególnie pomiarami małosygnałowymi i szumów w szerokim zakresie zmian wartości temperatury. Zajmują się też tematyką inżynierii systemów ochrony.