

Układ do badania centrów defektowych metodą niestacjonarnej pojemnościowej spektroskopii głębokich poziomów

WSTĘP

Parametry użytkowe wytwarzanych obecnie obwodów scalonych i dyskretnych przyrządów półprzewodnikowych w znacznym stopniu zależne są od koncentracji i własności centrów defektowych, związanych głównie z defektami punktowymi (wakansami, atomami zanieczyszczeń, kompleksami wakans-domieszka), powstającymi w sposób niekontrolowany w materiale półprzewodnikowym. Te niepożądane centra defektowe mogą być generowane, bądź wprowadzane do materiału podczas procesów: monokryształizacji, obróbki termicznej, domieszkania a także podczas montażu przyrządów oraz ich pracy w określonych urządzeniach elektronicznych.

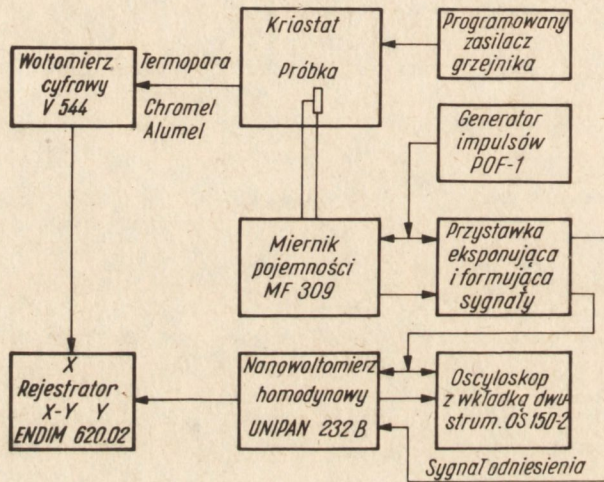
Niestacjonarna pojemnościowa spektroskopia głębokich poziomów (NPSGP) (Deep Level Transient Capacitance Spectroscopy - DLTS) jest obecnie jedną z najczęściej stosowanych metod badania centrów defektowych. Główną jej zaletą jest możliwość szybkiego otrzymywania widma energetycznych poziomów defektów w złączach p-n lub diodach z barierą Schottky'ego.

Technika pomiaru widma głębokich poziomów opisana została głównie w pracy Langa [1] i Kimerlinga [2]. W przypadku techniki Langa, do detekcji relaksacyjnych zmian pojemności, spowodowanych skokową zmianą napięcia polaryzacji, służy dwukanałowy konwerter samplingowy. Technika Kimerlinga polega na wykorzystaniu do ich detekcji nanowoltomierza homodynowego.

W niniejszej pracy przedstawiono opis układu pomiarowego umożliwiającego rejestrację widm głębokich poziomów techniką Kimerlinga. Wykorzystanie w tym układzie krajowych przyrządów pomiarowych było możliwe dzięki opracowaniu przystawki formującej sygnał odniesienia oraz eksponującej przebiegi relaksacyjne. Rezultaty badań centrów defektowych, przedstawione przykładowo dla krzemowej diody typu BA157GP, są potwierdzeniem prawidłowego działania układu pomiarowego.

Po skokowej zmianie napięcia wstecznego, przyłożonego do złącza p-n lub diody z barierą Schottky'ego, od wartości ustalonej do zera i ponownie do wartości pierwotnej, centra defektowe, obecne w warstwie zaporowej, są zapełnione większościowymi nośnikami ładunku. Nośniki te, są następnie uwalniane do pasma przewodnictwa lub pasma walencyjnego z szybkością zależną od temperatury. Zjawisko to uwidacznia się poprzez relaksacyjną zmianę pojemności warstwy ładunku przestrzennego.

Opracowana metoda pomiarowa polega na przetworzeniu, zależnych od temperatury, relaksacyjnych zmian pojemności warstwy ładunku przestrzennego na sygnał w postaci pików, których położenie na osi temperatury zależy od częstotliwości powtarzania impulsów polaryzujących. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat blokowy układu do badania centrów defektowych metodą niestacjonarnej pojemnościowej spektroskopii głębokich poziomów

W skład zestawu pomiarowego wchodzi następujące przyrządy:

- kriostat azotowy, umożliwiający utrzymywanie temperatury próbek w zakresie 100 K + 350 K;
- programowany zasilacz grzejnika, umożliwiający nagrzewanie próbek z szybkością 0,005+0,5 K/s;
- generator impulsów prostokątnych, umożliwiający impulsową polaryzację próbek napięciem wstecznym 0+-10 V przy poziomie odniesienia +2 + -2 V;
- miernik pojemności, umożliwiający pomiar zmian pojemności $|\Delta C| \gg 0,01$ pF w warunkach niestacjonarnych;
- przystawka formująca sygnał odniesienia i ekspanująca sygnał relaksacyjny (opracowanie własne);

- nanowoltomierz homodynamiczny, umożliwiający detekcję zmian kształtu impulsów relaksacyjnych;
- rejestrator X-Y, służący do rejestracji widma głębokich poziomów;
- oscyloskop, umożliwiający kontrolę przesunięcia fazowego pomiędzy sygnałem odniesienia i sygnałem relaksacyjnym.

Zasada działania układu polega na detekcji zmian amplitudy i fazy podstawowej składowej Fouriera sygnału relaksacyjnego, spowodowanych zmianami temperatury próbki. Detekcja ta przeprowadzana jest przy pomocy detektora fazoczułego, stanowiącego blok nanowoltomierza homodynamicznego. Do wydzielenia sygnału relaksacyjnego i uformowania sygnału odniesienia, wprowadzanych do nanowoltomierza homodynamicznego, służy przystawka, wykonana przy zastosowaniu układów scalonych ULY7741 i UCY74121. Przystawka ta umożliwi wyeksponowanie sygnału relaksacyjnego z jednoczesnym ograniczeniem amplitudy sygnału związanego ze zmianą napięcia polaryzacji do 3 ± 30 mV oraz ukształtowanie sygnału odniesienia w postaci impulsów prostokątnych o długości równej połowie okresu powtarzania impulsów polaryzujących.

W przypadku, gdy podstawowa składowa Fouriera sygnału relaksacyjnego jest opóźniona lub wyprzedza w fazie sygnał odniesienia amplituda sygnału na wyjściu detektora fazoczułego jest niewielka. W przypadku gdy podstawowa składowa Fouriera sygnału relaksacyjnego pokrywa się w fazie z sygnałem odniesienia na wyjściu detektora fazoczułego otrzymywany jest sygnał o maksymalnej amplitudzie. Jednocześnie amplituda podstawowej składowej Fouriera impulsu relaksacyjnego zależna jest od swojej fazy względem początku impulsu polaryzującego. Tak więc, przed rozpoczęciem pomiarów, należy tak dobrać przesunięcie fazowe pomiędzy początkiem sygnału relaksacyjnego a sygnałem odniesienia, aby synchronizacja fazowa sygnału odniesienia z podstawową składową Fouriera sygnału relaksacyjnego zachodziła przy maksymalnej jej amplitudzie. Jak wykazano w pracy [3], to przesunięcie wynosi $24^{\circ}30'$.

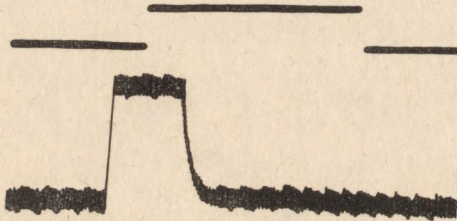
Dla temperatury T_M , w której sygnał wyjściowy z nanowoltomierza homodynamicznego osiąga maksimum, zależność pomiędzy stałą czasową τ , będącą odwrotnością szybkości emisji nośników ładunku, a częstotliwością powtarzania impulsów polaryzujących można przedstawić w postaci [3]:

$$\tau = 0,348f^{-1} \quad (1)$$

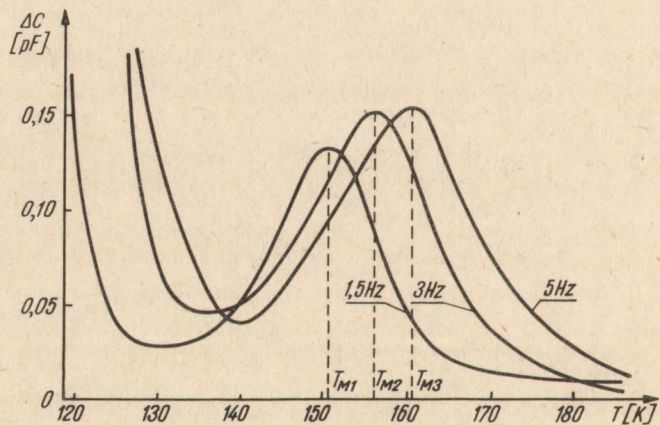
Tak więc, w celu wyznaczenia temperaturowej zależności stałej czasowej τ , niezbędnej dla określenia poziomu energetycznego, należy zarejestrować widmo głębokich poziomów przy kilku częstotliwościach powtarzania impulsów polaryzujących. Rejestracja ta prowadzona jest podczas nagrzewania próbki od temperatury ~ 100 K do temperatury ~ 350 K.

W celu stwierdzenia poprawności działania zaprojektowanego układu pomiarowego przeprowadzono rejestrację widm głębokich poziomów, związanych z centrami defektowymi, istniejącymi w krzemowej diodzie prostowniczej typu BA157GP.

Na rys. 2 przedstawiono sygnały relaksacyjny i odniesienia w przypadku poprawnie dostrojonego układu pomiarowego, a na rys. 3 pokazano widma głębokich poziomów przy częstotliwościach 1,5; 3; 5 Hz. Impulsy podawane na próbkę charakteryzowały się napięciem polaryzującym $-4,9$ V, napięciem odniesienia $+0,39$ V i współczynnikiem wypełnienia 86,39%.



Rys. 2. Oscylogram, ilustrujący przesunięcie fazowe o $24^{\circ}30'$ pomiędzy sygnałem relaksacyjnym (w temperaturze pokojowej) i sygnałem odniesienia.

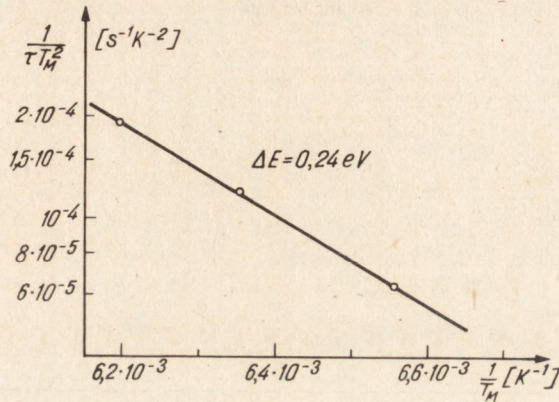


Rys. 3. Widma głębokich poziomów, związane z obecnością centrów defektowych w diodzie typu BA157GP, zarejestrowane przy częstotliwościach 1,5; 3; 5 Hz

Jak wynika z rys. 3, w analizowanym zakresie temperatur obserwowana jest emisja nośników ładunku z dwóch poziomów energetycznych. W przypadku emisji z poziomu, położonego dość głęboko w przerwie zabronionej możliwe byłoby zarejestrowanie całego piku, zaś w przypadku emisji z poziomu, położonego bliżej krawędzi pasma przewodnictwa lub pasma walencyjnego, zarejestrowano jedynie zbocze piku, leżące po stronie wyższych temperatur. Można jednak

stwierdzić, że ze wzrostem częstotliwości powtarzania impulsów polaryzujących oba piki przesuwają się w kierunku wyższych temperatur.

Wykorzystując równanie (1) oraz zależność temperatury, odpowiadającej pikowi, związanemu z emisją nośników ładunku z głębszego poziomu energetycznego, od częstotliwości, określono położenie tego poziomu w przerwie zabrconionej. Prosta $\lg\left(\frac{1}{\tau T_M^2}\right) = f\left(\frac{1}{T_M}\right)$, której nachylenie określa położenie tego poziomu względem dna pasma przewodnictwa lub wierzchołka pasma walencyjnego przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Wykres zależności $\lg\left(\frac{1}{\tau T_M^2}\right) = f\left(\frac{1}{T_M}\right)$ przy pomocy którego wyznaczono poziom energetyczny

Jak wynika z danych, przedstawionych na rys. 4, poziom energetyczny położony jest w odległości 0,24 eV od krawędzi pasma przewodnictwa lub pasma walencyjnego.

Koncentracja centrów defektowych, proporcjonalna do wysokości piku, wynosi $2,9 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. Sposób wyznaczania koncentracji centrów defektowych określony został na podstawie prac [3, 4].

Maksymalny błąd względny, z jakim określono położenie poziomu energetycznego i koncentrację centrów defektowych równy jest odpowiednio 5% i 15%.

PODSUMOWANIE

Opracowano układ pomiarowy, umożliwiający rejestrację widma głębokich poziomów metodą niestacjonarnej spektroskopii pojemnościowej. Zasadnicze przyrządy pomiarowe, wykorzystane do budowy układu (generator impulsów, miernik pojemności, nanowoltomierz homodynamiczny) są produkcji krajowej. Przedstawiona idea pomiarowa może być wykorzystana do budowy spektrometru głębokich poziomów. Budowa ta polegałaby głównie na scaleniu zasadniczych węzłów pomiarowych oraz wykonaniu bloku, umożliwiającego automatyczne dostrajanie się układu pomiarowego do żądanej częstotliwości powtarzania impulsów polaryzujących. (Tekst dostarczony 7.VI.1982 r.)

LITERATURA

1. Lang D.V.: J. Appl. Phys. 45, 3023, 1974
2. Kimerling L.C.: IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-23, 1497, 1976
3. Forbs L.: NSF Technical Report, University of California, Davis 1976
4. Kamiński P.: Rozprawa doktorska, Odesski Państwowy Uniwersytet im. I.I. Miecznikowa, Odessa 1981