

POMIAR KONCENTRACJI NOŚNIKÓW ŁADUNKU W PŁYTKACH MONOKRYSTAŁÓW OBJĘTOŚCIOWYCH I WARSTWACH EPITAKSJALNYCH SiC ZA POMOCĄ SONDY RTĘCIOWEJ*

Andrzej Brzozowski¹

Przedstawiono metodykę wyznaczania koncentracji nośników ładunku w płytkach monokrystałów objętościowych i warstwach epitaksjalnych węgla krzemu (SiC) poprzez pomiar charakterystyk pojemnościowo-napięciowych (C-U) obszaru zubożonego w zaporowo spolaryzowanych złączach Schottky'ego wytwarzanych za pomocą sondy rtęciowej. Omówiono przyczyny niedokładności pomiaru. Pokazano przykładowe wyniki pomiaru koncentracji nośników ładunku oraz określono rozrzuty wartości koncentracji nośników ładunku dla płytek monokrystałów objętościowych oraz warstw epitaksjalnych SiC.

1. WSTĘP

Pomiar koncentracji nośników ładunku w materiałach półprzewodnikowych polegający na analizie charakterystyk pojemnościowo-napięciowych (C-U) spolaryzowanego zaporowo złącza Schottky'go znany jest i stosowany od wielu lat. Użycie trawiącego elektrolitu do tworzenia kontaktu Schottky'go znalazło zastosowanie do pomiaru rozkładu koncentracji nośników w związkach półprzewodnikowych typu A^mB^v [1], natomiast sonda rtęciowa jest szeroko stosowana do pomiaru koncentracji nośników w produkowanych płytkach krzemowych. W szczególności, sonda rtęciowa

¹ Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa, e-mail: andrzej.brzozowski@itme.edu.pl

* W wyniku błędu redakcyjnego treść artykułu opublikowanego w poprzednim numerze (ME Nr.2, T. 36, 2008) została istotnie skrócona. Obecnie zamieszczamy pełną treść tego artykułu.

z głowicą typu 1Hg, w której kontakt Schottky'go z materiałem półprzewodnikowym utworzony jest z jednej strony płytki, zaś drugi – omowy tworzy się z drugiej strony płytki znalazła szczególnie zastosowanie do określania koncentracji nośników ładunku w krzemowych warstwach epitaksjalnych [2]. Umożliwiła ona szybki i powtarzalny pomiar koncentracji nośników ładunku w całym zakresie produkowanych wyrobów o rezystywności od $0.1 \Omega\text{cm}$ do $500 \Omega\text{cm}$. Sonda rtęciowa z głowicą 2Hg, w której kontakty Schottky'ego i omowy tworzą się z tej samej strony płytki, ze względu na dużą oporność szeregową i dużą pojemność równoległą układu, trudną do całkowitego skompensowania, nie znalazła zastosowania do wyznaczania koncentracji nośników w płytkach krzemowych, natomiast okazała się przydatna do pomiarów monokryształów SiC.

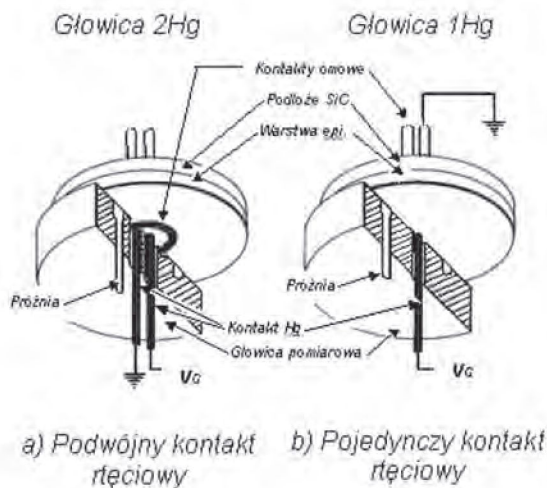
Celem niniejszej pracy jest przedstawienie szybkiej i nieniszczącej metody wyznaczania koncentracji nośników ładunku w płytkach monokryształów objętościowych oraz w warstwach epitaksjalnych SiC poprzez pomiar charakterystyk C-U złącz Schottky'go utworzonych przez sondę rtęciową. Metoda ta okazała się przydatna do szybkiej kontroli warunków procesów wzrostu objętościowych monokryształów SiC oraz warstw epitaksjalnych. W szczególności, w przypadku warstw epitaksjalnych umożliwia ona uzyskanie informacji niezbędnej do natychmiastowego wprowadzenia zmian w procesie domieszkowania.

2. APARATURA I KALIBRACJA SONDY RTĘCIOWEJ

Do pomiaru koncentracji nośników ładunku w płytkach monokrystalicznych i warstwach epitaksjalnych SiC zastosowano system pomiarowy CV-2000 wykonany w Przemysłowym Instytucie Elektroniki w Warszawie (opracowany na podstawie umowy 2387/C.T11-8/99 z Komitetem Badań Naukowych). System ten składa się z miernika pojemności wyposażonego w generator sygnału pomiarowego o częstotliwości 1 MHz i amplitudzie 50 mV. W skład systemu wchodzi również: sonda rtęciowa wyposażona w dwa rodzaje głowic 1Hg i 2Hg, charakterograf służący do sprawdzania charakterystyk prądowo-napięciowych, oraz komputer wraz z oprogramowaniem do sterowania pomiarami i analizy wyników. Maksymalne napięcie polaryzacji próbki dla tego systemu wynosi 100 V, natomiast maksymalna mierzona pojemność - 2000 pF.

Należy dodać, że w systemie CV-2000 blok analizy danych dostosowany jest do wyznaczania koncentracji nośników tylko w krzemowych warstwach epitaksjalnych. W celu przystosowania systemu do wyznaczania koncentracji nośników ładunku w SiC wykorzystano tor sterowania pomiarem pojemności w funkcji napięcia dla wstecznie spolaryzowanej testowej diody Schottky'ego utworzonej przez kontakty rtęciowe, natomiast do analizy zmierzonych danych zastosowano odrębną procedurę obliczeniową, opracowaną w arkuszu kalkulacyjnym Microsoft Office Excel.

Głowice oznaczone jako 1Hg i 2Hg stosowane są do tworzenia kontaktów rtęciowych na płytkach monokryształów objętościowych oraz na płytkach z warstwami epitaksjalnymi SiC osadzonymi zarówno na podłożach przewodzących, jak i izolujących. Konstrukcję tych głowic przedstawiono schematycznie na Rys. 1.



Rys. 1. Ilustracja konstrukcji głowic sondy rtęciowej, umożliwiających wytworzenie z jednej strony płytki SiC (a) dwóch kontaktów rtęciowych oraz (b) jednego kontaktu rtęciowego.
Fig. 1. Illustration of mercury probe heads dedicated to formation of two mercury contacts (a) and one mercury contact (b) on the one side of a SiC wafer.

Koncentrację nośników ładunku $N(W_i)$ w funkcji głębokości wnikania warstwy ładunku przestrzennego W_i wyznaczano ze wzorów [2]:

$$N(W_i) = C_i^3 / \epsilon \epsilon_0 A^2 (dC_i / dW_i), \quad (1)$$

$$W_i = \epsilon A / C_i, \quad (2)$$

$$C_i = C_{im} - C_{komp}, \quad (3)$$

w których: C_{im} oznacza pojemność przy napięciu U_p , C_{komp} - pojemność kompensacyjną, A - pole powierzchni kontaktu rtęci z półprzewodnikiem, e - ładunek elementarny, ϵ - stałą dielektryczną SiC.

Kalibracja sondy polegała na wyznaczeniu wartości pojemności kompensacyjnej C_{komp} dla sondy rtęciowej z głowicą typu 1Hg oraz 2Hg wraz z okablowaniem, a także efektywnego pola powierzchni A kontaktu rtęci z próbką dla każdej z głowic. Oba te parametry wyznaczono zgodnie z normą ASTM F1392. Z powodu braku płytek z węgliku krzemu o precyzyjnie określonych koncentracjach, do kalibracji użyto płytek krzemowych, które są dostępne w dużym zakresie rezystywności. Do wyzna-

czenia pojemności kompensacyjnej użyto płytkę krzemową z warstwą epitaksjalną o stałym profilu i niskiej koncentracji nośników ładunku (poniżej $1.0E + 13 \text{ cm}^{-3}$). Stałość profilu oraz jego poziom wyznaczono metodą *oporności rozplywu w styku punktowym* [3]. Wartość C_{kom} dobierano tak, by poziom koncentracji nośników ładunku mierzony metodą C-U był też stały w funkcji głębokości. Niski poziom koncentracji był potrzebny, aby pojemność mierzonej struktury była mała i aby wpływ źle dobranej pojemności kompensacyjnej na kształt profilu był jak najbardziej widoczny. Metodą tą wyznaczono pojemność kompensacyjną dla obu sond 1Hg i 2Hg.

Efektywne pole powierzchni kontaktu rtęci z materiałem półprzewodnikowym dla głowic 1Hg i 2Hg wyznaczono na podstawie koncentracji nośników ładunku określonej dla wzorcowych płytek krzemowych z warstwą epitaksjalną. Płytki z węgliku krzemu o precyzyjnie określonej koncentracji były niedostępne. Do kalibracji użyto płytek o koncentracji nośników ładunku w zakresie od $7.0E+13 \text{ cm}^{-3}$ do $2.0E+16 \text{ cm}^{-3}$ i wyznaczono taką powierzchnię, aby otrzymać zgodność wartości zmierzonej z wartościami wzorcowymi.

Określona tą metodą efektywna średnica kontaktu okazała się nieznacznie mniejsza ($\approx 5 \text{ }\mu\text{m}$) od średnicy kapilary, wyznaczonej przy użyciu mikroskopu optycznego. Różnica ta spowodowana jest meniskiem wypukłym, jaki tworzy rtęć w kapilarze, oraz ograniczoną precyzją wykonania kapilary i niedokładnością pomiaru jej średnicy.

3. DOKŁADNOŚĆ POMIARU KONCENTRACJI NOŚNIKÓW ŁADUNKU

Zgodnie ze wzorem (4) przedstawionym w pracy [1]

$$N_m/N = (1 + R_s/R_f) / [(1 + R_s/R_f)^4 - (\omega R_s C_m)^4], \quad (4)$$

w którym: N_m oznacza mierzoną koncentrację nośników ładunku, N - rzeczywistą koncentrację nośników ładunku, R_s - oporność szeregową, R_f - oporność upływu, C_m - mierzoną pojemność, ω - częstotliwość pomiarową, na dokładność pomiaru zasadniczy wpływ ma oporność szeregową testowej diody Schottky'ego oraz oporność równoległą, związana z prądem upływu wstecznie spolaryzowanego złącza rtęć - SiC. Gdy oporność szeregową nie jest pomijalna, część napięcia pomiarowego odkłada się na niej i zmniejsza mierzoną wartość pojemności w stosunku do wartości rzeczywistej. Zwiększenie dokładności pomiaru otrzymuje się poprzez zmniejszenie oporności szeregowej oraz zmniejszenie prądów upływu. Należy dodać, że pojemność szeregową wpływa szczególnie na pomiar koncentracji nośników ładunku w mate-

riale silnie domieszkowanym, kiedy występuje duża pojemność złącza rtęć – SiC w zakresie małych napięć polaryzacji.

W celu zwiększenia dokładności pomiaru zalecane jest też zmniejszenie powierzchni kontaktu rtęci z materiałem półprzewodnikowym, a więc zmniejszenie mierzonej pojemności. Należy się jednak wtedy liczyć z większym błędem pomiarowym spowodowanym nieprecyzyjnie wyznaczoną pojemnością kompensacyjną, której wpływ rośnie dla małych wartości C_m .

Zgodnie ze wzorem (4) zmniejszenie częstotliwości pomiarowej może zwiększyć dokładność pomiaru. Jednak w przypadku, gdy koncentracja głębokich poziomów pułapkowych w półprzewodniku jest wysoka, niższa częstotliwość pomiarowa uaktywnia wpływ termicznej emisji nośników ładunku z głębokich poziomów defektowych. Dla materiału typu n termiczna emisja elektronów z głębokich centrów donorowych podwyższa wartość mierzonej koncentracji nośników ładunku, natomiast emisja dziur z głębokich centrów akceptorowych obniża tę wartość.

W przypadku głowic 1Hg i 2Hg zastosowanych do wyznaczania koncentracji nośników ładunku w płytkach SiC średnica kontaktu rtęci z materiałem wynosiła ~ 1 mm. W głowicy 1Hg (Rys. 1b) kontakt omowy z płytką tworzony jest przez dwa sprężynujące pozłacane bolce, przez które przepuszczany jest prąd z naładowanego kondensatora. Przebijają one tlenki od spodniej części płytki i zdecydowanie zmniejsza oporność szeregową. Przy tak formowanych kontaktach o oporności szeregowej decyduje głównie rezystywność materiału. Dla warstw epitaksjalnych osadzonych na niskorezystywnych podłożach tego samego typu o wartości oporności szeregowej decyduje głównie rezystywność warstwy epitaksjalnej. Dla wysokorezystywnych warstw epitaksjalnych SiC o grubości ~ 10 μm oporność szeregowa wynosiła ~ 1 k Ω , natomiast dla warstw niskorezystywnych nawet ~ 20 Ω .

Głowica 2Hg nie posiada układu formowania kontaktu omowego i w związku z tym, że dla warstw epitaksjalnych kontakt omowy tworzony jest na warstwie, a nie na niskorezystywnym podłożu, otrzymywano zdecydowanie wyższe wartości oporności szeregowej. Głowica ta była więc nieprzydatna do wyznaczania koncentracji nośników ładunku w wysokorezystywnych warstwach epitaksjalnych SiC. Natomiast dla warstw o niskiej rezystywności uzyskiwane były małe wartości oporności szeregowej, a wartości koncentracji nośników ładunku były podobne lub identyczne, jak w przypadku zastosowania głowicy 1Hg. Głowica 2Hg, mimo zdecydowanie większej pojemności własnej, którą należy skompensować, okazała się bardziej przydatna do pomiaru koncentracji nośników w niskorezystywnych płytkach podłożowych SiC. Ponadto, przy pomiarach dużych pojemności ewentualne błędy związane z jej kompensacją są nieistotne. Uzyskiwano natomiast lepsze charakterystyki prądowo-napięciowe i bardziej prawidłowe przebiegi pojemności w funkcji napięcia polaryzacji niż w przypadku głowicy 1Hg. Podtrawienie próbki bezpośrednio przed pomiarem w kwasie fluorowodorowym przez ~ 2 minuty zdecydowanie zmniejszało oporność szeregową testowej diody Schottky'ego. Prawdopodobnie

w kwasie fluorowodorowym strawiane były z powierzchni płytki wszystkie tlenki i polepszał się kontakt omowy o dużej powierzchni, jaki tworzy rtęć z SiC. Świadczy o tym fakt, że powtórzone po ~ dobie pomiary wykazywały zdecydowanie większą oporność szeregową, a po wygrzaniu płytki przez kilkanaście minut w powietrzu, w temperaturze ~ 400 °C, oporność szeregową dalej wzrastała, aż osiągnęła wartość początkową, obserwowaną przed trawieniem.

Stosowany do pomiaru system posiada układ kontrolujący w trakcie pomiaru prąd upływu złącza rtęć - SiC. Charakterystyki prądowo-napięciowe kontrolowane są za pomocą charakterografu. W przypadku przekroczenia gęstości prądu powyżej 9 mA/cm², system zatrzymuje pomiar charakterystyk $C = f(U)$.

Dla warstw epitaksjalnych typu n/n^+ złącza rtęć - SiC posiadały prawidłowe charakterystyki prądowo-napięciowe. Dla większości tych warstw oporności szeregowie i upływności były małe, a duże upływności występowały dopiero przy napięciach wysokich. Dla niektórych warstw gęstości prądu upływu nie przekraczały maksymalnej wartości, nawet przy maksymalnym napięciu polaryzacji 100 V.

Innymi właściwościami charakteryzowały się złącza rtęć - SiC dla warstw typu p/p^+ . Oporności szeregowie dla tych warstw były małe, natomiast upływności, nawet dla małych napięć polaryzacji, były już dość duże i stosunkowo szybko przekraczały graniczną wartość 9 mA/cm². Zjawisko to obserwowano szczególnie dla warstw silnie domieszkowanych.

4. WYZNACZANIE PROFILU KONCENTRACJI NOŚNIKÓW ŁADUNKU NA PODSTAWIE CHARAKTERYSTYK C-U

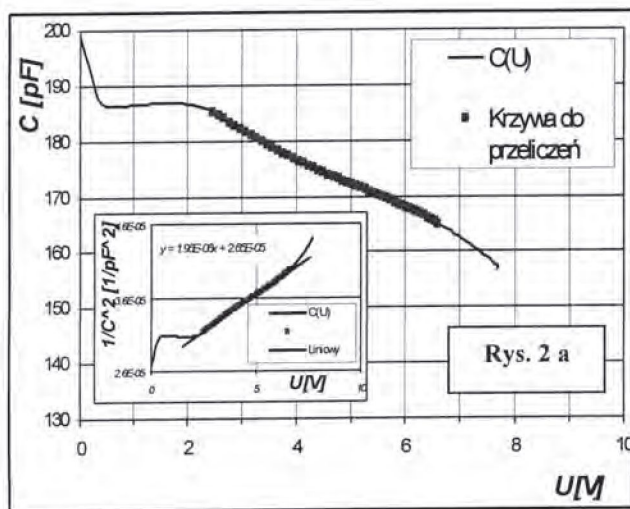
W celu przystosowania systemu pomiarowego do wyznaczania koncentracji nośników ładunku w SiC w arkuszu kalkulacyjnym Excel opracowano szablon obliczeniowy oraz raport wydruku wyników. W szablonie tym uwzględniono stałą dielektryczną dla SiC ($\epsilon/\epsilon_0 = 9.66$) oraz wartości pojemności kompensacyjnej C_0 , równe dla głowicy 1Hg i 2Hg, odpowiednio 2.183 pF i 6.245 pF. Arkuszowi wydruku wyników nadano formę analogiczną do arkusza wydruków dla pomiaru koncentracji nośników ładunku w płytkach krzemowych, który zalecany jest w normach ASTM F1392 [3].

Koncentrację nośników ładunku wyznaczano ze wzorów (1 - 3). Algorytm wyznaczania koncentracji nośników ładunku podano w normach ASTM F1392 [3], w których przedstawiono dwie metody obliczeniowe. Jedną z nich, tzw. *metoda przyrostów*, polega na obliczeniu rozkładu koncentracji nośników ładunku w funkcji głębokości W_i za pośrednictwem bezwymiarowego współczynnika S_i , wyznaczonego na podstawie par wartości pojemności i napięcia C_p , U_i oraz C_{i+k} , U_{i+k} , gdzie k jest liczbą całkowitą. Dla kolejnych wartości k pojemność C_{i+k} zawiera się w przedziale (0.8 - 0.85) C_i . Drugą metodą, tzw. *metoda dopasowania krzywej*

polega na aproksymowaniu funkcji $1/C_m^2(U)$ wielomianem rzędu k , dobraćym tak, by różnica pomiędzy wartością pojemności określonej w wyniku aproksymacji a wartością rzeczywistą dla wszystkich punktów pomiarowych nie przekraczała 1%. Z wyznaczonego w ten sposób wielomianu obliczana jest pochodna dC_i/dU_i i podstawiana do wzoru (1). Obie metody obliczeniowe stosowane są do wyznaczania koncentracji nośników ładunku w płytkach krzemowych. W wyniku zastosowania ich do analizy charakterystyk C-U dla SiC tracone były fragmenty profilu koncentracji nośników ładunku dla bardzo małych napięć, a więc blisko powierzchni płytki. Jednocześnie dla dużych napięć tracone były informacje o warstwie przejściowej między warstwą epitaksjalną a podłożem. Należy także dodać, że dla niektórych płytek SiC o bardzo niskiej rezystywności wyznaczenie rozkładu koncentracji nośników ładunku za pomocą tych metod było niemożliwe z powodu zbyt małej liczby punktów pomiarowych.

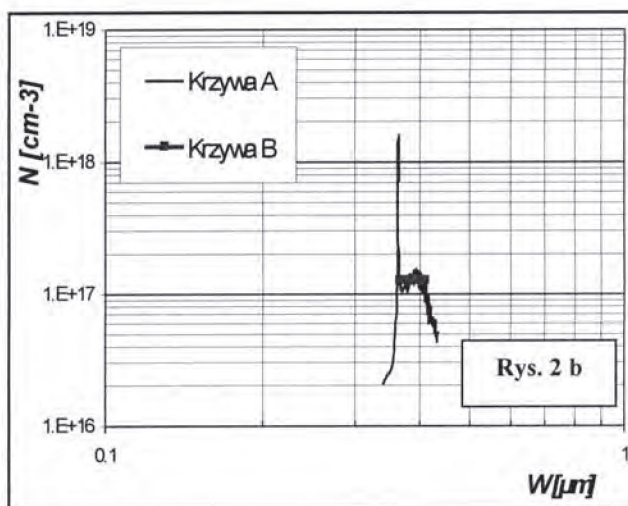
W związku z powyższym w arkuszu kalkulacyjnym zmodyfikowano procedurę obliczania koncentracji nośników ładunku na podstawie charakterystyk C-U. Dla monokrystalów SiC, w których koncentracja głębokich centrów defektowych jest niewiele niższa lub porównywalna do koncentracji nośników ładunku i wpływa na przebieg charakterystyki $C(U)$, zastosowano metodę przybliżania funkcji $1/C^2(U)$ wielomianem pierwszego stopnia (Rys. 2a). Wielomian ten dopasowywano do funkcji $1/C^2(U)$ w tym zakresie napięć, gdzie była ona rzeczywiście zbliżona do prostej. Koncentrację nośników ładunku obliczano z równania tej prostej. Na Rys. 2b przedstawiono wyniki koncentracji nośników ładunku otrzymane z uwzględnieniem całej, zmierzonej charakterystyki $C(U)$ (Krzywa A), a także dla zakresu napięć, gdzie $1/C^2(U)$ jest funkcją liniową (Krzywa B). Przedstawiona metoda obliczeniowa dobrze sprawdziła się dla pomiarów koncentracji nośników w monokrystalach objętościowych SiC, natomiast przy pomiarach warstw epitaksjalnych gubione były informacje o koncentracji w obszarze przejściowym warstwa – podłoże, a więc gubione były informacje o głębokości warstwy przejściowej.

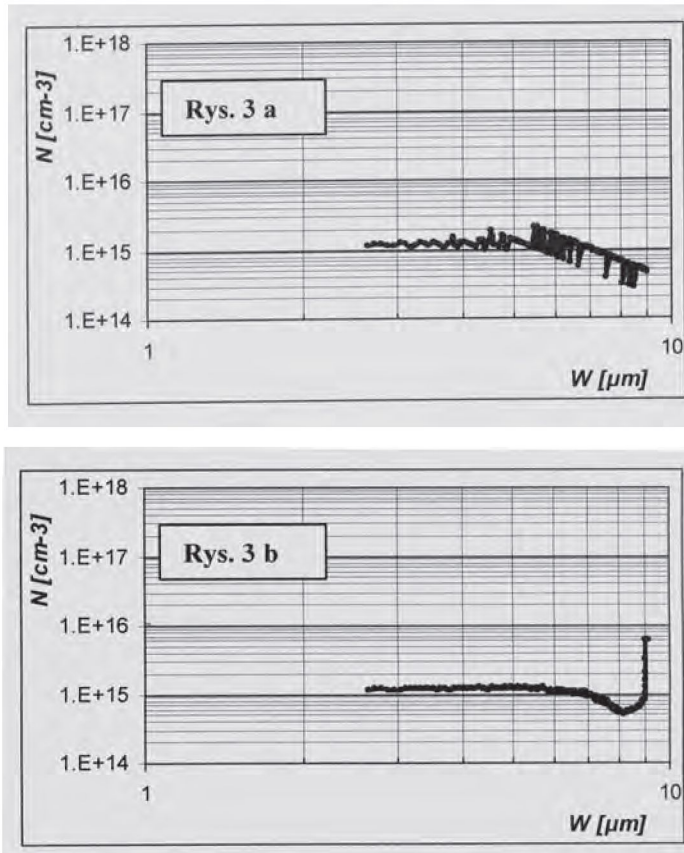
W przypadku warstw epitaksjalnych SiC, dla których charakterystyki $C(U)$ nie były istotnie zaburzone przez termiczną emisję nośników z głębokich centrów defektowych, do wyznaczania koncentracji nośników na podstawie zmierzonej zależności $C(U)$ zastosowano procedurę polegającą na obliczaniu pochodnej dC/dU (wzór 1) za pomocą przyrostów $\Delta C/\Delta U$. Należy jednak dodać, że przyrosty ΔU nie były jednakowe w całym zakresie przebiegu $C(U)$, ale rosły wraz ze wzrostem napięcia U . W ten sposób uzyskano istotną poprawę jakości otrzymywanych profili koncentracji nośników w głąb warstw SiC, bez straty informacji o warstwie przejściowej na granicy z podłożem (Rys 3a - 3b).



Rys 2. (a) Przykładowa charakterystyka $C(U)$ oraz (b) wyznaczony profil rozkładu koncentracji nośników ładunku w płycie monokryształu objętościowego 6H-SiC o dużej koncentracji głębokich centrów defektowych. Wstawka na Rys. 2a ilustruje przebieg zależności

$1/C^2(U)$ w zakresie napięć, dla których zależność ta jest funkcją liniową. Rozkład koncentracji nośników ładunku w funkcji głębokości wnikania warstwy ładunku przestrzennego, pokazany na Rys. 2b, został wyznaczony w wyniku aproksymacji zależności $1/C^2(U)$ funkcją liniową. **Fig. 2.** (a) Plot of $C(U)$ curve and (b) the charge carrier concentration profile for a wafer of 6H-SiC bulk crystal with a high concentration of deep-level defects. The insert in Fig. 2a shows the plot of $1/C^2(U)$ in the voltage-range where $1/C^2$ is a linear function of the voltage. The distribution of the charge carrier concentration as a function of the space charge penetration depth, plotted in Fig. 2b, was determined through a linear approximation of the $1/C^2(U)$ dependence.





Rys 3. Profil rozkładu koncentracji nośników ładunku w głąb warstwy epitaksjalnej 4H-SiC wyznaczony na podstawie charakterystyki $C(U)$ przy założeniu (a) stałych wartości ΔU oraz (b) dla rosnących wartości ΔU .

Fig.3. Charge carrier concentration profile in depth of a 4H-SiC epitaxial layer computed from the $C(U)$ curve assuming (a) constant ΔU values and (b) rising ΔU values.

5. WYNIKI POMIARÓW KONCENTRACJI NOŚNIKÓW ŁADUNKU W PŁYTKACH MONOKRYSTAŁÓW OBJĘTOŚCIOWYCH 6H-SiC

Pomiary koncentracji nośników ładunku wykonano sondą rtęciową z głowicą 2Hg na wypolerowanych płytkach 6H-SiC. Pomiary wykonano w środku płytki oraz w miejscach oddalonych o $\sim 7 \div 8$ mm od krawędzi płytek. Konstrukcja głowicy umożliwia wykonanie pomiarów w bliższych odległościach od krawędzi płytek.

Przykładowy przebieg zależności $C(U)$ oraz uzyskany na podstawie tej zależności profil rozkładu koncentracji nośników ładunku dla centralnego punktu płytki z monokryształu oznaczonego etykietą F 205-07-11 przedstawiono odpowiednio na Rys. 2a - 2b. Odstępstwo od liniowości przebiegu funkcji $1/C^2(U)$ sugeruje dużą koncentrację głębokich centrów defektowych, które uaktywniają się podczas pomiaru i wpływają na pojemność warstwy zubożonej. Jak wykazały wyniki badań metodą DLTS (*Deep Level Transient Spectroscopy*), koncentracja głębokich centrów w tej płytce zawierała się w przedziale $1.0E+15 \div 1.0E+16 \text{ cm}^{-3}$.

Wyniki pomiarów typu przewodnictwa, średniej wartości koncentracji nośników ładunku, wartości minimalnej i maksymalnej oraz odchylenia standardowego dla pięciu płytek z monokryształów otrzymanych w różnych procesach technologicznych przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Rozrzuty wartości koncentracji nośników ładunku w płytkach z wybranych monokryształów objętościowych 6H-SiC.

Table 1. Spread of the charge carrier concentration values for wafers from selected bulk 6H-SiC single crystals.

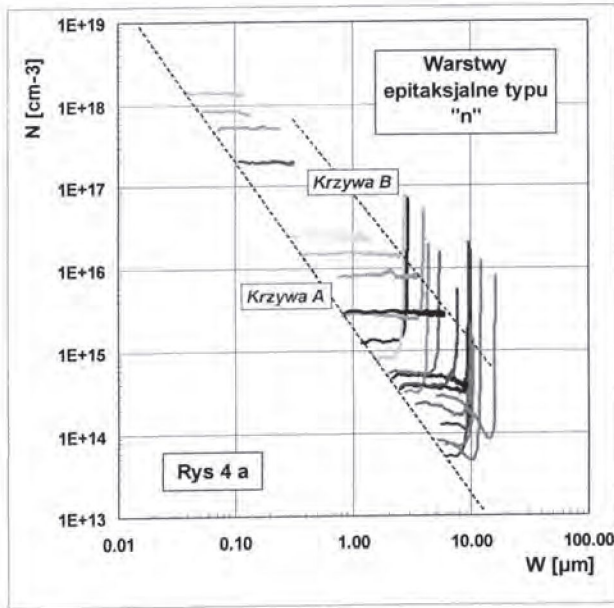
Nr procesu	Miejsce płytki w kryształach	Typ przew.	Koncentracja nośników ładunku			
			Wartość średnia [cm^{-3}]	Wartość min. [cm^{-3}]	Wartość maks. [cm^{-3}]	Odchyl. standard. [%]
F2 05-07-11	brak informacji	n	4.60E+17	7.32E+16	1.52E+18	114.1
F2 06-02-30	brak informacji	n	1.29E+18	1.01E+18	2.57E+18	35.4
F1 06-11-21	blisko zarodzi	p	1.17E+18	1.06E+18	1.49E+18	15.5
	blisko frontu kryst	n	1.72E+16	1.60E+15	3.63E+16	73.5
F2 07-09-25	blisko zarodzi	n	4.38E+17	3.87E+17	4.8E+17	7.3
	blisko frontu kryst	n	4.98E+17	4.53E+17	5.57E+17	8.5
F1 07-01-15	brak informacji	n	4.05E+15	1.30E+15	7.63E+15	61.5

Jak wskazują dane przedstawione w Tabeli 1, najmniejsze rozrzuty koncentracji nośników ładunku obserwowane są dla płytek z monokryształu F2 07-09-25. Należy dodać, że średnica tych płytek wynosiła 34 mm i była znacznie mniejsza od średnicy płytek standardowych, równej ~ 50 mm. Ponadto płytki charakteryzowały się małą gęstością defektów struktury krystalicznej. Zaobserwowano również zbliżone wartości koncentracji nośników w obu płytkach oraz zbliżone wartości odchylenia standardowego.

W przypadku domieszkowanego borem monokryształu 6H-SiC, oznaczonego etykietą F1 06-11-21, przygotowano płytki z początku i z końca kryształu. Otrzymane wartości koncentracji nośników ładunku potwierdzają fakt, że w początkowej fazie wzrostu do kryształu wprowadzana jest duża koncentracja boru, zaś koncentracja innych zanieczyszczeń może być znacznie mniejsza. Średnia wartość koncentracji nośników dla płytki typu *p* wyciętej z początku kryształu (blisko zarodzi) wynosi $1.17E + 18 \text{ cm}^{-3}$. Obserwowano również małe rozrzuty koncentracji dziur na tej płytce. Natomiast płytka wycięta z końca kryształu (blisko frontu krystalizacji) była już typu *n* o koncentracji elektronów $\sim 1,72E+16 \text{ cm}^{-3}$, a rozrzuty koncentracji nośników były zdecydowanie większe. Tak więc, na typ przewodnictwa tej płytki oraz rozrzuty koncentracji nośników ładunku istotny wpływ miały prawdopodobnie centra donorowe związane z atomami azotu lub tlenu, wprowadzane w sposób niekontrolowany do kryształu w procesie wzrostu. Wyniki przeprowadzonych pomiarów wskazują, że metoda polegająca na zastosowaniu sondy rtęciowej z głowicą typu 2Hg do wyznaczania koncentracji nośników ładunku w płytkach monokryształów objętościowych SiC jest dobrą metodą, umożliwiającą w szybki i nieniszczący sposób uzyskanie powtarzalnych wartości koncentracji nośników ładunku.

6. WYNIKI POMIARÓW KONCENTRACJI NOŚNIKÓW ŁADUNKU DLA WARSTW EPITAKSJALNYCH 4H-SiC

Warstwy epitaksjalne SiC, dla których przeprowadzono pomiary koncentracji nośników ładunku, osadzone zostały z fazy gazowej na monokryształiczne podłoża 4H-SiC w Pracowni Epitaksji Związków Półprzewodnikowych ITME. Grubość warstw epitaksjalnych wynosiła od kilku do kilkunastu mikrometrów. Na Rys. 4 pokazano przykładowe profile rozkładu koncentracji nośników ładunku w głąb warstw epitaksjalnych. Niedomieszkowane warstwy epitaksjalne o koncentracji nośników ładunku poniżej $1.0E + 15 \text{ cm}^{-3}$, oraz warstwy domieszkowane azotem, o koncentracji nośników ładunku powyżej $1.0E + 15 \text{ cm}^{-3}$, były typu *n*, natomiast warstwy domieszkowane aluminium były typu *p*. Na Rys 4a - 4b pokazane są dwie krzywe, z których krzywa A ilustruje zależność głębokości wnikania ładunku przestrzennego w funkcji koncentracji nośników ładunku dla zerowej polaryzacji złącza rtęć-półprzewodnik, zaś krzywa B odpowiada głębokości wnikania ładunku przestrzennego dla maksymalnego napięcia polaryzacji, równego 100 V, jakie można przyłożyć za pomocą zastosowanego zestawu pomiarowego. W praktyce, obszar między krzywą A i krzywą B wyznacza zakres pomiaru koncentracji nośników ładunku metodą C-U. Innymi słowy, metodą tą nie może być wyznaczona koncentracja nośników ładunku w warstwach epitaksjalnych o grubości mniejszej niż głębokość określona krzywą A.



Rys 4. (a) Profile rozkładu koncentracji elektronów w głąb warstw epitaksjalnych 4H-SiC typu n o różnej koncentracji donorów. (b) Profile rozkładu koncentracji dziur w głąb warstw epitaksjalnych 4H-SiC typu p o różnej koncentracji akceptorów. Liniami przerywanymi zaznaczono zakres zmian szerokości warstwy ładunku przestrzennego, które dla określonej koncentracji nośników ładunku w warstwie epitaksjalnej mogą być realizowane za pomocą systemu pomiarowego.

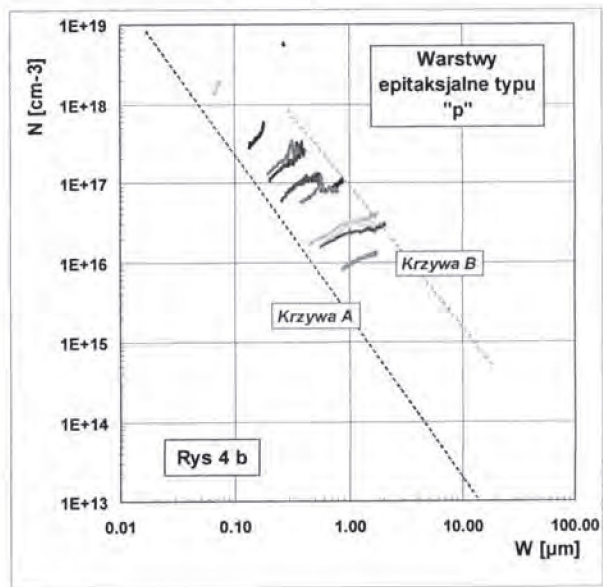


Fig. 4. (a) Electron concentration profiles in depth of n type 4H-SiC epitaxial layers with various donor concentrations. (b) Hole concentration profiles in depth of p type 4H-SiC epitaxial layers with various acceptor concentrations. The dotted lines mark the range of the space charge layer width changes that for a given charge carrier concentration in the epitaxial layer can be made using the experimental system.

Pomiary koncentracji nośników ładunku wykonano sondą rtęciową z głowicą typu 1Hg. Pole powierzchni kontaktu rtęć-SiC wynosiło $\sim 1 \text{ mm}^2$. Wszystkie pomiary dla warstw epitaksjalnych typu p wykazują wzrost koncentracji w funkcji głębokości. Jest to prawdopodobnie efekt szybkiego wzrostu natężenia prądu upływu w funkcji przyłożonego napięcia. Wydaje się, że mniejsze pole powierzchni oraz odpowiednia obróbka powierzchni płytek typu p poprawiłaby jakość kontaktu rtęć-SiC tworzącego złącze Schottky'ego.

W celu oceny rozrzutu wartości koncentracji nośników ładunku zmierzono rozkłady koncentracji nośników ładunku na kilku płytkach z warstwami epitaksjalnymi, osadzonymi w dwóch różnych komorach (C1 i C2) urządzenia do epitaksji. Dla

Tabela 2. Rozrzuty wartości koncentracji nośników ładunku oraz rozrzuty wartości głębokości warstwy przejściowej dla wybranych warstw epitaksjalnych 4H-SiC.

Table 2. Spread of the charge carrier concentration values and the values of the transition layer depth for selected epitaxial layers of 4H-SiC.

			Koncentracja nośników ładunku				Głębokość warstwy przejściowej			
Nr procesu	Nr komory	Typ przew.	Wartość średnia [cm^{-3}]	Wartość min. [cm^{-3}]	Wartość maks. [cm^{-3}]	Odchyl. stand. [%]	Wartość średnia [μm]	Wartość min. [μm]	Wartość maks. [μm]	Odchyl. stand. [%]
C1 P1_070307	C1	n	9.24E+14	8.13E+14	1.08E+15	11.3	9.50	9.30	9.50	2.3
C1 P4_090307	C1	n	1.14E+15	8.10E+14	1.41E+15	15.7	9.19	8.95	9.61	2.7
C1 P6_130307	C1	n	8.99E+14	8.99E+14	8.27E+14	7.8	9.43	9.20	9.61	1.4
C1 P8_150307	C1	n	8.41E+15	7.54E+15	1.05E+16	1.4				
0100 N2 C1	C1	n	2.98E+15	2.84E+15	3.07E+15	2.7				
C2 P2_070307	C2	n	8.04E+14	7.69E+14	8.75E+14	4.7	9.38	9.20	9.76	2.0
C2 P3_080307	C2	n	1.54E+16	1.41E+16	1.41E+16	3.7				
C2 P5_120307	C2	p	3.59E+16	3.33E+16	3.72E+16	3.5				
C2 P7_140307	C2	n	1.23E+16	1.17E+16	1.30E+16	3.5				
0103 A1 C2	C2	p	2.64E+16	2.46E+16	2.85E+16	4.7				

warstw, w których podczas pomiaru profilu rozkładu koncentracji nośników ładunku głębokość wnikania warstwy zubożonej sięgała cienkiej warstwy przejściowej, istniejącej pomiędzy podłożem a warstwą epitaksjalną, wyznaczono rozrzuty głębokości warstwy przejściowej. Wyniki pomiarów zestawiono w Tabeli 2. Rozkłady koncentracji nośników mierzono w dziewięciu punktach warstw epitaksjalnych, w centrum warstwy oraz na dwóch prostopadłych średnicach, w odległości ~ 5 mm od brzegu płytki i w połowie średnicy.

Wartości odchylenia standardowego koncentracji nośników ładunku wskazują, że jednorodność rozkładu koncentracji nośników ładunku w warstwach 4H-SiC z komory C2, dla których średnia wartość odchylenia standardowego wynosi 4.0%, jest znacznie większa niż jednorodność rozkładu koncentracji nośników ładunku w warstwach z komory C1, dla których średnia wartość odchylenia standardowego wynosi 9.6%. Rozrzuty głębokości warstwy przejściowej w warstwach epitaksjalnych z obu komór są małe (średnia wartość odchylenia standardowego wynosi 2.1%). Należy dodać, że warstwy epitaksjalne 4H-SiC z komory C2 są porównywalne pod względem rozrzutu koncentracji nośników ładunku oraz rozrzutu grubości z warstwami krzemowymi, natomiast jakość warstw 4H-SiC z komory C1 jest niewiele gorsza.

7. PODSUMOWANIE

Przedstawiono wyniki badań związanych z opracowaniem metodyki wyznaczania koncentracji nośników ładunku w płytkach monokryształów objętościowych i warstwach epitaksjalnych SiC poprzez pomiar charakterystyk pojemnościowo-napięciowych (C-U) obszaru zubożonego w zaporowo spolaryzowanych złączach Schottky'ego, wytwarzanych za pomocą sondy rtęciowej. Na podstawie tych wyników można sformułować następujące wnioski:

1. Za pomocą sondy rtęciowej można prawidłowo mierzyć koncentrację większościowych nośników ładunku w płytkach monokryształów objętościowych i warstwach epitaksjalnych SiC typu n i typu p w zakresie od $1.0E + 15 \text{ cm}^{-3}$ do $1.0 + 19 \text{ cm}^{-3}$. W przypadku materiału o koncentracji nośników ładunku w zakresie od $1.0E + 14 \text{ cm}^{-3}$ do $1.0E + 15 \text{ cm}^{-3}$ oporność szeregową testowej diody Schottky'ego utworzonej przez kontakty rtęciowe nie wpływa znacząco na wyznaczaną koncentrację nośników ładunku. W celu zmniejszenia prądu upływu złącza rtęć – SiC typu p niezbędne są dalsze badania dotyczące przygotowania powierzchni płytek.
2. Za pomocą sondy 1Hg można mierzyć koncentrację elektronów w warstwach epitaksjalnych SiC typu n/n^+ lub koncentrację dziur w warstwach typu p/p^+ . Sonda rtęciowa 2Hg może być stosowana do pomiaru koncentracji nośników ładunku w płytkach monokryształów objętościowych oraz w warstwach epitaksjalnych SiC osadzanych na podłożach izolujących.

3. Metoda wykorzystująca pomiar charakterystyk C-U testowych diod Schottky'ego utworzonych przez kontakty rtęciowe jest szybką i nieniszczącą metodą oceny koncentracji nośników ładunku w płytkach monokrystalów objętościowych oraz w warstwach epitaksjalnych SiC. W szczególności, metoda ta umożliwia wykonywanie szybkiej oceny wartości koncentracji nośników ładunku w warstwach epitaksjalnych SiC i na bieżąco wprowadzanie zmian w procesie domieszkowania.
4. Biorąc pod uwagę zarówno rozrzut koncentracji nośników ładunku, jak i rozrzut grubości warstwy na płytce, stwierdzono dobrą jakość osadzanych w ITME warstw epitaksjalnych SiC.

PODZIĘKOWANIE

Autor pragnie podziękować doc. dr. hab. Pawłowi Kamińskiemu za cenne dyskusje oraz pomoc w zredagowaniu końcowej wersji artykułu.

LITERATURA

- [1] Synowiec Z., Ściana B., Panek M.: Badanie pojemnościowo-napięciowe półprzewodników A(III)B(V) z wykorzystaniem złącza elektrolit-półprzewodnik, *Elektronika*, 36, 8, (1995), 8-14
- [2] Brzozowski A., Szymkiewicz A.: Pomiar warstw epitaksjalnych metodą C-U przy użyciu sondy rtęciowej, *Materiały Elektroniczne*, 4, (44), (1983), 36-56
- [3] Norma ASTM F1392 – 93: Standard test method for determining net carrier density profiles in silicon wafers by capacitance-voltage measurements with a mercury probe, (1993), 651-663

SUMMARY

MEASUREMENT OF CHARGE CARRIER CONCENTRATION IN SiC WAFERS OF BULK CRYSTALS AND EPITAXIAL LAYERS USING MERCURY PROBE

A methodology is described by which the charge carrier concentration can be determined in the wafers of SiC bulk crystals and epitaxial layers. It is based on measuring the capacitance-voltage (C-U) characteristics for the depleted region in a reverse-biased Schottky contact made by a mercury probe. The factors responsible

A. Brzozowski

for the measurement inaccuracy are discussed. The methodology is exemplified by the results showing the charge carrier concentrations in the bulk SiC wafers and epitaxial layers. The dispersions of the concentration values for the bulk and epitaxial material are also given.