

Stanisław KOCHOWSKI, Michał SZYDŁOWSKI

ANALIZA ELEKTRYCZNYCH WŁASNOŚCI STRUKTUR MIS NA BAZIE GAAS ORAZ SI W OPARCIU O METODĘ SPEKTROSKOPII IMPEDANCYJNEJ

Streszczenie. Obiektem badań były struktury Au/Pd/Ti-SiO₂-GaAs oraz Al-SiO₂-Si wykonane na bazie półprzewodników typu p. Wykonano pomiary pojemności i konduktancji struktur w szerokim zakresie częstotliwości i napięć polaryzacji bramki. Pokazano możliwość opisanía charakterystyk admitancyjnych struktur w oparciu o układ równoważny. W układzie równoważnym procesy prowadzące do częstotliwościowej dyspersji charakterystyk reprezentowane są przez element stałofazowy (CPE) połączony szeregowo z rezystancją. Dla różnych napięć bramki wyznaczono parametry układu równoważnego oraz stałe czasowe opisujące procesy elektronowe w badanych strukturach.

AN ANALYSIS OF ELECTRICAL PROPERTIES OF GAAS AND SI MIS STRUCTRES USING IMPEDANCE SPECTROSCOPY METHOD

Summary. The Au/Pd/Ti-SiO₂-GaAs and Al-SiO₂-Si structures both with p-type semiconductors have been investigated. The measurements of the capacitance-voltage characteristics at different frequencies have been performed as well as frequency dependence of MIS capacitance and conductance at fixed gate voltages. The electri-

cal equivalent circuits which allow to describe obtained characteristics in a simple way has been presented. They contain constant phase elements (CPE) in series with resistors. The parameters of these circuits have been estimated at different gate voltages as well as the characteristic time constants, which describe the electron processes resulting in observed frequency behaviour of admittance characteristics.

1. Wstęp

Współczesna elektronika o dużej skali integracji determinuje rozwój badań poświęconych opracowaniu nowych materiałów, a także udoskonalaniu już powszechnie stosowanych. Praktyczne zastosowanie materiału półprzewodnikowego w mikro- i nanoelektronice uwarunkowane jest możliwością wytworzenia na jego powierzchni stabilnej warstwy dielektrycznej i uzyskania powierzchni międzyfazowej półprzewodnik-dielektryk o małej gęstości stanów powierzchniowych. Stany powierzchniowe to specyficzne stany elektronowe, których funkcja falowa posiada maksimum na powierzchni i maleje eksponencjalnie w miarę oddalania się od niej — oznacza to lokalizację elektronów na powierzchni [15]. Przeważająca rola struktur krzem-tlenek krzemu we współczesnych zastosowaniach wynika z faktu zoptymalizowania parametrów powierzchni międzyfazowej półprzewodnik-dielektryk i uzyskania zanedbywalnej gęstości stanów powierzchniowych [5]. Struktury arsenek galu-dielektryk charakteryzują się dużą gęstością stanów powierzchniowych [1], które ograniczają zmiany położenia poziomu Fermiego pod wpływem przyłożonego napięcia (pinning). Prowadzi to do wielu niepożądanych efektów obserwowanych na elektrycznych charakterystykach układów MISFET [3, 10]. Pomiar admittancji struktur MIS wytworzonych na arsenku galu ujawniają występowanie silnej dyspersji częstotliwościowej oraz efektów histerezowych [6]. Utrudnia to zastosowanie do analizy struktur GaAs-dielektryk metod wykorzystywanych w badaniach struktur krzemowych [12]. Dlatego też stosuje się inne metody, np. spektroskopii impedancyjnej [2, 6, 11, 13]. Wyniki przedstawione w pracach [7, 8] wykazują jej przydatność do badania struktur metal-dielektryk-GaAs. W tej

pracy podjęto wstępną próbę analizy struktur SiO₂-Si w oparciu o metodę spektroskopii impedancyjnej.

2. Opis metody badawczej

Spektroskopię impedancyjną wykorzystuje się powszechnie w badaniach zjawisk elektrochemicznych [2, 11]. Metoda ta jest też przydatna w badaniach materiałów izolacyjnych, półprzewodników oraz złożonych struktur [13], w tym struktur MIS [6]. Spektroskopia impedancyjna polega na pomiarze impedancji układu dla wybranego zbioru dyskretnych częstotliwości w szerokim jej zakresie [11]. Impedancja jest cechą układu liniowego (opisanego za pomocą równania różniczkowego liniowego), którego właściwością jest sinusoidalna odpowiedź na sinusoidalne pobudzenie. Stosunek sygnału odpowiedzi do sygnału pobudzenia definiuje funkcję przeniesienia układu, która jest admitancją w przypadku prądowej odpowiedzi układu na napięciowe pobudzenie. Analiza tą metodą bazuje na znalezieniu najprostszego elektrycznego układu zastępczego, tzw. układu równoważnego (zawierającego elementy R, C, L i ewentualnie elementy stałofazowe CPE), opisującego admitancję badanego obiektu. Poszczególne elementy tego układu odpowiadają zjawiskom fizycznym zachodzącym w różnych obszarach badanej struktury. Element stałofazowy CPE (Constant Phase Element) posiada admitancję opisywaną zależnością:

$$Y_{CPE} = Q(j\omega)^n, \quad (1)$$

gdzie Q i n ($0 < n < 1$) są stałymi, niezależnymi od częstotliwości parametrami charakteryzującymi ten element [2, 11, 13]. Element CPE pozwala na fenomenologiczny opis układów, w których występuje silna dyspersja częstotliwościowa admitancji [11] i został zaproponowany do analizy struktur MIS w pracach [7, 8, 13].

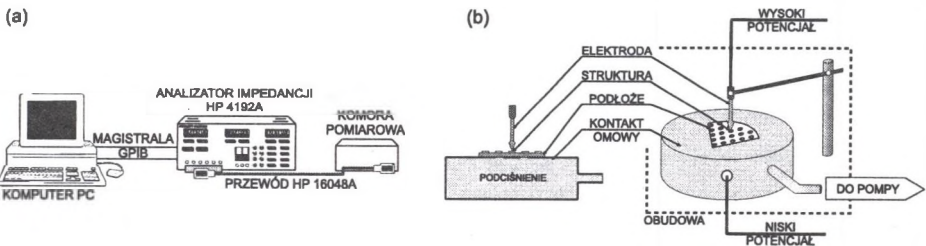
Do wyznaczenia parametrów elektrycznego układu równoważnego zastosowano metodę najmniejszych kwadratów jednoczesnego dopasowania odpowiednich zależności teoretycznych do eksperymentalnych charaktery-

styk częstotliwościowych pojemności i konduktancji badanej struktury. Suma kwadratów odchyleń miała postać:

$$\Psi = \sum_i \left\{ \frac{[C_m^*(\omega_i) - C_m(\omega_i)]^2}{C_m^{*2}(\omega_i)} + \frac{[\frac{G_m^*(\omega_i)}{\omega_i} - \frac{G_m(\omega_i)}{\omega_i}]^2}{\frac{G_m^{*2}(\omega_i)}{\omega_i^2}} \right\}, \quad (2)$$

gdzie $C_m^*(\omega_i)$, $G_m^*(\omega_i)$ są wartościami pojemności i konduktancji struktury MIS zmierzonymi przy różnych częstotliwościach, natomiast $C_m(\omega_i)$, $G_m(\omega_i)$ są wartościami obliczonymi dla danego zestawu parametrów. Funkcja Ψ była minimalizowana numerycznie z wykorzystaniem wariantu tłumionej metody Newtona [9]. Kryterium poprawności modelu jest zgodność otrzymanych na podstawie analizy modelu charakterystyk teoretycznych z doświadczalnymi i realność wartości parametrów, przy których ta zgodność została otrzymana.

Do pomiarów charakterystyk elektrycznych wykorzystano analizator impedancji HP 4192A firmy Hewlett Packard pracujący w równoległym układzie zastępczym. Amplituda sygnału pomiarowego wynosiła 20 mV. Mierzone płytki umieszczano na stoliku pomiarowym pokrytym warstwą złota w osłoniętej od światła ekranowanej komorze. Dobry kontakt płytki ze stolikiem pomiarowym zapewniała pompa podciśnienia (rys. 1).



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego (a). Konfiguracja kontaktów w komorze pomiarowej (b)

Fig. 1. Scheme of experimental set-up (a). Contacts configuration of used test probe (b)

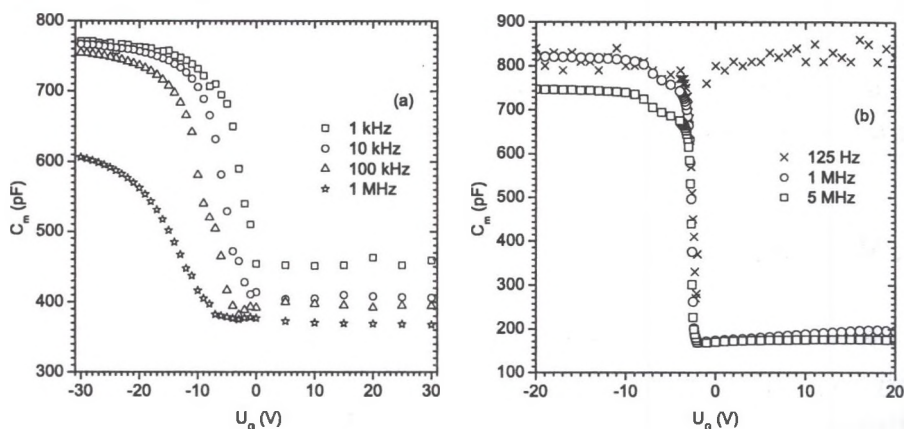
Badano struktury Au/Pd/Ti-(PECVD)SiO₂-(p)GaAs oraz Al-(termiczny)SiO₂-(p)Si. Mierzono pojemność i konduktancję struktur w funkcji

częstotliwości sygnału pomiarowego w przedziale od 100 Hz do 5 MHz przy ustalonych napięciach bramki. Zakres zmian napięcia, od inwersji do akumulacji, wynosił od -30 V do 30 V. Pomiarów przeprowadzono w temperaturze pokojowej.

3. Wyniki badań

Wyniki pomiarów charakterystyk pojemnościowo-napięciowych struktury Au/Pd/Ti-SiO₂-(p)GaAs przedstawiono na rys. 2a. Stwierdzono wyraźne przesunięcie krzywych C_m - V i zależność minimalnej wartości pojemności C_m dla dodatnich napięć bramki U_G od częstotliwości sygnału pomiarowego. Znaczna dyspersja częstotliwościowa pojemności struktury MIS związana jest z właściwościami obszaru międzyfazy GaAs-dielektryk [6]. Przedstawiona na rys. 2 b charakterystyka pojemnościowo-napięciowa struktury Al-SiO₂-(p)Si jest typową krzywą C_m - V dla układów MIS wykonanych na krzemie [14,16]. Obarczona szumem charakterystyka C_m - V dla częstotliwości 125 Hz (rys. 2 b) nie jest krzywą niskoczęstotliwościową z uwagi na zastosowaną metodę pomiarową. Do jej wyznaczenia standardowo stosuje się quasi-statyczną metodę pomiaru pojemności.

Dalsze badania obejmowały pomiar charakterystyk częstotliwościowych składowych zespolonej pojemności C_m i G_m/ω struktur MIS przy ustalonych napięciach bramki. Wyniki pomiarów przedstawione na rys. 3 wskazują na duże zmiany obu składowych w szerokim zakresie częstotliwości, przy czym zmiany te są większe dla struktur na bazie arsenku galu. Takie zachowanie składowych zespolonej pojemności sugeruje istnienie szerokiego spektrum stałych czasowych charakteryzujących procesy elektronowe zachodzące w badanych strukturach. Wszystkie badane struktury cechuje charakterystyczne maksimum znormalizowanej konduktancji G_m/ω , którego położenie na osi częstotliwości zmienia się wraz z napięciem bramki. Pojemność C_m wykazuje dyspersję w tym samym zakresie częstotliwości, gdzie pojawia się maksimum G_m/ω .

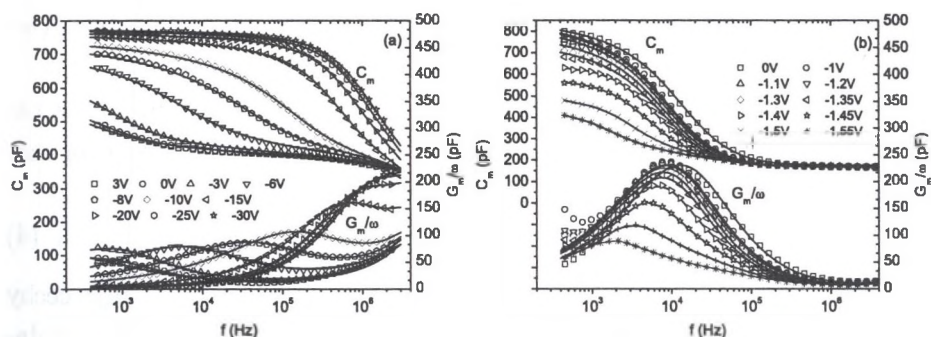


Rys. 2. Eksperymentalne charakterystyki pojemności C_m w funkcji napięcia bramki U_G struktur p-GaAs (a) i p-Si otrzymane dla różnych częstotliwości sygnału pomiarowego (b)

Fig. 2. Experimental capacitance C_m vs gate voltage U_G at different frequencies for structures p-GaAs (a) and p-Si (b)

Charakterystyki admitancyjne struktur MIS wykonanych na bazie p-GaAs aproksymowano układem równoważnym zawierającym dwa elementy stałofazowe $CPE1$, $CPE2$ połączone szeregowo z rezystorami R_1 i R_2 (rys. 4a), natomiast charakterystyki struktur MIS wykonanych na bazie p-Si opisano układem zawierającym jeden element stałofazowy $CPE1$ połączony w szereg z rezystorem R_1 (rys. 4b). W obu układach równoważnych występują: pojemność dielektryka C_{OX} , rezystancja szeregową R_S oraz pojemność obszaru ładunku przestrzennego C_{SC} (rys. 4). Wyniki aproksymacji admitancji struktur Al-SiO₂-(p)Si przedstawiono w zakresie napięć bramki odpowiadającym stanowi zubożenia.

Wyznaczone wartości parametrów modeli równoważnych przedstawiono na rys. 5–8. Wyniki aproksymacji potwierdzają bardzo dobrą zgodność charakterystyk teoretycznych z doświadczalnymi (rys. 3). Monotoniczna zależność parametrów układów zastępczych w funkcji napięcia bramki U_G (rys. 5–8) wskazuje, że układy równoważne są poprawne, a ich parametry w sensowny sposób opisują procesy fizyczne występujące w różnych



Rys. 3. Eksperymentalne charakterystyki pojemności C_m i znormalizowanej konduktancji G_m/ω w funkcji częstotliwości f ($\omega = 2\pi f$) przy różnych napięciach bramki struktur p-GaAs (a) oraz p-Si (b). Symbolami zaznaczono wartości eksperymentalne, linie ciągłe przedstawiają krzywe teoretyczne obliczone na podstawie układu zastępczego z rys. 4

Fig. 3. Experimental capacitance C_m and normalized conductance G_m/ω vs frequency f ($\omega = 2\pi f$) at different gate voltages for structures p-GaAs (a) and p-Si (b). Symbols represent experimental data while full lines, the best fit of experimental data using circuit from fig. 4

obszarach badanych struktur. Dla obu układów równoważnych otrzymano praktycznie niezależne od napięcia wartości pojemności dielektryka C_{OX} (rys. 5) i rezystancji szeregowej R_S (rys. 8). Ponadto otrzymane wartości C_{OX} (840 pF) oraz R_S (15 Ω) dla struktury Al-SiO₂-(p)Si pokrywają się z wyznaczonymi na podstawie metod klasycznych [4,16]. Istotne cechy admittancji badanych struktur opisane są szeregowym połączeniem elementu stałofazowego $CPE1$ i rezystancji R_1 . Parametry te powiązane są z procesami elektronowymi o szerokim rozkładzie stałych czasowych wokół wartości charakterystycznej [11]

$$\tau_1 = (R_1 Q_1)^{1/n_1}. \quad (3)$$

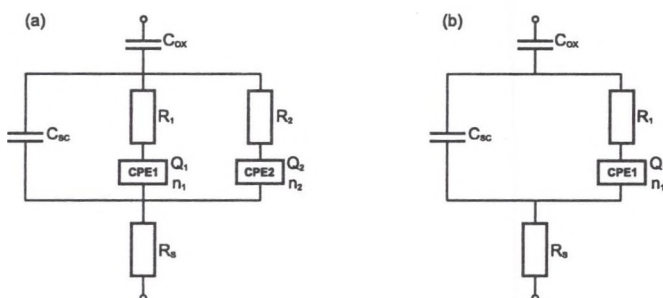
Wartości stałej czasowej τ_1 obliczone dla parametrów R_1 , Q_1 , n_1 w obu układach równoważnych (rys. 9) są do siebie zbliżone. Zarówno dla struktury Au/Pd/Ti-SiO₂-(p)GaAs, jak i Al-SiO₂-(p)Si wyróżnić można zakres

napięć bramki, dla których następuje wyraźna monotoniczna zmiana przebiegu wielkości τ_1 .

W strukturze Au/Pd/Ti-SiO₂-(p)GaAs dodatkowo obserwuje się, w całym zakresie napięć bramki (rys. 9), udział procesów opisanych stałą czasową

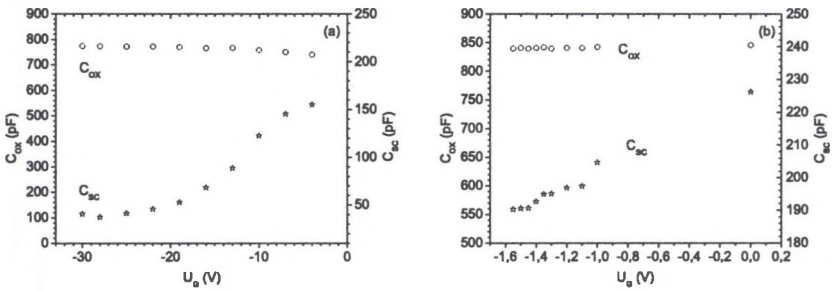
$$\tau_2 = (R_2 Q_2)^{1/n_2}. \quad (4)$$

Element *CPE2* o wykładniku $n_2 = 0.85 \div 0.90$ (rys. 7a) wykazuje cechy kondensatora stratnego (dla kondensatora bezstratnego $n = 1$) i w połączeniu szeregowym z R_2 reprezentuje małosygnalową admitancję zlokalizowanych stanów elektronowych w przypowierzchniowym obszarze ładunku przestrzennego.



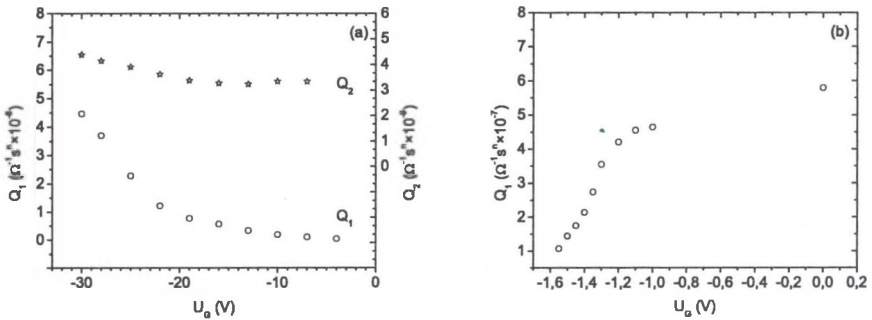
Rys. 4. Elektryczne układy równoważne badanych struktur: p-GaAs (a), p-Si (b). C_{OX} pojemność dielektryka; R_S rezystancja szeregową; C_{SC} pojemność obszaru ładunku przestrzennego; *CPE1* element stałofazowy opisany przez parametry Q_1 i n_1 ; R_1 rezystancja; *CPE2* element stałofazowy opisany przez parametry Q_2 i n_2 ; R_2 rezystancja

Fig. 4. Electrical equivalent circuits for tested structures: p-GaAs (a), p-Si (b). C_{OX} insulator capacitance; R_S series resistance; C_{SC} space charge layer capacitance; *CPE1* constant phase element characterized by Q_1 and n_1 parameters; R_1 resistance; *CPE2* constant phase element characterized by Q_2 and n_2 parameters; R_2 resistance



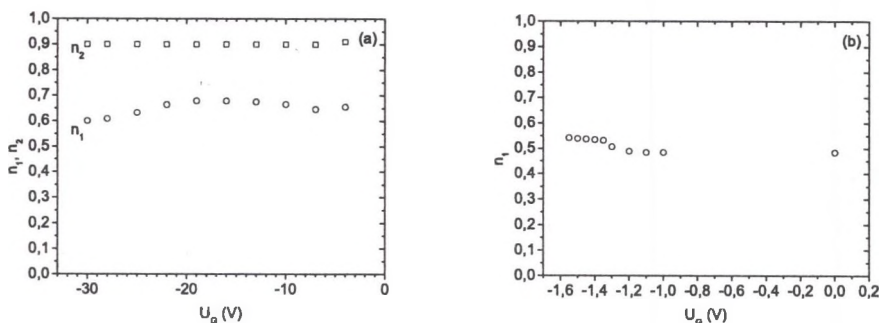
Rys. 5. Wartości parametrów C_{OX} i C_{SC} układu zastępczego z rys. 4 otrzymane dla struktur p-GaAs (a) i p-Si (b) dla różnych napięć bramki U_G

Fig. 5. Values of C_{OX} and C_{SC} parameters of equivalent circuit from fig. 4 obtained at different gate voltages U_G for structures p-GaAs (a) and p-Si (b)



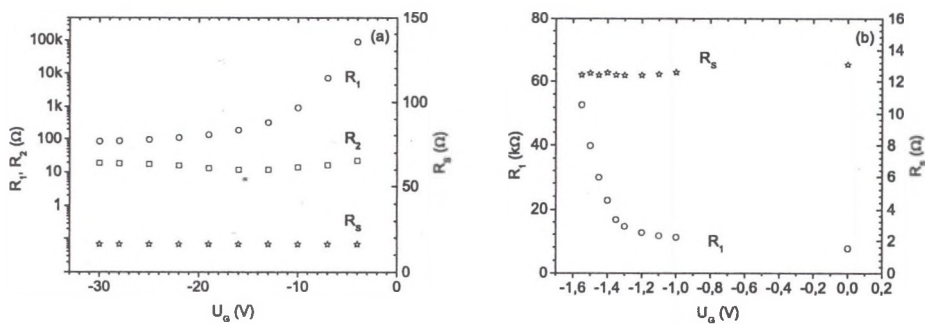
Rys. 6. Wartości parametrów elementów stałofazowych ($CPE1$, $CPE2$) Q_1 i Q_2 układu zastępczego z rys. 4 otrzymane dla struktur p-GaAs (a) i p-Si (b) dla różnych napięć bramki U_G

Fig. 6. Values of constant phase elements ($CPE1$, $CPE2$) parameters Q_1 and Q_2 of equivalent circuit from fig. 4 obtained at different gate voltages U_G for structures p-GaAs (a) and p-Si (b)



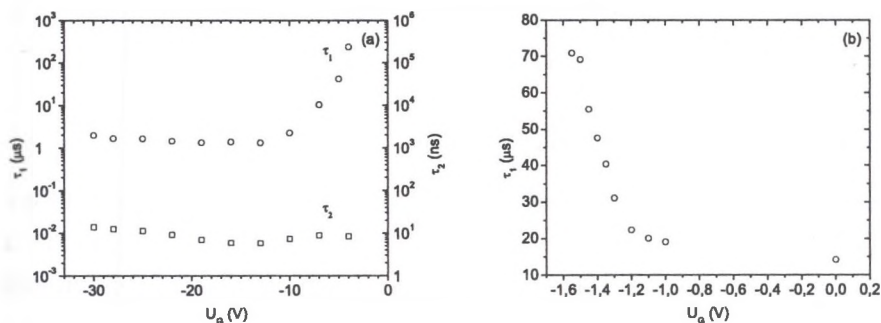
Rys. 7. Wartości parametrów elementów stałofazowych ($CPE1$, $CPE2$) n_1 i n_2 układu zastępczego z rys. 4 otrzymane dla struktur p-GaAs (a) i p-Si (b) dla różnych napięć bramki U_G

Fig. 7. Values of constant phase elements ($CPE1$, $CPE2$) parameters n_1 and n_2 of equivalent circuit from fig. 4 obtained at different gate voltages U_G for structures p-GaAs (a) and p-Si (b)



Rys. 8. Wartości parametrów elementów stałofazowych ($CPE1$, $CPE2$) R_1 i R_2 oraz parametru R_S układu zastępczego z rys. 4 otrzymane dla struktur p-GaAs (a) i p-Si (b) dla różnych napięć bramki U_G

Fig. 8. Values of constant phase elements ($CPE1$, $CPE2$) parameters R_1 , R_2 and R_S parameter of equivalent circuit from fig. 4 obtained at different gate voltages U_G for structures p-GaAs (a) and p-Si (b)



Rys. 9. Wartości stałych czasowych τ_1 i τ_2 dla różnych napięć bramki U_G wyliczone z parametrów Q_1, n_1, R_1 oraz Q_2, n_2, R_2 przedstawionych na rys. 6–8 dla struktur p-GaAs (a) i p-Si (b)

Fig. 9. Time constants τ_1 and τ_2 at different gate voltages U_G calculated from Q_1, n_1, R_1 and Q_2, n_2, R_2 data presented in fig. 6–8 for structures p-GaAs (a) and p-Si (b)

4. Podsumowanie

Konstruowanie układu równoważnego i jego analiza umożliwiającą szybkie uzyskiwanie informacji o procesach zachodzących w badanych strukturach i ich parametrach. Przedstawiony układ równoważny (rys. 4a) dobrze opisuje eksperymentalne charakterystyki pojemności i konduktancji struktur metal-SiO₂-(p)GaAs w szerokim zakresie napięć polaryzacji (rys. 3). Wyniki analizy struktur metal-SiO₂-(p)Si w zakresie zubożenia w oparciu o układ równoważny z rys. 4b potwierdzają słuszność zastosowania opisanej metody do analizy również struktur krzemowych. Odniesienie otrzymanych wartości parametrów układu równoważnego do parametrów wyznaczonych metodami klasycznej analizy elektrycznych charakterystyk struktur metal-SiO₂-(p)Si umożliwi jednoznaczne przyporządkowanie elementów układu równoważnego zjawiskom fizycznym, które zachodzą w różnych obszarach badanych struktur. Powinno to pozwolić na zrozumienie natury procesów

fizycznych, które prowadzą do wystąpienia elementu stałofazowego w układzie równoważnym struktury MIS.

Podziękowania

Autorzy pracy dziękują Wydziałowi Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki Politechniki Wrocławskiej (prof. nadzw. dr hab. inż. Karol Nitsch, dr hab. inż. Regina Paszkiewicz, dr inż. Bogdan Paszkiewicz) za udostępnienie struktur i umożliwienie przeprowadzenia pomiarów.

Literatura

1. N. N. Berchenko, Y. V. Medvedev, *Russian Chem. Rev.* **68** (1994), 623–639.
2. W. Bogusz, F. Krok, *Elektrolity state – właściwości elektryczne i sposoby ich pomiaru*, WNT, Warszawa 1995.
3. H. Hasegawa, *Thin Solid Films* **367** (2000), 58–67.
4. A. Jakubowski, K. Iniewski, *Solid State Electronics* **26** (1983), 755–756.
5. C. Jungemann, B. Meinerzhagen, M. Eller, *IEEE Trans. Electron Dev. Lett.* **20** (1999), 283–285.
6. S. Kochowski, *Analiza powierzchniowych procesów elektronowych w strukturze metal-SiO₂-GaAs*, *Zesz. Nauk. Pol. Śl. Mat.-Fiz.* **88** (2001).
7. S. Kochowski, K. Nitsch, *Thin Solid Films* **415** (2002), 133–137.
8. S. Kochowski, K. Nitsch, B. Paszkiewicz, R. Paszkiewicz, *Thin Solid Films* **444** (2003), 208–214.
9. S. Kochowski, M. Nowak, *Acta Phys. Polon.* **A69** (1986), 517–524.
10. D. C. Look, *Electrical characterization of GaAs materials and devices*, John Wiley & Sons, New York 1989.
11. J. R. Macdonald, *Impedance Spectroscopy*, John Wiley & Sons, New York 1987.

12. E. H. Nicollian, J. R. Brews, *MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) Physics and Technology*, John Wiley & Sons, New Jersey 2003.
13. K. Nitsch, *Zastosowanie spektroskopii impedancyjnej w badaniach materiałów elektronicznych*, Oficyna Wyd. Pol. Wroc., Wrocław 1999.
14. D. K. Schröder, *Semiconductor material and device characterization*, John Wiley & Sons, New York 1990.
15. A. Szaynok, S. Kuźmiński, *Podstawy fizyki powierzchni półprzewodników*, WNT, Warszawa 2000.
16. S. C. Witzak, J. S. Suehle, M. Gaitan, *Solid State Electronics* **35** (1992), 345–355.

Stanisław Kochowski

Michał Szydłowski

Instytut Fizyki

Politechnika Śląska

Krzywoustego 2

44-100 Gliwice

Abstract

Our previous research confirms the usefulness of impedance spectroscopy method as a simple way of the metal-insulator-GaAs structures analysis. Presented work considers preliminary analysis of SiO₂-Si structures based on this method in comparison with results obtained for GaAs MIS structures. We investigated both Au/Pd/Ti-(PECVD)SiO₂-(p)GaAs and Al-(thermal)SiO₂-(p)Si structures. The measurements of the capacitance-voltage characteristics at different frequencies (100 Hz to 5 MHz) have been performed as well as the frequency dependence of MIS capacitance and conductance at fixed gate voltages (–30 V to 30 V) using HP 4192A impedance analyser. The capacitance-voltage measurements of GaAs MIS structures reveal strong frequency dispersion of capacitance. For both GaAs

and Si structures we have observed variation in the components of measured complex capacitance for wide frequency range. This behaviour suggests broad spectrum of time constants which characterize the electron processes proceeding in the structure. The characteristic maximum of normalized conductance shifting for different gate voltage is typical of all investigated structures. Presented electrical equivalent circuits succeeded to describe experimental characteristics in a simple way. They contain insulator capacitance, serial resistance, space charge layer capacitance and constant phase elements (CPE) in series with resistors. The parameters of these circuits have been estimated at different gate voltages as well as the characteristic time constants. The results of metal-SiO₂-(p)Si analysis performed for depletion region have confirmed that described method is also good for investigation of silicon structures. The comparison between parameters obtained by the equivalent circuit analysis and standard analysis of electrical characteristics of metal-SiO₂-(p)Si structures will allow to assign particular elements of the equivalent circuit to physical phenomena proceeding in different regions of investigated structures. It should make possible to understand the nature of processes leading to constant phase element in the equivalent circuit of MIS structure.