

Charakteryzacja arsenku galu na tranzystory MESFET

1. WSTĘP

Charakteryzacja półprzewodników i wytwarzanych z nich przyrządów ma na celu podniesienie poziomu zrozumienia ich wzajemnych zależności oraz powiązanie badań teoretycznych z wynikami eksperymentalnymi. Można więc uznać ją za formę sprzężenia zwrotnego pomiędzy producentami materiału wyjściowego i producentami przyrządów, mającą wpływ na klasę przyrządu, powtarzalność parametrów i uzysk oraz ustalenie podstawowych standardów materiałowych.

Podłożem, na którym jest wytwarzana warstwa czynna metodą epitaksji lub implantacji jest płytka półizolacyjnego GaAs. W przypadku epitaksji jest wytwarzana najpierw bardzo czysta (niedomieszkowana) warstwa buforowa, która izoluje warstwę czynną od podłoża. Ogranicza to wpływ podłoża na tranzystor i zmniejsza zakres wymagań stawianych GaAs do odpowiedniej gęstości dyslokacji i termostabilności. Gdy warstwa czynna jest wytwarzana poprzez implantację, wówczas podłoże ma daleko większy wpływ. Bardzo ważnym parametrem staje się wtedy ruchliwość elektronów w materiale podłożowym.

Badania materiału półizolacyjnego stanowią osobną, trudną grupę zagadnień i specyficznych technik pomiarowych i zostaną w niniejszej pracy pominięte. Ograniczymy się do badań parametrów elektrofizycznych warstwy czynnej i niektórych struktur testowych wytworzonych w trakcie procesu produkcji tranzystorów. Celem tych wszystkich technik pomiarowych jest możliwie wczesne określenie parametrów materiału mających wpływ na wzmocnienie, częstotliwość graniczną, moc i szumy tranzystora.

2. OPIS METOD POMIAROWYCH

Wymagania stawiane warstwie czynnej są następujące:

- grubość warstwy $0,2-0,5 \mu\text{m}$
- koncentracja elektronów w warstwie $1-2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
- ruchliwość hallowska elektronów $4000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
- odpowiedni charakter profilu koncentracji i ruchliwości elektronów (wykluczony jest spadek ruchliwości w pobliżu granicy podłoże-warstwa czynna).

Do określenia tych parametrów jest stosowany cały zespół technik pomiarowych, które zostaną kolejno omówione.

2.1. Pomiary koncentracji i ruchliwości elektronów

Pomiary hallowskie z zastosowaniem metody Van der Pauwa [1] są wykonywane na płytach z wytworzoną warstwą czynną. Typowe wartości natężenia prądu i indukcji pola magnetycznego wynoszą odpowiednio 100 μA i 0,5 T. W wyniku pomiarów otrzymujemy wartości rezystywności warstwy na kwadrat r_{kw} , koncentrację elektronów w warstwie N_{g} i średnią ruchliwość hallowską elektronów μ_{H} . W przypadku implantacji wartość μ_{H} i stosunek N_{g} do zaimplantowanej dawki jonów N_{I} służą do szacunkowej oceny implantacji, pokrycia i wygrzewania poimplantacyjnego. Nie należy jednak traktować stosunku $N_{\text{g}}/N_{\text{I}}$ jako współczynnika aktywacji. Z powodu zagięcia pasm przy powierzchni GaAs, wynikającego z istnienia potencjału powierzchniowego, mierzona wartość N_{g} jest zawsze mniejsza niż wartość rzeczywista, przy czym im mniejsza jest energia implantowanych jonów i płytszy donor, tym silniej przejawia się to zjawisko [2].

Do pomiarów hallowskich są stosowane także elementy próbne Van der Pauwa wykonywane w czasie wytwarzania trzynystora. Znajdują się one w strukturach próbnym rozmieszczonych równomiernie w kilkunastu punktach na powierzchni płytki. Mogą one służyć do oceny jednorodności warstwy czynnej. Są także konieczne w przypadku podwójnej implantacji (implantacja kanału i warstwy przekontaktowej). W tym przypadku są wytwarzane elementy próbne oddzielnie dla pierwszej i drugiej implantacji.

Pomiary hallowskie są pomiarami wstępnymi. Można na ich podstawie ocenić tylko średnią ruchliwość i stopień aktywacji implantowanych domieszek (w przybliżeniu). Pomiary te pozwalają na wstępnym etapie technologii wyeliminować materiał o niewystarczającej jakości.

2.2. Pomiary profilu koncentracji nośników

Do wyznaczania profilu koncentracji stosuje się kilka metod, przy czym największe znaczenie mają pomiary pojemnościowe barier Schottky'ego. Bariere uzyskuje się przez naparowanie próżniowe metalu na powierzchnię GaAs lub przez kontakt sondy rtęciowej, albo elektrolitu, z powierzchnią warstwy. Otrzymane profile są poprawne tylko w zakresie od zerowego napięcia polaryzacji do przebicia w kierunku zaporowym. Pod tym względem istotną przewagę wykazują pomiary przy użyciu elektrolitu, w których można w sposób kontrolowany strawić powierzchnie półprzewodnika zwiększając zakres pomiaru w głąb warstwy. Szerokie zastosowanie metod pojemnościowych wynika z faktu, że jeden prosty pomiar może dostarczyć danych najbardziej interesujących producenta tranzystorów (grubość warstwy, koncentracja nośników, napięcie zamknięcia kanału).

Analiza charakterystyki C-U opiera się na szeregu uproszczeń, które prowadzą do równań:

$$N(d) = \frac{C^3}{q \epsilon A^2} \left(\frac{dC}{dU} \right)^{-1} \quad (1)$$

oraz

$$d = \epsilon A/C \quad (2)$$

gdzie: C - pojemność warstwy zubożonej przy danym napięciu polaryzacji U,
q - ładunek elektronu,
 ϵ - stała dielektryczna półprzewodnika,

- A - powierzchnia diody,
- d - odległość punktu od powierzchni,
- N - koncentracja nośników.

Do pomiarów służą zazwyczaj dostępne na rynku zautomatyzowane układy pomiarowe. Do uzyskanych wyników należy jednak podchodzić z umiarkowanym zaufaniem. Ze względu na specyficzną geometrię układu należy liczyć się z wystąpieniem znacznej rezystancji szeregowej. Mierzona przez układ pojemność C' jest wtedy równa:

$$C' = \frac{C}{1 + \omega^2 R^2 C^2} \quad (3)$$

gdzie: R - rezystancja szeregową,

ω - pulsacja sygnału pomiarowego.

W miarę zbliżania się do zamknięcia kanału, R silnie rośnie i bezpośrednio podstawienie C' w równaniach (1) i (2) daje znaczne błędy. Podobne problemy występują zarówno w przypadku pomiarów na elementach próbnym z barierą Schottky'ego, jak i w przypadku zastosowania sondy rtęciowej. Dla sondy rtęciowej rezystancja szeregową może być jeszcze większa z powodu gorszego kontaktu omowego i mniej korzystnej geometrii. Maksymalna głębokość pomiaru jest ograniczona napięciem przebicia złącza spolaryzowanego w kierunku zaporowym. Kompletny profil jest więc dostępny za pomocą sekwencji trawienie-pomiar, możliwej do uzyskania za pomocą elektrolitu (Tiron). Metoda ta została opracowana przez Ambridge'a [3]. Na rys. 1 przedstawiono profil koncentracji uzyskany tą metodą, a na rys. 2 charakterystyki C-U i G-U bariery elektrolit-warstwa implantowana GaAs. Wyniki te zostały uzyskane na urządzeniu firmy Polaron.

Do pomiaru profilu koncentracji nośników można także stosować pomiary efektu Halla metodą różnicową [4]. Polega ona na stopniowym usuwaniu cienkich warstw materiału na przemian z pomiarem parametrów hallowskich. Koncentrację nośników w i-tej warstwie obliczamy według zależności:

$$n_i = \frac{\Delta(\sigma_g)_i}{q d_i \mu_i} \quad (4)$$

$$\mu_i = \frac{\Delta(R_{Hg} \sigma_g^2)_i}{\Delta(\sigma_g)_i} \quad (5)$$

gdzie: σ_g - konduktywność,

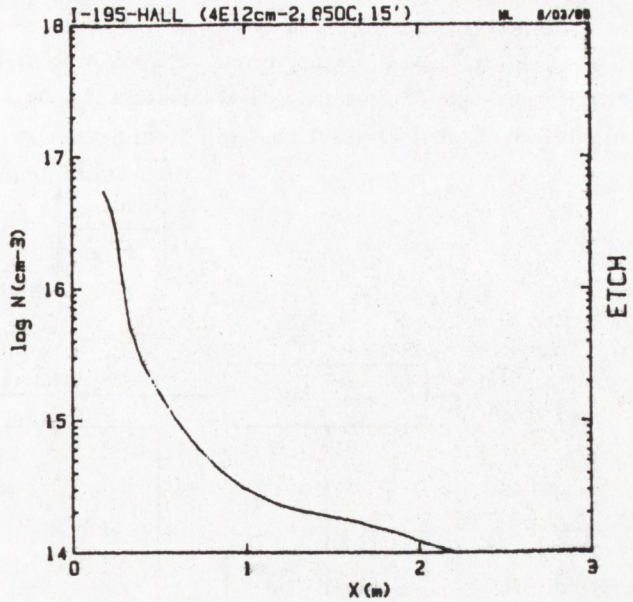
R_H - stała Halla,

d_i - grubość i-tej warstwy,

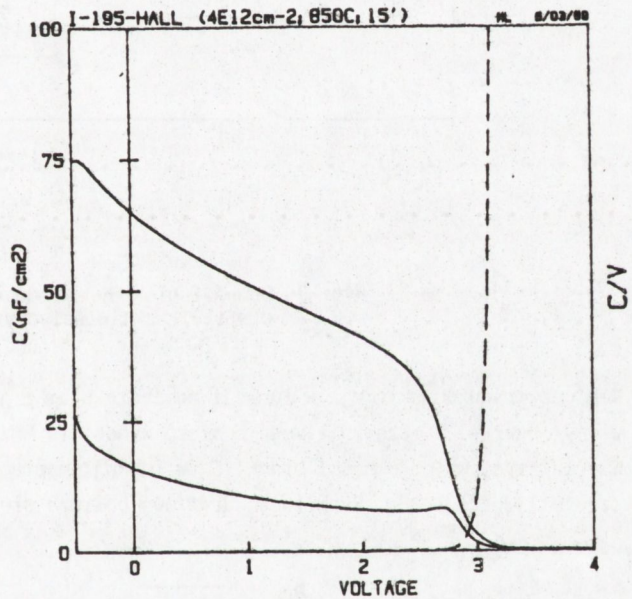
μ_i - ruchliwość elektronów w i-tej warstwie,

n_i - koncentracja elektronów w i-tej warstwie.

Usuwanie cienkich warstw GaAs (ok. 40 nm) jest realizowane przez anodowe utlenianie powierzchni materiału i strawianie tlenku kwasem fluorowodorowym.



Rys. 1. Profil koncentracji nośników w warstwie implantowanej otrzymanej metodą elektrochemiczną (elektrolit - 0,1 n roztwór Fironu)



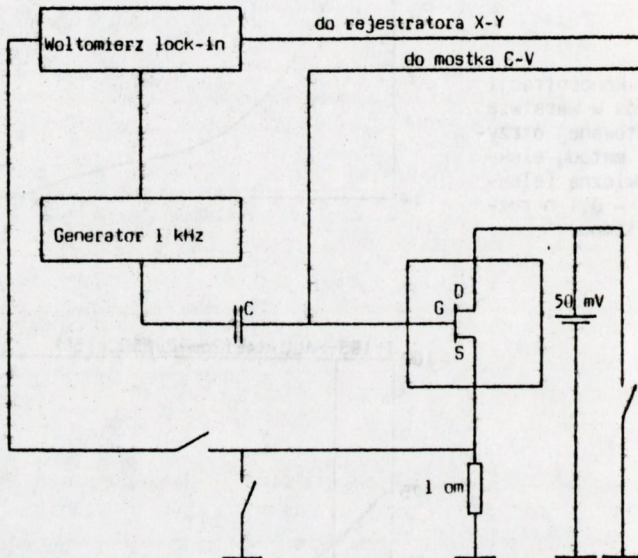
Rys. 2. Pojemność i konduktancja bariery elektrolit-warstwa implantowana w funkcji napięcia polaryzacji (elektrolit - 0,1 n roztwór Fironu, częstotliwość pomiaru - 3,2 kHz, średnica kontaktu 3,4 mm)

2.3. Pomiary profilu ruchliwości elektronów

Średnia wartość ruchliwości elektronów ma znaczenie podstawowe, jednak bardzo istotny - zwłaszcza dla tranzystorów mocy pracujących przy dużych sygnałach - jest profil ruchliwości elektronów. Profil ruchliwości hallowskiej uzyskujemy za pomocą opisaną metodą różnicowej Halla. Do wyznaczenia profilu ruchliwości dryftowej jest sto-

sowana metoda pomiaru zależności transkonduktancji i pojemności bariery metal-półprzewodnik w funkcji napięcia bramki na tranzystorze z bramką o dużych wymiarach (Fat FET) [5]. Typowe wymiary bramki tranzystora Fat-FET to 100x200 μm. Transkonduktancja jest miarą czułości prądu tranzystora I_{DS} na zmiany napięcia bramki U_{GS} przy niewielkiej stałej wartości napięcia źródło-dren.

$$g_m = \left| \frac{dI_{DS}}{dU_{GS}} \right| \quad U_{DS} \ll 0,1 \text{ V} \quad (6)$$



Rys. 3. Schemat blokowy układu do pomiaru profilu ruchliwości dyfuzyjnej

Wartość transkonduktancji w funkcji napięcia bramki jest mierzona w układzie przedstawionym na rys. 3. Częstotliwość pomiaru wynosi 10 kHz, napięcie źródło-dren - 50 mV. Charakterystyka pojemności bramki C_G w funkcji napięcia bramki jest mierzona przy częstotliwości 1 MHz. Ruchliwość dyfuzyjną oblicza się z zależności:

$$\mu_d = \frac{g_m L^2}{C_G U_{DS}} \left[1 - \frac{R_p}{R_L} \right]^{-2} \quad (7)$$

gdzie: L jest długością bramki, a wyrażenie w nawiasie jest czynnikiem korekcyjnym uwzględniającym wkład pasozytniczej rezystancji otwartego kanału i kontaktów omowych (R_p) dla całkowitej rezystancji źródło-dren. Głębokość d jest obliczana z zależności (2).

Należy w tym miejscu wspomnieć o możliwości pomiaru profilu ruchliwości elektronów na gotowej strukturze MESFET. Dokonuje się tego poprzez pomiar tzw. transkonduktancji, czyli pomiar transkonduktancji w funkcji pola magnetycznego [6].

3. PODSUMOWANIE

Przedstawione metody pomiarowe nie wyczerpują problemu charakteryzacji arsenku galu na tranzystory MESFET. Najważniejsze z pominiętych metod badawczych to badania głębokich centrów defektowych metodami DLTS, PITS i OCTS. Mają one na celu ustalenie koncentracji i położenia energetycznego głębokich poziomów w materiale.

Wymienione trzy grupy zagadnień pomiarowych dostarczają wielu informacji, które pozwalają przewidzieć zachowanie tranzystora w zakresie wysokich częstotliwości oraz ocenić jakość poszczególnych etapów technologii. Standardowe włączenie ich do technologii pozwala na wyeliminowanie płytek o niskiej jakości i zmniejszenie kosztów produkcji.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Van der Pauw J.L.: Phil. Res. Rep., 1958, 13, 1
- [2] Immorlica A.A., Decker D.R., Hill W.A.: IEEE Trans. Electron Dev., 1980, ED-27, 2285
- [3] Ambridge T., Stevenson J., Redstall R.: J. Electrochem. Soc., 1980, 127, 122
- [4] Hurtes C., Hollan L., Boulou M.: Proc., 1978 Int. Symp. Gallium Arsenide and Related Compounds, 1979, 342
- [5] Pucell R.A., Krumm C.F.: Electron. Lett., 1976, 12, 240
- [6] Lau K.M., Liu J.: IEEE Trans. Electron Dev., 1987, ED-34, 920