

STAŁOPRĄDOWE WŁAŚCIWOŚCI ELEKTRYCZNE IZOLACJI IMPLANTOWANEJ W ARSENKU GALU

Zdzisław Synowiec

Zbadano właściwości elektryczne izolacji implantowanej w GaAs, takie jak transport nośników ładunku elektrycznego, stabilność termiczną i wytrzymałość na przebicie elektryczne. Wyjaśniono mechanizm przebicia elektrycznego oraz wpływ podłoża i warstwy buforowej na właściwości materiału. Stabilność termiczna zależy od gęstości defektów wynikającej z dawki bombardujących jonów. Stwierdzono, że izolacja uzyskana w wyniku bombardowania dawką jonów równą $5 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ wykazuje lepszą stabilność termiczną niż przy dawce równej 10^{12}cm^{-2} i 10^{13}cm^{-2} . Przedstawiono charakterystyki prądowo-napięciowe (I-U) izolacji o różnych długościach. Stwierdzono, pomijalny wpływ dawki jonów na wytrzymałość izolacji na przebicie, która wynosi odpowiednio 10V/10 μm , 12V/20 μm , 15V/50 μm i 20V/100 μm . Z drugiej strony taki sam wpływ długości izolacji na wytrzymałość elektryczną w przypadku *półizolującego arsenku galu* (SI) GaAs wskazuje na dominujący wpływ podłoża z jego stanami powierzchniowymi na wytrzymałość elektryczną struktur z izolacją implantowaną. Ponieważ podłoże GaAs może obniżyć wytrzymałość elektryczną izolacji implantowanej, wymagana jest nie domieszkowana warstwa buforowa. Konieczna grubość bufora zależy od długości izolacji i wymaganego napięcia przebicia. Dla przykładu, użycie warstwy buforowej o grubości 0,8 μm powoduje wzrost napięcia przebicia z 12V/20 μm do 60V/20 μm .

WPROWADZENIE

W technologii związków półprzewodnikowych typu A^{III}-B^V nie stosuje się procesu dyfuzji do ich domieszkowania. Związki te można domieszkować donorami lub akceptorami podczas wyciągania krysztalu (w objętości), podczas epitaksjalnego wzrostu krysztalu (na całej powierzchni) oraz selektywnie, precyzyjnie i powyżej granicy rozpuszczalności metodą implantacji jonów. Proces usuwania poimplantacyjnych uszkodzeń radiacyjnych i elektrycznego uaktywnienia domieszki jest tu jednak bardziej złożony niż w półprzewodnikach jednoskładnikowych jak np. Si.

¹ Instytut Techniki Mikrosystemów Politechniki Wrocławskiej
ul. Janiszewskiego 11/17, 50-372 Wrocław

Dlatego w przyrządach typu MESFET^{*)}, HEMT^{**)} czy HBT^{***)} stosuje się epitaksjalne warstwy domieszkowane, a implantacja jonów jest wykorzystywana do silnego domieszkowania warstw podkontaktowych, co pozwala zachować płaskość powierzchni układu [1,2,3]. Implantatory jonów są wykorzystywane również do bombardowania jonami powierzchni GaAs w celu uzyskania wysokorezystywnych warstw, które pełnią rolę izolacji międzyelementowej w układach scalonych tzw. izolacji implantowanej. Elementy układu można również izolować przez selektywne strawianie przewodzących warstw (metoda mesa), ale mamy wtedy niepłaską powierzchnię, co przyczynia się do pęknięcia metalizacji prowadzonej po takiej powierzchni, a ponadto odślonięte *podłoże półizolującego arsenku galu* (SI GaAs) posiada niską wytrzymałość na przebicie elektryczne [1].

W układach cyfrowych z tranzystorami z kanałem typu n i typu p gdzie domieszki wprowadza się selektywnie do SI GaAs metodą implantacji, nie domieszkowane obszary między elementami stanowią naturalną izolację tzw. izolację selektywnej implantacji. W tym przypadku mamy płaską powierzchnię jednak pozostaje problem niskiej wytrzymałości podłoża na przebicie. Wytrzymałość tę doskonale poprawia bombardowanie jonowe powierzchni SI GaAs.

W zależności od napięcia przyspieszającego będącego do dyspozycji implantatora, które decyduje o zasięgu jonów w materiale i od wymaganej grubości izolacji, najczęściej GaAs bombarduje się jonami H⁺, He⁺, B⁺, N⁺ i O⁺. W bombardowanym materiale indukowane są defekty sieci krystalicznej, wykazujące własności pułapek swobodnych nośników ładunku (głębokie poziomy), które powodują redukcję gęstości swobodnych elektronów lub dziur, eliminując je z procesu przewodnictwa elektrycznego. Zjawisko to, w połączeniu z niską ruchliwością nośników w obecności dużej gęstości defektów, powoduje wzrost rezystywności domieszkowanych warstw. Przez odpowiedni dobór dawki i energii bombardujących jonów i parametrów późniejszej obróbki cieplnej można uzyskać materiał nadający się na stosowanie go do izolowania elementów układu scalonego. Ze względu na najwyższą skuteczność w generowaniu pułapek i najlepszą stabilność termiczną uzyskiwanych izolacji, najczęściej do bombardowania wykorzystuje się jony tlenu. Bombardowanie jonowe nie jest najczęściej ostatnią operacją w technologii układów scalonych, a późniejsze procesy termiczne mogą zmieniać rezystywność izolacji. Dlatego po bombardowaniu jonami tlenu stosuje się wygrzewanie w temperaturze od 500°C do 600°C w ciągu 20 minut w piecach klasycznych lub około 1 minuty w systemach RTA. W wyższych temperaturach następuje porządkowanie struktury sieci krystalicznej, redukcja gęstości pułapek, emisja elektronów do pasma przewodnictwa i redukcja rezystywności warstwy do poziomu bliskiego poziomowi przed bombardowaniem [1,3].

^{*)} MESFET - tranzystor polowy

^{**)} HEMT - tranzystor pseudomorficzny

^{***)} HBT - heterozłączowy tranzystor bipolarny

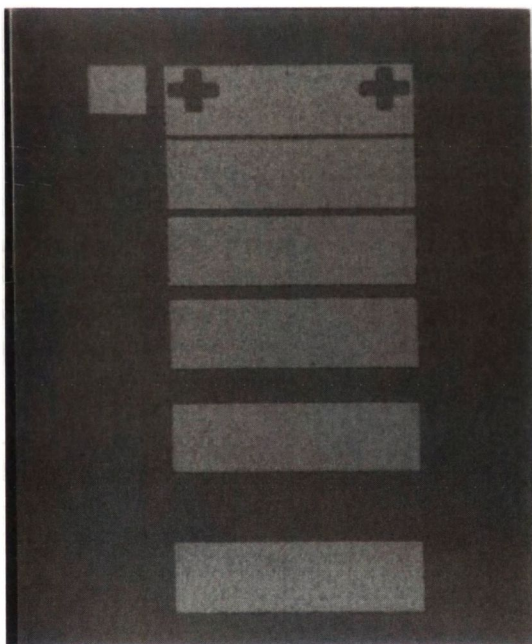
W dotychczasowych publikacjach można znaleźć wiele przykładów stosowania bombardowania różnymi jonami, o różnych parametrach bombardowania, różnych związków $A^{III}-B^V$ (GaAs, InP, AlGaAs, InGaAs, AlInAs), a także korzyści wynikające ze stosowania izolacji implantowanej [3]. Brak jest natomiast doniesień na temat właściwości elektrycznych izolacji implantowanej, takich jak wytrzymałość elektryczna na przebicie, stabilność termiczna w temperaturach pracy przyrządów, rodzaj transportu nośników ładunku, czy wreszcie wpływ podłoża i warstwy buforowej na te parametry. Opisanie badania i wynikające z nich wnioski są próbą odpowiedzi na te pytania.

2. OPIS EKSPERYMENTU

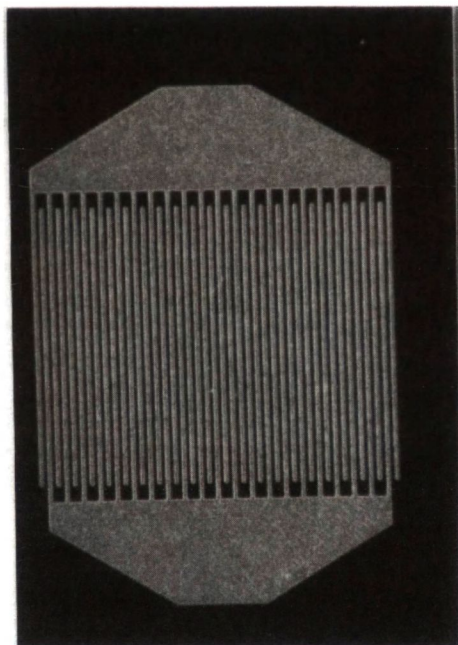
Badano struktury złożone z domieszkowanych krzemem warstw epitaksjalnych na nie domieszkowanych warstwach buforowych otrzymanych metodą *chemicznego osączenia z par związków metaloorganicznych* (MOCVD) leżących na półizolacyjnym podłożu skompensowanym chromem SI GaAs (Cr). Koncentracja elektronów swobodnych w warstwach domieszkowanych zmierzona metodą *electrochemical capacitance-voltage* (EC-V) wynosiła $2,7 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, a ruchliwość elektronów zmierzona metodą Halla wynosiła $2700 \text{cm}^2/\text{Vs}$. Takie warstwy stosuje się pod kontakty źródła i drenu struktur MESFET. Jedna część struktur zawierała domieszkowaną warstwę epitaksjalną o grubości $0,3 \mu\text{m}$ i warstwę buforową o grubości $0,2 \mu\text{m}$, a druga część domieszkowaną warstwę epitaksjalną o grubości $0,12 \mu\text{m}$ i warstwę buforową o grubości $0,8 \mu\text{m}$. W strukturach tych uformowano kontakty omowe (AuGeNi) z pogrubioną do $0,7 \mu\text{m}$ warstwą złota, które stanowiły maskę dla bombardujących jonów. Następnie struktury te dwukrotnie (dla uzyskania równomiernego rozkładu defektów w bombardowanej warstwie) bombardowano jonami tlenu o energii 250keV i 100keV i dawkach od 10^{12}cm^{-2} do $5 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$. Po bombardowaniu struktury wygrzewano przez 20 minut w temperaturze 500°C w konwencjonalnym piecu z rurą kwarcową w atmosferze azotu. Metaliczne kontakty omowe o wymiarach $0,1 \text{mm} \times 0,3 \text{mm}$ umieszczone obok siebie w kształcie *transmission line model* (TLM) w odległości 5, 10, 20, 50, 100, i $200 \mu\text{m}$, a umożliwiające pomiary elektryczne przedstawiono na Rys. 1. Po wstępnych ostrzowych pomiarach rezystancji warstw po bombardowaniu, płytki zostały pocięte na pojedyncze struktury TLM i następnie metodą ultrakompresji zmontowane na podłożach szklano-epoksydowych z odpowiednio wytrawioną folią miedzianą.

Na stabilizowanym zasilaczu napięciowym nastawiano kolejno coraz wyższe napięcie i mierzono wartość przepływającego przez strukturę badaną prądu pośrednio przez pomiar napięcia na rezystorze wzorcowym połączonym z nią szeregowo. Odczyt napięć dokonywano po ustabilizowaniu się ich wartości, co następowało po kilku sekundach. Zmierzono w ten sposób *charakterystyki prądowo-napięciowe* (I-U)

warstw bombardowanych przed i po wygrzewaniu w temperaturach od 50 K do 373 K. Na podstawie tych charakterystyk oceniono zakres omowy zależności prądu od napięcia, wpływ napięcia na konduktancję warstw, i charakter tego wpływu, a także wpływ podłoża i warstwy buforowej na te parametry. Dla zakresu omowego charakterystyk wyliczono rezystancje warstw izolacyjnych w temperaturach od 30 K do 423 K, co umożliwiło zbadanie temperaturowej zależności rezystancji, wyliczenia energii aktywacji przewodnictwa elektrycznego i określenia rodzaju przewodnictwa. Do pomiarów w temperaturze niższej od pokojowej wykorzystano chłodziarkę Gifforda Mc Mahona (bez światła i z ciśnieniem około 0,1 Tr w komorze roboczej), a w temperaturze powyżej pokojowej w suszarce z dostępem atmosfery. Podobne pomiary przeprowadzono na strukturach uformowanych na półizolacyjnym podłożu (bez warstwy epitaksjalnej) przed i po bombardowaniu, w temperaturze od 293 K do 30 K. Pozwoliło to ocenić właściwości elektryczne powierzchni podłoża wykorzystywanego na tzw. izolację selektywnej implantacji, a także wpływ bombardowania jonowego na te właściwości. Dla ułatwienia pomiaru dużych wartości rezystancji bombardowanych podłoży w niskich temperaturach, w strukturach SI GaAs uformowano kontakty metaliczne w kształcie *inter digital resistor* (IDR) pokazane na Rys. 2, ze ścieżkami o szerokości 20 μm ., umieszczonymi w odległości 20 μm .



Rys.1. Widok struktury testowej TLM.
Fig.1. Top view of the TLM test structure.

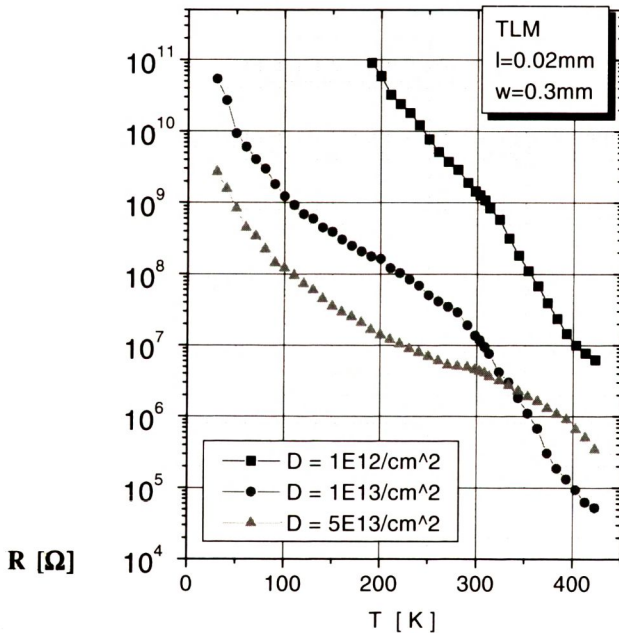


Rys.2. Widok struktury testowej IDR.
Fig.2. Top view of the IDR test structure.

Przedstawiona metoda pomiarowa pozwoliła ocenić wyłącznie statyczne właściwości badanego materiału, nie uwzględniając właściwości dynamicznych wynikających z efektu ładowania się pułapek elektronowych, czy z efektu histerezy przy wzroście i obniżaniu się napięcia pomiarowego. Zbadanie tych efektów, a zwłaszcza zmiennoprądowych właściwości izolacji implantowanej wymaga dalszych badań i studiów.

3. WYNIKI POMIARÓW I DISKUSJA

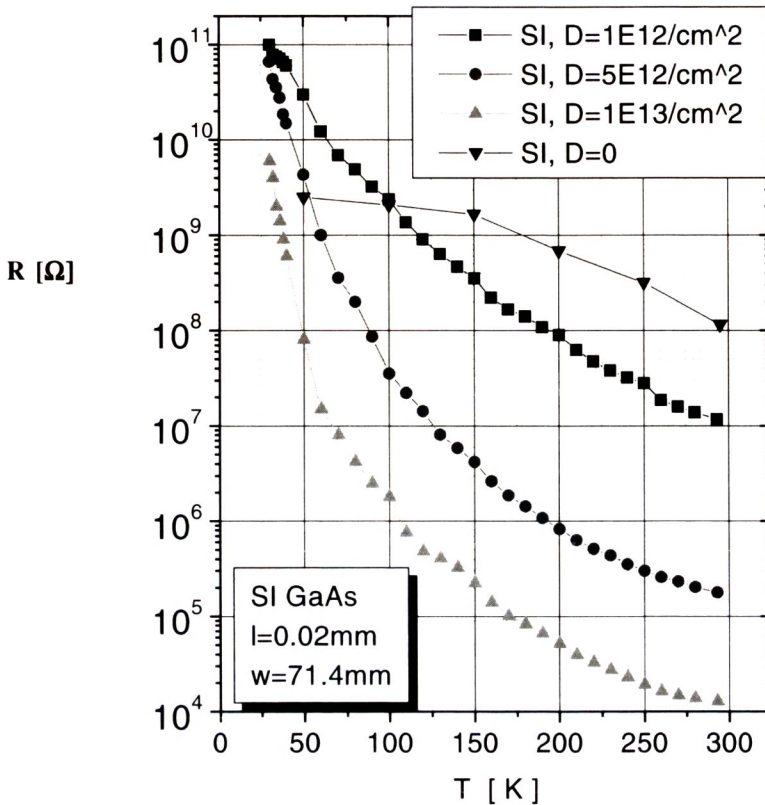
Szczegółowe wyniki pomiarów zawarte są w pracy [2]. W tym artykule przedstawiono jedynie wybraną ich część, co jednak oddaje istotę zbadanych właściwości. Na Rys. 3 przedstawiono zależność rezystancji od temperatury dla warstw epitaksjalnych GaAs po bombardowaniu jonami tlenu o różnych dawkach i po wygrzewaniu, a na Rys. 4 dla półizolacyjnego podłoża po bombardowaniu jonowym. Dla porównania jedna charakterystyka dotyczy SI GaAs nie bombardowanego ($D=0$).



Rys.3. Temperaturowa zależność rezystancji warstw epitaksjalnych GaAs po bombardowaniu różną dawką jonów tlenu.

Fig.3. Temperature dependence of GaAs epitaxial layers resistance after oxygen ion bombardment for different ion doses.

W Tabeli 1 przedstawiono rezystancje powierzchniowe warstw epitaksjalnych i półizolacyjnego podłoża w temperaturze pokojowej, przed i po bombardowaniu, i dodatkowo po wygrzewaniu dla warstw epitaksjalnych.



Rys.4. Temperaturowa zależność rezystancji warstw SI GaAs przed ($D=0$) i po bombardowaniu różną dawką jonów tlenu.

Fig.4. Temperature dependence of SI GaAs layers resistance before and after oxygen ion bombardment for different ion doses.

Tabela 1. Rezystancje powierzchniowe badanych struktur.

Table 1. The sheet resistances of the tested structures.

Struktura	Dawka jonów [cm^{-2}]	Rezystancja powierzchniowa [Ω / \square]		
		Przed bombardowaniem	Po bombardowaniu	Po wygrzewaniu ($500^\circ\text{C} / 20 \text{ min.}$)
epi / SI GaAs	1E12	87	5E8	3,2E10
	1E13		5,5E4	2,8E8
	5E13		3,1E3	7E7
SI GaAs	1E12	4,5E11	5,7E10	
	5E12		7,1E8	
	1E13		5,7E7	

Z przedstawionych wyników widać, że wzrost dawki jonów powyżej 10^{12}cm^{-2} powoduje obniżenie się rezystywności warstw (wzrost konduktywności) zarówno w przypadku warstw przewodzących jak również w przypadku warstw półizolacyjnych. Wraz ze wzrostem dawki rośnie gęstość defektów, co powoduje obniżenie się ruchliwości nośników ładunku, ale jednocześnie wzrost prądu hoppingowego polegającego na przeskoku elektronów sputapkowanych przez defekty z jednego defektu na następny [4,5].

Tabela 2. Energia aktywacji E_a [meV] procesu przewodnictwa stałoprądowego przewodnictwa warstw bombardowanych jonami.

Table 2. The dc conductivity activation energy E_a [mV] of the ion bomarded layers.

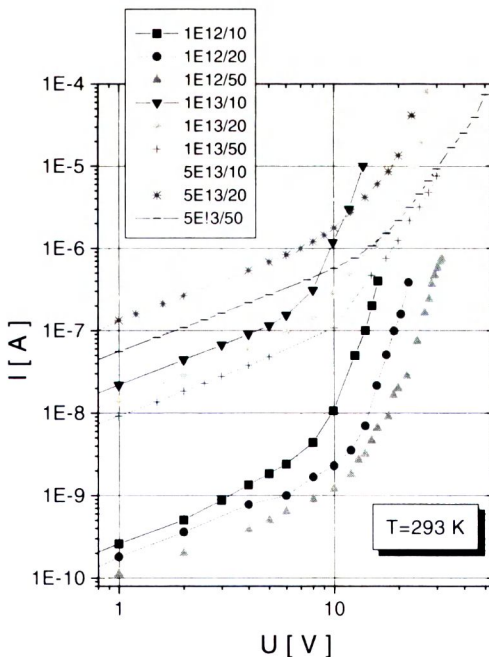
Struktura Zakres tempe- ratury [K]	epi / SI GaAs			SI GaAs		
	Dawka jonów [cm^{-2}]			Dawka jonów [cm^{-2}]		
	1E12	1E13	5E13	1E12	5E12	1E13
30 - 50		10	8,5	4,5	16	24
50 - 100		23,5	16,8	6	29	34
100 - 150		31	18,1	16	58	55
150 - 200		64	57,3	69	84	77
200 - 250	134	95,4	60,3	119	84	85
250 - 300	225	164,3	60,3	119	84	85
300 - 350	579	370,4	150,6			
350 - 400	579	491	208,8			

W przypadku energii aktywacji nie przekraczającej wartości około 60 meV ($\sim 2kT$) dominuje opisane przez Motta przewodnictwo hoppingowe o zmiennym zasięgu i zależność rezystywności od temperatury przybiera postać $\rho \sim \exp(A/T^{1/4})$ [4]. Polega ono na przeskoku elektronów ze wspomaganie fononowym między defektami, a w sensie elektronowym między stanami zlokalizowanymi, położonymi energetycznie w pobliżu poziomu Fermiego leżącego w takim materiale w środku przerwy zabronionej półprzewodnika. Wyższe energie aktywacji oznaczają, że wzrasta udział w przewodzeniu elektronów, które są emitowane termicznie z głębokich poziomów do pasma przewodnictwa lub stanów zlokalizowanych poniżej pasma przewodnictwa [5]. W warstwach po bombardowaniu dawką jonów równą $5 \times 10^{13}\text{cm}^{-2}$ przewodnictwo hoppingowe o zmiennym zasięgu ze słabą zależnością od temperatury dominuje do temperatury 300 K. W warstwach o mniejszej koncentracji defektów, gdzie maleje prawdopodobieństwo hoppingu między poziomami w pobliżu poziomu Fermiego, ten typ przewodnictwa nie jest dominującym już powyżej temperatury 200 K. Wraz ze wzrostem temperatury wrasta udział przewodnictwa z udziałem stanów elektronowych zlokalizowanych poniżej pasma przewodnictwa lub

w paśmie przewodnictwa. Uwzględniając mniejszą ruchliwość elektronów w warstwach o większej koncentracji defektów i słabszą zależność rezystywności takich warstw od temperatury, dochodzimy do wyjaśnienia zjawiska "skrzyżowania" się krzywych $R=f(T)$ (w pobliżu 340 K) przedstawionych na Rys. 3 dla warstw po bombardowaniu dawką jonów $5 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ i 10^{13}cm^{-2} . To oryginalne spostrzeżenie autora ma istotne znaczenie praktyczne dla projektanta układów scalonych w GaAs z izolacją implantowaną.

Bardzo ważnym parametrem izolacji międzyelementowej, zarówno izolacji implantowanej jak izolacji po selektywnej implantacji, jest wytrzymałość na przebicie elektryczne, określana przez wartość napięcia przebicia. W przypadku przebicia katastroficznego określenie napięcia przebicia jest jednoznaczne. Natomiast w przypadku tzw. przebijania miękkiego, kiedy następuje wzrost konduktancji izolacji o kilka rzędów wielkości bez jej katastroficznego uszkodzenia, podawanie wartości napięcia przebicia wymaga jego sprecyzowania. Wartość tego napięcia powinien ocenić konstruktor układu scalonego, który decyduje o dopuszczalnym prądzie upływu między izolowanymi implantacyjnie elementami. Jednak dla przejrzystości dyskusji wyników, autor przyjął definicję napięcia przebicia stosowaną w publikacji [7], tj. taką wartość napięcia, dla której konduktancja materiału wzrasta pięć razy w stosunku do konduktancji dla niższych napięć.

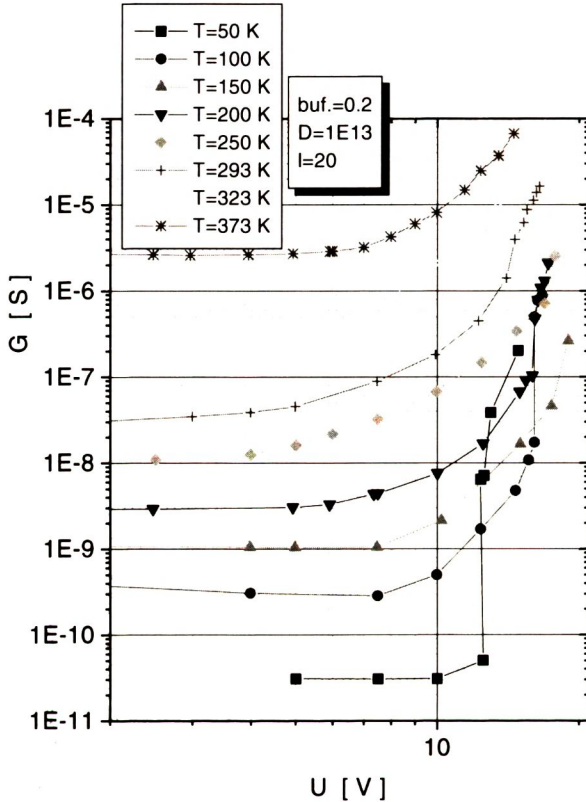
Na Rys. 5 przedstawiono charakterystyki I-U zmierzone w temperaturze pokojowej silnie domieszkowanych warstw epitaksjalnych o różnych długościach z cienką warstwą buforową ($0,2 \mu\text{m}$) po bombardowaniu jonami o różnych dawkach. Po zakresie



Rys.5. Charakterystyki prądowo-napięciowe struktur testowych izolacji implantowanej o różnych długościach w $[\mu\text{m}]$ z cienkim buforem po bombardowaniu różną dawką jonów $[\text{cm}^{-2}]$.

Fig. 5. Current-voltage characteristics of the implant isolation test structures with thin buffer after ion bombardment for different doses in $[\text{cm}^{-2}]$ and different structure lengths in $[\mu\text{m}]$.

omowym tych charakterystyk występuje tu miękkie przebijanie. Wartość napięcia przebicia nie wzrasta proporcjonalnie do wzrostu długości izolacji. Na Rys. 6 przedstawione są *charakterystyki konduktancyjno napięciowe* ($G-U$) (dla lepszego uwidocznienia wpływu napięcia na wartość konduktancji) dla jednej długości warstwy wynoszącej $20\ \mu\text{m}$, ale w szerokim zakresie temperatury.

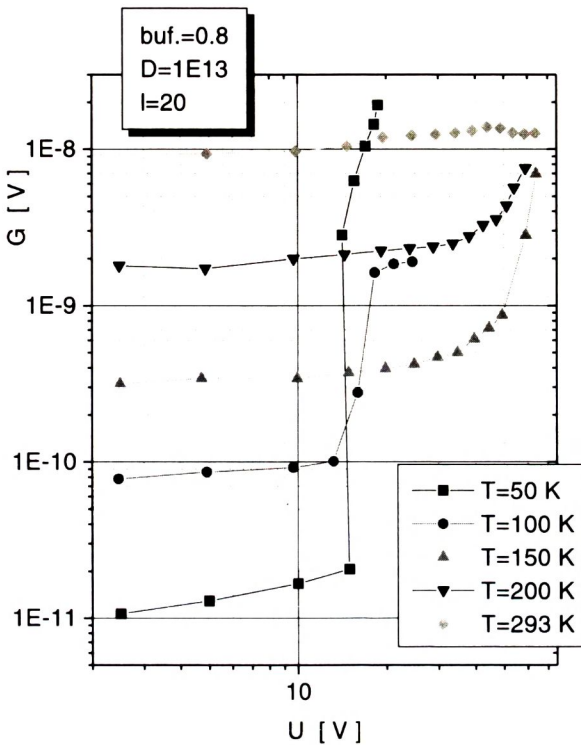


Rys.6. Charakterystyki konduktancyjno-napięciowe struktur testowych izolacji implantowanej o długości $20\ \mu\text{m}$ z cienkim buforem po bombardowaniu dawką jonów równą 10^{13}cm^{-2} dla różnych temperatur.

Fig. 6. Conductance-voltage characteristics of the implant isolation test structures ($20\ \mu\text{m}$ length) with thin buffer after ion bombardment with dose 10^{13}cm^{-2} for different temperatures.

W przypadku izolacji implantowanej z warstwą buforową o grubości $0,8\ \mu\text{m}$, której charakterystyki konduktancyjno-napięciowe dla różnych temperatur przedstawiono na Rys. 7, widać zdecydowany wzrost wytrzymałości napięciowej na przebicie dla temperatury $T \geq 150\ \text{K}$ (w tym przypadku katastroficzne) do ponad $60\ \text{V}/20\ \mu\text{m}$ w porównaniu z około $10\ \text{V}/20\ \mu\text{m}$ w przypadku izolacji z warstwą buforową o grubości $0,2\ \mu\text{m}$ (Rys.6). Fakt ten wskazuje na to, że warstwa buforowa redukuje szkodliwy wpływ międzywarstwy „warstwa epitaksjalna - podłoże” na wytrzymałość izolacji implantowanej. W niskich temperaturach ($100\ \text{K}$ i $50\ \text{K}$), gdy konduktancja izolacji obniżyła się o ~ 3 rzędy wartości, wytrzymałość izolacji obniżyła się do $\sim 15\ \text{V}/20\ \mu\text{m}$ (Rys.7). Wobec tak niskiej konduktywności izolacji, pojawia się

udział międzywarstwy w przewodnictwie prądu i jej szkodliwy wpływ na wytrzymałość elektryczną.



Rys.7. Charakterystyki kondukcyjno-napięciowe struktur testowych izolacji implantowanej o długości 20 μm z grubym buforem, po bombardowaniu dawką jonów równą 10^{13}cm^{-2} dla różnych temperatur.

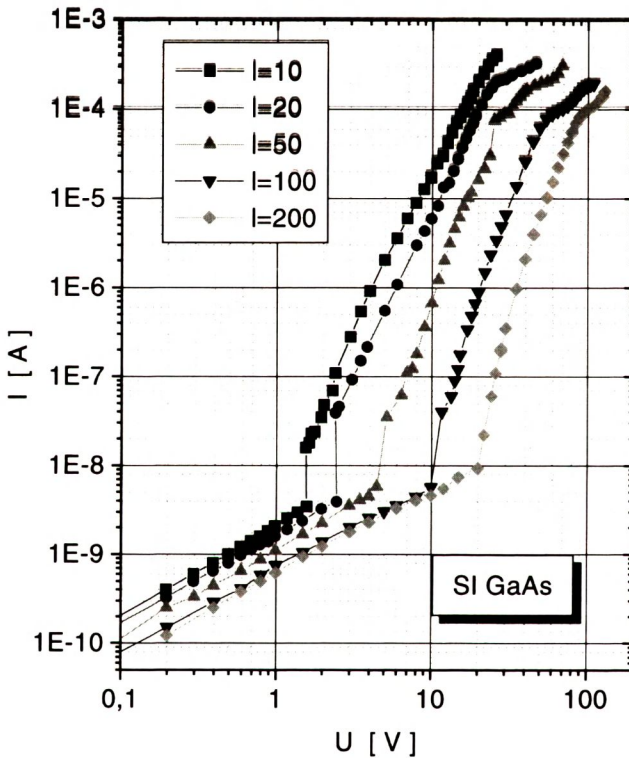
Fig. 7. Conductance-voltage characteristics of the implant isolation with thick buffer test structures of the length 20 μm , after ion bombardment of the dose 10^{13}cm^{-2} at different temperatures.

Rys. 8 przedstawia charakterystyki prądowo-napięciowe powierzchni półizolacyjnego GaAs w temperaturze pokojowej (bez dostępu światła) dla różnych odległości kontaktów pomiarowych AuGeNi. Wytrzymałość napięciowa nie jest tu również proporcjonalna do długości warstwy. Po zakresie omowym występuje gwałtowny wzrost prądu o kilka rzędów wielkości i charakterystyczne nasycenie się tego wzrostu dla natężenia prądu wynoszącego około 10^{-4} A. W literaturze nie ma dobrze opracowanych teorii wyjaśniających taki przebieg charakterystyk. Jest kilka hipotez, z których wg autora najbardziej trafna jest hipoteza Hasegawy [6].

Badał on półizolacyjne podłoża skompensowane chromem lub tlenem *Horizontal Bridgmann* (HB), podłoża półizolacyjne nie kompensowane *liquid encapsulated Czochralski* (LEC) z warstwami pasywującymi SiO_2 i Si_3N_4 oraz takie podłoża bez warstw pasywujących z kontaktami AuGeNi umieszczonymi w różnych odległościach. Po przekroczeniu zakresu omowego charakterystyki I-U Hasegawa zauważył emisję widzialnego białego światła, w pobliżu dodatnio spolaryzowanej elektrody. Zjawisko to wy-

jaśnił on w następujący sposób. W GaAs istnieje duża ilość pułapek ładunku elektrycznego o gęstości od 10^{15} do 10^{17}cm^{-3} , które znajdują się na powierzchni podłoża lub w objętości w pobliżu powierzchni. Ze wzrastającym napięciem, coraz więcej elektronów jest wstrzykiwanych z elektrod do GaAs, i następnie przechwytywanych przez obecne w nim pułapki.

W ten sposób zgromadzony na powierzchni ładunek powoduje lokalny duży wzrost natężenia pola elektrycznego w pobliżu anody, do wartości zdolnej do wywołania jonizacji atomów i powstania związanej z nią mikroplazmy emitującej białe światło. Generowane w plazmie elektrony i dziury o wysokiej energii są wyciągane przez odpowiednie potencjały na elektrodach, a także są wstrzykiwane do podłoża, powodując gwałtowny wzrost gęstości prądu.



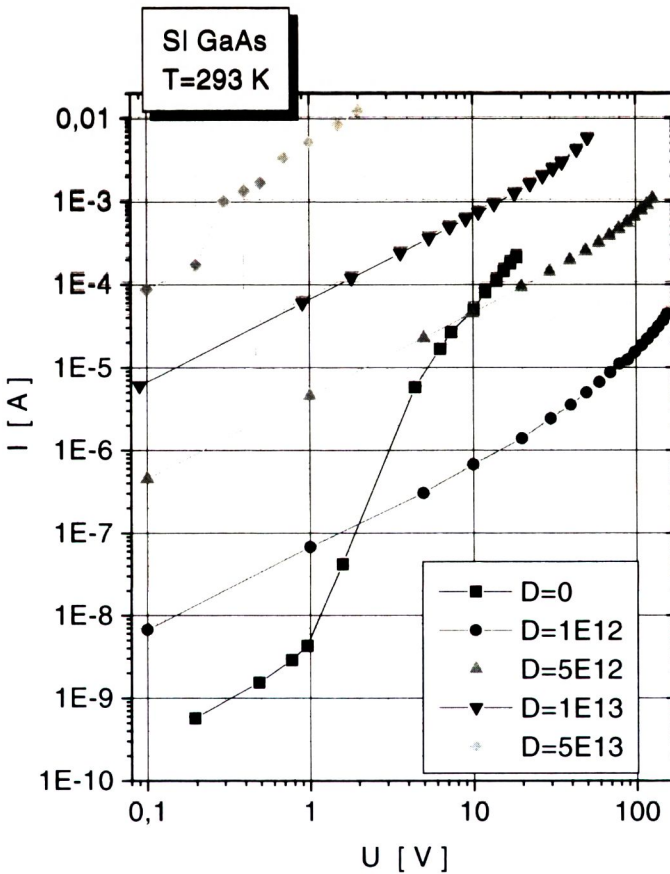
Rys.8. Charakterystyki prądowo-napięciowe struktur testowych warstw SI GaAs o różnych długościach w $[\mu\text{m}]$, w temperaturze pokojowej.

Fig. 8. Current-voltage characteristics of SI GaAs layers test structures for different structure lengths in $[\mu\text{m}]$ at room temperature.

W naszym przypadku natężenie prądu wzrasta w przybliżeniu proporcjonalnie do czwartej potęgi napięcia. Widać jednak wyraźne, że dla natężenia prądu wynoszącego około 10^{-4} A, występuje nasycenie się prądu, co jest charakterystyczne dla efektu *space charge limited current* (SCLC). Generowany ładunek w plazmie jest trudniej wyciągany przez bardziej oddalone elektrody, dlatego też efekt nasycenia się prądu w wyniku kumulującego się ładunku przestrzennego przebiega silniej dla

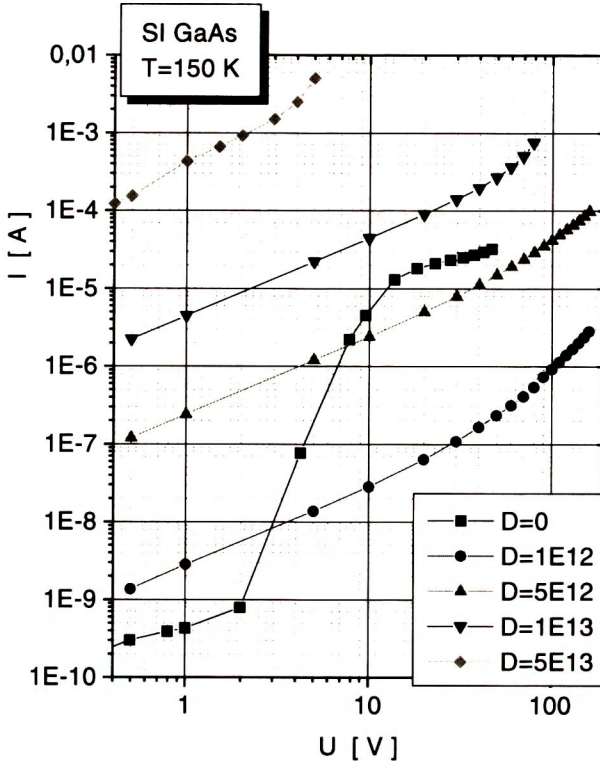
bardziej oddalonych elektrod. Zjawiska te są jednak ciągle za mało znane i trudne do wyrażenia za pomocą wzorów matematycznych.

Na Rys. 9 pokazane są charakterystyki I-U warstw powierzchniowych półizolacyjnego GaAs w temperaturze pokojowej z kontaktami IDR (odległość 20 μm) po dwukrotnym bombardowaniu jonami tlenu o energii 250 keV i 100 keV i dawkach od 10^{12}cm^{-2} do 10^{13}cm^{-2} , zaś na Rys. 10 charakterystyki I-U tych warstw w temperaturze 150 K. (Dla porównania na tych rysunkach pokazane są również charakterystyki I-U SI GaAs nie bombardowanego).



Rys.9. Charakterystyki prądowo napięciowe struktur testowych warstw SI GaAs w temperaturze pokojowej przed i po bombardowaniu jonowym o różnych dawkach D w $[\text{cm}^{-2}]$.

Fig. 9 . Current-voltage characteristics of SI GaAs layers test structures before and after ion bombardment with different doses D in $[\text{cm}^{-2}]$ at room temperature.



Rys.10. Charakterystyki prądowo napięciowe struktur testowych SI GaAs w temperaturze 150 K przed i po bombardowaniu jonowym.

Fig. 10. Current-voltage characteristics of SI GaAs layers test structures before and after ion bombardment at temperature 150 K.

W podłożach półizolacyjnych nie bombardowanych jonami przebicie napięciowe następuje przy napięciu powyżej 1 V, w temperaturze pokojowej i powyżej 2 V w temperaturze 150 K. Widać więc, że w rozważanym zakresie temperatur nie zmienia się w sposób istotny powierzchniowa wytrzymałość elektryczna podłoża.

Natomiast podłoża bombardowane wykazują zdecydowaną poprawę wytrzymałości napięciowej, i tak dla dawki 10^{12}cm^{-2} i $5 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$ przekracza ona 160 V w temperaturze pokojowej. W przypadku wyższych dawek gęstość prądu hoppingowego jest na tyle wysoka, że wydzielana energia cieplna w warstwie powoduje katastroficzne jej przebicie.

Chociaż efekt pasywującego działania bombardowania jonowego na powierzchnię GaAs jest znany i wykorzystywany do zwiększenia napięcia przebicia między bramką i drenem tranzystorów MISFET, to jednak w literaturze brak jest teorii wyjaśniającej to zjawisko.

Hipoteza autora interpretująca ten efekt wzrostu napięcia przebicia SI GaAs po bombardowaniu może być następująca: bombardowanie jonowe generuje defekty, które umożliwiają przepływ prądu hoppingowego. Dla dawki jonów 10^{12}cm^{-2} i większej gęstość tego prądu jest na tyle duża, że zapobiega on gromadzeniu się ładunków w pułapkach, a zatem powstawaniu lokalnie dużych natężeń pola elektrycznego, powodującego powstawanie opisanej wcześniej mikroplazmy.

Bombardowanie jonowe usuwa także z powierzchni GaAs zaadsorbowane tam atomy obce, głównie tlen i węgiel, a także tlenki galu i arsenu. Reasumując bombardowanie jonowe powierzchni półizolacyjnego GaAs może więc być wykorzystane do zdecydowanego podwyższenia napięcia przebicia między elementami układu scalonego z izolacją typu mesa, a także w układach z selektywną implantacją.

Przed procesem epitaksji występuje operacja wygrzewania podłoża w reaktorze, w atmosferze wodoru, w temperaturach od 600°C do 850°C w zależności od rodzaju procesu, która ma na celu usunięcie tlenków samoistnych z powierzchni GaAs. Tak więc powierzchnia podłoża półizolacyjnego GaAs pod warstwą epitaksjalną jest bardziej czysta chemicznie, a zatem można powiedzieć, że występuje tam mniejsza gęstość stanów powierzchniowych, pułapkujących swobodne nośniki. Ten fakt tłumaczy kilkakrotnie większą wytrzymałość napięciową struktur z warstwami epitaksjalnymi na półizolacyjnym podłożu od wytrzymałości samego podłoża.

Mimo procesu chemicznej obróbki podłoża przed procesem epitaksji, w trakcie epitaksjalnego wzrostu warstw w początkowej jego fazie występuje wiele defektów strukturalnych sieci krystalicznej. Ten obszar, określanej w technicznej literaturze anglojęzycznej terminem interface, a w polskiej terminem międzywarstwy lub międzypowierzchni, zawiera stany elektronowe położone w przerwie zabronionej półprzewodnika, które pułkują swobodne nośniki ładunku. Tak więc, w tym obszarze może dojść do pojawienia się pól elektrycznych o wartości dostatecznie dużej do powstania mikroplazmy, w której generowane są elektrony i dziury wstrzykiwane następnie do sąsiednich obszarów i wywołujące elektryczne przebijanie badanych struktur.

Warstwy buforowe powiększają odległość międzywarstwy od powierzchni struktur, na której znajdują się elektrody z przyłożonym napięciem, zatem natężenie pola elektrycznego w międzywarstwie jest mniejsze i potrzebne są wyższe napięcia dla przebicia elektrycznego struktur z izolacją implantowaną.

4. WNIOSKI

- Dwukrotne bombardowanie jonami tlenu o energiach 100 i 250 keV i dawkach nie niższych niż 10^{12}cm^{-2} , domieszkowanych warstw epitaksjalnych o grubości $0,3\ \mu\text{m}$ i o koncentracji elektronów około $3 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$, a także poimplantacyjne wygrzewanie w temperaturze 500°C pozwala uzyskać materiał spełniający wymaga-

nia izolacji międzyelementowej w układach scalonych w GaAs.

- Izolacja implantowana uzyskana w wyniku bombardowania jonami o dawce $5 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ wykazuje wyższą stabilność termiczną niż izolacje po bombardowaniu jonami o mniejszych dawkach.

- Dla zredukowania szkodliwego wpływu międzywarstwy „warstwa epitaksjalna-półizolacyjne podłoże” na parametry elektryczne izolacji implantowanej konieczne jest stosowanie warstwy buforowej.

- Niezbędna grubość warstwy buforowej zależy będzie od oczekiwanej wytrzymałości napięciowej izolacji i wymaganej odległości izolowanych elementów układu scalonego. Uwzględniając występujące napięcia w układach scalonych GaAs i gęstość upakowania elementów, warstwy buforowe o grubości $\sim 0,8 \mu\text{m}$ wydają się być niezbędne.

- Przebiecie elektryczne półizolacyjnego podłoża GaAs występuje przy niskich napięciach, ($1,5 \text{ V} / 10 \mu\text{m}$; $2,4 \text{ V} / 20 \mu\text{m}$ i $4 \text{ V} / 50 \mu\text{m}$), a wartość tego napięcia nie jest proporcjonalna do odległości elektrod, co świadczy o powierzchniowym charakterze tego zjawiska.

- Bombardowanie jonowe powierzchni półizolacyjnego podłoża powoduje wzrost jego wytrzymałości na przebicie elektryczne do ponad $160 \text{ V} / 20 \mu\text{m}$.

- W przypadku struktur z cienkimi warstwami buforowymi ($0,2 \mu\text{m}$), powstawanie mikroplazmy w międzywarstwie „podłoże - warstwa epitaksjalna” wytrzymałość napięciowa izolacji na przebicie elektryczne wynosi od 10 do 20 V dla długości izolacji od 10 do 100 μm .

- W przypadku struktur z grubymi warstwami buforowymi ($\sim 0,8 \mu\text{m}$), izolacja implantowana wykazuje zdecydowanie większą wytrzymałość na przebicie i napięcie przebicia wynosi wtedy około $60 \text{ V} / 20 \mu\text{m}$.

- Wielkość dawki bombardujących jonów nie ma istotnego wpływu na wytrzymałość elektryczną izolacji. Fakty te potwierdzają, że o wytrzymałości elektrycznej na przebicie struktur z izolacją implantowaną decyduje wytrzymałość elektryczna niżej położonych warstw lub międzywarstw.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Synowiec Z., Dąbrowska M., Ohly T.: Izolacja implantowana w półprzewodnikach typu A^mB^v . Elektronika (XXXV), 1994, 3, 8-12
- [2] Synowiec Z.: Badanie właściwości elektrofizycznych izolacji implantowanej w GaAs. Praca doktorska. Raport Serii Pre 22/97 Instytutu Technologii Elektronowej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1997
- [3] Pearton S.J.: Ion implantation in III-V semiconductor technology. International Journal of Modern Physics B, Vol.7, No. 28, 1993, 4687-4761
- [4] Zallen R.: Fizyka ciał amorficznych. Warszawa: PWN, 1994

- [5] Brodsky M.H.: Amorphous semiconductors. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1985
- [6] Hasegawa H., Kitigawa T., Sawada T., Ohno H.: Surface electrical breakdown with white-light emission on semi-insulating GaAs substrates. Electronics Letters, Vol. 20, 1984, 561-562
- [7] Clauwaert F., Van Daele P., Baets R., Lagasse P.: Characterization of device isolation in GaAs MESFET circuits by boron implantation. J. Electrochem. Soc. Vol. 134, 3, March 1987, 711-714

DC ELECTRICAL PROPERTIES OF IMPLANT ISOLATION IN GaAs

Summary

The electrical properties of implant isolation in GaAs such as electrical carrier transport, thermal stability and electrical breakdown strength are determined. The mechanism of electrical breakdown and influence of a substrate and a buffer layer on material properties are explained.

The thermal stability is determined by a defect density as a function of ion bombarding dose. It has been found out that implant isolation obtained after ion bombarding with a dose of $5 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ has a better thermal stability than with doses