

WPLYW ZANIECZYSZCZEŃ METALICZNYCH NA PROFIL SYGNAŁU EBIC W KRZEMOWYCH STRUKTURACH EPITAKSJALNYCH

Marta Pawłowska

Badano charakterystyki prądu EBIC w krzemowych warstwach epitaksjalnych ze złączami p-n oraz barierami metal-półprzewodnik. Obserwowano zmiany kształtu profilu sygnału EBIC w stosunku do warstw odniesienia po celowym wprowadzeniu atomów Ni, Fe lub Cu. Dla warstw typu n maksimum sygnału EBIC obserwowano przy złączu p-n, dla warstw typu p - przy złączu l-h na granicy z podłożem. W warstwach typu n największe zmiany profilu sygnału EBIC powodowała obecność atomów Ni, w warstwach typu p - obecność atomów Fe.

1. WPROWADZENIE

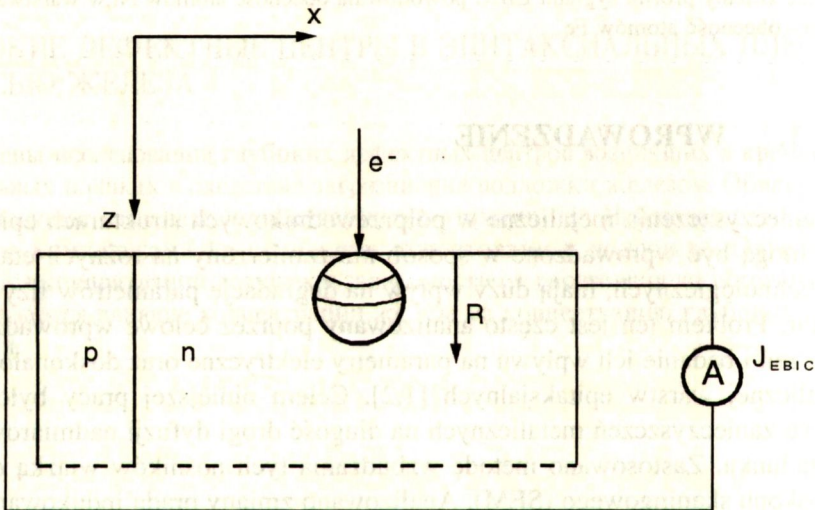
Zanieczyszczenia metaliczne w półprzewodnikowych strukturach epitaksjalnych, które mogą być wprowadzone w sposób nie zamierzony na różnych etapach procesów technologicznych, mają duży wpływ na degradację parametrów fizycznych tych struktur. Problem ten jest często analizowany poprzez celowe wprowadzanie zanieczyszczeń i badanie ich wpływu na parametry elektryczne oraz doskonałość struktury krystalicznej warstw epitaksjalnych [1,2]. Celem niniejszej pracy było określenie wpływu zanieczyszczeń metalicznych na długość drogi dyfuzji nadmiarowych nośników ładunku. Zastosowano metodę wzbudzania tych nośników wiązką elektronową mikroskopu skaningowego (SEM). Analizowano zmiany prądu indukowanego wiązką elektronów (I_{EBIC}) w funkcji odległości od złącza p-n lub bariery metal-półprzewodnik. Do pomiarów prądu EBIC wykorzystano struktury ze złączem usytuowanym równolegle do kierunku wiązki elektronów. Szczegółowa analiza zmian prądu EBIC w funkcji odległości od złącza, przy spełnieniu odpowiednich warunków, pozwala na określenie długości drogi dyfuzji nośników mniejszościowych, a także prędkości rekombinacji powierzchniowej. Przedmiotem badań były struktury epitaksjalne n^+/n i p^+/p wytwarzane i testowane w ITME.

2. PODSTAWY FIZYCZNE METODY BADAŃ

Najczęściej stosowane są dwie metody pomiaru długości drogi dyfuzji nośników przy wzbudzeniu wiązką elektronową:

a) Poprzez pomiar prądu I_{EBIC} w funkcji odległości zogniskowanej wiązki elektronów od płaszczyzny złącza p-n lub styku metal - półprzewodnik, usytuowanych prostopadle do bombardowanej powierzchni; długość drogi dyfuzji nośników mniejszościowych jest oceniana na podstawie analizy zaniku prądu I_{EBIC} w zwartym obwodzie elektrycznym ze złączem - najczęściej z wykładniczego profilu zaniku prądu, w funkcji odległości sfery generacji od płaszczyzny złącza.

b) Poprzez pomiar prądu I_{EBIC} w funkcji energii wiązki elektronów dla złączy usytuowanych równoległe do naświetlanej powierzchni. Metoda ta jest szczególnie stosowana wówczas, kiedy oprócz określania długości drogi dyfuzji nośników istnieje potrzeba ujawniania i analizy aktywności rekombinacyjnej indywidualnych defektów strukturalnych.



Rys. 1. Schemat podstaw oddziaływania wiązki elektronów z materiałem półprzewodnikowym w obszarze złącza p-n.

Schemat usytuowania wiązki elektronów w przypadku próbki ze złączem p-n równoległym do kierunku padającej wiązki elektronów podano na Rys.1. Zogniskowana wiązka elektronów padając na powierzchnię próbki półprzewodnika podlega wielu elastycznym i nieelastycznym procesom rozpraszania oraz rozpywa się w kryształ tworząc pewną sferę oddziaływania. W wyniku tego oddziaływania powstają nadmiarowe nośniki ładunku tzw. pary elektron - dziura. Szybkość generacji

par elektron - dziura można wyrazić równaniem [3, 4]

$$G_t = \frac{I_b}{q} \times \frac{E_b}{E_{e-h}} \times (1 - \eta), \quad (1)$$

gdzie I_b/q jest liczbą padających elektronów w jednostce czasu;

I_b - prądem wiązki elektronów,

q - ładunkiem elementarnym,

E_b/E_{e-h} - liczbą generowanych par przez elektrony pierwotne,

E_b - energią wiązki elektronów,

E_{e-h} - energią potrzebną do wytworzenia pary elektron - dziura

dla Si [3] $E_{e-h} = 3,6 \text{ eV}$

η - współczynnik strat energii z powodu elektronów odbitych (dla Si $\eta = 0,1$).

Przyrost gęstości każdego rodzaju nośników ładunku wprowadzonych do półprzewodnika jest iloczynem szybkości generacji G_t i czasu życia nośników τ podzielonym przez objętość, w której powstają nośniki

$$\Delta p = \frac{G_t \times \tau}{V} \quad (2)$$

Wielkość sfery generacji wiąże się z zasięgiem penetracji pierwotnych elektronów. Dla Si najczęściej przyjmowana jest empiryczna zależność [4]

$$R_{[\mu\text{m}]} = 0,0171 \times E_{b[\text{keV}]}^{1.75} \quad (3)$$

Rozkład par elektron - dziura w sferze generacji nie jest jednorodny i opisywany jest złożoną funkcją [5]

$$G(r) = G_t \times F(x, y, z, E_b) \times h(z, E_b) \quad (4)$$

Funkcja $F(x, y, z, E_b)$ opisuje radialny rozkład generowanych par elektron - dziura; wg [6], funkcja ta dla Si ma postać

$$F(x, y, z, E_b) = \frac{1.76}{2\pi\sigma^2 R} \exp\left[\frac{-(x+y)^2}{\sigma^2}\right], \quad (5)$$

gdzie $\sigma^2 = 0,36 d^2 + 0,11 (z^3/R)$

d - średnica wiązki elektronów.

Funkcja $h(z, E_b)$ opisuje rozkład generowanych par w głąb od powierzchni i często podawana jest w postaci unormowanej w stosunku do głębokości wnika- nia R . Np. wg Everharta i Hoffa [7] ma ona postać:

$$h\left(\frac{z}{R}\right) = 0.6 + 6.21\left(\frac{z}{R}\right) - 12.40\left(\frac{z}{R}\right)^2 + 5.69\left(\frac{z}{R}\right)^3. \quad (6)$$

wg Fittinga [8]

$$h\left(\frac{z}{R}\right) = \frac{1.76}{R} \exp\left[-7.5\left(\frac{z}{R} - 0.3\right)^2\right]. \quad (7)$$

Złożona zależność rozkładu par elektron - dziura w objętości generacji wymaga skomplikowanych obliczeń numerycznych. Dlatego często stosowany jest uproszczony model, przyjmujący, że źródło generacji nośników jest punktowe i znajduje się na powierzchni próbki bądź na głębokości h lub na kształt sfery o promieniu r ze środkiem przesuniętym na głębokość $h = a \times r$.

W literaturze [9] podawanych jest kilka wartości parametru a : 0,5; 0,41; 1.

Nadmiarowe nośniki mogą dyfundować poza obszar wzbudzenia na odległość L nazwaną długością drogi dyfuzji oraz podlegają procesom rekombinacji z szybkością R_k . Dla matematycznego opisu zmian koncentracji nadmiarowych nośników w funkcji czasu należy rozwiązać równanie dyfuzji zawierające jako parametry funkcję generacji G , parametr rekombinacji R_k oraz stałą dyfuzji nośników mniejszościowych D . W przypadku, gdy wiązka elektronów pada w kierunku osi z , rozkład koncentracji nadmiarowych nośników Δp (dziur w półprzewodniku typu n) można wyznaczyć z zależności

$$\frac{\delta(\Delta p)}{\delta t} = G(z) - R_k + D_p \frac{\delta^2(\Delta p)}{\delta z^2} \quad (8)$$

Przy stałym sygnale wzbudzenie- $\frac{\delta(\Delta p)}{\delta t} = 0$ oraz $R_k = \frac{\Delta p}{\tau}$

τ - czas życia nośników; $\tau = \frac{L^2}{D}$,

równanie (8) przyjmuje postać

$$\frac{\delta^2(\Delta p)}{\delta z^2} - \frac{\Delta p}{L^2} = -\frac{G(z)}{D_p} \quad (9)$$

Wartością mierzoną jest prąd indukowany wiązką elektronów zbierany przez barierę Schottky'ego lub złącze p-n

$$I_{\text{EBIC}} = qD_p \iint \frac{\delta(\Delta p)}{\delta(z)} dx dy \quad (10)$$

W pracy [10] analizowano problemy rozkładu koncentracji nadmiarowych nośników oraz ich zbierania przez złącze, wprowadzono funkcję prawdopodobieństwa zbierania nośników ładunku $\varphi(r)$.

Prąd indukowany wiązką elektronów może być wówczas określony zależnością

$$I_{EBIC}(r, E_b) = I_G \int \varphi(r) N(r, E_b) dr, \quad (11)$$

gdzie $N(r, E_b)$ jest funkcją rozkładu koncentracji nośników, która związana jest z funkcją $F(x, y, z, E_b)$ zależnością

$$N(r, E_b) = \iiint F(x, y, z, E_b) dx dy dz. \quad (12)$$

W przypadku układu do pomiaru I_{EBIC} ze złączem położonym równolegle do kierunku padającej wiązki elektronów (Rys.1) prąd I_{EBIC} opisywany jest zależnością

$$I_{EBIC}(x_o, E_b) = I_G \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \varphi(x, z) N_2(x - x_o, z, E_b) dx dz, \quad (13)$$

gdzie I_G - jest prądem generacji $= \frac{I_b E_b}{E_{e-h}} (1 - \eta)$

$$N_2(x - x_o, z, E_b) = \int F(x, y, z, E_b) dy$$

$x - x_o$ - jest odległością od punktu padania wiązki elektronów x_o .

Funkcja rozkładu prawdopodobieństwa zbierania nośników $\varphi(x, z)$ w przypadku analizowanego układu zależy od położenia wiązki względem złącza oraz od parametrów badanego obszaru. Jej maksimum występuje, w przybliżeniu, w środku warstwy ładunku przestrzennego (bardziej szczegółowa analiza przeprowadzona np. w pracy Dicmana i innych [11] wskazuje na przesunięcie maksimum przy większych objętościach obszaru generacji).

Szczegółową analizę zależności prądu EBIC od parametrów fizycznych i warunków eksperymentalnych prowadził Donolato [12].

Według niego funkcja prawdopodobieństwa zbierania nośników (po uwzględnieniu złożonych transformacji funkcji będących rozwiązaniem równania ciągłości) ma postać

$$\varphi(x, z) = \exp\left(\frac{-x}{L}\right) - \frac{2\rho}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{k}{\mu^2(\mu + \rho)} \times \exp(-\mu z) \sin(kx) dk, \quad (14)$$

gdzie $\rho = (s/D_p)$, s - prędkość rekombinacji powierzchniowej

$$\mu = \left[\frac{(k^2 + 1)}{L^2} \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Funkcja ta uwzględnia znaczny wpływ prędkości rekombinacji powierzchniowej s (która w praktyce eksperymentalnej ma duże znaczenie) oraz wpływ długości

drogi dyfuzji L . Przy założeniu, że prędkość rekombinacji powierzchniowej jest pomijalnie mała, w funkcji prawdopodobieństwa $\varphi(x, z)$ pozostaje tylko wykładniczy czynnik $\exp(-x/L_p)$ określający zależność prawdopodobieństwa zbierania nośników od odległości od płaszczyzny złącza (lub od granicy warstwy zubożonej, kiedy szerokość obszaru tej warstwy jest znaczna np. w materiałach nisko domieszkowanych).

$$I_{EBIC} \propto \exp\left(\frac{-x}{L}\right) \quad (15)$$

Zależność ta w pierwszym przybliżeniu pozwala na oszacowanie długości drogi dyfuzji nośników mniejszościowych z nachylenia prostej ilustrującej w skali logarytmiczno - liniowej zależności eksperymentalnie mierzonej wartości prądu I_{EBIC} w funkcji położenia wiązki elektronów względem złącza.

Przy szczegółowej analizie problemu oddziaływania wiązki elektronów z realnym półprzewodnikiem, wykonanej w pracach Donolato [12], Kittlera i Schodera [13], Berza i Kuikena [14], Oelgarta [15], uwzględniono wpływ realnej wartości prędkości rekombinacji powierzchniowej (przyjmowanej w przybliżonych oszacowaniach $s = 0$ lub $s = \infty$). Ma ona znaczny wpływ na przebieg I_{EBIC} w pobliżu złącza i powoduje szybsze obniżanie wartości prądu. Ponadto, wykładnicza zależność I_{EBIC} od odległości x jest dobrym przybliżeniem dla $x > 2L$, gdzie przeważający wpływ ma proces dyfuzji nośników mniejszościowych.

Zależność (15) może być również zakłócona w przypadku cienkich warstw oraz występowania innych barier potencjału (granic z obszarem o innych własnościach, kontaktów omowych). Wielkości fizyczne oceniane na podstawie analizy krzywych I_{EBIC} w funkcji odległości od złącza z uwzględnieniem powyższych czynników otrzymywane są z dopasowania eksperymentalnego przebiegu zmian I_{EBIC} do analogicznych, teoretycznych krzywych obliczonych przy różnych parametrach. Są to: prędkości rekombinacji powierzchniowej, długości drogi dyfuzji przy określonych warunkach brzegowych eksperymentu.

W niniejszej pracy zastosowano pierwsze przybliżenie w ocenie zmian długości drogi dyfuzji nośników, w obecności zanieczyszczeń metalicznych. Pełna analiza, z porównaniem do obliczeń teoretycznych symulujących profile prądu EBIC przy różnych parametrach oraz w określonych warunkach pomiarów, wykonana będzie w drugiej części pracy.

3. OPIS I WYNIKI BADAŃ

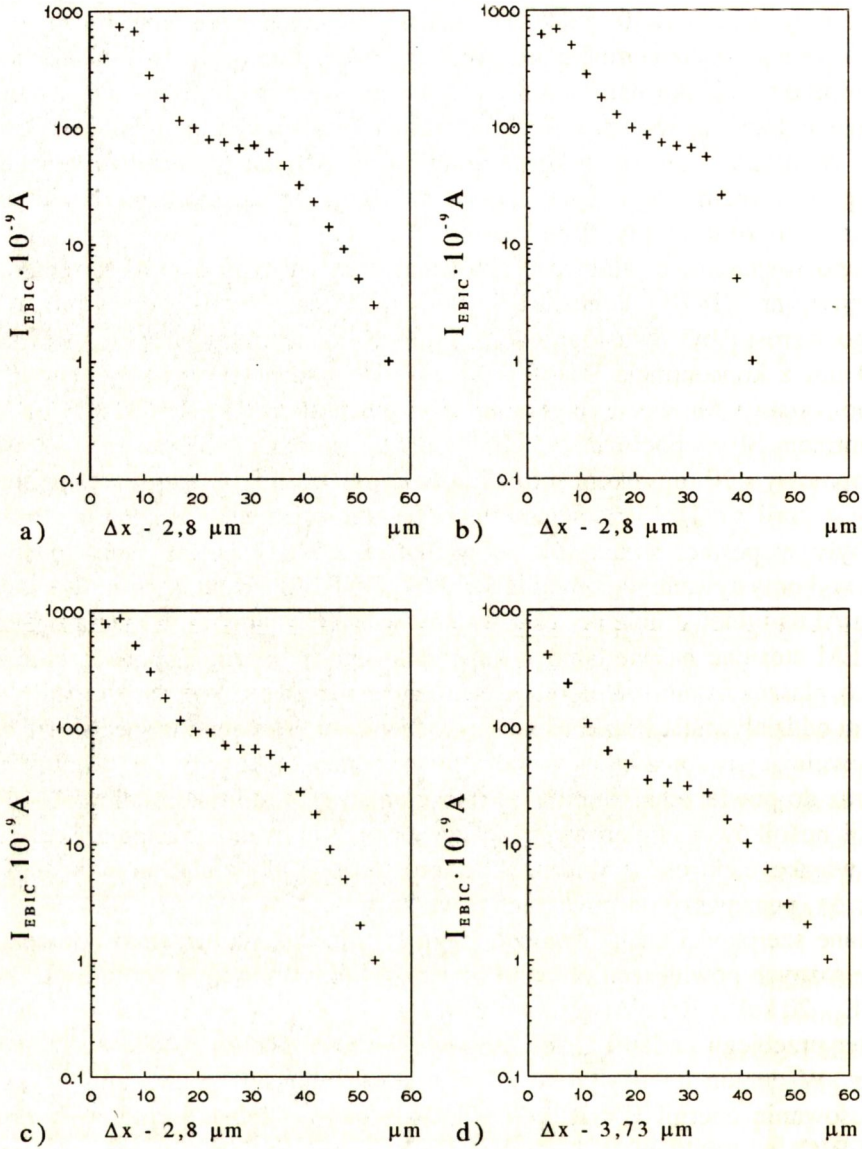
Przedmiotem badań były krzemowe warstwy epitaksjalne typu n oraz typu p. Próbkki typu n (z serii nr 1/1322) miały grubość warstw 30 μm , zaś koncentracja donorów (P) wynosiła $\sim 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, a koncentracja domieszki (Sb) w podłożu $\sim 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. W przypadku warstw typu p (mierzone próbki z serii nr 1/1315)

miały grubość 30 μm i koncentrację domieszki (B) $\sim 4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. Koncentracja boru w podłożu wynosiła $\sim 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Aby uzyskać złącze p-n nie wprowadzając dodatkowych operacji wysokotemperaturowych, na powierzchnię warstw o niskiej koncentracji nośników ładunku nanoszono cienkie warstwy (około 2 μm) o przeciwnym typie przewodnictwa: warstwę domieszkowaną B o koncentracji $\sim 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ lub warstwę domieszkowaną P o koncentracji $\sim 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Warstwy epitaksjalne, będące przedmiotem badań były celowo zanieczyszczone atomami Ni, Fe lub Cu. Metale te nanoszono na płytki podłożowe [1].

Badano również specjalnie przygotowane warstwy typu n o większej grubości. Dla warstwy nr 1/1470 (koncentracja Sb w podłożu $\sim 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) proces epitaksjalnego wzrostu był dwustopniowy: -7 μm o koncentracji boru $\sim 1,1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ oraz 60 μm z koncentracją B $\sim 9 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. Do badań tej warstwy metodą EBIC napyłono warstwę Au w celu uzyskania bariery Schottky'ego. Dla warstwy nr 2/1280 (koncentracja Sb w podłożu $\sim 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) proces epitaksjalnego wzrostu był jednostopniowy - 70 μm o koncentracji boru $\sim 7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. Warstwa ta, podobnie jak warstwy z serii nr 1/1322, stanowiła bazę epitaksjalnego złącza p-n. Próbkę do badań były w postaci kwadratów, o wielkości 2,5 x 2,5 mm. Były to struktury testowe wykorzystywane w pomiarach metodą DLTS [2]. Kontakty omowe stanowiła warstwa Al na tylnej stronie płytek z warstwami epitaksjalnymi. Badania wykonywano w SEM stosując naświetlanie wiązką elektronów, bocznych powierzchni próbek będących płaszczyznami przełomu tzn. płaszczyzna złącza była prostopadła do powierzchni oddziaływania wiązki elektronów. Próbkę umieszczono w specjalnym uchwycie zapewniającym sprężynujący dociskowy kontakt elektryczny do kontaktu omowego oraz do powierzchni warstwy. Profile zmian I_{EBIC} w funkcji odległości obszaru generacji nośników nadmiarowych od złącza otrzymywano przemieszczając nieruchomą wiązkę elektronów wzdłuż linii prostopadłej do złącza o określony stały odcinek Δx , począwszy od powierzchni warstwy.

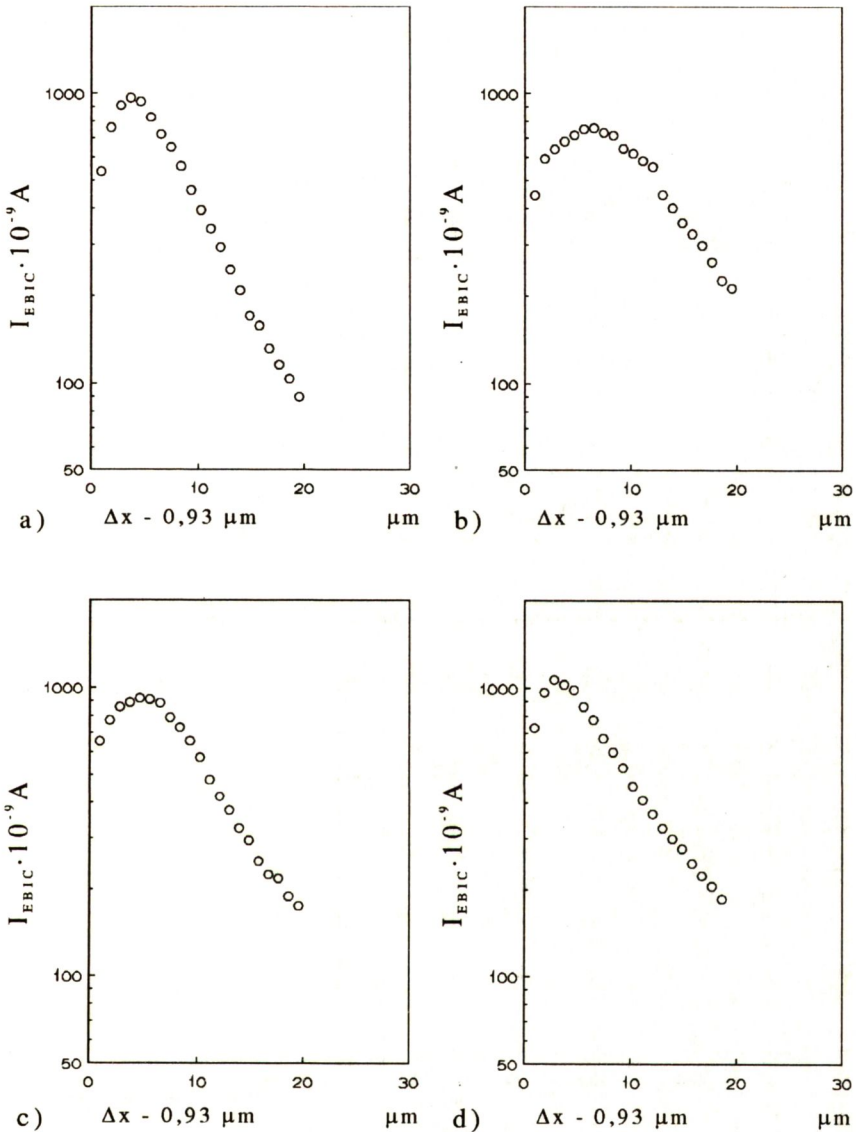
Zmianę szerokości analizowanego fragmentu próbki realizowano poprzez zastosowanie różnych powiększeń obrazu. Pomiarów wykonywano przy energii wiązki elektronów E_b - 20 keV i 30 keV (głębokość wnikania R odpowiednio - 3,2 μm i 6,5 μm). Charakter przebiegu zmian I_{EBIC} dla obydwu wartości energii wiązki elektronów był podobny. W demonstracji wyników badań posłużono się wartościami uzyskanymi przy stosowaniu energii $E_b = 20 \text{ keV}$. Porównywano względne zmiany w profilach prądu EBIC, w strukturach z wprowadzonymi zanieczyszczeniami metalicznymi w stosunku do struktury odniesienia - bez zanieczyszczeń. Na Rys. 2 przedstawiono profile zmian prądu EBIC od powierzchni w kierunku podłoża dla warstwy epitaksjalnej typu n (seria nr 1/1322):

- a) - warstwa odniesienia (bez zanieczyszczeń),
- b) - warstwa zanieczyszczona Ni,
- c) - warstwa zanieczyszczona Fe,
- d) - warstwa zanieczyszczona Cu.



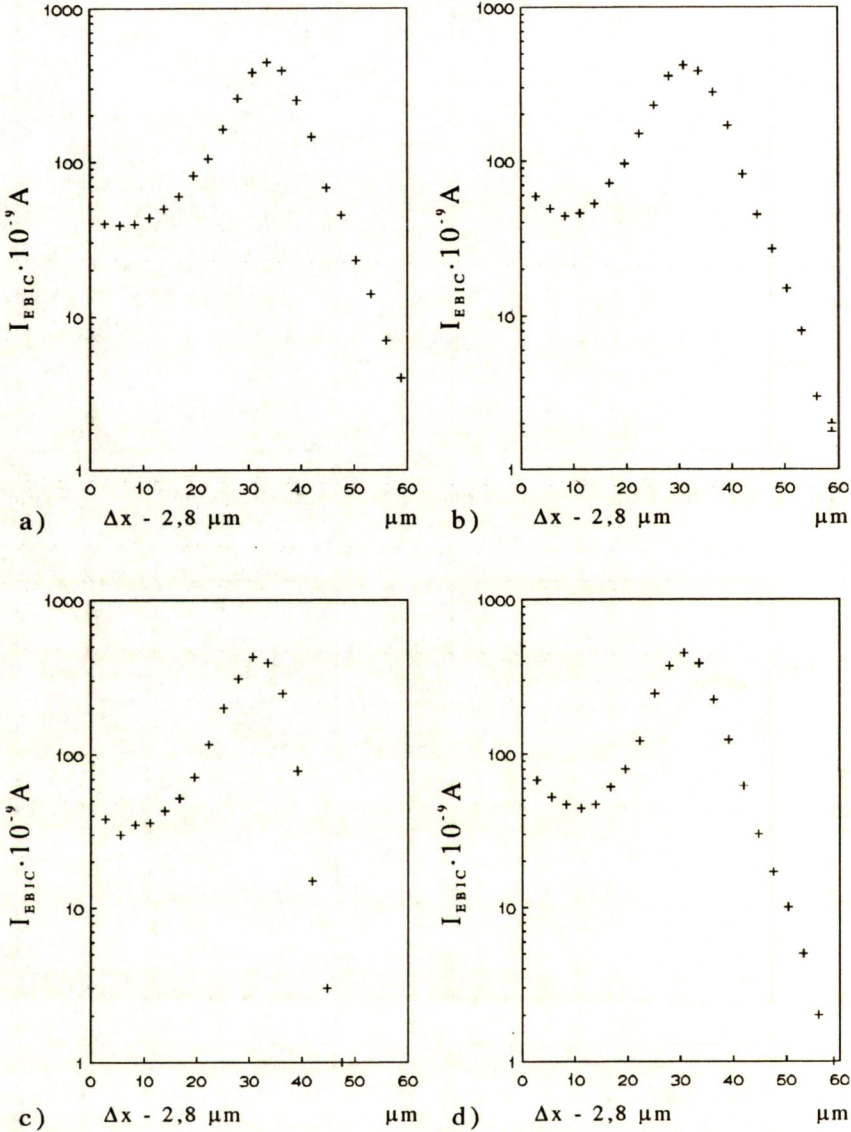
Rys. 2. Profile zmian prądu I_{EBIC} w funkcji odległości od złącza dla próbek warstw epitaksjalnych typu n, z serii 1/1322; a- bez metalu (oszacowanie L_p w podłożu $6,1 \mu\text{m}$), b- z Ni (oszacowanie L_p w podłożu $2,1 \mu\text{m}$), c- z Fe (oszacowanie L_p w podłożu $4,2 \mu\text{m}$), d- z Cu (oszacowanie L_p w podłożu $6,9 \mu\text{m}$). Warunki pomiarów: $E_b = 20 \text{ keV}$, $I_b = 3 \times 10^{-11} \text{ A}$.

Podobne zestawienie wyjściowych pomiarów I_{EBIC} dla węższego obszaru przy złączu, z zastosowaniem innej wartości kroku pomiarowego podano na Rys. 3. Maksimum wartości prądu rejestrowano w pobliżu złącza p-n.

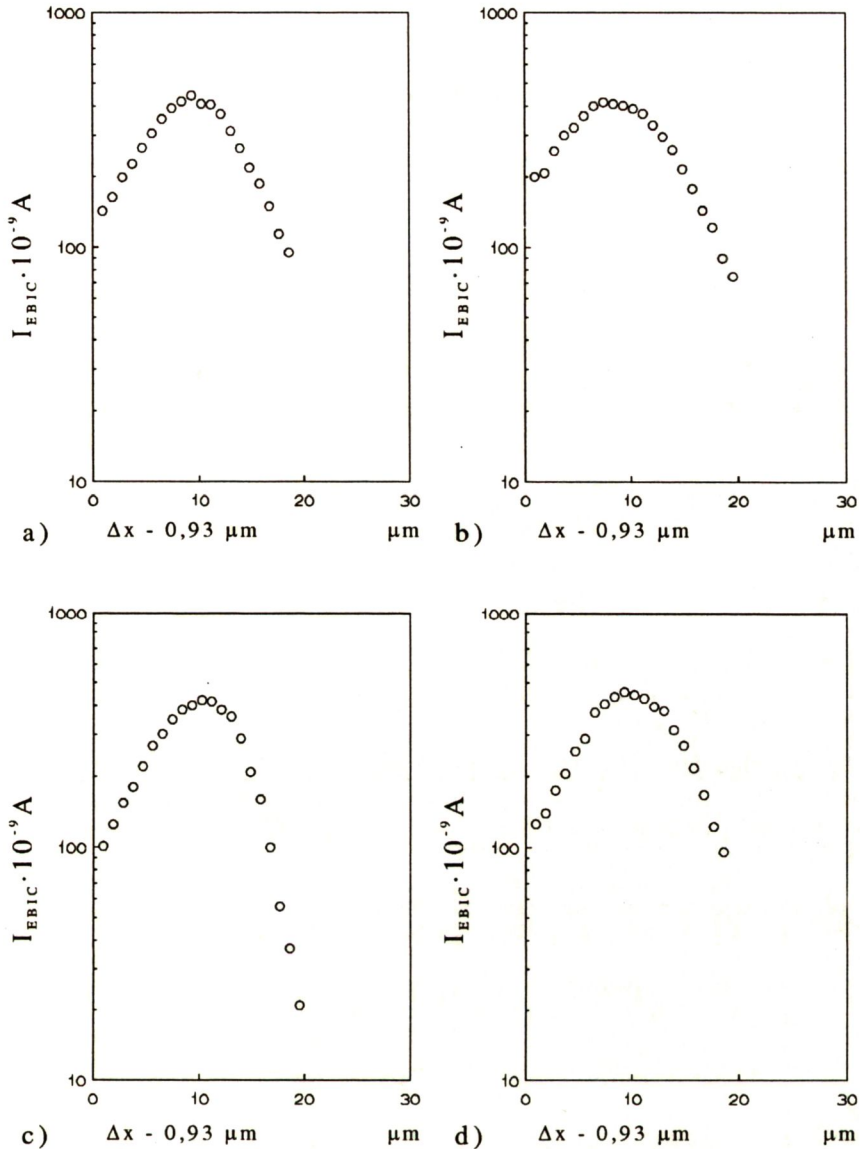


Rys. 3. Profile zmian prądu I_{EBIC} w funkcji odległości od złącza dla próbek warstw epitaksjalnych typu n, z serii 1/1322; a- bez metalu, b- z Ni, c- z Fe, d- z Cu. Warunki pomiarów: $E_b = 20 \text{ keV}$, $I_b = 3 \times 10^{-11} \text{ A}$.

Analogiczny układ charakterystyk dla warstw epitaksjalnych typu p przedstawiono na Rys. 4 i Rys. 5. Dla warstw tych maksimum wartości prądu I_{EBIC} rejestrowano w obszarze złącza l-h na granicy podłoże - warstwa epitaksjalna.



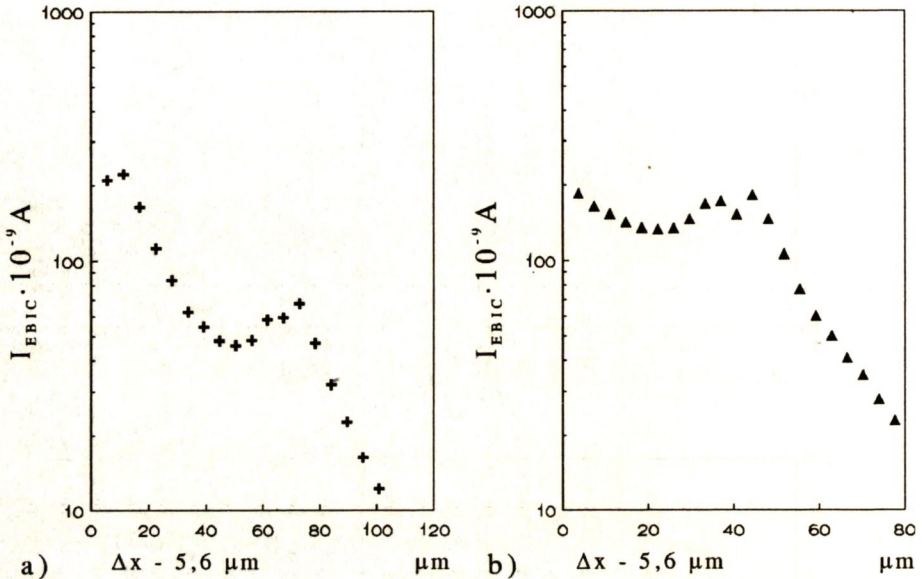
Rys. 4. Profile zmian prądu I_{EBIC} w funkcji odległości od złącza dla próbek warstw epitaksjalnych typu p, z serii 1/1315; a- bez metalu (oszacowanie L_n w podłożu 4.9 μm), b- z Ni (oszacowanie L_n w podłożu 4.5 μm), c- z Fe (oszacowanie L_n w podłożu 2.6 μm), d- z Cu (oszacowanie L_n w podłożu 4.3 μm). Warunki pomiarów: $E_b = 20 \text{ keV}$, $I_b = 1.5 \times 10^{-11} \text{ A}$.



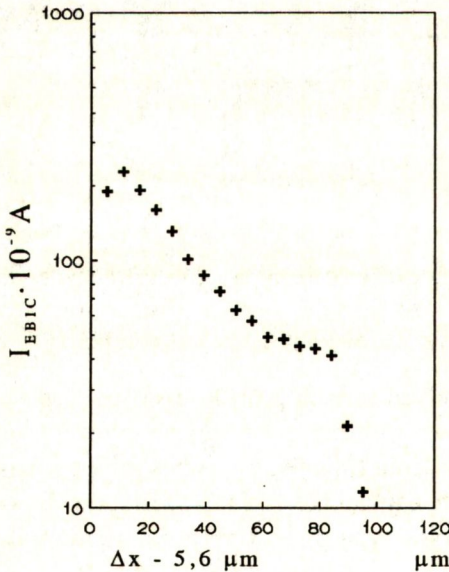
Rys. 5. Profile zmian prądu I_{EBIC} w funkcji odległości od złącza dla próbek warstw epitaksjalnych typu p, z serii 1/1315; a- bez metalu, b- z Ni, c- z Fe, d- z Cu. Uwaga: początek skali nie odpowiada powierzchni warstwy. Warunki pomiarów: $E_b = 20 \text{ keV}$, $I_b = 1.5 \times 10^{-11} \text{ A}$.

Różnice w profilach zmian I_{EBIC} w badanych seriach próbek w stosunku do próbki odniesienia wyrażają się zmianami szerokości i nieznacznego przemieszczenia maksimum wartości prądu oraz różnicami w nachyleniu fragmentów krzywych odpowiadających obszarom podłoża. Dla warstw typu n największe zmiany występowały w obecności zanieczyszczeń atomami Ni, dla warstw typu p - w obecności atomów Fe.

Na podstawie fragmentów zmian I_{EBIC} odpowiadających obszarom podłoża w badanych strukturach oszacowano długość drogi dyfuzji nośników mniejszościowych (wartości podano w podpisach pod odpowiednimi rysunkami).



Rys. 6. Profil zmian prądu I_{EBIC} w funkcji odległości od złącza dla warstwy typu n nr 1/1470, a- oszacowanie L_p w podłożu $17.8 \mu m$, b- uwaga; początek skali nie odpowiada powierzchni warstwy. Warunki pomiarów: $E_b = 20 keV$, $I_b =$ dla: a - $1.5 \cdot 10^{-11} A$, dla b - $3 \cdot 10^{-11} A$.



Rys. 7. Profil zmian prądu I_{EBIC} w funkcji odległości od złącza dla warstwy typu n, nr 2/1280, oszacowanie L_p w podłożu $12.1 \mu m$. Warunki pomiarów: $E_b = 20 keV$, $I_b = 4 \cdot 10^{-10} A$.

Dla specjalnie przygotowanych warstw o zwiększonej grubości charakterystyki I_{EBIC} przedstawiono na Rys.6 i Rys.7. Dla warstwy wzrastającej dwustopniowo, maksimum krzywej I_{EBIC} występuje przy barierze Schottky'ego. Zaznacza się, jednakże pewien wzrost wartości prądu przy powierzchni granicznej dwu warstw epitaksjalnych oraz na granicy z podłożem. Rozszerzony obraz zmian charakterystyki I_{EBIC} dla tego fragmentu próbki, przy zastosowaniu mniejszych odległości punktów pomiarowych podano na Rys. 6b.

Dla warstwy nr 2/1288 (Rys.7) maksimum zależności $I_{EBIC} = f(\Delta x)$ występuje w obszarze złącza p-n, a jednocześnie widoczne jest wyraźne zmniejszenie wartości prądu na powierzchni granicznej z podłożem.

Przedstawione profile zmian prądu I_{EBIC} charakteryzują złożony proces generacji i oddziaływania pól elektrycznych z nadmiarowymi nośnikami ładunku w epitaksjalnych złączach p-n i złączach l-h na granicy warstwa - podłoże. Zaznacza się również wpływ rekombinacji nośników na powierzchni warstw.

Obecność zanieczyszczeń metalicznych przejawia się zmianą profilu I_{EBIC} poprzez pewne poszerzenie maksimum oraz szybszy spadek wartości prądu na obszarze podłoża. W przypadku badanych wysokooporowych warstw, przybliżone określenie długości drogi dyfuzji nośników jest możliwe dopiero dla obszaru podłoża. Nawet dla warstw o zwiększonej grubości nie są spełnione warunki możliwości wykorzystania krzywych I_{EBIC} do określania długości drogi dyfuzji, w pierwszym przybliżeniu, ponieważ bariera potencjału na pograniczu z podłożem jest w odległości mniejszej, niż długość drogi dyfuzji nośników.

4. PODSUMOWANIE

Z analizy uzyskanych krzywych wynika, że w przypadku badanych warstw epitaksjalnych typu n i typu p maksimum prądu I_{EBIC} występuje w dwu obszarach:

- dla warstw typu n (nośnikami mniejszościowymi są dziury) maksymalna wartość prądu występuje przy złączu p-n lub przy barierze Schottky'ego,
- dla warstw typu p (nośnikami mniejszościowymi są elektrony), maksimum prądu I_{EBIC} występuje przy granicy warstwy z podłożem.

Dla obu typów warstw zmiany długości drogi dyfuzji nośników ładunku spowodowane wprowadzeniem atomów Ni, Fe, lub Cu sygnalizowane są przez szybszy spadek intensywności prądu I_{EBIC} w podłożu. Na obszarze warstw epitaksjalnych efekt ten jest przesłonięty złożonością wpływu wielu czynników na sygnał prądu, powiązany z długością drogi dyfuzji, a szczególnie wpływem granic z obszarami o innych właściwościach. O wartości prądu I_{EBIC} w badanych warstwach decydował głównie proces generacji nadmiarowych nośników ładunku. W przypadku obecności metali generacja par elektron - dziura zachodzi nie tylko w wyniku przejść pasmo - pasmo, ale również poprzez poziomy energetyczne zlokalizowane w przerwie wzbrow-

nionej. W badanych warstwach, długość drogi dyfuzji jest większa od grubości wysokooporowej warstwy epitaksjalnej i wtedy nie jest słuszne przybliżenie zależności wykładniczego zaniku nośników ładunku w funkcji odległości od złącza.

Dla serii próbek z warstwą typu n największe zmiany spowodowało wprowadzenie atomów Ni, dla serii próbek z warstwą typu p największe zmiany obserwowano po wprowadzeniu atomów Fe.

Ponadto, obserwowano zmiany w szerokości maksimum krzywych I_{EBIC} , ale są one trudne do liczbowej oceny. Należy je wiązać ze zwiększoną generacją par elektron - dziura z powodu istnienia dodatkowych poziomów energetycznych w przerwie wzbudzonej. W przypadku warstw typu p poszerzenie krzywych I_{EBIC} jest mniejsze z powodu bardziej złożonego procesu transportu generowanych nośników ładunku (dłuższa droga dyfuzji elektronów w stosunku do długości drogi dyfuzji dziur).

BIBLIOGRAFIA

- [1] Nossarzewska-Orłowska E., Sarnecki J., Wodzińska H., Skwarcz J.: Wpływ obecności Fe i Ni na własności krzemowych warstw epitaksjalnych. *Materiały Elektroniczne* 1994, 2, 11-24
- [2] Kamiński P, Kozłowski R, Nossarzewska-Orłowska E, Sarnecki J.: Deep-level defects in epitaxial silicon for VLSI technology. *Proceedings of the Fifth International Conference, Santander, Spain, 6-10 September 1993*, 217-220
- [3] Holt D.B.: *SEM Microcharacterization of Semiconductors*. London: Academic Press 1989, 226
- [4] Leamy H. J : Charge collection scanning electron microscopy. *Journal of Applied Physics* 53, 1982, 6, R 51-R80
- [5] Yakimow E.: Electron beam induced current investigations of inhomogeneities with spatial resolution. *Scanning Microscopy* 6, 1992, 1, 81-96
- [6] Donolato C.: An analytical model of SEM and STEM charge collection images of dislocations in thin semiconductor layers. *Physica Status Solidi (a)* 65, 1981, 2, 649-658
- [7] Everhart T. E., Hoff P. H.: Determination of kilovolt electron energy dissipation vs penetration distance in solid materials. *Journal of Applied Physics* 42, 1971, 5837-5846
- [8] Fitting H. J., Gleafeke H., Wild W.: Electron penetration and energy transfer in solid targets. *Physica Status Solidi (a)* 43, 1977, 1, 185-190
- [9] Romanowski A.: *Badanie półprzewodników metodami elektronowoltaicznymi*,. Prace Naukowe Instytutu Technologii Elektronowej Politechniki Wrocławskiej Nr 39 Seria Monografie Nr 14 Wrocław 1990, 10
- [10] Hoppe W., Kittler M.: On investigation of dopant boundaries in silicon device structures by means of SEM-EBIC. *Crystal Research and Technology* 24, 1989, 1, 65-81

- [11] Dicman S.A., Seleznieva S.S., Filippow S.S.: Ob opredelenii niekoto-rych parametrov poluprovodnikovych materialov i priborov elektronno-zondovym metodom, Izvestia Akademii Nauk SSSR, Seria fizičeskaja 41, 1977, 5, 942-950
- [12] Donolato C.: On the analysis of diffusion length measurements by SEM. Solid State Electronics 25, 1982, 11, 1077-1081
- [13] Kittler M., Schroder K. W.: Determination of semiconductor parameters and of the vertical structure of devices by numerical analysis of energy-dependent EBIC measurements. Physica Status Solidi (a) 77, 1983, 1, 139-151
- [14] Berz F., Kuiken H.K.: Theory of life time measurements with the scanning electron microscope: steady state. Solid State Electronics 19, 1976, 6, 437-445
- [15] Oelgart G., Fiddicke J., Reulke R.: Investigation of minority-carrier diffusion lengths by means of the SEM. Physica Status Solidi (a) 66, 1981 1, 283-292

SUMMARY

INFLUENCE OF METALLIC CONTAMINATIONS ON EBIC SIGNAL PROFILES IN SILICON EPILAYERS

The EBIC characteristics recorded from Si epitaxial layers with p-n junction and the metal-semiconductor barriers are presented. The changes of the shape of EBIC signal profiles after introducing the Ni, Fe or Cu atoms into the epilayers were noticed. The maximum of EBIC signals on the n-type epilayers were observed at the p-n junction. But for the p-type epilayers the maximum of EBIC signals were observed at the l-h adjacent to substrate. The biggest changes of EBIC profiles were observed for the n-type epilayers with Ni atoms and for the p-type with atoms of Fe.

СОДЕРЖАНИЕ

ВЛИЯНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА ПРОФИЛЬ ТОКА EBIC В КРЕМНИЕВЫХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЁНКАХ

Исследованы характеристики тока EBIC в кремниевых эпитаксиальных плёнках с n-p переходами или барьерами металл-полупроводник. Обнаружены изменения профиля тока EBIC после загрязнения атомами Ni, Fe или Cu по отношению к исходным плёнкам. Для плёнок n-типа максимум сигнала EBIC найден при n-p переходе, для p-типа - при l-h переходе на границе с подложкой. В плёнках n-типа значительные различия профилей сигнала EBIC были связаны с наличием атомов Ni, в p-типе с присутствием атомов Fe.