

POLSKA  
RZECZPOSPOLITA  
LUDOWA



URZĄD  
PATENTOWY  
PRL

# OPIS PATENTOWY

# 148 156

Patent dodatkowy  
do patentu nr \_\_\_\_\_

Zgłoszono: 85 06 20 (P. 254093)

Pierwszeństwo \_\_\_\_\_

Zgłoszenie ogłoszono: 87 01 12

Opis patentowy opublikowano: 1989 12 31

CZYTELNIA

Urzedu Patentowego  
Klasa 10.000.000.000.000

Int. Cl.<sup>4</sup> H01L 21/66  
G01R 31/26

Twórca wynalazku: Zbigniew Tadeusz Kuźnicki

Uprawniony z patentu: Polska Akademia Nauk, Instytut Podstawowych  
Problemów Techniki, Warszawa (Polska)

## SPOSÓB OKREŚLANIA GRUBOŚCI RZECZYWISTYCH WARSTW W EPITAKSJALNYCH STRUKTURACH WIELOWARSTWOWYCH

Przedmiotem wynalazku jest sposób określania grubości rzeczywistych warstw w epitaksjalnych strukturach wielowarstwowych metodą nieniszczącą. Znany jest ze zgłoszenia patentowego nr P. 252506 sposób pomiaru strukturalnego obszaru przejściowego w skokowych strukturach półprzewodnikowych.

Sposób ten polega na tym, że dokonuje się pomiaru profilu koncentracji nośników swobodnych metodą nieniszczącą, po czym określa się współczynnik strukturalnego obszaru przejściowego. Następnie na podstawie określonego współczynnika porównywanego z rozkładem koncentracji nośników, teoretycznym lub doświadczalnym, odtwarza się krzywą ilustrującą profil koncentracji domieszek wewnątrz obszaru przejściowego poprzez przeniesienie punktów tych rozkładów od międzypowierzchni złącza na poszukiwany profil.

Znane rozwiązanie ma zastosowanie w przypadku profili domieszkowych charakteryzujących się rozkładem monotonicznym wewnątrz jednego obszaru przejściowego. Celem wynalazku jest opracowanie sposobu pozwalającego na nieniszczący pomiar grubości warstw w epitaksjalnych strukturach wielowarstwowych.

Sposób zgodnie z wynalazkiem polega na tym, że dokonuje się pomiaru profilu koncentracji nośników swobodnych i określa na krzywej profilu minimalną koncentrację wewnątrz warstwy słabiej domieszkowanej, po czym wyznacza się koncentrację nośników w punkcie profilu doświadczalnego, odpowiadającemu położeniu międzypowierzchni.

Koncentracja ta obliczana jest ściśle na podstawie zależności:

$$U_S^* = \sqrt{2} \sqrt{\frac{N_{DII}}{N_{DI}}} \sqrt{\exp(U_B^* - U_S^*) - U_B^* + U_S^* - 1}$$

gdzie:  $U_B^*$  i  $U_S^*$  są znormalizowanymi potencjałami opisanymi wzorami:

$$U_B^* = \ln \frac{N_{DI}}{n_2^*} ; \quad U_S^* = \ln \frac{N_{DI}}{n_{m0}^*}$$

$n_2^*$ ,  $n_{m0}^*$  - koncentracja nośników swobodnych odpowiednio, na powierzchni ograniczającej i międzypowierzchni złącza,  $N_{DII}$  - koncentracja domieszek w obszarze słabiej domieszkowanym,  $N_{DI}$  - koncentracja domieszek w obszarze silniej domieszkowanym. Natomiast suma odległości pomiędzy płaszczyzną, wyznaczoną przez punkt na krzywej profilu, określającą minimalną koncentrację nośników swobodnych równoległą do międzypowierzchni, a jedną i drugą międzypowierzchnią wyznacza w sumie grubość warstwy słabiej domieszkowanej. Grubość warstwy silniej domieszkowanej określana jest przez odległość dwóch sąsiednich międzypowierzchni ograniczających tą warstwę.

Rozwiązanie według wynalazku wykorzystuje analityczną metodę opisu zależności koncentracji nośników swobodnych od odległości od międzypowierzchni w strukturach epitaksjalnych. Przedstawiony sposób według wynalazku znajduje zastosowanie w konstrukcji i technologii produkcji przyrządów półprzewodnikowych opartych na wielowarstwowych strukturach epitaksjalnych.

Przedmiot wynalazku zostanie bliżej objaśniony w przykładzie wykonania w oparciu o rysunek, na którym przedstawiono skokowe złącze 1-h z ograniczonym obszarem słabiej domieszkowanym wbudowanym w strukturę wielowarstwową.

Po określeniu profilu koncentracji nośników swobodnych w wielowarstwowej strukturze epitaksjalnej wykonanej w półprzewodniku jednego typu  $n$  lub  $p$  znane są koncentracje domieszek oraz minimalna koncentracja nośników w warstwach słabiej domieszkowanych  $n_2^*$  oraz maksymalna koncentracja nośników w warstwach silniej domieszkowanych  $n_1^*$ .

Jeśli warstwy silniej domieszkowane są dostatecznie grube, to w temperaturze pokojowej koncentracja  $n_1^*$  równa jest koncentracji domieszek ( $n_1^* = N_{DI}$ ). W większości przypadków warunek ten jest spełniony. Natomiast w przypadku koncentracji  $n_2^*$  wiadomo, że jest ona zwykle większa od koncentracji domieszek (szerszy obszar ładunku przestrzennego) niż w przypadku sąsiednich warstw silniej domieszkowanych  $n_2^* > N_{DII}$ .

Na podstawie doświadczalnej wielkości  $n_2^*$  można ze ścisłego wyrażenia, zgodnie z powyżej opisaną metodą, obliczyć koncentrację nośników swobodnych na międzypowierzchni pomiędzy obszarem silniej i słabiej domieszkowanym  $n_{m0}^*$ . Wyrażenie analityczne, na podstawie którego oblicza się  $n_{m0}^*$  przy znajomości  $n_2^*$  jest ściśle. Naniesienie wartości  $n_{m0}^*$  na doświadczalny profil koncentracji nośników swobodnych określa granice między poszczególnymi warstwami. Na tej podstawie można określić w bardzo dokładny sposób, ograniczony wyłącznie metodami pomiarowymi, grubości poszczególnych warstw struktury rzeczywistej.

W złączu 1-h można wyróżnić dwie podstawowe grupy złącz ograniczonych: złącza cienkie, w których oba obszary są ograniczone, złącza grube, w których tylko jeden obszar jest ograniczony drugi zaś, jest na tyle gruby, iż można go traktować jako półnieograniczony.

W drugim przypadku można ponadto mówić o ograniczeniu, bądź obszaru silniej domieszkowanego, bądź obszaru słabiej domieszkowanego. Niezależnie od tego można wyróżnić: złącza ograniczone samoistne, tzn. zajmujące całą bryłkę półprzewodnika - jedna międzypowierzchnia w danej strukturze półprzewodnikowej oraz złącza ograniczone wbudowane, np. w strukturę wielowarstwową - wiele międzypowierzchni w danej strukturze półprzewodnikowej. Złącza samoistne różnią się od złącz wbudowanych przede wszystkim tym, że obszar ograniczony jest dodatkowo zaburzony stanami powierzchniowymi powierzchni ograniczającej.

Spośród przedstawionych powyżej możliwości w przykładzie ograniczono się do opisu analitycznego złącza wbudowanego grubego, z ograniczonym obszarem słabiej domieszkowanym. Przedstawiony sposób jest przydatny we wszystkich pozostałych przypadkach.

Ponieważ założono, że analizowane jest skokowe złącze 1-h, w którym ograniczony jest tylko obszar słabiej domieszkowany, podstawowe zmiany dotyczące potencjału elektrostatycznego i funkcji pochodnych odnoszą się wyłącznie do tego obszaru. Przykład będzie bardziej uproszczony, jeśli założy się, że badana struktura stanowi fragment struktury wielowarstwowej, pozbawionej wpływu energetycznych stanów powierzchniowych.

Na podstawie właściwości elektrycznych w przypadku obszaru silnie domieszkowanego ograniczonego złącza 1-h funkcja rozkładu potencjału elektrostatycznego nie ulegnie żadnym zmianom w punkcie widzenia jej kształtu. Zmieni się wyłącznie wielkość potencjału elektrostatycznego  $\varphi_S^*$  na międzypowierzchni. Jest ona zależna nie tylko od poziomów domieszkowania i ich stosunków w obu obszarach, ale także od szerokości obszaru słabiej domieszkowanego. Całkowity ładunek elektryczny warstwy podwójnej złącza ulega zmniejszeniu proporcjonalnemu do ograniczenia szerokości obszaru słabiej domieszkowanego.

Wzory opisujące nieograniczony obszar silnie domieszkowany ograniczonego złącza 1-h o małym stosunku koncentracji domieszek mają następującą postać dla  $x \leq 0$ ,  $x = 0$  oznacza położenie międzypowierzchni

$$\begin{aligned}\varphi_1^* (x) &= \varphi_S^* \exp(x L_{DI}) ; \\ E_1^* (x) &= -\frac{\varphi_S^*}{L_{DI}} \exp(x L_{DI}) ; \\ \zeta_1^* (x) &= q N_{DI} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{q}{kT} \varphi_1^* (x)\right) \right] ; \\ n_1^* (x) &= N_{DI} \exp\left[-\frac{q}{kT} \varphi_1^* (x)\right],\end{aligned}$$

gdzie:  $\varphi_S^*$  - potencjał na międzypowierzchni złącza ograniczonego,  $L_{DI}$  - droga Debye'a w obszarze silnie domieszkowanym,  $N_{DI}$  - koncentracja domieszek w obszarze silnie domieszkowanym,  $q$  - ładunek elementarny,  $k$  - stała Boltzmanna,  $T$  - temperatura absolutna.

Zgodnie z prawem zachowania ładunku, warunek neutralności elektrycznej, ładunek całkowity złącza ograniczonego ulega zmniejszeniu w stosunku do tak samo domieszkowanego, co do poziomów koncentracji i ich stosunku, złącza nieograniczonego. Po scałkowaniu równania Poissona jednokrotnie w przestrzeni potencjału otrzymujemy:

$$\left[ E_2^* (x) \right]^2 = \frac{2}{L_{DII}^2} \left( \frac{kT}{q} \right)^2 \left\{ \exp\left[ U_B^* - U_2^* (x) \right] - U_B^* + U_2^* (x) - 1 \right\}$$

gdzie:  $U_B^*$  i  $U_2^* (x)$  - znormalizowane potencjały odpowiednio: dyfuzyjny i w dowolnym punkcie obszaru słabiej domieszkowanego,  $L_{DII}$  - droga Debye'a w obszarze słabiej domieszkowanym.

W stanie równowagi wartość wewnętrznego pola elektrycznego na powierzchni ograniczającej wynosi 0

$$E_2^* (l_G) = 0 ,$$

gdzie  $l_G$  jest szerokością ograniczonego obszaru złącza. Po uwzględnieniu wcześniejszych zależności otrzymuje się równanie:

$$\exp\left[ U_B^* - U_2^* (l_G) \right] - U_B^* + U_2^* (l_G) = 1 ,$$

które może być spełnione tylko wówczas, gdy

$$U_2^* (l_G) = U_B^* \leq U_B .$$

Ograniczenie obszaru słabiej domieszkowanego powoduje zmniejszenie wysokości bariery poten-

cjału w złączeniu.

Na podstawie powyższych równań można znaleźć ponadto zależność pomiędzy koncentracjami nośników swobodnych na międzypowierzchni i na powierzchni ograniczającej. Korzystając z zasady neutralności elektrycznej, po porównaniu wyrażań dla  $x = 0$  mamy

$$U_S^* = \sqrt{2} \sqrt{\frac{N_{DII}}{N_{DI}}} \sqrt{\exp(U_B^* - U_S^*) - U_B^* + U_S^* - 1}$$

gdzie  $U_B^*$  i  $U_S^*$  są znormalizowanymi potencjałami opisanymi wzorami

$$U_B^* = \ln \frac{N_{DI}}{n_2^*}$$

$$U_S^* = \ln \frac{N_{DI}}{n_{m0}^*}$$

$n_2^*$ ,  $n_{m0}^*$  - koncentracja nośników swobodnych odpowiednio: na powierzchni ograniczającej i międzypowierzchni złącza,

$N_{DII}$  - koncentracja domieszek w obszarze słabiej domieszkowanym.

Zależność ta jest wyrażeniem ścisłym wężącym jednoznacznie warunki brzegowe występujące na krawędziach ograniczonego obszaru słabiej domieszkowanego skokowego złącza 1-h. Określenie którejkolwiek z koncentracji  $n_{m0}^*$  lub  $n_2^*$  jest równoznaczne z określeniem wszystkich interesujących warunków brzegowych, dotyczących koncentracji nośników, potencjałów i pól elektrycznych.

#### Z a s t r z e ż e n i e   p a t e n t o w e

Sposób określania grubości rzeczywistych warstw w epitaksjalnych strukturach wielowarstwowych metodą nieniszczącą, polegający na pomiarze profilu koncentracji nośników swobodnych i określeniu minimalnej koncentracji wewnątrz warstwy słabiej domieszkowanej, z n a m i e n n y   t y m , że po określeniu minimalnej koncentracji nośników swobodnych wewnątrz warstwy słabiej domieszkowanej na krzywej profilu koncentracji wyznacza się koncentrację tych nośników na międzypowierzchni znajdującej się w punkcie profilu doświadczalnego, w którym koncentracja równa jest koncentracji ściśle obliczonej na podstawie zależności:

$$U_S^* = \sqrt{2} \sqrt{\frac{N_{DII}}{N_{DI}}} \sqrt{\exp(U_B^* - U_S^*) - U_B^* + U_S^* - 1}$$

gdzie:  $U_B^*$  i  $U_S^*$  są znormalizowanymi potencjałami opisanymi wzorami:

$$U_B^* = \ln \frac{N_{DI}}{n_2^*}; \quad U_S^* = \ln \frac{N_{DI}}{n_{m0}^*}$$

$n_2^*$ ,  $n_{m0}^*$  - koncentracja nośników swobodnych odpowiednio, na powierzchni ograniczającej i międzypowierzchni złącza,

$N_{DII}$  - koncentracja domieszek w obszarze słabiej domieszkowanym,

$N_{DI}$  - koncentracja domieszek w obszarze silniej domieszkowanym, natomiast odległość pomiędzy powierzchnią wyznaczoną punktem na krzywej profilu określającym minimalną koncentrację nośników swobodnych, równoległą do międzypowierzchni, a jedną i drugą międzypowierzchnią wyznaczają w sumie grubość warstwy słabiej domieszkowanej i równocześnie odległość pomiędzy dwiema międzypowierzchniami ograniczającymi warstwę silniej domieszkowaną określa grubość tej warstwy.

