

Epitaksja odwrotna w technologii otrzymywania krzemowych przyrządów półprzewodnikowych

WSTĘP

Ograniczona czystość materiałów wyjściowych oraz niekontrolowane zanieczyszczenia, wprowadzane do warstwy epitaksjalnej w trakcie jej wzrostu, uniemożliwiają obecnie uzyskanie w produkcji masowej krzemowych warstw epitaksjalnych o rezystywności powyżej $100 \Omega \cdot \text{cm}$. W technologii otrzymywania przyrządów półprzewodnikowych, w których wymagana jest wysokorezystywna warstwa na niskorezystywnym podłożu, jest stosowana tzw. epitaksja odwrotna. W tym przypadku w procesie epitaksji na wysokorezystywnym podłożu narasta silnie domieszkowana warstwa epitaksjalna, o grubości około $100 \mu\text{m}$ służąca m.in. jako nośnik mechaniczny materiału wysokorezystywnego, którego nadmiar usuwa się po procesie epitaksji do żądanej grubości.

Metoda ta jest wykorzystywana w technologii wytwarzania krzemowych przyrządów półprzewodnikowych opartych na strukturze PIN, która składa się z dwóch obszarów niskorezystywnych o przeciwnym typie przewodnictwa, rozdzielonych obszarem wysokorezystywnym.

1. OSADZANIE GRUBYCH NISKOREZYSTYWNYCH WARSTW EPITAKSJALNYCH

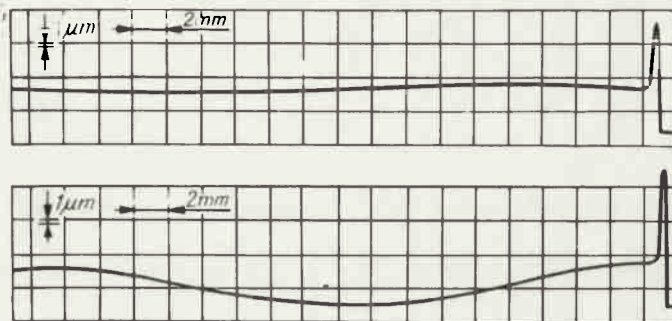
W procesie epitaksji osadzano warstwę domieszkowaną fosforem o rezystywności około $0,01 \Omega \cdot \text{cm}$ i grubości około $100 \mu\text{m}$. Płytki podłożowe z krzemu monokrystalicznego o rezystywności $1,5 - 3,0 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ typu n, były cięte w płaszczyźnie (111) z dezorientacją $2^\circ \pm 30'$. Powierzchnia, na której narastała warstwa była polerowana metodą mechaniczno-chemiczną, a powierzchnia tylna płytki – trawiona.

Proces epitaksji prowadzono w urządzeniu z poziomą komorą reakcyjną chłodzoną powietrzem. Grzany indukcyjnie grzejnik grafitowy, na którym układano płytki podłożowe, był pokrywany warstwą krzemu polikrystalicznego o grubości około $6 \mu\text{m}$. Bezpośrednio przed wzrostem epitaksjalnym płytki podłożowe były poddawane trawieniu gazowym HCl w temperaturze 118°C . Jako źródło krzemu używano SiCl_4 , a do domieszkowania warstw stosowano PH_3 w H_2 o koncentracji 100 ppm.

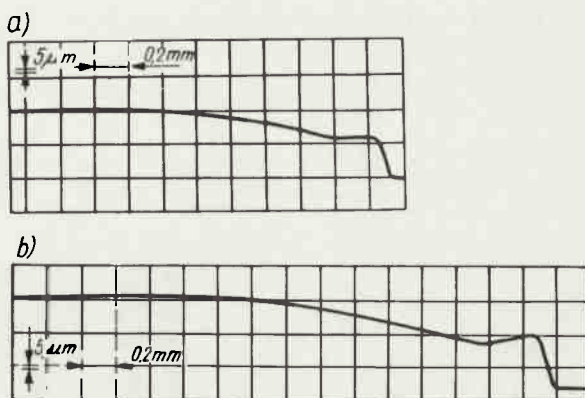
Wzrostowi epitaksjalnemu na powierzchni płytki podłożowej towarzyszy narastanie krzemu polikrystalicznego na grzejniku grafitowym oraz no ściankach bocznych płytek. W rezultacie płytka obrosnięta jest polikrystalicznym krzemem do wysokości około $100 \mu\text{m}$ i podczas stygnięcia grzejnika ulega ścisnaniu przez tę warstwę, co powoduje znaczne wygięcie/wklęsłość od strony podłoża/, a nawet pękanie płytek. W celu



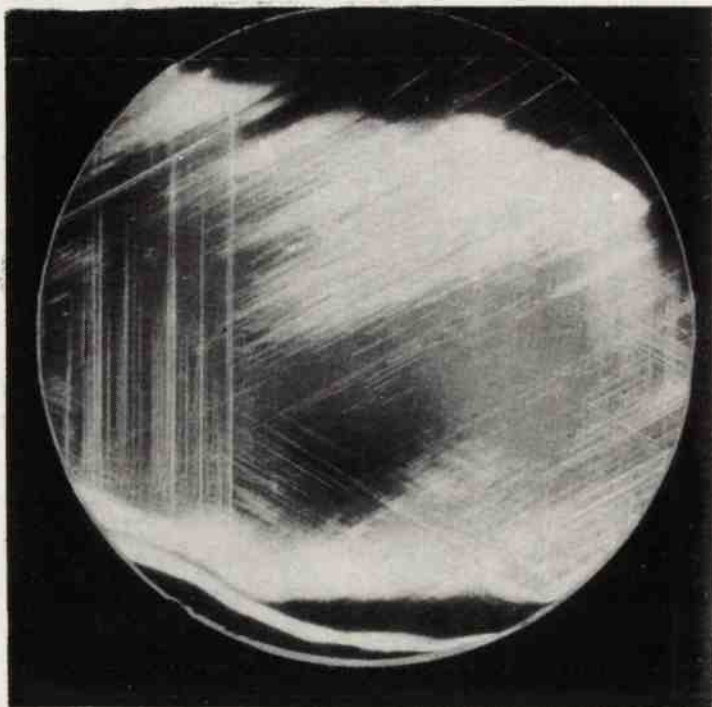
Rys. 1. Profil brzegu płytki krzemowej z zaokrąglonym brzegiem



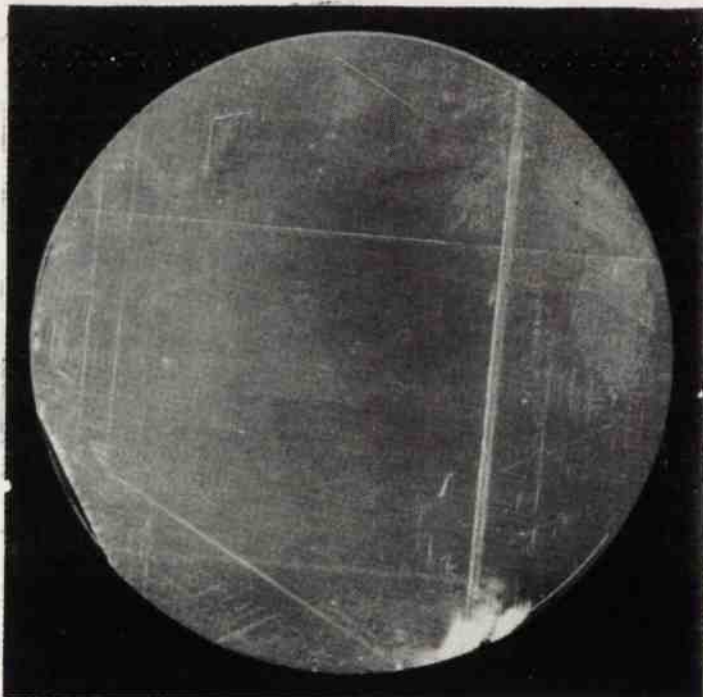
Rys. 2. Profile powierzchni płytki krzemowej z "koroną" na obrzeżu, zdjęte w dwóch prostopadłych kierunkach



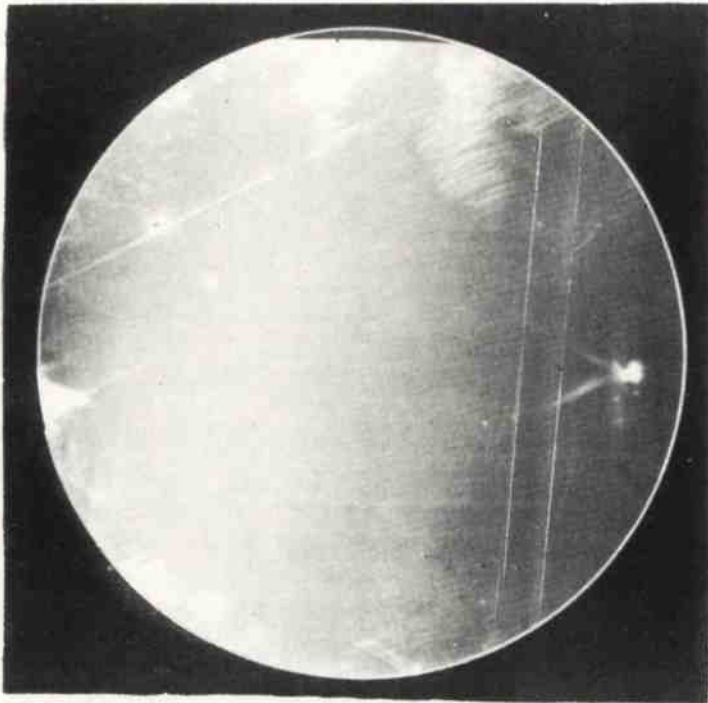
Rys. 3. Profile "korony" narosłej na obrzeżu płytki z zaokrąglonymi brzegami
a/ od strony warstwy epitoksjalnej, b/ od strony odwrotnej



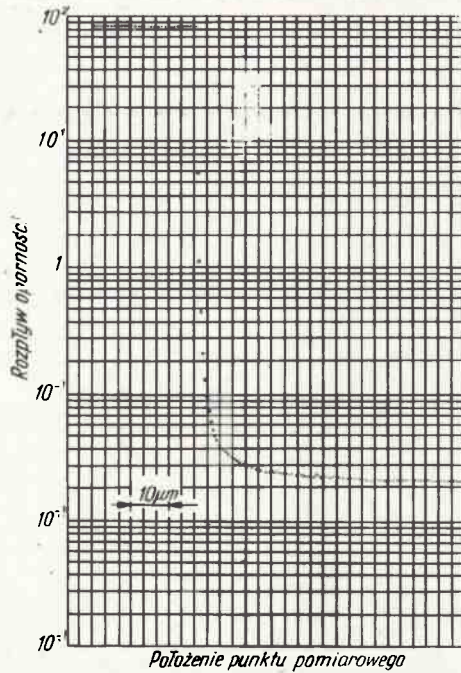
Rys. 4. Topogram płytki z warstwą epitaksjalną. Promień krzywizny $R = 108$ m



Rys. 5. Topogram płytki z warstwą epitaksjalną. Promień krzywizny $R = 40$ m



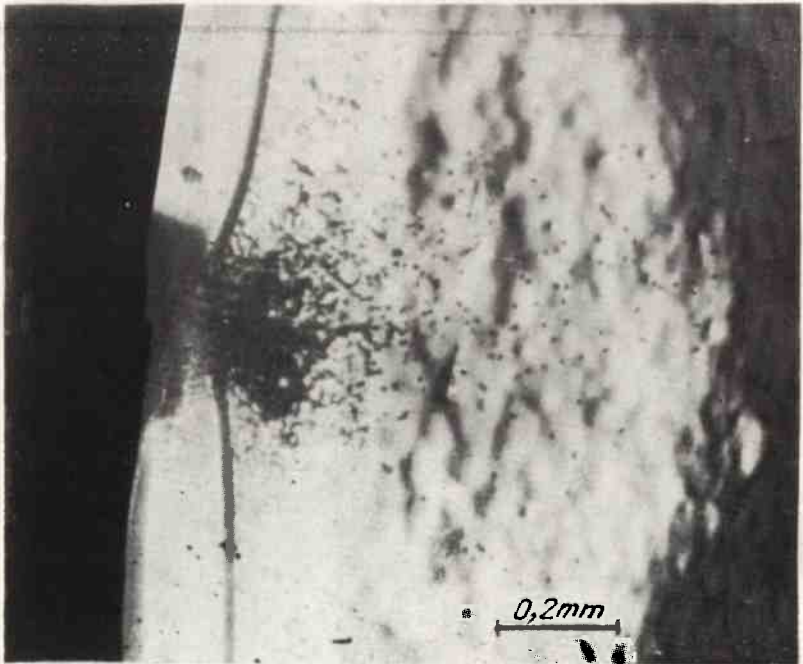
Rys. 6. Topogram płytki z warstwą epitaksjalną, Promień krzywizny $R = 48$ mm



Rys. 8. Profil rezystywności na granicy warstwy epitaksjalna-podłoża. Rezystywność podłoża $1,5 \text{ k}\Omega$
 Rezystywność warstwy $0,01\Omega \cdot \text{cm}$, grubość warstwy $80 \mu\text{m}$



Rys. 7. Dyslokacje na płytce podłożowej po epitaksji
a/ na krawędzi płytki, b/ w miejscu wyszczerbienia



Rys. 7. Dyslokacje na płytce podłożowej po epitaksji
a/ na krawędzi płytki, b/ w miejscu wyszczerbienia

wyeliminowania tego zjawiska zastosowano płytki z brzegami zaokrąglonymi przez trawienie chemiczne. Profil takiej płytki pokazany jest na rys. 1.

Dodatkowym problemem przy otrzymywaniu grubych warstw epitaksjalnych na płaszczyźnie (111) jest tzw. "korona". Szybkość wzrostu epitaksjalnego zależy od kierunku krystalograficznego i jest najmniejsza w kierunku $\langle 111 \rangle$. Na skutek tego na obrzeżu płytek zachodzi szybszy wzrost krzemu i powstaje "korona", której wysokość nad powierzchnią warstwy może dochodzić do grubości tej warstwy. Profil powierzchni płytki z "koroną" na obrzeżu pokazano na rys. 2. Po procesie epitaksji "korona" musi być usunięta przez zeszlifowanie lub obcięcie, ponieważ uniemożliwia ona dalsze etapy obróbki płytek. Stanowi to dodatkową operację, w której płytka łatwo może ulec zniszczeniu. Zastosowanie płytki podłożowej z zaokrąglonymi brzegami rozwiązuje również ten problem, ponieważ w tym przypadku "korona" jest znacznie niższa i nie przeszkadza w dalszej obróbce płytek. Ilustruje to rys. 3.

Stosując płytki z zaokrąglonymi brzegami osadzano warstwy o grubości do 150 μm . Płytki nie pękały w trakcie stygnięcia grzejnika i były wygięte zgodnie z warunkami niedopasowania sieciowego, tzn. wklęsłe od strony warstwy epitaksjalnej.

W omawianym przypadku w procesie epitaksji powstaje struktura trójwarstwowa. Podłoże stanowi płytka z krzemu monokrystalicznego o rezystywności powyżej 1 $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$, co odpowiada koncentracji domieszek poniżej $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. Na stronie polerowanej narasta warstwa epitaksjalna o rezystywności około 0,01 $\Omega \cdot \text{cm}$, domieszkowana fosforem, co odpowiada jego koncentracji $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Na odwrotnej stronie płytki podłożowej narasta warstwa bardzo zdefektowanego krzemu, przenieszonego z pokrycia grzejnika grafitowego, zadomieszkowana fosforem do poziomu 10^{15} cm^{-3} .

Zagadnienie niedopasowania sieciowego warstwy epitaksjalnej i podłoża było omawiane w artykule [1]. Różnica promieni kowalencyjnych atomów krzemu i fosforu powoduje różnicę stałej sieciowej obszaru podłoża i warstwy epitaksjalnej. Wynikłe stąd niedopasowanie sieciowe jest przyczyną dwóch zjawisk: wygięcia płytki i powstania sieci dyslokacji niedopasowania - po przekroczeniu pewnej granicznej grubości warstwy. W omawianym przypadku niedopasowanie sieciowe wynosi $5 \times 10^{-4}\%$, przewidywany promień krzywizny - około 50 m /wklęsłość od strony warstwy/, a graniczna grubość warstwy, powyżej której należy się spodziewać generacji dyslokacji niedopasowania - 56 μm .

W Pracowni Rentgenowskiej ONPMP, metodą transmisyjnej topografii rentgenowskiej z użyciem komory Langa wykonano topogramy przedstawione na rys. 4, 5, 6. Przed wykonaniem topogramów usunięto zdefektowaną warstwę narosłą na tylnej stronie płytki. Grubość warstwy epitaksjalnej na wszystkich płytkach była około 80 μm , a koncentracja fosforu w warstwie około $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Z pomiarów rentgenowskich wynika, że płytki są wklęsłe od strony warstwy, a promień krzywizny jest powyżej 40 m, co odpowiada strzałce ugięcia około 5 μm . W płytce przedstawionej na rys. 4 widoczna jest gęsta sieć dyslokacji niedopasowania. Jednocześnie promień krzywizny tej płytki jest większy, niż wynika to z teorii niedopasowania. Można przypuszczać, że naprężenia elastyczne spowodowane niedopasowaniem sieciowym zrelaksowały się przez powstanie sieci dyslokacji niedopasowania.

W płytkach pokazanych na rys. 5 i 6 nie zaobserwowano dyslokacji niedopasowania, widoczne są tylko krótkie pasma poślizgu przy brzegu płytek oraz skupiska dyslokacji wychodzących na powierzchnię, również w obszarze przybrzeżnym. Po wytrawieniu w roztworze Sirtla obserwuje się dużą ilość jamek trawienia od strony podłoża, ułożonych w formie pierścienia przy brzegu płytki. Ich gęstość maleje w kierunku do środka

płytki. Skupiska dyslokacji występują również w miejscach uszkodzeń mechanicznych na płytce podłożowej. Rys. 7a, b – to zdjęcia płytek od strony podłoża z ujawnionymi dyslokacjami. Dyslokacje te powstają prawdopodobnie na skutek naprężeń powstających przy stygnięciu grzejnika grafitowego. Nie przechodzą one przez całą płytkę i od strony warstwy epitaksjalnej obserwuje się tylko pojedyncze jamki trawienia.

2. PARAMETRY OBSZARU PODŁOŻA I WARSTWY PO PROCESIE EPITAKSJI

Proces epitaksji jest prowadzony w wysokiej temperaturze /około 1180°C/. Przeprowadzono badania, które miały wykazać, w jakim stopniu wpływa on na parametry wysokorezystywnego obszaru podłoża. W tym celu wykonano pomiary drogi dyfuzji [2] w płytce podłożowej przed i po procesie epitaksji. Pomiary przeprowadzono dla dwóch serii procesów, które różniły się szybkością studzenia grzejnika grafitowego z płytkami – po zakończeniu procesu wzrostu. W serii I studzenie było powolne /od 1180 do 1000°C z szybkością około 5°C/min/, natomiast w serii II spadek temperatury od 1180 do 1000°C zachodził w czasie 2 min. W każdej serii były prowadzone procesy z szybkością wzrostu epitaksjalnego 0,7 $\mu\text{m}/\text{min}$ i 1,2 $\mu\text{m}/\text{min}$. Uzyskane wartości drogi dyfuzji nośników nadmiarowych w płytce podłożowej po procesie epitaksji pozostają na poziomie wartości określonych przed epitaksją i wynoszą 0,20–0,50 mm. Obserwuje się lokalnie obniżenie drogi dyfuzji w pobliżu brzegów płytek, co spowodowane jest występowaniem w tym obszarze naprężeń mechanicznych, defektów powierzchniowych oraz dyslokacji. Pomiary nie wykazały różnic w płytkach różnie studzonych oraz zależności od szybkości wzrostu warstwy. A zatem możliwe jest prowadzenie procesu epitaksji z szybkością wzrostu powyżej 1 $\mu\text{m}/\text{min}$, co zmniejsza czas trwania procesu.

W otrzymanych płytkach z warstwami epitaksjalnymi określono również naprężenia mechaniczne [2]. Ich wielkość nie przekracza na ogół 300 kG/cm^2 , ale w miejscach uszkodzeń mechanicznych jest znacznie większa i sięga 2000 kG/cm^2 . Z danych literaturowych wynika, że naprężenia w płytkach krzemu na poziomie określonym przez badania nie powinny wpływać na parametry elektryczne materiału.

Ponieważ koncentracja fosforu w warstwie epitaksjalnej sięga powyżej 10^{18} cm^{-3} , podczas wzrostu warstwy następuje jego dyfuzja do wysokorezystywnego podłoża. Metodą rezystancji rozplwy w styku punktowym na szlifie skośnym określono rozkład rezystywności na granicy podłoża-warstwa epitaksjalna. Rozkład ten przedstawiono na rys. 8.

Powyższe badania wykazały, że wysokotemperaturowy proces epitaksji nie wprowadza do obszaru podłoża zmian, które mogłyby wpłynąć na parametry diod półprzewodnikowych typu PIN. Wniosek ten został potwierdzony przy opracowaniu w Instytucie Technologii Elektronowej diod telewizyjnych i fotodiod krzemowych typu PIN.

PODSUMOWANIE

Metoda epitaksji odwrotnej może być z powodzeniem stosowana w technologii wytwarzania przyrządów półprzewodnikowych. Jest ona szczególnie przydatna w przypadku przyrządów, których konstrukcja jest oparta na złączu typu PIN.

Zastosowanie płytek podłożowych z zaokrąglonymi brzegami umożliwia osadzanie warstw epitaksjalnych o grubości powyżej 100 μm . Warstwa taka może służyć jako nośnik mechaniczny o odpowiednich parametrach elektrycznych.

Literatura

1. Nossorzewska-Orłowska E., A. Lachowski: Materiały Elektroniczne 4, 1976
2. Sikorski S., Świdorski J.: Fotelektryczne kryteria oceny materiałów półprzewodnikowych. PWN, Warszawa 1968