

Metoda otrzymywania monokrystalicznych folii krzemowych z wykorzystaniem krzemu porowatego

Jerzy Sarnecki, Andrzej Brzozowski, Dariusz Lipiński

Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych

ul. Wólczyńska 133, 01 - 919 Warszawa;

e-mail: jerzy.sarnecki@itme.edu.pl

Streszczenie: Określono warunki i opracowano metodę otrzymywania folii krzemowych o grubości do $\sim 100 \mu\text{m}$ i wymiarach $50 \times 50 \text{ mm}$. Metoda ta polega na odrywaniu warstw epitaksjalnych osadzanych na porowatej powierzchni płytki krzemowej typu p^+ . Opracowano oryginalną metodę odrywania warstwy epitaksjalnej łączącą działanie obniżonego ciśnienia i kąpieli w gorącej wodzie.

Słowa kluczowe: warstwa epitaksjalna, krzem porowaty, CVD, folia krzemowa

A method of obtaining monocrystalline silicon foils using porous silicon

Abstract: A method of obtaining silicon foil with the thickness of up to $100 \mu\text{m}$ and dimensions $50 \times 50 \text{ mm}$ was worked out and experimental conditions were determined. This technique consists in the separation of epitaxial layers deposited on the porous surface of the p^+ silicon wafer. Such an original method of epitaxial layer separation, combining the effect of low pressure and a bath in hot water, was developed.

Key words: epitaxial layer, porous silicon, CVD, silicon foil

1. Wprowadzenie

Przedstawione w artykule wyniki dotyczą prac będących kontynuacją badań związanych z krzemowymi warstwami epitaksjalnymi do zastosowań fotowoltaicznych osadzanych na krzemie porowatym [1].

W efekcie przeprowadzonych wówczas prac technologicznych ustalono warunki wytwarzania warstw o odpowiedniej porowatości zapewniającej osadzenie w procesie epitaksji z fazy gazowej (CVD) warstw Si o grubości dochodzącej do $\sim 50 \mu\text{m}$. W funkcji rezystywności płytek krzemowych określono związek między gęstością prądu w procesie porowacenia a porowatością płytek krzemowych typu p^+ oraz wyznaczono zależność prędkości powstawania warstwy porowatej od gęstości natężenia prądu. Znajomość tych zależności umożliwiła projektowanie głębokości i stopnia porowatości monokrystalicznych płytek krzemowych przy zmiennym (dwustopniowym) profilu porowatości w głąb płytki i zapewniła wytworzenie na powierzchni płytek p^+ o orientacji $\langle 111 \rangle$ i $\langle 100 \rangle$ oraz rezystywności w zakresie $0,05 \text{ ohmcm} - 0,003 \text{ ohmcm}$ podwójnej warstwy krzemu porowatego. Na podwójną warstwę porowatą składa się powierzchniowa warstwa o małej wartości sporowacenia (LPor) mieszczącej się w przedziale $10\% - 20\%$ i umożliwiająca wzrost epitaksjalnej warstwy Si oraz warstwa zagrzebana o dużej wartości sporowacenia (HPor) dochodzącej do 70% , co jest warunkiem wymaganym do odseparowania (oderwania) warstwy epitaksjalnej od wyjściowego podłoża [1].

Właściwe przygotowanie podłoża z powierzchniową warstwą LPor oraz warstwą zagrzebaną HPor posłużyło

określeniu parametrów procesu epitaksji warstw krzemowych i otrzymaniu warstw epitaksjalnych o zadawalającej jakości strukturalnej i zakładanych parametrach elektrycznych, jak to potwierdziły obserwacje za pomocą SEM i pomiary metodami XRD i SR [1].

Podjęto zatem badania, których celem było określenie warunków i opracowanie metody otrzymywania cienkich folii krzemowych o grubości do $\sim 100 \mu\text{m}$ w wyniku procesu odrywania warstwy epitaksjalnej osadzonej na porowatej powierzchni płytki podłożowej. Badania dotyczyły także możliwości powtórnego przygotowania płytki podłożowej z warstwą porowatą do procesu epitaksji i kolejnego uwolnienia warstwy epitaksjalnej.

W efekcie przeprowadzonych prac określono najbardziej odpowiednie warunki wytworzenia dwuwarstwowej struktury porowatej w płytkach p^+ Si o orientacji $\langle 111 \rangle$ i $\langle 100 \rangle$, zapewniającej w procesie CVD zarówno wzrost warstw epitaksjalnych o założonych parametrach elektrycznych i grubości około $100 \mu\text{m}$ jak i umożliwiającej oddzielenie warstwy epitaksjalnej od wyjściowego podłoża.

Opisywana w literaturze metoda odrywania krzemowych warstw epitaksjalnych osadzonych na warstwie krzemu porowatego wykorzystująca drgania mechaniczne wytwarzane w płuczce ultradźwiękowej, okazała się w naszym przypadku nieskuteczna. Nie podjęto prób eksfoliacji z zastosowaniem mikrostrumienia wodnego pod ciśnieniem (tzw. noża wodnego) skierowanego w obszar porowaty między warstwą epitaksjalną a podłożem, gdyż metoda ta wymaga dodatkowego precyzyjnego oprzyrządowania [2].

Opracowana została natomiast nowatorska metoda polegająca na wstępnym osłabieniu w warunkach obniżo-

nego ciśnienia połączeń między warstwą o dużej wartości sporowacenia a płytką bazową i następnie całkowitemu uwolnieniu warstwy epitaksjalnej podczas wygrzewania płytki w wodzie o temperaturze 90 °C – 100 °C w czasie ~ 60 min. Jest to w pełni oryginalna metoda odrywania epitaksjalnej warstwy krzemowej osadzonej na powierzchni krzemu porowatego, która umożliwiła nam otrzymanie folii krzemowych o grubości w zakresie od 30 μm do 105 μm i wymiarach 50 x 50 mm.

2. Struktury epitaksjalne

Płytki z warstwą epitaksjalną osadzaną na warstwie krzemu porowatego, które posłużyły do określenia metody umożliwiającej oddzielenie warstwy epitaksjalnej od podłoża, wytworzono w trzech etapach:

Etap I - podwójne porowacenie płytki podłożowej,

Etap II - wygrzewanie w wodzie płytki z warstwą porowatą w celu zaślepienia porów,

Etap III - osadzanie warstw epitaksjalnych na warstwie krzemu porowatego.

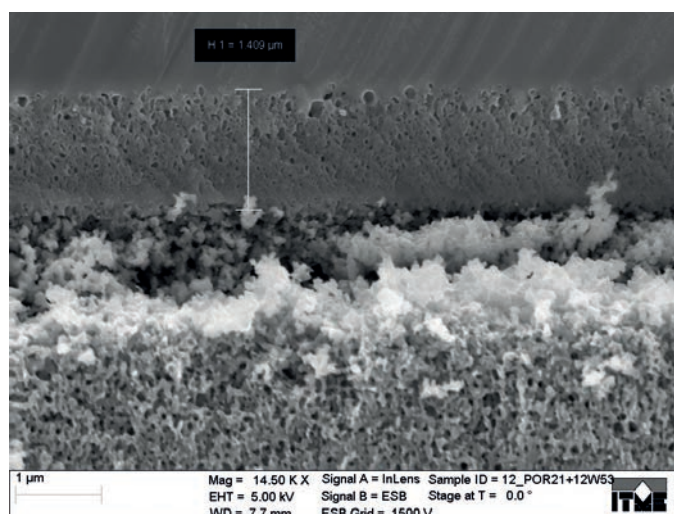
Określenie zależności między gęstością prądu trawienia a porowatością i szybkością z jaką zachodzi porowacenie monokrystalicznego krzemu o danej rezystywności pozwoliło na kontrolę grubości i stopnia sporowacenia wytworzonej warstwy. Ze wzrostem gęstości prądu trawienia zwiększa się porowatość wytrawionej warstwy. Dla określonej wartości gęstości prądu trawienia obniżenie rezystywności płytek powoduje zwiększenie porowatości wytrawionej warstwy [1].

Płytki krzemowe typu p^+ o średnicy 76 mm o rezystywności w zakresie 0,008 – 0,02 Ωcm, domieszkowane borem o orientacji <111> i <100> z powierzchniową warstwą porowatą, które stanowiły wyjściowe podłoże do epitaksji warstw Si przygotowano dwuetapowo. Początko-

wo, w pierwszej fazie porowacenia, wartość gęstości prądu mieściła się w przedziale od 0,2 mA/cm² do 2,5 mA/cm². W drugiej fazie zastosowano prądy o wyższej gęstości w zakresie od 3 mA/cm² do 100 mA/cm² w zależności od orientacji i rezystywności płytki p^+ . W rezultacie wytworzono w płytkach dwuwarstwowy obszar porowaty, jaki tworzyła przypowierzchniowa warstwa porowata o niskiej porowatości 10 % - 15 % i grubości ~ 1 μm oraz warstwa o wyższej porowatości dochodzącej do ~ 33 % w płytkach o orientacji <111> i do 50 % w płytkach o orientacji <100>. Grubość warstwy zagrzebanej Hpor w obu przypadkach wynosiła ~ 15 μm. Grubość warstwy porowatej wytwarzanej przy zadanej gęstości prądu była zależna od czasu trawienia. Przeprowadzono ponad 50 procesów elektrochemicznego porowacenia.

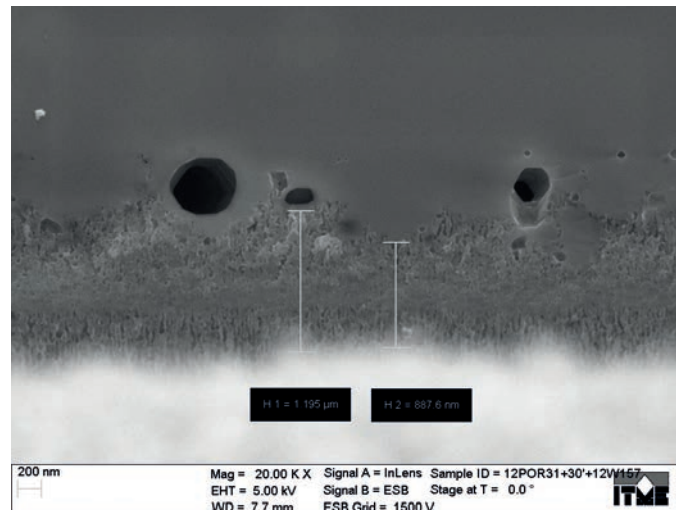
Proces osadzania warstw epitaksjalnych na płytce z dwuwarstwową strukturą krzemu porowatego poprzedzało wygrzewanie płytek w atmosferze wodoru w temperaturze 1100 °C. Wygrzewanie powodowało zaślepienie porów na powierzchni zewnętrznej warstwy LPor i prowadziło do wygładzenia jej powierzchni. Płytki wygrzewano w czasie 30, 60 i 90 minut. Procesy epitaksji metodą CVD przeprowadzono w urządzeniu do epitaksji krzemu Gemini 1 z grzaniem indukcyjnym. Warstwy osadzano z szybkością ~ 1 μm/min.

Rys. 1 – 5 przedstawiają mikrostruktury przekrojów poprzecznych płytek z warstwą epitaksjalną osadzoną na warstwie krzemu porowatego uzyskane za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM). Płytki różniły się czasami wygrzewania poprzedzającego wzrost warstw epitaksjalnych. Z mikrostruktur SEM wynika, że wygrzewanie w czasie 30 min prowadzi do wystarczająco jednorodnej powierzchni umożliwiającej wzrost warstwy monokrystalicznej. W czasie wygrzewania pory koagulują tworząc pustki (*voids*). Warstwa o niskiej porowatości przekształca się w warstwę monokrystaliczną



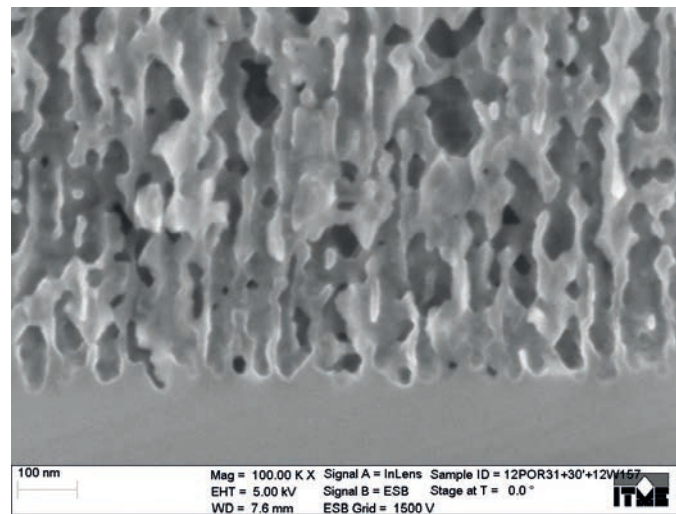
Rys. 1. Obraz mikrostruktury obszaru przejścia warstwa epitaksjalna – warstwa porowata w strukturze epitaksjalnej $n/p/p^+$ o orientacji <111>. Czas wygrzewania przed osadzeniem warstwy wynosił 30 min.

Fig. 1. SEM micrograph of interface between epitaxial layer and porous layer in <111> oriented $n/p/p^+$ structure. The annealing time before deposition was 30 minutes.



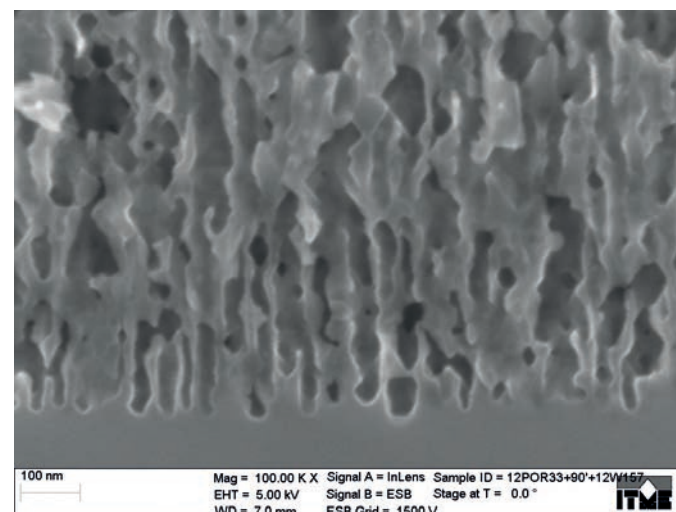
Rys. 2. Obraz mikrostruktury obszaru przejścia warstwa epitaksjalna – warstwa porowata w strukturze epitaksjalnej p/p^+ o orientacji $\langle 100 \rangle$. Czas wygrzewania przed osadzeniem warstwy wynosił 30 min.

Fig. 2. SEM micrograph of interface between epitaxial layer and porous layer in $\langle 100 \rangle$ oriented p/p^+ structure. The annealing time before deposition was 30 minutes.



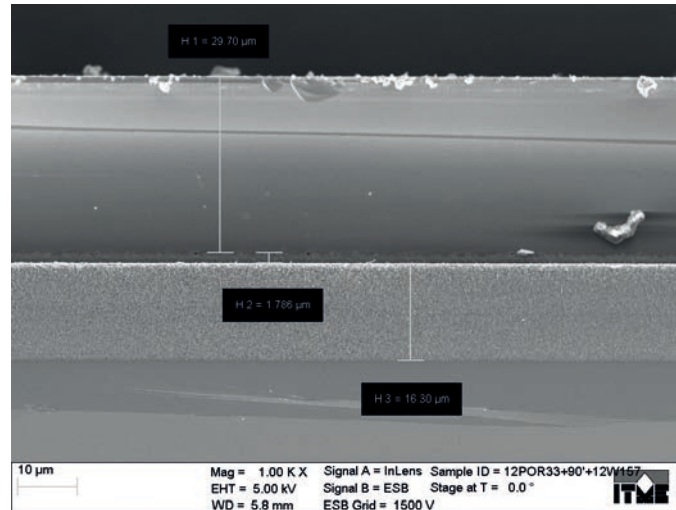
Rys. 3. Obraz SEM warstwy HPor w płytce p^+ o orientacji $\langle 100 \rangle$. Czas wygrzewania przed osadzeniem warstwy wynosił 30 min.

Fig. 3. SEM image of high porosity layer in $\langle 100 \rangle$ oriented p^+ wafer. The annealing time before deposition was 30 minutes.



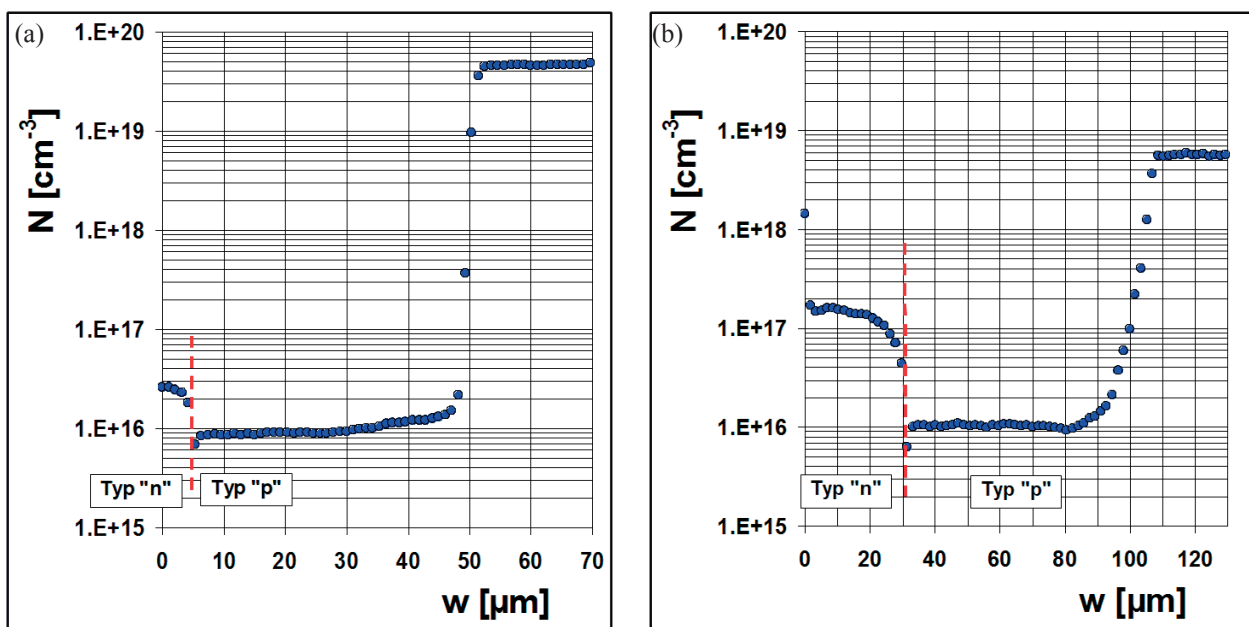
Rys. 4. Obraz SEM warstwy HPor w płytce p^+ o orientacji $\langle 100 \rangle$. Czas wygrzewania przed osadzeniem warstwy wynosił 90 min.

Fig. 4. SEM image of high porosity layer in $\langle 100 \rangle$ oriented p^+ wafer. The annealing time before deposition was 90 minutes.



Rys. 5. Obraz przekroju poprzecznego płytki p^+ o orientacji $\langle 100 \rangle$: z warstwą epitaksjalną o grubości $\sim 30 \mu\text{m}$, Grubość warstwy o niskiej porowatości ($\sim 12.5\%$) wynosi $\sim 1,5 \mu\text{m}$, a grubość warstwy o wysokiej porowatości ($\sim 45\%$) wynosi $\sim 15 \mu\text{m}$. Osadzenie warstwy epitaksjalnej poprzedzało 90 min wygrzewania.

Fig. 5. SEM image of cross-section of $\langle 100 \rangle$ oriented p^+ substrate with epitaxial layer having thickness of about $30 \mu\text{m}$. Thickness of low porosity layer ($\sim 12.5\%$) and high porosity layer ($\sim 45\%$) was about $1.5 \mu\text{m}$ and $15 \mu\text{m}$ respectively. The annealing time before deposition was 90 minutes.



Rys. 6. Rozkład koncentracji nośników większościowych w strukturach epitaksjalnych $n/p/p^+$ - proces 12W204 ($w = 50 \mu\text{m}$) oraz $n^+/n/p/p^+$ - proces 12Z250 ($w = 105 \mu\text{m}$), gdzie w jest sumaryczną grubością osadzonych warstw epitaksjalnych..

Fig. 6. Concentration profile of majority carriers in $n/p/p^+$ epitaxial structures: epi-run no 12W204 ($w = 50 \mu\text{m}$) and $n^+/n/p/p^+$ structures: epi-run no 12Z250 ($w = 105 \mu\text{m}$), in the case of which w stands for total thickness of epitaxial layers.

zawierającą pustki tak jak to przedstawiono na Rys. 1 - 2. Powierzchnię o najwyższej jakości, odpowiednią dla procesu epitaksji, uzyskano dla płytek typu p^+ o orientacji $\langle 111 \rangle$ i rezystywności $0,008 - 0,016 \Omega\text{cm}$. Podobny efekt procesu wygrzewania zaobserwowali autorzy prac [3 - 4].

Na tak przygotowanych podłożach osadzono warstwy epitaksjalne o grubości od $30 \mu\text{m}$ do $105 \mu\text{m}$. Profile koncentracji nośników większościowych w warstwach epitaksjalnych przedstawiono na Rys. 6.

Za pomocą profilometru Dektak 150 firmy VEECO wykonano pomiary chropowatości płytek z warstwami epitaksjalnymi osadzonymi bezpośrednio na typowych płytkach podłożowych typu p^+ i na płytkach p^+ z dwuwarstwową strukturą porowatą. Z pomiarów tych wynika, że średnie wartości chropowatości R_a wyznaczone na odcinku 1 cm dla warstw osadzonych na płytkach z warstwą porowatą i bez niej są porównywalne i wynoszą odpowiednio:

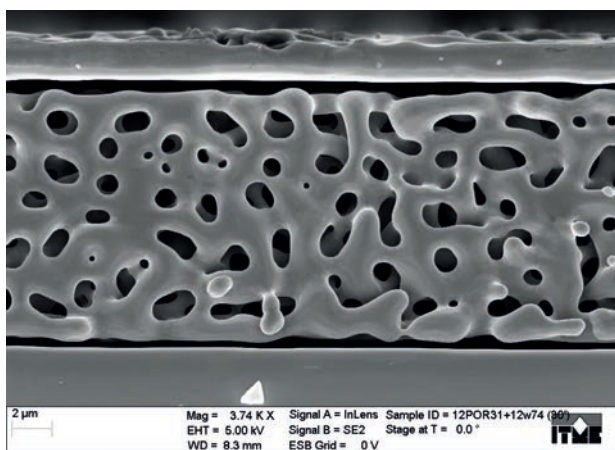
- warstwa o grubości 50 μm (podłoże porowate) - Ra \approx 26,7 nm
- warstwa o grubości 105 μm (podłoże porowate) - Ra \approx 21,1 nm
- warstwa o grubości 105 μm (podłoże bez warstwy porowatej) - Ra \approx 20,0 nm

Na odpowiednio przygotowanej powierzchni krzemu porowatego można zatem otrzymać warstwy epitaksjalne nie tylko o wysokiej jakości strukturalnej [1], ale i zbliżonych parametrach powierzchni, podobnie jak na typowym podłożu monokrystalicznym.

3. Odrywanie warstwy epitaksjalnej

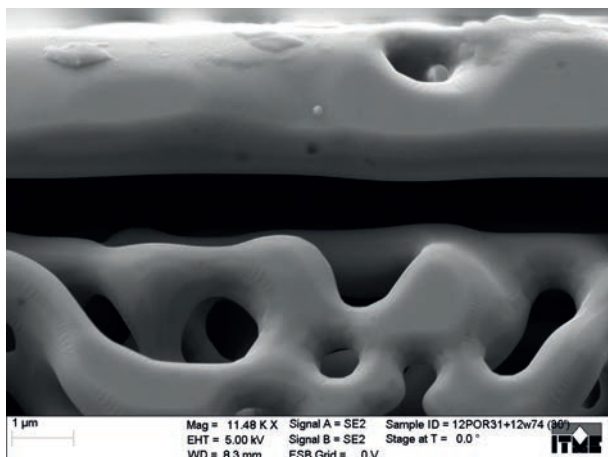
Próby uwolnienia warstwy epitaksjalnej z wykorzystaniem płuczki ultradźwiękowej zakończyły się niepowodzeniem. O metodzie tej, bardzo zresztą enigmatycznej, informują autorzy pracy [5]. W naszym przypadku w płuczce ultradźwiękowej odrywały się niewielkie fragmenty warstwy, lecz większa część warstwy rozpadała się w sposób niekontrolowany. Układ sterowania płuczka ultradźwiękowa, którą dysponował zespół nie zapewniał regulacji mocy, a w związku z tym kontrola procesu odrywania była prawie niemożliwa. Należało wobec tego opracować inny, równie prosty ale skuteczny sposób uwalniania warstwy.

Sądziliśmy, że poddanie płytki działaniu obniżonego ciśnienia będzie prowadziło do osłabienia czy też rozzerwania połączeń struktury krystalicznej w warstwie krzemu porowatego. Przypuszczenie, że wyższe ciśnienie w porach zagrzebanego obszaru porowatego w stosunku do ciśnienia na zewnątrz płytki spowoduje uwolnienie warstwy epitaksjalnej okazało się uzasadnione, czego



Rys. 7. Obraz mikrostruktury płytki $p^+ <100>$ z podwójnym obszarem porowatym wygrzewanej przez 30 min w temperaturze 1100 °C w atmosferze wodoru.

Fig. 7. SEM micrograph of $<100>$ oriented p^+ wafer with double porous region annealed for 30 minutes at 1100 °C in hydrogen atmosphere.



Rys. 8. Fragment obszaru przejściowego między warstwami o różnej porowatości.

Fig. 8. SEM image of transition layer between layers of different porosity.

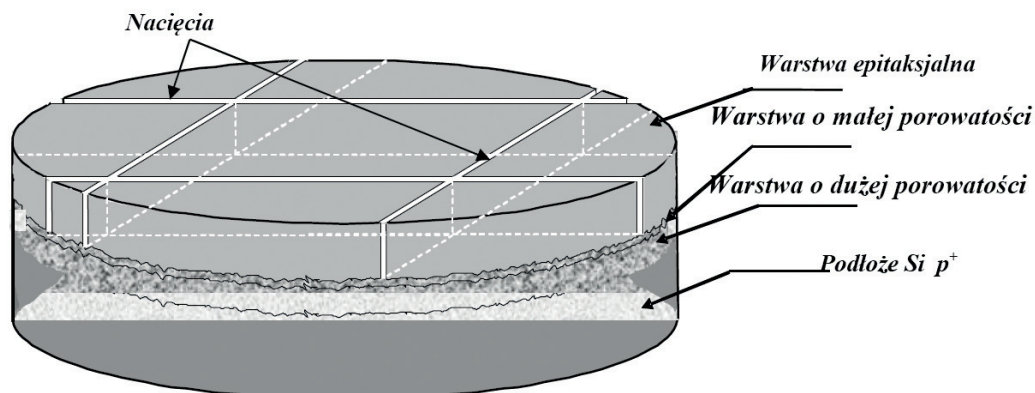
dowodem są mikrostruktury przedstawione na Rys. 7 - 8. Obrazy SEM przedstawiają przekrój płytki $p^+ <100>$ z obszarem porowatym, poddanej działaniu obniżonego ciśnienia.

Zaobserwowane rozwarstwienie wywołane działaniem obniżonego ciśnienia na granicy warstwa porowata – podłoże i na granicy warstw o różnej porowatości potwierdziło nasze oczekiwania dotyczące możliwości odseparowania warstwy epitaksjalnej od podłoża.

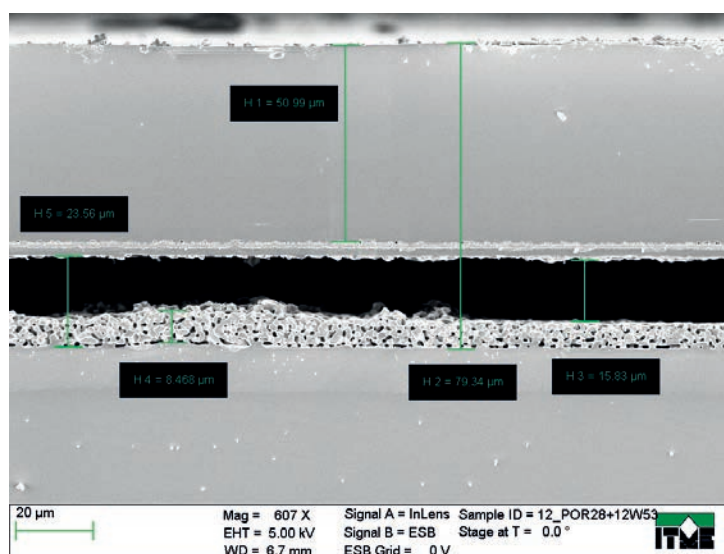
Zasadniczym naszym celem było otrzymanie folii krzemowej jaką miała stanowić oderwana warstwa epitaksjalna o z góry założonym kształcie np. kwadratu. Warunek ten stanowił kolejny, kłopotliwy problem, dlatego też jeszcze przed etapem odrywania warstwy należało tak przygotować płytkę aby uwolniona została warstwa o wymaganym kształcie. W tym celu płytka po procesie epitaksji była nacinana za pomocą piły diamentowej. Istotna, jak się okazało, była głębokość nacięcia. Okazało się, że nacinanie płytki do granicy warstwa epitaksjalna - warstwa porowata było najskuteczniejsze.

Sposób nacinania płytki z warstwą epitaksjalną osadzoną na podwójnej warstwie porowatej pokazano na Rys. 9. Tak przygotowaną płytkę poddawano działaniu ciśnienia obniżonego do wartości $\sim 0,01$ MPa, czemu towarzyszyło zazwyczaj pojawienie się wybrzuszenia w środkowej części naciętego kwadratu. Nie powodowało to jednak całkowitego oderwania warstwy epitaksjalnej od podłoża. Na Rys. 10 - 11 przedstawiono mikrostrukturę środkowego fragmentu płytki z oderwaną warstwą epitaksjalną. Całkowita separacja warstwy następowała dopiero podczas wygrzewania płytki pod ciśnieniem atmosferycznym w dejonizowanej wodzie o wysokiej czystości (rezystywność ~ 17 M Ω cm) w temperaturze 90 °C – 100 °C. Profil uskoku naciętej krawędzi po oderwaniu warstwy epitaksjalnej o grubości 50 μm zmierzony za pomocą profilometru Dektak 150 przedstawia Rys. 12.

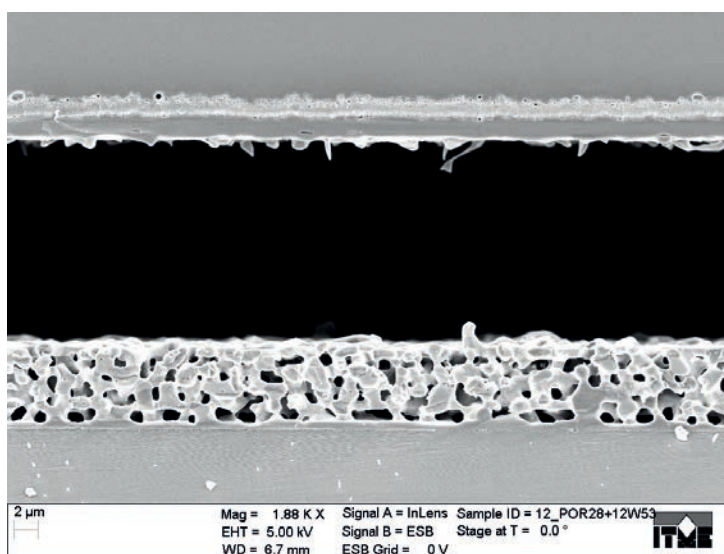
Najlepsze efekty uzyskano dla warstw epitaksjalnych o sumarycznej grubości 52,5 μm (struktura $n/p/p^+$ - proces



Rys. 9. Schemat nacięć płytki Si przed operacją odrywania warstwy.
Fig. 9. Diagram of Si wafer cutting before epitaxial layer separation.



Rys. 10. Obraz SEM przekroju płytki p^+ $\langle 100 \rangle$ z oderwaną warstwą epitaksjalną o grubości $\sim 50 \mu\text{m}$.
Fig. 10. SEM image of cross-section of $\langle 100 \rangle$ oriented p^+ wafer with separated epitaxial layer having thickness of about $50 \mu\text{m}$.

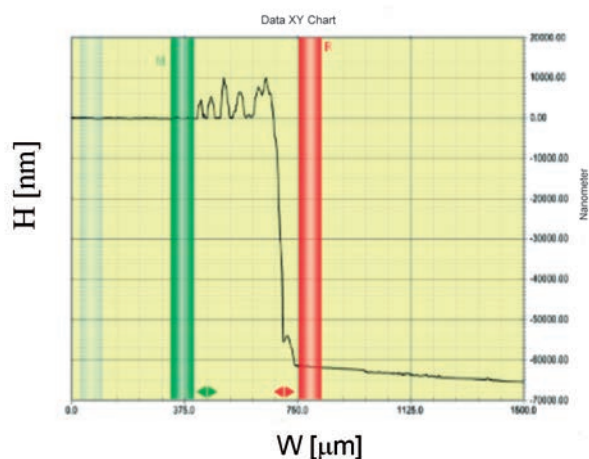


Rys. 11. Obraz SEM płytki z oderwaną warstwą epitaksjalną.
Fig. 11. SEM image of wafer with separated epitaxial layer.

epitaksji 12W204) i grubości 105,0 μm (struktura $n^+/n/p/p^+$ - proces epitaksji 12Z250) (Rys. 6), w przypadku których nastąpiło całkowite oderwanie warstwy epitaksjalnej.

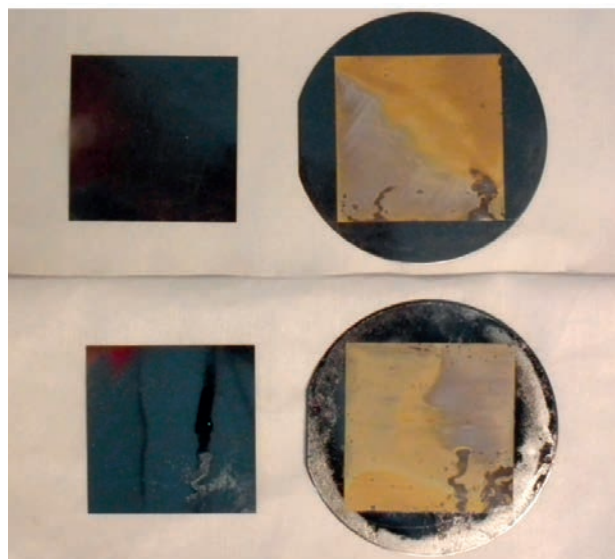
Rys. 13 przedstawia zdjęcia uwolnionych warstw o grubości 52,5 μm i 105,0 μm wraz z płytkami od których zostały oddzielone. Zastosowana procedura pozwala na powtarzalne wytworzenie folii krzemowych powstałych w wyniku oderwania warstw epitaksjalnych osadzanych na krzemie porowatym.

Następny etap prac dotyczył powtórnego wykorzystania tych samych płytek Si, czyli kolejnego ich przygotowania do wytworzenia podwójnej warstwy porowatej, osadzenia na niej warstwy epitaksjalnej i jej odseparowania.



Rys. 12. Wynik pomiaru profilu uskoku utworzonego wzdłuż naciętej krawędzi przez oderwaną warstwę epitaksjalną o grubości 52,5 μm .

Fig. 12. Results of profile measurement of edge formed along cut line after separation of 52.5 μm thick epitaxial layer.



Rys. 13. Oderwane warstwy epitaksjalne o wymiarach 50 x 50 mm wraz z płytkami macierzystymi.

Fig. 13. Exfoliated epitaxial layers with dimensions 50 x 50 mm together with native wafers.

Przed kolejnym cyklem porowacenia z płytki usunięto pozostałości warstw epitaksjalnej i porowatej. Wykorzystano do tego celu precyzyjną szlifierkę MPS2-R300S firmy G&N służącą do pocieniania płytek krzemowych. Pomiar chropowatości powierzchni płytki po pocienianiu wskazywał na to, że jakość uzyskanej powierzchni jest wystarczająca do przeprowadzenia kolejnego cyklu porowacenia i epitaksji bez konieczności szlifowania i ponownego polerowania płytek.

W pracy [6] opisano cykl wytwarzania folii krzemowych dla ogniw słonecznych, w którym po pierwszym oderwaniu warstwy płytka nie była „odświeżana”, czyli, kolejny proces porowacenia przeprowadzano w płytce bezpośrednio po oderwaniu warstwy. W naszym przypadku chropowatość płytki po operacji pocieniania mieściła się w zakresie 20 – 50 nm i odpowiadała chropowatości powierzchni w obszarze uwolnionym od warstwy epitaksjalnej. Wobec tego przeprowadzenie procesu porowacenia płytek poddanych operacji mechanicznego pocieniania był uzasadniony.

Do ponownego cyklu porowacenia i epitaksji użyto płytek uprzednio wykorzystanych do przeprowadzonych z różnym skutkiem operacji odrywania warstw. Powtórne zastosowanie płytek jedynie pocienianych pozwoliło zaoszczędzić czas i koszty. Końcowy efekt odrywania warstwy epitaksjalnej był równie udany, jak w przypadku wyjściowych płytek podłożowych z polerowaną powierzchnią.

4. Podsumowanie

Określono warunki i opracowano metodę otrzymywania folii krzemowych o grubości do $\sim 100 \mu\text{m}$ jako efekt procesu odrywania warstw epitaksjalnych osadzanych na porowatej powierzchni płytki krzemowej typu p^+ . W płytkach p^+ o orientacji $\langle 111 \rangle$ i $\langle 100 \rangle$ wytwarzano podwójną warstwę porowatą. Powierzchniowa warstwa LPor zapewniała po wstępnym wygrzewaniu w wodorze w temperaturze 1100 $^{\circ}\text{C}$ wzrost monokrystalicznych wielowarstwowych struktur epitaksjalnych. Dolna warstwa HPor umożliwiała oderwanie warstwy epitaksjalnej od płytki podłożowej.

Opracowano oryginalną metodę odrywania warstwy epitaksjalnej. Na cykl procesu odrywania warstwy epitaksjalnej składały się operacje:

- nacinanie płytki do granicy warstwy epitaksjalna – zasklepienia powierzchnia górnej warstwy porowatej,
- poddanie płytki działaniu obniżonego ciśnienia osłabiającego połączenia w dolnej warstwie o dużej wartości sporowacenia ,
- całkowite oderwanie warstwy epitaksjalnej w kąpieli wodnej w temperaturze 90 $^{\circ}\text{C}$ – 100 $^{\circ}\text{C}$.

Opracowana metoda pozwala na powtarzalne wytworzenie folii krzemowych o wymiarach 50 x 50 mm i grubości w zakresie 30 μm – 105 μm . Metoda ta zapewnia odrywanie warstwy epitaksjalnej osadzonej na krzemie

porowatym wytworzonym zarówno w polerowanej płytce podłożowej, jak i wytworzonym w płytce po operacji oderwania warstwy.

Podziękowania

Autorzy serdecznie dziękują Pani mgr Magdalenie Romaniec za wykonanie i analizę obrazów SEM przedstawiających mikrostrukturę warstw krzemu porowatego.

Literatura

[1] Lipiński D., Sarnecki J., Brzozowski A., Mazur K.: Krzemowe warstwy epitaksjalne do zastosowań

fotowoltaicznych osadzone na krzemie porowatym, *Materiały Elektroniczne*, 2012, 40/3, 28 - 37

- [2] Yonehara T. and Sakaguchi K.: Novel SOI wafer technology, *JSAP International*, 2001, .4, 10 - 16
- [3] Weber K. J. et al.: Silicon as a photovoltaic material, *Materials Forum*, 2004, 27 , 9 - 14
- [4] Otto N. et al., Evolution of the microstructure during annealing of porous silicon multilayers, *J. Appl. Phys.* 2004, 95, 497 - 503
- [5] Solanki C. S. et al: Porous silicon layer transfer processes for solar cells, *Solar Energy Mat., & Solar Cells*, 2004, 83, 101 - 113
- [6] Solanki C.S. et al.: Characterization of free-standing thin crystalline films on porous silicon for solar cells, *Thin Solid Films*, 2004, 451 - 452, 649 - 654,