

PUŁAPKI ELEKTRONOWE W KRZEMIE WYGRZEWANYM W WARUNKACH WYSOKICH CIŚNIENÍ

Paweł Kamiński ¹⁾, Roman Kozłowski ¹⁾, Andrzej Misiuk ²⁾

Przeprowadzono badania głębokich centrów defektowych w Cz-Si poddanym wysokociśnieniowej obróbce termicznej. Stwierdzono, że pułapki T1 ($E_c - 0,20$ eV) powstają w wyniku działania ciśnienia hydrostatycznego na aglomeraty międzywęzłowych atomów tlenu. Pułapki T2 ($E_c - 0,45$ eV) generowane są w wyniku dyfuzji niklu, którego źródło znajdowało się w komorze wysokociśnieniowej. Pułapki T3 ($E_c - 0,62$ eV) powstają wskutek deformacji plastycznej materiału, będącej wynikiem działania ciśnienia na wytrącenia tlenowe w postaci fazy SiO₂.

1. WPROWADZENIE

Wytwarzanie układów scalonych o bardzo dużej skali integracji (ULSI), zawierających ponad 10⁸ elementów, wymaga zmniejszenia koncentracji zanieczyszczeń metalicznych w obszarze przypowierzchniowym płytek Cz-Si do poziomu poniżej 10⁹ cm⁻³. W elementach o submikronowych wymiarach występują bowiem silne pola elektryczne zwiększające ich podatność na uszkodzenia spowodowane obecnością atomów tych zanieczyszczeń w obszarze czynnym.

Konwencjonalna procedura geterowania wewnętrznego, mająca na celu usunięcie zanieczyszczeń metalicznych z tego obszaru, polega na zastosowaniu cyklu obróbek termicznych, podczas których następuje dyfuzja atomów tlenu z obszaru przypowierzchniowego a następnie zarodkowanie i wzrost wytrąceń tlenowych (SiO₂) w obszarze położonym w pewnej odległości (> 30 μm) od powierzchni płytki [1]. W wyniku dużych naprężeń lokalnych (~ 10⁸ Pa) [2], występujących na granicy wytrącenia tlenowe/matryca Si, powstają pętle dyslokacyjne, które wnikają głębiej w płytkę i tworzą silnie zdefektowany obszar zwany strefą geterującą. Znajdujące się tam dyslokacje i błędy ułożenia są bowiem ujściem defektów punktowych, które migrują z obszaru przypowierzchniowego.

¹⁾ Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych
ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa

²⁾ Instytut Technologii Elektronowej
Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa

Jednym z czynników umożliwiających oddziaływanie na strukturę defektową materiału w strefie geterującej jest ciśnienie hydrostatyczne [2], które wpływa na naprężenia istniejące na granicy - wytrącenie tlenowe/matryca Si. W połączeniu z wysokotemperaturową obróbką termiczną czynnik ten może powodować zmianę morfologii wytrąceń SiO_2 i powstanie struktury defektowej o lepszych właściwościach geterujących [2].

Celem niniejszej pracy było określenie wpływu warunków wysokociśnieniowej obróbki termicznej na parametry i koncentrację pułapek w płytkach Cz-Si zawierających wytrącenia tlenowe. Badania głębokich pułapek zostały uzupełnione pomiarami intensywności anomalnej transmisji promieniowania rentgenowskiego, które są czułe na lokalne pola naprężeń istniejące w otoczeniu wytrąceń, błędów ułożenia i dyslokacji.

2. METODYKA BADAŃ

Do badań wykorzystano płytki krzemowe typu n, zorientowane w płaszczyźnie (100), pochodzące z monokryształu otrzymanego metodą Czochralskiego domieszko- wanego fosforem. Koncentracja elektronów w płytkach wynosiła $\sim 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, zaś koncentracja międzywęzłowych atomów tlenu $[\text{O}_i]$, wyznaczona metodą fourierow- skiej spektroskopii absorpcyjnej w podczerwieni (FTIR), zawierała się w zakresie $(6,5 - 8,6) \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

W celu wygenerowania wytrąceń tlenowych, płytki poddano wygrzewaniu wstęp- nemu w atmosferze N_2 w warunkach termicznych stosowanych w procesach getero- wania wewnętrznego. Po wygrzewaniu wstępnym ponownie określano koncentrację O_i oraz prowadzono obserwacje mikroskopowe defektów ujawnionych na powierzch- ni płytek wskutek selektywnego trawienia chemicznego w roztworze Yanga. Warunki wstępnych obróbek termicznych wraz z wartościami gęstości defektów i koncentracji tlenu zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie temperatur i czasów procesów wygrzewania wstępnego oraz gęstości defektów i koncentracji tlenu po tych procesach.

Table 1. Defects densities and oxygen concentration after preannealing at various tempera- tures ant treatment times.

| Próbka | T_a [K] | t_a [h] | Gęstość defektów $[\text{cm}^{-2}]$ | Koncentracja O_i $[\text{cm}^{-3}]$ |
|-----------------|-----------|-------------------------|-------------------------------------|--|
| F5WS2 | 723 | 26 | SPD: 1×10^4 | 6.4×10^{17} |
| A10 | 723 + 923 | (proces dwustop- niowy) | SF: 4×10^6 | 3.4×10^{17} |
| A11 | 923 | 96 | SPD: 1×10^6 | 7.3×10^{17} |
| A12/1, A12/2 | 998 | 96 | SPD: 2×10^6 | 5.8×10^{17} |

Uwagi: SPD - saucer pit defect; SF - stacking fault

Procesy ciśnieniowe w wysokich temperaturach wykonywano w atmosferze oczyszczonego argonu, który był medium przenoszącym ciśnienie hydrostatyczne. Maksymalne ciśnienie osiągnięte w procesach ciśnieniowo-temperaturowych wynosiło 1,1 GPa. Ze względu na małą objętość komory ciśnieniowej próbki przygotowano w postaci kawałków płytki o wymiarach 15x5x4 mm³, wyciętych wzdłuż osi [110] i [1 $\bar{1}$ 0]. Podczas obróbki wysokociśnieniowej wprowadzano do próbek nikiel, którego źródłem była folia użyta do owijania próbek. Parametry wysokociśnieniowych wygrzewań poszczególnych próbek zestawiono w tabeli 2.

Po każdym procesie próbki myto w odczynnikach organicznych, a następnie usuwano warstwę przypowierzchniową poprzez trawienie chemiczne.

Tabela 2. Zestawienie parametrów wysokociśnieniowej obróbki termicznej.

Table 2. Conditions of high-pressure heat treatments.

| Próbka | Temperatura [K] | Ciśnienie [GPa] | Czas procesu [h] |
|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| F5WS2, A10, A11 | 1393 | 1.1 | 4 |
| A12/1 | 1400 | 0.01 | 5 |
| A12/2 | 1400 | 1 | 5 |

Badania pułapek przeprowadzono metodą niestacjonarnej spektroskopii pojemnościowej (DLTS). Kontakty Schottky'ego o średnicy 1,75 mm wytwarzano poprzez naporowanie warstwy Au na górną powierzchnię próbki przez maskę molibdenową. Na dolnej powierzchni próbki wytwarzano kontakt omowy naporowując warstwę Al. Widma DLTS mierzono w zakresie temperatur 80 - 330 K przy napięciu wstecznym $V_R = -6V$, amplitudzie impulsu zapełniającego $U_F = 4V$ i szerokości tego impulsu $t = 50$ ms. Koncentrację pułapek wyznaczono zgodnie z metodyką podaną w pracy [3].

Intensywność anomalnej transmisji I_a mierzono w temperaturze pokojowej, wykorzystując promieniowanie CuK α . Dla znormalizowania wyników przyjęto wartość 100 dla próbki F5WS2, która charakteryzowała się największą wartością I_a .

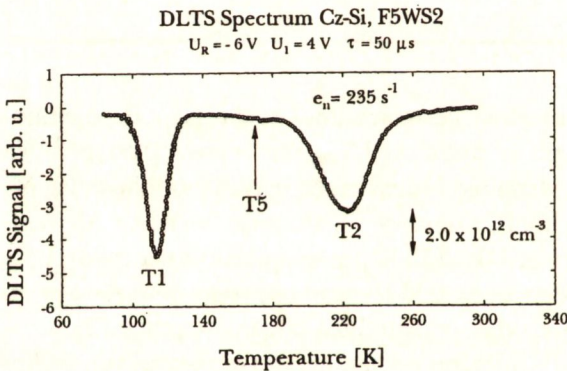
3. WYNIKI BADAŃ

W próbkach kontrolnych, nie poddanych żadnej obróbce termicznej, koncentracja głębokich pułapek była poniżej poziomu czułości posiadanego układu pomiarowego. Po wygrzewaniu wstępnym próbek F5WS2, A11 i A12, poddanych jednostopniowej obróbce termicznej (tabela 1), widma DLTS wskazywały na obecność jednej pułapki $E_c - 0,36$ eV, $\sigma_a = 2 \times 10^{-14}$ cm², której koncentracja wynosiła $\sim 1 \times 10^{12}$ cm⁻³. Jednocześnie, zgodnie z danymi w tabeli 1 w próbkach tych nastąpił niewielki ubytek koncentracji O_i . W przypad-

ku próbki A10, wygrzewanej w procesie dwustopniowym, najpierw w temperaturze 723 K, a następnie w temperaturze 923 K, widmo DLTS świadczyło o dużej koncentracji ($> 2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) tzw. nowych donorów termicznych [4] o energiach aktywacji w zakresie 0,05 - 0,20 eV. W próbce tej nastąpił bowiem z jednej strony znaczący ubytek koncentracji O_i , z drugiej zaś wzrost koncentracji elektronów do poziomu $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

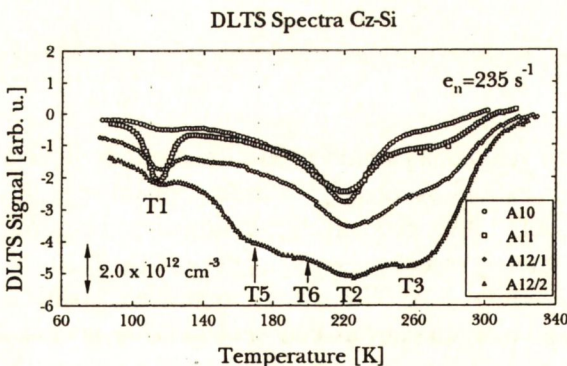
Wielkość wytrąceń tlenowych zależy głównie od temperatury procesu wygrzewania. W temperaturze 723 K powstają aglomeraty międzywęzłowych atomów tlenu, które nie stanowią jeszcze odrębnej fazy SiO_2 [2,5]. Faza ta powstaje w temperaturze 923 K [6] i jak wykazały badania elipsometryczne [7] rozmiar wytrąceń SiO_2 nie przekracza 0,2 nm. Większe wytrącenia SiO_2 tworzą się w temperaturze 998 K. W wyniku obróbki dwustopniowej, sprzyjającej powstawaniu nowych termodonorów, rozmiar wytrąceń SiO_2 jest $\leq 0,04 \mu\text{m}$, zaś ich gęstość jest znacznie większa niż po wygrzewaniu jednostopniowym [7].

Wpływ warunków wygrzewania wstępnego na strukturę defektową Cz-Si poddanego wysokociśnieniowej obróbce termicznej ilustrują widma DLTS, przedstawione na rys.1 i rys.2 dla próbek F5WS2, A10 i A11. Zgodnie z tabelą 2 obróbkę ciśnieniową tych próbek przeprowadzono w jednakowych warunkach, przy maksymalnym



Rys.1. Widmo DLTS ilustrujące obecność pułapek elektronowych T1 i T2 w Cz-Si poddanym wysokociśnieniowej obróbce termicznej. Warunki wygrzewania wstępnego oraz warunki obróbki ciśnieniowej są podane odpowiednio w tabelach 1 i 2 (próbka F5WS2).

Fig. 1. DLTS spectrum for sample F5WS2 showing the presence of traps T1 and T2. Preannealing and high-pressure annealing conditions are listed in tables 1 and 2, respectively.

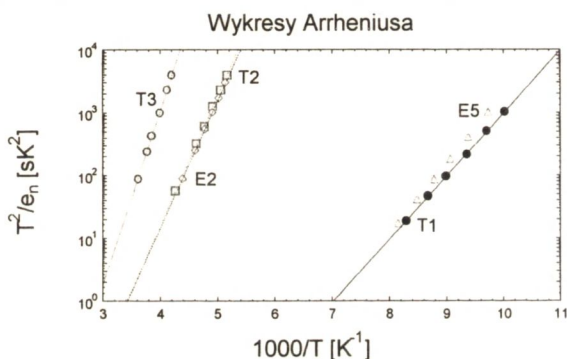


Rys.2. Widma DLTS ilustrujące zmiany koncentracji pułapek T1, T2 i T3 w zależności od warunków wygrzewania wstępnego (tabela 1) oraz warunków obróbki wysokociśnieniowej (tabela 2).

Fig. 2. DLTS spectra illustrating changes in concentrations of traps T1, T2 and T3 induced by preannealing conditions (table 1) as well as high-pressure heat treatment conditions (table 2).

ciśnieniu hydrostatycznym w komorze roboczej. Widma DLTS dla próbek A12/1 i A12/2 (rys. 2) ilustrują zmianę struktury defektowej materiału spowodowaną wzrostem ciśnienia hydrostatycznego od 0.01 GPa do 1.0 GPa. Strzałkami zaznaczono pułapki T5 i T6, których parametrów nie można było wyznaczyć wskutek zbyt dużego poszerzenia odpowiednich pików w widmach DLTS. Należy podkreślić, że poszerzone widma DLTS dla poszczególnych pułapek świadczą o zlokalizowaniu odpowiedzialnych za nie centrów defektowych w pobliżu pól naprężeń, wywołanych obecnością wytrąceń SiO₂, dyslokacji i błędów ułożenia [8].

W wyniku obróbki ciśnieniowej próbki F5WS2, zawierającej jedynie aglomeraty tlenowe, powstały dwie pułapki elektronowe T1 i T2 (rys.1). Należy dodać, że próbka ta charakteryzowała się największą wartością I_a, przyjętą jako 100%. W próbkach A10 i A11, posiadających wstępnie uformowane wytrącenia tlenowe, oprócz pułapek T1 i T2 występuje również pułapka T3 (rys.2). Wykresy Arrheniusa, na podstawie



Rys.3. Temperaturowe zależności odwrotności szybkości emisji dla pułapek T1, T2 i T3 wykrytych w Cz-Si poddanym wygrzewaniu w warunkach wysokich ciśnień.

Fig. 3. Arrhenius plots for traps T1, T2 and T3 detected in Cz-Si subjected to high-pressure heat treatment.

których wyznaczono parametry pułapek T1, T2 i T3, przedstawiono na rys.3. Dla porównania zamieszczono na tym rysunku również wykresy Arrheniusa dla pułapek E2 i E5, charakterystycznych dla krzemu zanieczyszczonego Ni [9]. Parametry pułapek T1, T2 i T3, wykrytych w Cz-Si po wygrzewaniu w warunkach wysokich ciśnień oraz pułapek E2 i E3, które zgodnie z pracą [9] powstają w wyniku zanieczyszczenia krzemu niklem, zestawiono w tabeli 3.

Jak wynika z porównania wykresów Arrheniusa oraz wyników przedstawionych w tabeli 3, pułapka T2 spowodowana jest obecnością niklu, który celowo wprowadzony został podczas obróbki wysokociśnieniowej. Warto dodać, że wyznaczone wartości energii aktywacji są zgodne z rezultatami pracy [10], przypisującymi atomom Ni głęboki poziom akceptorowy E_c - 0,45 eV. Łatwo także zauważyć (rys.1, rys.2), że koncentracja pułapek T2 w niewielkim stopniu zależy od warunków wygrzewania wstępnego, natomiast znacznie wzrasta ze wzrostem ciśnienia oraz czasu trwania obróbki wysokociśnieniowej.

Pułapka T1 nie jest związana z obecnością Ni. Ponadto, w przeciwieństwie do pułapek T2, na koncentrację pułapek T1 silny wpływ mają warunki wygrzewania

Tabela 3. Wartości energii aktywacji i pozornego przekroju czynnego na wychwyt elektronów dla pułapek T1, T2 i T3 wykrytych w Cz-Si poddanym wysokociśnieniowej obróbce termicznej.

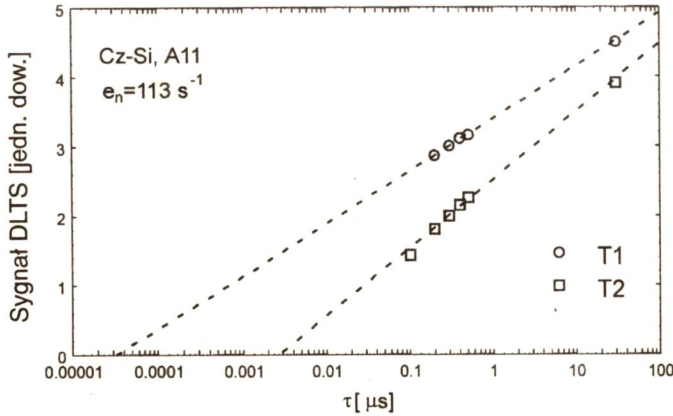
Table 3. Thermal emission activation energies and apparent electron capture cross-sections for electron traps T1, T2 i T3 in Cz-Si subjected to annealing at high pressure.

| Pułapka | E_a (eV) | δ_a (cm ²) | Identyfikacja |
|---------|------------|-------------------------------|--|
| T1 | 0.20±0.003 | 2.0 x 10 ⁻¹⁴ | kompleks tlen- aglomerat wakansów |
| T2 | 0.45±0.006 | 6.5 x 10 ⁻¹⁴ | Ni |
| T3 | 0.62±0.02 | 2.0 x 10 ⁻¹² | deformacja plastyczna wskutek wytrąceń tlenowych |
| E2 | 0.45±0.01 | 4.0 x 10 ⁻¹⁴ | Ni [9] |
| E5 | 0.23±0.002 | 7.0 x 10 ⁻¹³ | Ni [9] |

wstępnego, innymi słowy warunki powstawania wytrąceń tlenowych. Największą koncentracją pułapek T1 ($N_{T1} = 3,3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$) charakteryzuje się próbka F5WS2, w której po wygrzewaniu wstępnym obecne były termodonory i aglomeraty tlenowe. Najmniejsza koncentracja tych pułapek ($N_{T1} = 6,6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$) występuje w próbce A10, w której po wygrzewaniu wstępnym stwierdzono dużą koncentrację nowych donorów. Tak więc można przypuszczać, że proces powstawania nowych donorów przeciwdziała formowaniu się pułapek T1 podczas obróbki termicznej pod ciśnieniem hydrostatycznym.

Pułapki T1 powstają prawdopodobnie w wyniku oddziaływania ciśnienia hydrostatycznego na aglomeraty międzywęzłowych atomów tlenu. Pod wpływem ciśnienia i wysokiej temperatury aglomeraty te ulegają rozbiciu, któremu towarzyszy generacja wakansów. Pułapka T1 może więc być kompleksem złożonym z międzywęzłowego atomu tlenu i aglomeratu wakansów. W próbce A10 znaczna koncentracja O_i została związana z atomami Si wskutek powstania nowych donorów i gęstość aglomeratów tlenowych jest znacznie mniejsza niż w próbce F5WS2. Należy dodać, że pułapka elektronowa o energii aktywacji $E_a = 0,20 \text{ eV}$, przypisana kompleksowi złożonemu z atomu tlenu i potrójnego wakansu, była również obserwowana przez Kimerlinga [11], który badał głębokie centra defektowe w próbkach Si napromieniowanych elektronami i wygrzanych w temperaturach powyżej 300 °C.

Na rys.4 przedstawiono zależności amplitudy sygnału DLTS dla pułapek T1 i T2 od czasu trwania impulsu zapełniającego. Otrzymane zależności wskazują, że kinetykę wychwytu elektronów przez obie pułapki można opisać funkcją logarytmiczną. Innymi słowy koncentracja zapełnianych pułapek jest proporcjonalna do $\ln(t)$. Zależności przedstawione na rys.4 są typowe dla pułapek w Si poddanym deformacji

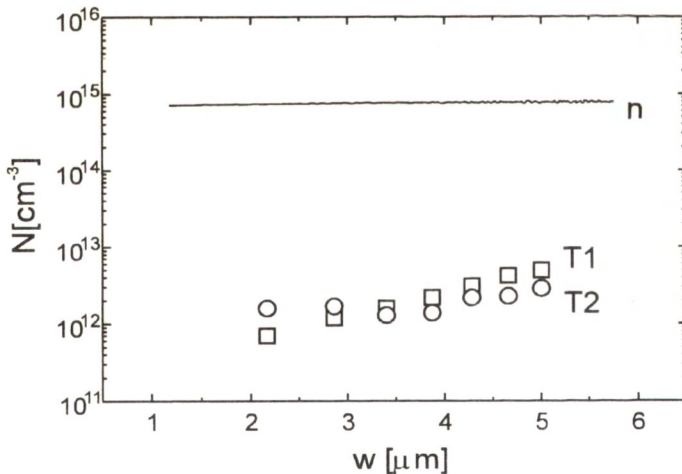


Rys.4. Zależności amplitudy sygnału DLTS od szerokości impulsu wypełniającego dla pułapek T1 i T2.

Fig. 4. Amplitude of DLTS signal for traps T1 and T2 as a function of filling pulse width.

plastycznej. W materiale tym centra defektowe znajdują się w pobliżu dyslokacji lub w ich rdzeniu i rozkład potencjału wokół tych centrów uzależniony jest od oddziaływania lokalnych pól naprężeń. Potwierdzeniem deformacji plastycznej próbki A11, w której badano proces wychwytu dla pułapek T1 i T2, jest wartość anomalnej transmisji promieni X, wynosząca 27,5 %. Stała sieci tej próbki, wyznaczona metodą Bonda w temperaturze 20°C, jest równa 0,5430659 nm.

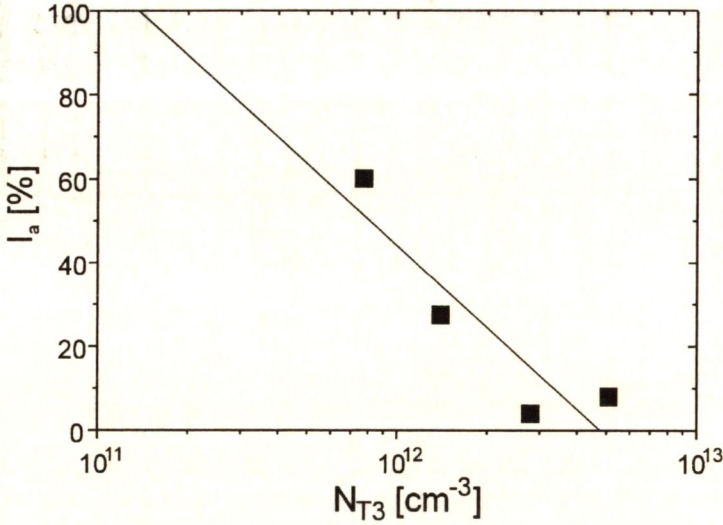
Rysunek 5 ilustruje profile koncentracji pułapek T1 i T2. Widoczny jest wzrost koncentracji pułapki T1 w głąb próbki, który może być spowodowany mniejszą koncentracją O_i w obszarze przypowierzchniowym. Rozkład koncentracji pułapki T2 jest w dużym stopniu równomierny.



Rys. 5. Profile koncentracji centrów T1 i T2 oraz rozkład koncentracji elektronów w Cz-Si po wygrzaniu wysokociśnieniowym (próbka A11).

Fig. 5. Profiles of T1 and T2 traps concentrations and electron concentration profile in Cz-Si after high-pressure heat treatment (sample A11).

Na rys.6 przedstawiono zależność intensywności anomalnej transmisji promieni rentgenowskich od koncentracji pułapek T3 w poszczególnych próbkach. Silny spadek intensywności anomalnej transmisji ze wzrostem koncentracji pułapek T3 świadczy o istotnej roli deformacji plastycznej w procesie powstawania tych pułapek.



Rys. 6. Intensywność anomalnej transmisji promieni X w funkcji koncentracji pułapek T3.

Fig. 6. X-ray anomalous transmission intensity as a function of concentration trap T3.

Deformacja ta występuje wskutek zwiększonych naprężeń na granicy wytrącenie tlenowe/matryca Si podczas wysokotemperaturowego wygrzewania próbek [2]. Pułapka T3 ($E_c - 0,62$ eV) wydaje się być tą samą pułapką ($E_c - 0,63$ eV), którą obserwowali Patel i Kimerling [12] w Si zawierającym pasma linii poślizgu powstałe w wyniku niejednorodnej deformacji plastycznej. Należy podkreślić, że zgodnie z wynikami pracy [12] pułapki T3 nie są związane z zerwanymi wiązaniami w rdzeniu dyslokacji, lecz powstają wskutek generacji defektów punktowych, towarzyszącej deformacji plastycznej.

Koncentracja pułapek T3 zależna jest od wielkości wytrąceń SiO_2 oraz od ciśnienia hydrostatycznego podczas obróbki termicznej. W próbce F5WS2, w której deformacja plastyczna nie wystąpiła w wyniku braku wytrąceń tlenowych, koncentracja centrów T3 jest poniżej poziomu detekcji. W próbce A10, zawierającej przed obróbką ciśnieniową dużą gęstość drobnych wytrąceń SiO_2 , koncentracja pułapek T3 wynosi $7,7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$. Wraz ze wzrostem wielkości wytrąceń, obserwowanym w próbkach, A11 i A12/1, koncentracja centrów T3 wzrasta odpowiednio do $1,4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ i $2,8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. Wzrost ciśnienia hydrostatycznego od 0,01 GPa (próbka A12/1) do 1 GPa (próbka A12/2) powoduje zwiększenie koncentracji pułapek T3 do $5,1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzono badania głębokich centrów defektowych w Cz-Si poddanym wysokociśnieniowej obróbce termicznej. Stwierdzono, że pułapki T1 ($E_c - 0,20$ eV) powstają w wyniku działania ciśnienia hydrostatycznego na aglomeraty międzywęzłowych atomów tlenu. Pułapki T2 ($E_c - 0,45$ eV) generowane są wskutek dyfuzji niklu,

którego źródło znajdowało się w komorze wysokociśnieniowej. Pułapki T3 ($E_c - 0,62$ eV) powstają wskutek deformacji plastycznej materiału, będącej wynikiem działania ciśnienia na wytrącenia tlenowe w postaci fazy SiO_2 . Określono wpływ warunków wygrzewania wstępnego, prowadzonego w celu wytworzenia wytrąceń tlenowych, oraz warunków wysokociśnieniowej obróbki termicznej na koncentrację poszczególnych pułapek. Wyznaczono zależność anomalnej transmisji promieni X od koncentracji pułapek T3.

Podziękowanie

Autorzy pragną podziękować Pani mgr Jolancie Adamczewskiej za wykonanie pomiarów metodą anomalnej transmisji promieni X oraz pani mgr Barbarze Surmie za wyznaczenie koncentracji tlenu metodą FTIR. Słowa podziękowania należą się również pani dr Elżbiecie Nossarzewskiej-Orłowskiej za cenne uwagi w końcowym zredagowaniu pracy.

Badania metodą DLTS wykonano w ITME w ramach tematu statutowego nr 14/1/0185/5. Próbkę do badań zostały przygotowane w ITE w ramach grantu KBN nr 8T11B04809.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Devine R.A.B., Warren W.L., Xu J.B., Wilson I.H., Paillet P., Leray J.-L.: Oxygen getting and oxide degradation during annealing of Si/SiO₂/Si structures. *J. Appl. Phys.*, 77, 1995, 175-186
- [2] Misiuk A., Adamczewska J., Bąk-Misiuk J., Wolf J.: Evolution of oxygen clusters and agglomerates in annealed Cz-Si at high pressure-high temperature. *Solid State Phenomena*, 32-33, 1993, 167-172
- [3] Kamiński P., Gawlik G., Kozłowski R.: Deep levels in rapid thermal annealed GaAs. *Materials Science and Engineering*, B28, 1994, 439-443
- [4] Kamura Y., Hashimoto F., Yoneta M.: Oxygen precipitation at 400 - 700 °C in Czochralski silicon: thermal donors, new donors and rod-like defects. *Defect Control in Semiconductors*, K. Sumino ed., Elsevier Sci. Publ. 1990, 233
- [5] Korytar D.: Point-like and extended defects in Si and GaAs. *J. Cryst. Growth*. 126, 1993, 30-40
- [6] Claes C., Vanhellefont J.: Recent progress in understanding of crystallographic defects in silicon. *J. Cryst. Growth*. 126, 1993, 41-62
- [7] Kamińska A. M., Misiuk A., Wolf J.: Ellipsometric investigation of single crystalline Cz-Si subjected to hydrostatic pressure. *Surface and Interface Analysis*. 22, 1994, 346-349
- [8] Omling P., Weber E.R., Montelius L., Alexander H., Michel J.: Electrical properties of dislocations and point defects in plastically deformed silicon. *Phys. Rev. B*. 32, 10, 1985, 6571-6581

- [9] Kamiński P., Kozłowski R.: Identyfikacja centrów generacyjno-rekombinacyjnych w epitaksjalnych warstwach Si. Sprawozdanie z projektu badawczego nr 803379101. Warszawa 1994
- [10] Kitagawa H., Tanaka S., Nakashima H., Yoshida M.: Electrical properties of nickel in silicon. *J. Electron. Mater.* 20, 6, 1991, 441-447
- [11] Kimerling L.C.: Radiation effects in semiconductors. N.B. Urii and J.W. Corbett Bristol, Institute of Physics, 1977, 221
- [12] Patel J. R., Kimerling L.C.: Dislocation energy levels in deformed silicon, *Cryst. Res. Technol.*, 16, 2, 1981, 187-195

SUMMARY

ELECTRON TRAPS IN SILICON ANNEALED UNDER HIGH PRESSURE

The DLTS technique has been employed to monitor the changes in the defect structure of n-type Cz-Si with oxygen precipitates after the high-pressure heat treatments. Three electron traps at $E_c - 0.20$ eV, $E_c - 0.45$ eV and $E_c - 0.62$ eV were detected. The annihilation of the first trap, which is believed to be related to an oxygen-multivacancy complex, was found to be induced by the new donor formation. The latter two traps are associated with Ni contamination and the plastic deformation due to oxygen precipitates, respectively.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОННЫЕ ЛОВУШКИ В КРЕМНИИ ТЕРМИЧЕСКИ ОБРАБОТАННОМ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

Проведены исследования глубоких центров в кремнии выращенным методом Чохральского и подвергнутым отжигу под высоким давлением. Обнаружено, что ловушки T1 ($E_c - 0,20$ eV) возникают вследствие воздействия гидростатического давления на скопления междоузельных атомов кислорода. Ловушки T2 ($E_c - 0,45$ eV) появляются из-за неконтролируемой диффузии никеля. Ловушки T3 ($E_c - 0,62$ eV) являются продуктом пластической деформации кремния, происходящей в высоких температурах в результате воздействия высокого давления на преципитаты кислорода в форме фазы SiO₂.