

ZASTOSOWANIE FOURIEROWSKIEJ SPEKTROSKOPII ABSORPCYJNEJ W PODCZERWIENI DO BADANIA INTERFEJSU $\text{SiO}_2//\text{Si}$ W ŁĄCZONYCH STRUKTURACH SOI

Małgorzata Możdżonek¹, Bronisław Piątkowski¹, Andrzej Kozłowski¹

Badania tlenków w pobliżu interfejsu $\text{SiO}_2//\text{Si}$ powstałego w wyniku połączenia płytek krzemowych oraz interfejsu Si/SiO_2 uformowanego w procesie termicznego utleniania płytek Si w łączonych strukturach SOI przeprowadzono metodą fourierowskiej spektroskopii absorpcyjnej w podczerwieni. Określono zmiany energii fononów TO i LO wiązań O-Si-O w zależności od grubości tlenku, poceniając badane tlenki poprzez trawienie w rozcieńczonym kwasie fluorowodorowym. Uzyskane wyniki zmian energii fononów optycznych w funkcji grubości tlenków pokazują, że w pobliżu obu interfejsów istnieją obszary substechiometrycznego SiO_x . Struktura tlenków w tych obszarach jest jednak różna. W przypadku interfejsu $\text{SiO}_2//\text{Si}$ występuje $\text{SiO}_2 + \text{Si}$, co powoduje przesunięcie linii absorpcyjnej modu TO w stronę wyższych liczb falowych. Zmiany położenia linii modu TO obserwowane są dla tlenków o grubości poniżej 4,0 nm. W interfejsie Si/SiO_2 warstwa SiO_x jest taka sama jak warstwa przejściowa w tlenkach termicznych. Badania absorpcyjne wykonano dla tlenków w zakresie grubości 1,5- 20 nm.

1. WSTĘP

Opracowano już wiele typów struktur SOI (*silicon-on-insulator*), jednak szersze praktyczne zastosowanie znalazły głównie dwa ich rodzaje: SIMOX oraz łączone (*bonded*) struktury SOI. W strukturach typu SIMOX odseparowanie dwóch warstw Si następuje w wyniku implantacji tlenu do płytki Si. Łączone struktury SOI otrzymywane są natomiast poprzez połączenie dwóch płytek Si, z których jedna pokryta jest tlenkiem termicznym. Zespolecie płytek następuje wskutek działania międzycząsteczkowych sił van der Waals'a pomiędzy dwoma niemal idealnie płaskimi powierzchniami płytek. Proces łączenia płytek wykonywany jest w temperaturze pokojowej, a następnie dla uzyskania większej siły ich zespolecia struktura wy-

¹ Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa, e-mail: Malgorzata.Mozdzonek@itme.edu.pl

grzewana jest w temperaturze $\sim 1100^{\circ}\text{C}$ w atmosferze tlenu. W powstałej w ten sposób strukturze SOI aktywna warstwa krzemu jest pocieniana poprzez szlifowanie i polerowanie. Z punktu widzenia produkcji elementów półprzewodnikowych istotne jest, aby interfejsy w strukturach SOI posiadały jak najlepsze parametry elektryczne. Biorąc pod uwagę fakt, że właściwości izolujące tlenków zależą głównie od jakości tlenku w pobliżu interfejsu poznanie struktury tlenków w tym obszarze ma duże znaczenie praktyczne.

Spektroskopia absorpcyjna w podczerwieni (IR) jest metodą umożliwiającą w sposób szybki i dokładny zidentyfikowanie różnych wiązań chemicznych, a czułość spektrofotometrów Fourierowskich pozwala na badanie nawet pojedynczych warstw atomowych. Dlatego też, metoda ta jest stosowana do badania struktury tlenków termicznych, również tych bardzo cienkich w pobliżu interfejsu Si/SiO₂ [1-5]. W niniejszej pracy przy użyciu tej metody przeprowadzono analizę stechiometrii SiO₂ w pobliżu interfejsu SiO₂//Si, powstałego w wyniku połączenia płytek Si w łączonych strukturach SOI. Analiza wyników, otrzymanych dla badanych struktur SOI wskazuje na występowanie w interfejsie SiO₂//Si warstwy SiO_x. Warstwa ta różni się zarówno strukturą jak i grubością od tej, jaką obserwuje się na płytkach krzemowych z tlenkiem termicznym.

2. SPOSÓB PRZYGOTOWANIA PRÓBEK I PRZEPROWADZENIA POMIARÓW

Łączone struktury SOI zostały wykonane z domieszkowanych fosforem (P) płytek krzemowych o średnicy 76 mm i orientacji (100), pochodzących z kryształów otrzymanych metodą Czochralskiego (Cz) oraz metodą topienia strefowego (FZ). Rezystywność płytek Si Cz i FZ wynosiła odpowiednio 5-8 Ωcm i 5-7 Ωcm . Płytki były jednostronnie wypolerowane, a ich grubość wynosiła $\sim 200\ \mu\text{m}$. Część płytek została utleniona w dwóch różnych procesach termicznych. Jedną grupę płytek utleniono w temperaturze 900°C w mokrym tlenie (*wet* O₂), a grubość otrzymanego SiO₂ była $\sim 154,6\ \text{nm}$. Drugą partię płytek utleniono w temperaturze 1050°C w suchym tlenie (*dry* O₂) i otrzymano tlenek o grubości $\sim 173,1\ \text{nm}$. Następnie płytki z tlenkiem zostały połączone w temperaturze pokojowej z płytkami bez tlenku. Dla uzyskania silniejszego zespolenia, łączone płytki poddano obróbce termicznej w temperaturze 200°C przez 3 godz. w atmosferze powietrza. Pozostające w obszarze łączenia pęcherze, usunięto wygrzewając otrzymane struktury SOI w suchym tlenie w 1100°C przez 3 godz. Jakość połączenia płytek skontrolowano poprzez obserwację powierzchni złącza w podczerwieni. Przeprowadzono również obserwację przełomu struktur SOI za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM). Badania absorpcyjne w podczerwieni tlenków w pobliżu interfejsów SiO₂//Si oraz Si/SiO₂ wykonano przy użyciu spektrofotometru fourierowskiego (FTIR) firmy Bruker typu

IFS 113v w zakresie spektralnym $400 - 2000 \text{ cm}^{-1}$ ze zdolnością rozdzielczą 6 cm^{-1} w temperaturze 273 K. Zastosowano dwie konfiguracje pomiarowe:

- 1 - strumień IR padał prostopadle na badaną strukturę,
- 2 - strumień IR padał pod kątem 25° do powierzchni badanej struktury.

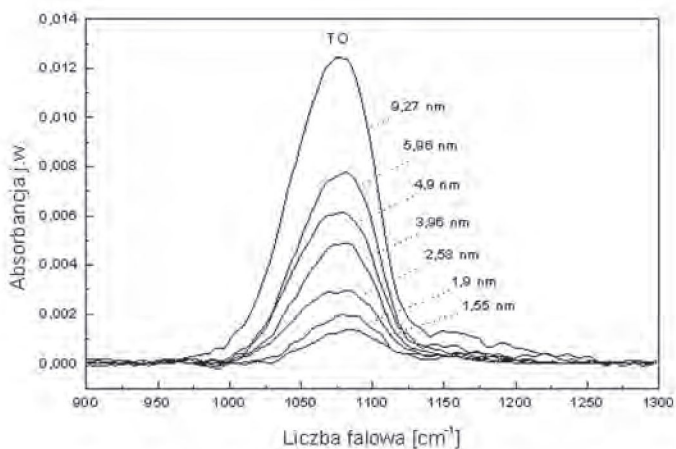
Pierwsza konfiguracja pozwala obserwować linie absorpcyjne pochodzące od poprzecznych fononów optycznych (TO – *transverse optical*) wiązań Si-O-Si. Linia modu TO występująca przy $\sim 1080 \text{ cm}^{-1}$ pochodzi od asymetrycznych drgań rozciągających (*asymmetric stretching vibration*) wiązań Si-O-Si. Intensywność tej linii jest wprost proporcjonalna do grubości tlenku. Dlatego też została ona wykorzystana do określania grubości badanych tlenków. Pomiar kalibracyjny tlenków o grubości 3,1 nm, 6,8 nm i 9,5 nm przeprowadzono za pomocą elipsometru spektralnego. Druga konfiguracja pomiarowa umożliwia natomiast jednoczesne badanie linii fononowej TO oraz linii pochodzącej od podłużnych fononów optycznych (LO – *longitudinal optical*) wiązań Si-O-Si. Do obserwacji pasm LO konieczne jest aby strumień IR padał na próbkę pod kątem i miał polaryzację równoległą do powierzchni płytki (p) [1]. Padająca prostopadle na płytkę fala elektromagnetyczna nie oddziałuje bowiem na podłużne fonony (LO) w SiO_2 .

Próbki do badań absorpcyjnych SiO_2 w pobliżu interfejsów $\text{SiO}_2//\text{Si}$ oraz Si/SiO_2 przygotowano poprzez usunięcie warstwy Si z drugiej strony struktury SOI. Warstwę Si najpierw częściowo zeszlifowano, a następnie zastosowano selektywne trawienie jednostronne. Ujawniony w ten sposób tlenek był powoli trawiony w roztworze (1:100) HF (1 część HF 49% i 100 części wody dejonizowanej).

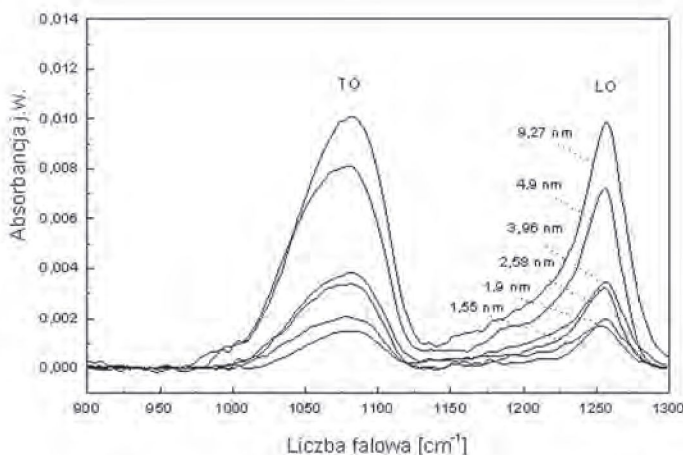
3. WYNIKI EKSPERYMENTALNE

Pomiary widm absorpcyjnych SiO_2 zostały wykonane dla tlenków w zakresie grubości 1,5 – 20,0 nm od interfejsów $\text{SiO}_2//\text{Si}$ oraz Si/SiO_2 struktur SOI. Dla porównania podobne pomiary widm IR przeprowadzono również dla płytek krzemowych z tlenkiem termicznym, będących płytkami wyjściowymi do wykonania struktur SOI. Widma absorpcyjne otrzymane dla SiO_2 w pobliżu interfejsu $\text{SiO}_2//\text{Si}$ w strukturze SOI FF05 wykonanej z płytek Si-FZ, z tlenkiem otrzymanym poprzez utlenianie w mokrym tlenie w 900°C przedstawione są na Rys. 1. Charakterystyki zmian położenia linii absorpcyjnych modów TO i LO w funkcji grubości tlenku zamieszczono odpowiednio na Rys. 2-3. Na wykresach umieszczono również wyniki otrzymane dla płytki wyjściowej. Jak widać, wyniki uzyskane dla tlenków z interfejsu $\text{SiO}_2//\text{Si}$ w strukturze SOI oraz tlenków z interfejsu Si/SiO_2 w płytce wyjściowej znaczne się od siebie różnią. W pierwszym przypadku, w zakresie grubości SiO_2 3,5 – 15,0 nm, położenie linii modu TO prawie nie ulega zmianie (występuje tylko minimalny wzrost o 1 cm^{-1}). Wraz z dalszym pocienianiem tlenku następuje dość gwałtowne przesunięcie linii modu TO w stronę wyższych liczb falowych. Obserwowana zmiana

położenia linii TO wynosi 7 cm^{-1} przy różnicy w grubości tlenku $2,0 \text{ nm}$. Natomiast w przypadku obszaru przejściowego w interfejsie Si/SiO₂ w płytce wyjściowej, dla tlenków o grubości poniżej $10,0 \text{ nm}$ linia modu TO przesuwana jest w stronę niższych liczb falowych wraz ze zmniejszaniem się grubości SiO₂, co jest zgodne z danymi literaturowymi [2-4]. Wyższe wartości liczb falowych linii fononowych TO i LO



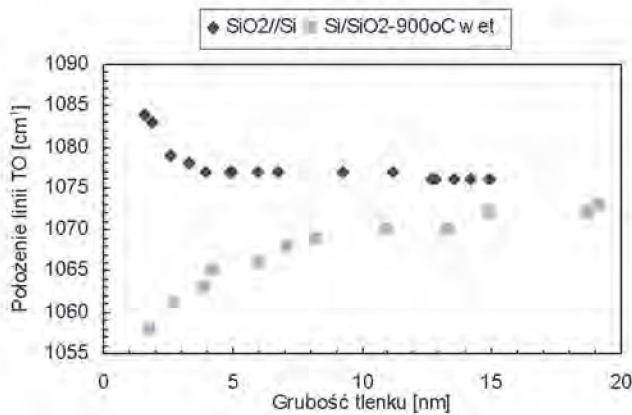
a)



b)

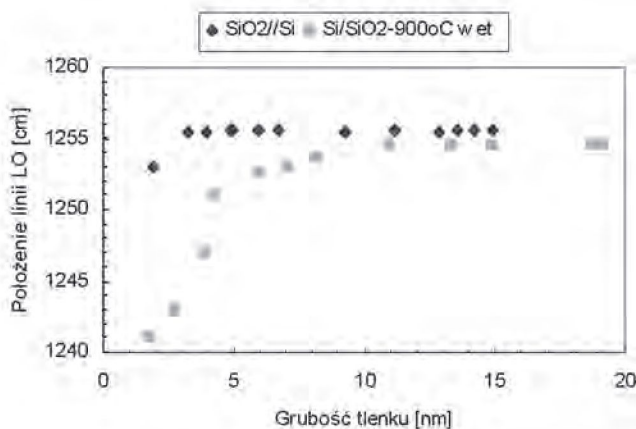
Rys. 1. Widma absorpcyjne tlenków o grubości od $1,5 \text{ nm}$ do $9,3 \text{ nm}$ w pobliżu interfejsu SiO₂//Si otrzymane dla dwóch kątów padania strumienia IR: (a) prostopadle, (b) pod kątem 25° do powierzchni płytki. Struktura SOI z SiO₂ otrzymanym w mokrym tlenie w 900°C .
Fig. 1. IR absorption spectra of the oxide near the SiO₂//Si interface thinned from $9,3 \text{ nm}$ to $1,5 \text{ nm}$, acquired with the infrared beam incident: (a) normal, (b) grazing (25°) to the sample surface. The SOI structure with the SiO₂ grown at 900°C in wet O₂.

jakie widzimy dla tlenków o grubości powyżej 10,0 nm z interfejsu SiO₂//Si to wynik wygrzania struktury SOI w temperaturze wyższej od temperatury otrzymania tlenku. Efekt ten, świadczący o zmianach strukturalnych zachodzących w objętości tlenku obserwowany jest dla tlenków otrzymanych w temperaturach poniżej 1100°C, a następnie poddanych obróbce termicznej w wyższej temperaturze [2]. Położenie linii modu LO dla tlenków z interfejsu SiO₂//Si nie zmienia się aż do grubości ~1,9 nm, po czym ulega nieznacznemu przesunięciu (o ~3 cm⁻¹) w stronę niższych liczb falowych wraz ze zmniejszeniem grubości SiO₂. W przypadku interfejsu Si/SiO₂ w płycie wyjściowej obserwowany jest natomiast dość gwałtowny spadek liczby falowej linii LO dla tlenków o grubościach < 5,0 nm.



Rys. 2. Położenie linii modu TO w funkcji grubości tlenku dla dwóch rodzajów interfejsów: SiO₂//Si w strukturze SOI oraz dla Si/SiO₂ w płycie wyjściowej. SiO₂ otrzymany w mokrym tlenie w 900°C.

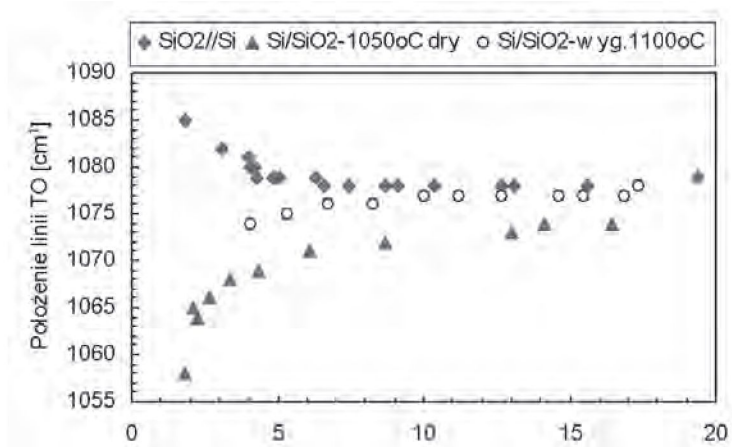
Fig. 2. The peak position of the TO mode as a function of the oxide film thickness for two interfaces: SiO₂//Si in the SOI structure and Si/SiO₂ on the initial wafer. SiO₂ was grown in wet O₂ at 900°C.



Rys. 3. Położenie linii modu LO w funkcji grubości tlenku dla dwóch rodzajów interfejsów: SiO₂//Si w strukturze SOI oraz dla Si/SiO₂ w płytce wyjściowej. SiO₂ otrzymany w mokrym tleniu w 900°C.

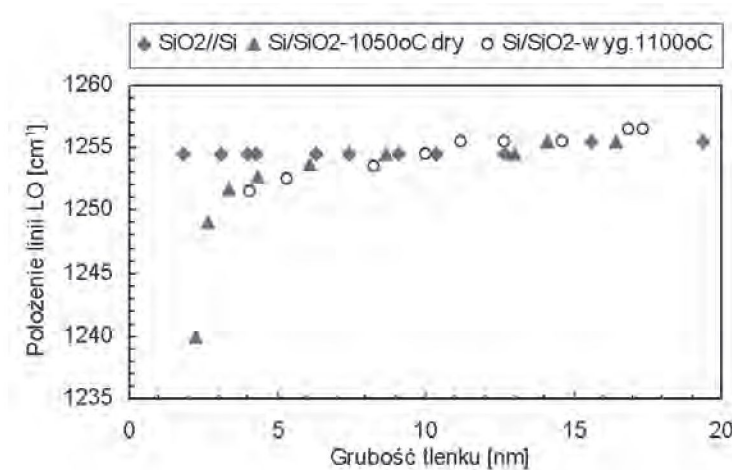
Fig. 3. The peak position of the LO mode as a function of the oxide film thickness for two interfaces: SiO₂//Si in the SOI structure and Si/SiO₂ on the initial wafer. SiO₂ was grown in wet O₂ at 900°C.

Na Rys. 4–5 zobrazowano zmiany położenia linii fononowych TO i LO w funkcji grubości tlenku otrzymane dla interfejsu SiO₂//Si w strukturze SOI CC26 wykonanej z płytek Si-Cz, z tlenkiem otrzymanym w suchym tleniu w 1050°C. Na wykresach zamieszczono dodatkowo wyniki uzyskane dla płytki wyjściowej oraz dla interfejsu Si/SiO₂ w strukturze SOI po wygrzaniu struktury w 1100°C. Widoczne jest, że charakter zmian położenia linii modów TO i LO w funkcji grubości SiO₂ jest podobny do zmian zaobserwowanych dla próbki FF05 (Rys. 2-3). Należy jednak zauważyć, że początkowe przesunięcie linii TO w kierunku wyższych liczb falowych następuje dla nieco grubszego tlenku, bo już przy ~ 4,2 nm. Zmiany położenia modów LO i TO dla interfejsu Si/SiO₂ w strukturze SOI po wygrzaniu wraz ze strukturą wykazują taką samą zależność jak dla interfejsu Si/SiO₂ w próbce wyjściowej. Dla tlenków o grubości większej niż 10,0 nm położenie linii fononowych TO i LO jest jednakowe dla obu interfejsów w strukturze SOI (dla SiO₂//Si oraz Si/SiO₂).



Rys. 4. Położenie linii modu TO w funkcji grubości tlenku dla interfejsów: SiO₂//Si w strukturze SOI, Si/SiO₂ w płytce wyjściowej oraz Si/SiO₂ w strukturze SOI po wygrzaniu w 1100°C. SiO₂ otrzymany w suchym tlenie w 1050°C.

Fig. 4. The peak position of the TO mode as a function of the oxide film thickness for three interfaces: SiO₂//Si in the SOI structure, Si/SiO₂ on the initial wafer and Si/SiO₂ in the SOI structure after annealing at 1100°C. SiO₂ was grown in dry O₂ at 1050°C.



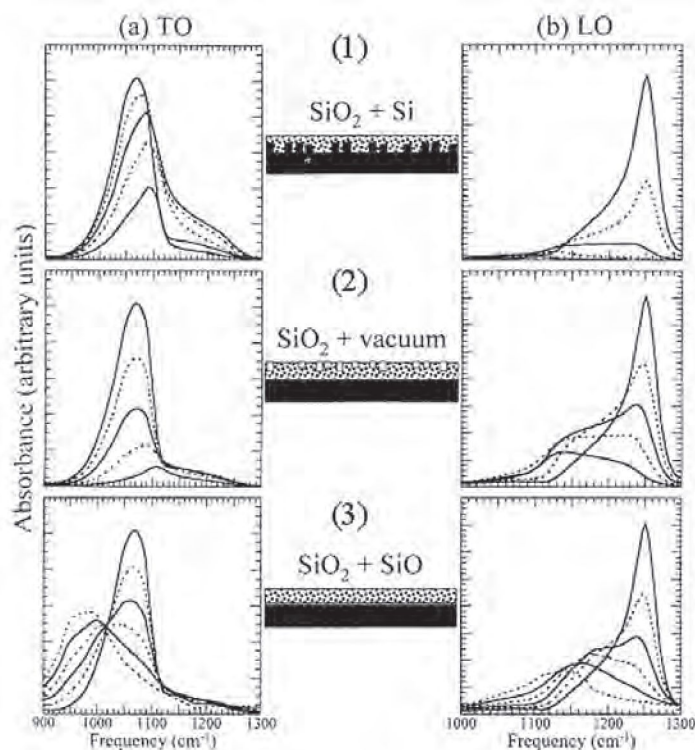
Rys. 5. Położenie linii modu LO w funkcji grubości tlenku dla interfejsów: SiO₂//Si w strukturze SOI, Si/SiO₂ w płytce wyjściowej oraz Si/SiO₂ w strukturze SOI po wygrzaniu w 1100°C. SiO₂ otrzymany w suchym tlenie w 1050°C.

Fig. 5. The peak position of the LO mode as a function of the oxide film thickness for three interfaces: SiO₂//Si in the SOI structure, Si/SiO₂ on the initial wafer and Si/SiO₂ in the SOI structure after annealing at 1100°C. SiO₂ was grown in dry O₂ at 1050°C.

4. ANALIZA OTRZYMANYCH WYNIKÓW

Przedstawione powyżej wyniki zmian położenia linii fononowych TO i LO dla tlenków o grubości powyżej 10,0 nm w pobliżu interfejsu SiO_2/Si powstałego z połączenia płytek oraz interfejsu Si/SiO_2 utworzonego poprzez utlenianie termiczne pokazują, że właściwości tlenków w tym zakresie grubości są takie same w obu interfejsach. W każdym przypadku, linia modu TO przesuwa się w stronę niższych liczb falowych gdy grubość tlenku maleje, a położenie linii modu LO pozostaje natomiast stałe. Przesunięcie linii fononowej TO w kierunku bliższej podczerwieni wywołane jest zmianą fazy fali elektromagnetycznej jaka następuje na granicy Si/SiO_2 [2]. Natomiast dla tlenków o grubości od 1,5 do 10,0 nm wyniki otrzymane dla poszczególnych interfejsów znacznie się od siebie różnią. Dla interfejsu Si/SiO_2 występuje dość gwałtowne obniżenie liczby falowej modów TO i LO w funkcji grubości warstwy SiO_2 . Według autorów prac [4, 9] jest ono wynikiem występowania warstwy SiO_x ($x < 2$) o grubości $\sim 0,6$ nm w obszarze interfejsu Si/SiO_2 , a zmiany w strukturze SiO_2 są bardziej zobrazowane poprzez położenie linii modu LO niż modu TO [4]. Jak pokazują wyniki przedstawione na Rys. 2-5 dla tlenków o grubości poniżej 10,0 nm w pobliżu interfejsu SiO_2/Si w strukturach SOI linie fononowe TO oraz LO położone są w zakresie znacznie wyższych liczb falowych niż dla interfejsu Si/SiO_2 . Następuje też wzrost liczby falowej linii fononowej TO wraz ze zmniejszaniem się grubości SiO_2 tzn. odwrotnie niż dla typowego interfejsu Si/SiO_2 (Rys. 2). Ponadto, szerokość linii modu TO maleje wraz z grubością tlenku podczas gdy dla Si/SiO_2 rośnie. Zmiany położenia modu LO są natomiast nieznaczne, a przesunięcie linii w kierunku niższych liczb falowych następuje dopiero dla tlenków o grubości poniżej 2,0 nm. Porównanie przebiegu zmian położenia modów TO i LO dla tlenków w zakresie grubości 1,5 – 10,0 nm w interfejsach SiO_2/Si i Si/SiO_2 pokazuje więc, że tlenki w tych obszarach interfejsów charakteryzują się różną strukturą. K.T. Queeney w oparciu o teorię EMA Bruggeman'a (*effective medium approximation*) obliczył widma absorpcyjne symulujące wpływ chropowatości interfejsów oraz zmian składu SiO_x na widma absorpcyjne podłużnych (TO) i poprzecznych (LO) fononów optycznych. Wyniki tych obliczeń przedstawione w pracy [4] zamieszczono na Rys. 6. Zestawienie uzyskanych przez autorów widm absorpcyjnych tlenków z obszaru interfejsu SiO_2/Si z widmami absorpcyjnymi obliczonymi dla układu $\text{SiO}_2 + \text{Si}$ pozwala wnioskować, że tlenek w pobliżu interfejsu SiO_2/Si w strukturze SOI nie jest stechiometryczny, lecz posiada raczej strukturę $\text{SiO}_2 + \text{Si}$. Warstwa tlenku o strukturze SiO_x w interfejsie SiO_2/Si wydaje się być też znacznie cieńsza niż w interfejsie Si/SiO_2 płytki wyjściowej, ponieważ zmiany położenia linii fononowych następują dla tlenku cieńszego. Dokładne określenie grubości tej warstwy z otrzymanych wyników nie jest jednak możliwe. Obecność warstwy o strukturze $\text{SiO}_2 + \text{Si}$ może wynikać z chropowatości powierzchni płytki dołączonej lub być

wynikiem dyfuzji O_2 podczas wygrzewania struktury SOI w temperaturze $1100^\circ C$. Chropowatość polerowanych płytek krzemowych jest rzędu $0,2 - 0,3$ nm. W procesie wygrzewania struktury SOI powierzchnia płytki Si ulega prawdopodobnie dalszemu wygładzeniu, co potwierdzają wyniki badań po wygrzaniu tych struktur w zakresie temperatur $400 - 1000^\circ C$ [7], przeprowadzonych metodą wielokrotnych odbić wewnętrznych (MIR – *multiple internal reflection*). Dla temperatury wygrzewania $800^\circ C$ w widmach absorpcyjnych występuje bardzo wąska linia C-H, która jest obserwowana dla idealnie gładkiej powierzchni płytki Si [6-7].



Rys. 6. Widma modów TO (a) i LO (b) obliczone wg teorii EMA w zależności od zawartości SiO_2 w ośrodku: (1) Si, wpływ chropowatości płytki na interfejsie SiO_2/Si , (2) próżnia, wpływ chropowatości płytki na interfejsie $SiO_2/powietrze$, (3) SiO, symulacja substechiometrii interfejsu SiO_2/Si . Poszczególne linie od najwyższej odpowiadają następującej zawartości SiO_2 : 99%, 80%, 60%, 40%, 20% oraz 10% w (3) [4].

Fig. 6. Spectra of the (a) TO and (b) LO calculated as function of SiO_2 filling fraction mixed via effective medium approximation with (1) Si, to simulate roughness at the Si/SiO_2 interface, (2) vacuum, to simulate roughness at the SiO_2/air interface; and (3) SiO, to simulate substoichiometry at the Si/SiO_2 interface. The tallest (solid) peak in each spectrum corresponds to 99% SiO_2 , with the fraction of SiO_2 in the film decreased to 0.8 (dashed), 0.6 (solid), 0.4 (dashed), and 0.2 (solid). The final dashed spectrum in (3) corresponds to 90% SiO [4].

Wyniki otrzymane metodą MIR umożliwiły również stwierdzenie, że po połączeniu płytek krzemowych, w obszarze złącza występują molekuly H_2O i OH , które ulegają rozpadowi w temperaturach wyższych od $400^\circ C$. Wiązania Si-O-Si powstają natomiast w temperaturze $\sim 1000^\circ C$ [7]. W pracy [8] T.Abe i H. Yamada-Kaneta przedstawili rezultaty prac nad dyfuzją tlenu z tlenków termicznych do płytek Si podczas izotermicznych procesów dla zakresu temperatur $1050 - 1150^\circ C$, które pokazują, że koncentracja tlenu wdyfundowanego do płytki Si wzrasta wraz z temperaturą wygrzewania. Współczynniki dyfuzji atomów tlenu z warstwy SiO_2 do płytki krzemowej określone dla temperatury $1100^\circ C$ wg zależności wyprowadzonej przez nich wynoszą: $1,14 \times 10^{-10} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ dla tlenku otrzymanego w suchym tlenie i $6,92 \times 10^{-11} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ dla tlenku otrzymanego w mokrym tlenie [8]. Tak więc, w wyniku dyfuzji atomów tlenu do płytki Si w interfejsie $SiO_2//Si$ powstaje warstwa tlenku SiO_x , którą obserwujemy w widmach absorpcyjnych.

5. PODSUMOWANIE

W pracy przeprowadzono badania struktury tlenków w pobliżu interfejsu $SiO_2//Si$ powstałego w wyniku połączenia płytek krzemowych oraz interfejsu Si/SiO_2 uformowanego w procesie termicznego utleniania płytek Si w łączonych strukturach SOI za pomocą fourierowskiej spektroskopii absorpcyjnej w podczerwieni (FT-IR). Pocieniając badane tlenki poprzez trawienie w 1% kwasie fluorowodorowym zbadano energie fononów TO i LO wiązań O-Si-O w zależności od grubości tlenku. Charakter widma fononowego zależy bowiem od składu SiO_x . Uzyskane wyniki zmian energii fononów optycznych w funkcji grubości tlenków pokazują, że w pobliżu obu interfejsów istnieją obszary niestechiometrycznego SiO_x . Struktura tlenków w tych obszarach jest jednak różna. W przypadku interfejsu $SiO_2//Si$ występuje $SiO_2 + Si$. Fakt ten manifestuje się w pomiarach absorpcyjnych wzrostem liczby falowej modu TO dla tlenków o grubości poniżej 3,0 nm oraz prawie stałym położeniem linii modu LO aż do $\sim 1,9$ nm. Natomiast w interfejsie Si/SiO_2 tlenek posiada taką samą strukturę jak w płycie wyjściowej, a więc występuje $SiO_2 + SiO$, co powoduje przesunięcie linii fononowych TO i LO w stronę niższych liczb falowych gdy grubość tlenku maleje. Grubość tlenku, dla której obserwowane były zmiany częstości linii fononowych TO i LO dla interfejsu powstałego z połączenia płytek wynosi: $\sim 3,0$ nm dla struktury SOI z SiO_2 otrzymanym w mokrym tlenie w $900^\circ C$ oraz $\sim 4,0$ nm dla struktury z SiO_2 otrzymanym w suchym tlenie w $1050^\circ C$. Badania absorpcyjne wykonano dla tlenków w zakresie grubości 1,5 - 20 nm.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Berreman D.W.: Infrared absorption at longitudinal optic frequency in cubic crystal films. *Phys.Rev.*, 130, (1963), 2193
- [2] Martinet C., Devine R.A.B.: Analysis of the vibrational mode spectra of amorphous SiO₂ films. *J. Appl. Phys.*, 77, 9, (1995) 4343
- [3] Devine R.A.B.: Structural nature of the Si/SiO₂ interface through infrared spectroscopy. *Appl. Phys. Lett.*, 68, 22, (1996), 3108
- [4] Queeney K.T., Weldon M.K., Chang J.P., Chabal Y.J., Gurevich A.B., Sapjeta J., Opila R.L.: Infrared spectroscopic analysis of the Si/SiO₂ interface structure of thermally oxidized silicon. *J. Appl. Phys.*, 87, 3, (2000), 1322
- [5] Milkehin A., Friedrich M., Hiller K., Wiemer M., Gessner T., Zahn D.R.T.: Infrared study of Si surfaces and bonded Si wafers, *Semicond. Sci. Technol.*, 14, 70, (1999)
- [6] Pietsch G.J., Chabal Y.J., Higashi G.S.: *J. Appl. Phys.*, 78, 3, 1995, 1650
- [7] Możdzonek M.: Wpływ obróbki termicznej na struktury Si-Si typu bonding, praca statutowa ITME, (2002)
- [8] Abe T., Yamada-Kaneta H.: „Annealing behavior of oxygen in-diffusion from SiO₂ film to silicon substrate. *J. Appl. Phys.*, 96, 8, (2004), 4143

INFRARED SPECTROSCOPIC ANALYSIS OF THE SiO₂//Si INTERFACE OF SOI STRUCTURES

SUMMARY

Infrared absorption spectroscopy has been used to investigate the silicon oxide near the two interfaces in the SOI structure, the SiO₂//Si interface created by bonding of two silicon wafers and the Si/SiO₂ interface created by thermal oxidation. The oxide films were thinned by etching in dilute hydrofluoric acid for the spectroscopic analysis. The behavior of the transverse (TO) and longitudinal (LO) optical phonon modes, which are associated with asymmetric stretching the O-Si-O bonds as a function of the oxide film thickness provides an evidence that near the both interfaces exist region of sub-stoichiometric silicon oxide (SiO_x). The structure of this SiO_x layer is different at each interface. We propose a model in which the sub-oxide layer in the SiO₂//Si interface is composed with SiO₂ and Si. We found that the TO phonon frequency apparently starts to shift toward higher wave number at around 4,0 nm from the interface. The structure of this SiO_x layer in the Si/SiO₂ interface is just the same as that observed for the thermal oxide. Spectroscopic investigations were performed for the oxide films range from 1,5 nm to 20 nm.