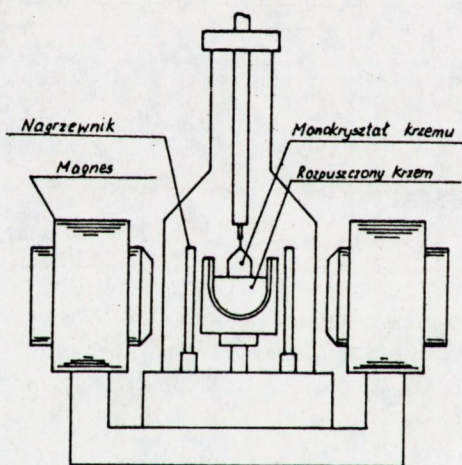


## Wpływ pola magnetycznego na proces monokryształizacji krzemu metodą Czochralskiego

### 1. WPROWADZENIE

W ostatnich latach dokonano znacznego postępu w zmniejszaniu rozmiarów elementów półprzewodnikowych, a jednocześnie wzrosły wymagania eksploatacyjne dotyczące układów scalonych. W rezultacie powstała konieczność poprawy własności monokryształu, a zwłaszcza jednorodności rozkładu domieszek, których koncentracja w kryształach powinna być na ściśle określonym poziomie. Pierwsze sugestie użycia pola magnetycznego w tym celu wysunięto już w 1966 r.



Rys. 1. Schemat systemu do monokryształizacji metodą Czochralskiego w polu magnetycznym

w tygłu w procesie MCz oraz ich wpływu na transport tlenu i domieszek, aby móc sterować własnościami kryształów otrzymywanych w polu magnetycznym.

### 2. BADANIA METODĄ SYMULACJI NUMERYCZNYCH ZJAWISK ZACHODZĄCYCH W POLU MAGNETYCZNYM W PROCESIE MONOKRYSTAŁIZACJI METODĄ CZOCHRALSKIEGO

W ciągu ostatnich kilku lat badania koncentrowały się na tworzeniu modeli systemu monokryształizacji Cz opisanych matematycznie oraz na symulowaniu procesu przez roz-

eksperymentalnie ustalono, że pole magnetyczne tłumi lub stabilizuje konwekcję termiczną w cieczy z jednoczesnym stłumieniem fluktuacji termicznych w pobliżu frontu wzrostu, co eliminuje pasma wzrostu. Ponadto odpowiednie zastosowanie pola pozwala kontrolować koncentrację tlenu w monokryształach.

Metoda MCz (Magnetic-field-applied Czochralski) ciągle jeszcze nie jest powszechnie stosowana w produkcji, ponieważ wpływ pola na zjawiska zachodzące w procesie monokryształizacji jest różnorodny i trudny do jednoznacznego określenia. W ITME podjęto więc badania mające na celu gruntowne poznanie ruchów cieczy krzemowej

wiązywanie metodami numerycznymi zależności opisujących zjawiska fizyczne zachodzące podczas tego procesu.

Zaletą posługiwania się symulacją jako metodą badawczą jest wyeliminowanie bardzo kosztownej i złożonej aparatury, jaką należałoby zastosować do eksperymentalnego badania zjawisk zachodzących w systemie.

Modele symulacyjne wymagają przyjęcia pewnych uproszczeń w celu opisanie ich równaniami matematycznymi lub rozwiązania tych równań, dlatego są one tylko pewnym przybliżeniem rzeczywistych zjawisk. Niemniej jednak pozwalają one na rozpatrywanie wpływu różnych parametrów na zjawiska zachodzące w systemie.

Pionierskie prace, w których symulowano metodami numerycznymi przebieg procesu pod działaniem pola magnetycznego, ukazały się w roku 1982 [1].

W badaniach symulacyjnych, jakie prowadzono później, analizowano wpływ pola magnetycznego na wiele zjawisk zachodzących w systemie monokryształizacji, takich jak: przepływy konwekcyjne w cieczy, asymetrię przepływu oraz rozkład temperatury w roztopionym krzemie, periodyczne fluktuacje temperatury, efektywny współczynnik rozdziału, transport tlenu w cieczy krzemowej, efekty współ-rotacji i przeciw-rotacji tygla i kryształu, postaci warstewki granicznej na froncie kryształu-ciecz.

Należy tu nadmienić, że analizując wymienione zjawiska ograniczano się do pewnych konfiguracji systemu monokryształizacji i z tego powodu nie można wyników odnosić bezpośrednio do procesów rzeczywistych. Często rozwiązania modeli symulacyjnych należy traktować jako wskazówkę do dalszych, już eksperymentalnych, badań. Niekiedy wymagają one nowych rozwiązań matematycznych w celu uzyskania pewnych uogólnień.

Dlatego niezmiernie ważny jest nurt badań eksperymentalnych nad zastosowaniem pola magnetycznego w metodzie Cz.

### 3. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Wyniki badań eksperymentalnych powinny stanowić potwierdzenie tezy sformułowanej na podstawie wyników działania modelu symulacyjnego. Zdarza się jednak, że złożoność zjawisk lub ułomność stosowanego modelu wskazuje na wiarygodność jedynie wyników eksperymentalnych.

Prace eksperymentalne skupiały się przede wszystkim na badaniu zjawisk symetrii termicznej w cieczy krzemowej, zawartości tlenu w kryształach Si otrzymywanych metodą Cz., mikroskopowego rozkładu osiowego domieszki w kryształach, innych własności kryształów krzemu otrzymywanych w poprzecznym i pionowym polu magnetycznym.

Już samo przytoczenie zagadnień, jakim były poświęcone dotychczasowe prace badawcze - zarówno teoretyczne, jak i doświadczalne - wskazuje na duży i złożony wpływ pola magnetycznego na proces Czochrańskiego. Ponadto trzeba pamiętać, że pole magnetyczne oddziałuje jako jeden z kilku czynników zewnętrznych. Dlatego też należy rozpatrywać własności końcowe monokryształu jako wynik skomplikowanej współzależności oddziaływania tych czynników. Tłumaczy to fakt, że kryształy otrzymywane w pozornie porównywalnych warunkach różnią się takimi własnościami, jak: koncentracja tlenu, rozkład domieszki, występowanie mikrodefektów.

#### 4. WPŁYW POLA MAGNETYCZNEGO NA PRZEPIŁYWY KONWEKCYJNE W STOPIONYM KRZEMIE ORAZ NA ASYMETRIĘ PRZEPIŁYWU

Aby móc sterować własnościami kryształu wyciąganego w polu magnetycznym, należy poznać ruchy cieczy krzemowej w tyglu pod wpływem pola oraz ich wpływ na transport tlenu i domieszek.

Ruch cieczy w tyglu ma kilka składowych [2], [10]:

- pierwszą jest ruch cieczy związany ze wzrostem kryształu, gdy prędkość cieczy przy froncie równa jest prędkości wyciągania;
- drugą jest ruch wynikający z obrotów kryształu i tygla. Siła odśrodkowa powoduje pompowanie cieczy w kierunku południkowym. Cyrkulację tę nazywa się konwekcją wymuszoną;
- trzecia składowa wiąże się z działaniem siły wyporu. Ogrzana ciecz unosi się przy pionowych ściankach tygla, zimna natomiast opada pod czołem kryształu. Cyrkulację tę nazywa się konwekcją termiczną;
- czwarta składowa związana z termokapilarnością jest ruchem cieczy przy powierzchni swobodnej, polegającym na przepływie od obszaru o niskim napięciu powierzchniowym przy gorącym tyglu do obszaru o wysokim napięciu powierzchniowym blisko chłodnego kryształu. Niektórzy badacze uważają konwekcję termokapilarną za czynnik mający dominujący wpływ na własności kryształu [2, 5].

Pierwsza składowa jest bardzo mała i może być pomijana. Pozostałe trzy można traktować jako przepływy stałe. Kiedy przepływ cieczy przewodzącej elektrycznie przecina ją linie sił pola magnetycznego, powstaje siła przeszkadzająca krążeniu cieczy. Siła tłumienia zależy od natężenia pola magnetycznego.

Przy odpowiednio silnym polu magnetycznym prędkości przepływu w cieczy są tak małe, że:

- wpływ sił inercji oprócz siły odśrodkowej można pominać,
- wpływy kapilarności ograniczają się do bardzo cienkiej warstwy,
- ruchy cieczy związane z pozostałymi mechanizmami napędzającymi maleją.

Z rozwiązania równań opisujących model przedstawiony w pracy [3] wynika postać przepływu cieczy krzemowej w tyglu w czasie procesu krystalizacji. Przepływ jest wypadkową obu przepływów konwekcyjnych (swobodny i wymuszony) i jego postać zmienia się w zależności od tego, jaki typ konwekcji dominuje i od wzajemnych relacji obrotów kryształu i tygla.

W pracy [3] wykreślono kontury będące rzutem linii przepływu na płaszczyznę przekroju pionowego. Przy dominowaniu konwekcji wymuszonej linie przepływu tworzą zamkniętą komórkę pod kryształem o cirkulacji zgodnej ze wskazówkami zegara. Przy silnym wpływie konwekcji swobodnej cirkulacja cieczy w tyglu odbywa się w dwóch zamkniętych komórkach o przeciwnych kierunkach przepływu. Zauważa się hamowanie radialnego ruchu cieczy, co powoduje osłabienie cirkulacji w płaszczyźnie pionowej, oraz tendencję do wywierania wpływu obrotami kryształu na głębsze penetrowanie cieczy przez strumień przepływu.

Charakter oddziaływania pola zależy od kierunku przepływu cieczy względem kierunku linii sił pola [4].

W polu magnetycznym poprzecznym wektory prędkości przepływu w płaszczyźnie horyzontalnej są tłumione w sposób zróżnicowany w zależności od kierunku, w którym te wektory

działają. W konsekwencji pole magnetyczne wymusza strumień przepływu w swoim własnym kierunku, a wektor maksymalnej prędkości jest tylko umiarkowanie stłumiony. Rozkład temperatury jest w dużym stopniu asymetryczny w pobliżu frontu wzrostu. Efekty te ulegają tylko nieznacznej zmianie przy dostarczeniu silniejszego pola.

Pionowe pole magnetyczne tłumi wektory prędkości w płaszczyźnie horyzontalnej niezależnie od kierunku tych wektorów w tej płaszczyźnie. Wektor prędkości maksymalnej jest znacznie zmniejszony. Pole temperaturowe w pobliżu frontu wzrostu jest znacznie bardziej symetryczne. Asymetria przepływu i pola temperatur zmniejsza się wraz ze wzrostem intensywności pola.

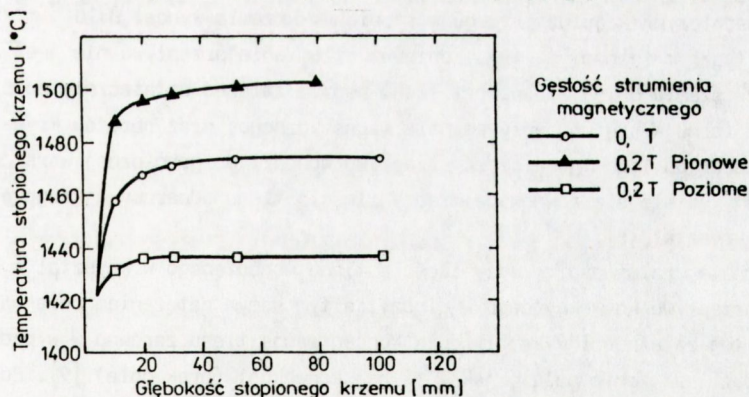
## 5. WPŁYW POLA MAGNETYCZNEGO NA FLUKTUACJĘ TEMPERATURY I ROZKŁAD TEMPERATURY W CIECZY

W warunkach bez pola magnetycznego - na skutek istnienia asymetrii termicznej w cieczy oraz niestabilności przepływu konwekcyjnego - powstają regularne wahania temperatury na froncie krystalizacji, odpowiadające za turbulencję czyli zaburzenia ruchu cieczy. Pole magnetyczne tłumi turbulencję, dzięki czemu eliminuje niekorzystne wpływy oscylacji na mikrosegregację składu, mikrodefekty, pasma wzrostu. Jednocześnie znika także korzystne zjawisko mieszania cieczy przez prądy turbulenty, które powodują wyrównywanie składu i gwałtowny transport tlenu i domieszek [2]. W wypadku silnej turbulencji koncentracja i rozkład tlenu oraz domieszek w kryształach są względnie niezależne od przepływów w cieczy.

Warunkiem stłumienia turbulencji jest większa wartość energii potencjalnej pola magnetycznego energii kinetycznej ruchów turbulentnych cieczy [23].

Bardzo ważnym czynnikiem warunkującym prędkość wzrostu monokryształu są gradienty temperatury w kryształach i w cieczy. Gradient temperatury w rosnącym kryształach nie zależy od pola magnetycznego i jest stały dla danego układu grzewczego.

Natomiast gradient temperatury w cieczy na głębokości pod frontem krystalizacji jest mniejszy w polu poziomym niż pionowym, a także mniejszy, gdy nie ma pola [19].



Rys. 2. Rozkład temperatury na głębokości cieczy

Wynika stąd możliwość stosowania większej prędkości wyciągania kryształu w polu magnetycznym poziomym. W eksperymencie [19] wyciągano kryształ o średnicy 125 mm z wsadu 30 kg z prędkością 2 mm/min w polu o natężeniu 0,25-0,3 Tesli.

Także temperatura przy dnie tygla jest niższa w polu poziomym niż w wypadku braku pola oraz niższa niż w polu pionowym. Wraz ze wzrostem natężenia pola poziomego obniża się temperatura przy dnie tygla.

Tak wyraźna różnica w rozkładzie temperatury w cieczy wynika z innej postaci przepływu cieczy w obu konfiguracjach pola.

Przepływ jest zdeterminowany zazwyczaj konwekcją termiczną, której tylko składowe poprzeczne do linii sił pola są tłumione.

W pracy [23] przewiduje się możliwość zwiększania prędkości wyciągania w polu pionowym, gdy przepływ jest skierowany z dołu do góry. Prędkość krystalizacji może wzrosnąć wtedy na tyle, że - jeśli zwiększeniu nie ulegną obroty kryształu lub prędkość wyciągania - łatwo może dojść do zakrzywienia osi kryształu.

Możliwość wykorzystania pola magnetycznego do zwiększenia prędkości wyciągania należałoby zweryfikować, prowadząc własne prace eksperymentalne. Pole magnetyczne zmienia bowiem w istotny sposób warunki krystalizacji i może ona ulegać przyspieszeniu, gdy zredukowany zostanie gradient temperatury (krystalizacja równowagowa) lub też przy przechłodzeniu przy froncie krystalizacji.

Mimo niezaprzeczalnego faktu tłumienia fluktuacji temperatury przez pole magnetyczne okazuje się, że niekoniecznie w rezultacie wyciągania kryształu w polu eliminuje się mikrosegregację składu (striations) [5].

## 6. TRANSPORT TLENU PODCZAS MONOKRYSTALIZACJI W POLU MAGNETYCZNYM

Tlen jest wprowadzany do cieczy z rozpuszczających się ścianek tygla kwarcowego, skąd wędruje wraz z przepływem do powierzchni swobodnej cieczy, gdzie podlega reakcji przypowierzchniowej. Tworzy lotny monotlenek krzemu, który odparowuje. Jednocześnie turbulencja cieczy rozprasza tlen w objętości.

W polu magnetycznym, gdy jest tłumiony przepływ konwekcyjny oraz turbulencja, pewną rolę zaczyna odgrywać dyfuzja tlenu. Badania [10] wskazują jednak, że jest ona skrajnie wolna; współczynnik dyfuzji tlenu w stopionym krzemie wynosi  $D=10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  i maleje w polu magnetycznym (pionowym) [9]. Ponieważ stłumienie przepływu nie jest całkowite (zależy od natężenia pola), transport tlenu będzie zależeć ostatecznie od przepływu cieczy, jaki formuje się pod wpływem pola magnetycznego, oraz obrotów kryształu i tygla. W zależności od tego, jaka część przepływu wchodzi do granicznej warstewki przypowierzchniowej, ustala się równowaga między ilością tlenu odparowującego a ilością wchodzącą w kryształ [8].

Nie ma prostej zależności między ilością tlenu wchodzącego w kryształ a stopniem stłumienia przepływu konwekcyjnego w cieczy, a tym samym natężeniem pola magnetycznego. Badania tej zależności wykazały dużą koncentrację tlenu zarówno w wypadku słabej konwekcji (duże natężenie pola), jak i silnej konwekcji (brak pola) [9]. Potwierdzeniem tych wyników badań symulacyjnych są wyniki doświadczeń prowadzonych w polu magnetycznym pionowym [14, 19, 20 i 9], które wykazały dużo większą zawartość tlenu w kryształach niż konwekcyjna metoda Cz.

Fakt ten znajduje w literaturze następujące wyjaśnienie:

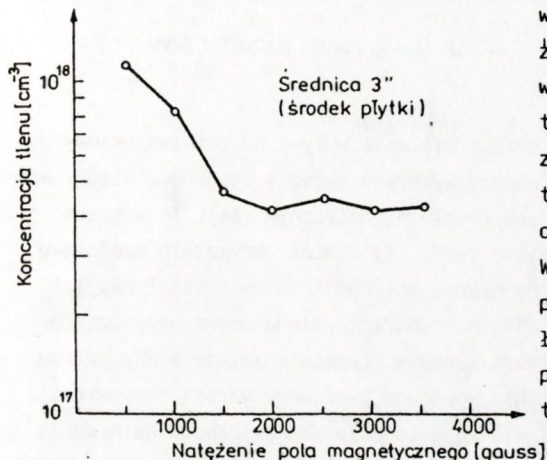
- turbulencja, jaka zachodzi w cieczy w procesie Cz., powoduje, że dyfuzja tlenu w cieczy krzemowej jest praktycznie większa niż w metodzie pionowego MCz., gdy turbulencja

jest silnie tłumiona. Większy współczynnik dyfuzji daje w konsekwencji mniejszą zawartość tlenu w kryształach [9];

- w pionowym polu magnetycznym redukcji ulega transport ciepła przez ciecz. Dlatego konieczne jest silniejsze grzanie w celu stworzenia warunków do krystalizacji. Wyższa temperatura ścianki tygla zwiększa koncentrację tlenu [14, 20];

- w pionowym polu magnetycznym jest tłumiony dopływ cieczy bogatej w tlen do powierzchni swobodnej, co hamuje jego parowanie. Większe stężenie tlenu w cieczy oznacza większe jego stężenie w kryształach;

- pole pionowe tak wpływa na zamkniętą komórkę cyrkulacji przepływu formującą się



wzdłuż kierunku wzrostu kryształu [19], że wydłuża się ona. Długość jej wzrasta wraz ze zwiększaniem się prędkości obrotowej kryształu. Gdy zetknie się ona z dnem tygla, rozpuszczanie kwarcu wzrasta gwałtownie i koncentracja tlenu w cieczy blisko frontu wzrostu zwiększa się. W poziomym polu taka komórka linii przepływu nie formuje się lub jest bardzo mała, nawet przy dużych obrotach kryształu, ponieważ przepływy pionowe w cieczy są tłumione.

Rys. 3. Typowa koncentracja tlenu w kryształach krzemu otrzymywanych w polu magnetycznym poziomym o różnych natężeniach. Koncentracja tlenu przestaje zależeć od natężenia pola powyżej 2000 G, gdy konwekcja termiczna w cieczy prawie zanika

Dla pola magnetycznego poziomego ustalono [16, 17] zależność między natężeniem pola a koncentracją tlenu, co pokazano na rysunku 3.

## 7. WPŁYW POLA MAGNETYCZNEGO NA EFEKTYWNY WSPÓŁCZYNNIK ROZDZIAŁU FAZ I ROZKŁAD DOMIESZEK W KRYSZTALE

Efektywny współczynnik rozdziału zanieczyszczeń pod wpływem pola magnetycznego zwiększa się [15, 21]. Oznacza to wyższy poziom koncentracji i bardziej jednorodny rozkład domieszki w kryształach. Wyniki eksperymentów wskazują, że efektywny współczynnik rozdziału w metodzie Cz jest pośredni między współczynnikiem teoretycznie wyliczonym dla wypadku, gdy następuje całkowite mieszanie w cieczy (bez pola magnetycznego), a współczynnikiem dla wypadku, gdy nie ma wcale mieszania,  $k_{eff} = 1$  (silne pole).

W polu magnetycznym (pionowe) rzędu 0,1-0,2 T następuje redukcja cyrkulacji cieczy wywołanej obracaniem się kryształu o jeden lub dwa rzędy wielkości, co powoduje w efekcie zbliżenie się współczynnika rozdziału do jedności [6].  $k_{eff}$  wiąże się z grubością granicznej warstewki dyfuzyjnej. Kształt i grubość tej warstewki, zależne od postaci przepływu, determinują wchodzenie domieszki do kryształu i ich rozkład. Z badań warstewki dyfuzyjnej [15] wynika, że grubość jej przy braku pola wynosi ok. 0,1 mm, podczas gdy w silnym polu pionowym (2500 Oe) grubość jej wzrosła do 5-6 mm.

Rozkład radialny domieszek w kryształach otrzymywanych w pionowym polu [14, 21] jest bardziej niejednorodny niż w kryształach otrzymanych bez pola. Niejednorodność ta zwiększa się, gdy natężenie pola wzrosło od 1000 do 3000 G. Tłumaczy się ten fakt tym, że pole osiowe silnie hamuje przepływ radialny, skuteczniej tłumiąc mieszanie. Z danych eksperymentalnych wynika, że przez odpowiednie dobranie pola magnetycznego i prędkości obrotowych kryształu i tygla, można poprawić radialne niejednorodności oporności. Zwłaszcza w poziomym polu magnetycznym, gdzie można otrzymać małą koncentrację tlenu nawet przy dużych obrotach kryształu, osiągnano dobrą jednorodność w radialnym rozkładzie tlenu, w szerokim zakresie jego koncentracji [17].

## 8. WPŁYW WSPÓŁODDZIAŁYWANIA OBROTÓW TYGLA I KRYSZTAŁU Z POLEM MAGNETYCZNYM NA WŁASNOŚCI KRYSZTAŁU

W wypadku nieobecności pola obroty kryształu nie mają wpływu na rozkład osiowy domieszki, a sterują głównie rozkładem radialnym. Wykazano wyraźną zależność między koncentracją tlenu a obrotami kryształu w osiowym polu magnetycznym [14]. Im większe obroty, tym większa koncentracja tlenu (patrz rozdz. 6). Obroty kryształu częściowo niwelują zwiększony gradient temperatury na głębokości pod frontem krystalizacji. Kryształy otrzymane w polu poziomym mają małą koncentrację tlenu nawet przy dużych obrotach kryształu [16, 17]. Natomiast poziom tlenu w kryształach zależy wtedy przede wszystkim od obrotów tygla. Duże obroty tygla powodują gwałtowny wzrost koncentracji tlenu. Przy stałej prędkości wyciągania i stałej sile pola magnetycznego osiowego zmieniano koncentrację tlenu w kryształach od  $1 \times 10^{17}$  do  $2,5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-9}$ , sterując obrotami tygla [22].

Stosując metodę symulacji numerycznej procesu MCZ [11] stwierdzono, że współ-rotacja kryształu i tygla w połączeniu z oddziaływaniem pola magnetycznego (pionowego) powoduje silniejsze tłumienie cyrkulacji południkowej cieczy niż konwencjonalnie stosowana przeciw-rotacja. Ponadto istnieje skomplikowany, ale udowodniony wpływ obrotów tygla na efektywny współczynnik rozdziału domieszek pod wpływem pola magnetycznego [7]. Dążenie  $k_{\text{eff}}$  do jedności jest wyraźniejsze przy przeciw-rotacji tygla i kryształu, ale też przy odpowiednio dobranej współ-rotacji można osiągnąć ten sam efekt. Dlatego wielkość i wzajemna relacja obrotów w metodzie MCZ ma bardzo duże znaczenie dla zoptymalizowania warunków wyciągania w danym systemie.

## 9. WŁASNOŚCI KRYSZTAŁÓW KRZEMU OTRZYMYWANYCH W OBECNOŚCI POLA MAGNETYCZNEGO

Brak w literaturze dostatecznej ilości potwierdzających się danych dotyczących wpływu pola na formowanie mikrodefektów wzrostu. Z całą pewnością można oczekiwać, że zmiana rozkładu temperatury w cieczy (bardziej stabilny wzrost kryształu) oraz koncentracji tlenu wchodzącego do kryształu i jednorodności rozkładu domieszki wpłynie na koncentrację i charakter rozkładu mikrodefektów, a w następstwie na zmianę charakterystyki elektrycznej i strukturalnej termostabilności krzemu.

W monokryształach o małej koncentracji tlenu, którą za pomocą poziomego pola można zmniejszyć do  $0,5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-9}$ , nie obserwuje się wydzielań tlenowych lub ilość ich jest

znacznie zredukowana [17]. W wyniku obróbek cieplnych imitujących wytwarzanie elementów półprzewodnikowych jest zredukowana generacja mikrodefektów związanych z wydzieleniami tlenu (błędy ułożenia, dyslokacje) i powstawanie donorów termicznych. Zaznaczyć jednocześnie należy, że w płytkach Si o małej koncentracji tlenu nie zachodzi geterowanie wewnętrzne i należałoby stosować geter zewnętrzny. W kryształach otrzymywanych metodą MCz nie obserwuje się więc pasm wzrostu, ponieważ przy froncie krystalizacji są tłumione fluktuacje temperatury.

## 10. PODSUMOWANIE I WNIOSKI DLA PRAC PROWADZONYCH W ITME

Z prac badawczych wynika, że dzięki stosowaniu pola magnetycznego można otrzymywać kryształy o lepszej jakości, jakiej nie można było osiągnąć standardową metodą Cz.

Stosowanie pola magnetycznego ma szczególne znaczenie dla wytwarzania kryształów o dużych średnicach (powyżej 100 mm), gdy mamy do czynienia z dużą ilością cieczy w tyglu, a tym samym silnymi przepływami konwekcyjnymi, które można tłumić i kontrolować polem.

Z punktu widzenia kontrolowanej koncentracji tlenu w kryształach stosowanie HMCz (horizontal MCz) jest lepsze niż stosowanie VMCz (vertical MCz). Metoda HMCz umożliwia zmniejszenie koncentracji tlenu do  $0,5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , a praktycznie umożliwia sterowanie koncentracją tlenu w szerokim zakresie przez zmiany natężenia pola i obroty tygla.

Pionowe pole magnetyczne daje w efekcie średnią i dużą koncentrację tlenu w kryształach, tj. do  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

Już dla małych natężeń tego pola (od 0,1 T), są eliminowane pasma wzrostu w kryształach. Natomiast dla stłumienia fluktuacji przepływu w polu poprzecznym wymagane jest natężenie w zakresie 0,25 - 0,3 T.

Kryształy otrzymywane w polu magnetycznym, te z ograniczoną koncentracją tlenu, odznaczają się termostabilną strukturą.

Pole magnetyczne wpływa na poprawę jednorodności makroskopowego rozkładu osiowego domieszki.

Przyłożenie pola magnetycznego umożliwia, przy zachowaniu własności wzrastających monokryształów, zwiększenie prędkości wyciągania.

Celem badań podjętych w ITME w omawianej dziedzinie jest zastosowanie pola magnetycznego w technologii monokryształizacji krzemu metodą Czochralskiego. W wyniku stosowania nowej technologii spodziewana jest poprawa własności kryształów. Uwzględniając osiągnięte na świecie rezultaty stosowania MCz, dokonano wyboru poziomej konfiguracji pola magnetycznego (HMCz). Powstała już konstrukcja elektromagnesu wokół dolnej komory urządzenia do monokryształizacji (analogiczna jak na rys. 1). Prace nasze skupiają się przede wszystkim na obniżeniu poziomu tlenu w kryształach, poprawie rozkładu domieszek oraz wyeliminowaniu mikrodefektów. Ma to doprowadzić do poprawy termostabilności parametrów elektrycznych i strukturalnych. Uniezależnienie dobrych właściwości materiału wyjściowego, jakim jest monokryształ, od stosowanych następnie obróbek termicznych przy wytwarzaniu przyrządów półprzewodnikowych jest główną zaletą technologii MCz.



Najistotniejszym problemem w opracowaniu technologii MCz jest dobranie parametrów monokryształizacji w nowych, zmienionych działaniem sił pola warunkach wzrostu (temperatura nagrzewnika, prędkość wyciągania, obroty tygla i kryształu i inne).

#### LITERATURA

1. W. E. Langlois, K. Lee, J. Crystal Growth 1983, 62, 481
2. L. N. Hjellming, J. S. Walker, J. Crystal Growth 1988, 87, 18
3. A. E. Organ: J. Crystal Growth 1985, 73, 571
4. M. Mihelčič, K. Wingerath: J. Crystal Growth 1987, 82, 318
5. R. A. Cartwright, A. A. Wheeler: J. Crystal Growth 1988, 87, 466
6. D. T. J. Hurle, R. W. Series: J. Crystal Growth 1985, 73, 1
7. R. A. Cartwright, D. Hurle, R. W. Series, J. Szekely: J. Crystal Growth 1987, 82, 327
8. A. E. Organ, N. Riley: J. Crystal Growth 1987, 82, 465
9. S. Kobayashi: J. Crystal Growth 1987, 85, 69
10. L. N. Hjellming, J. S. Walker: J. Crystal Growth 1987, 85, 25
11. H. Lee, K. Lee, W. E. Langlois: J. Crystal Growth 1987, 84, 666
12. N. Riley: J. Crystal Growth 1987, 85, 417
13. H. Hirata, N. Inoue: Jpn. J. Appl. Phys. 1984, 8, L527
14. T. T. Braggins, R. N. Thomas: Oxygen in axial-field magnetic Czochralski silicon, Abstract No. 243., Materiały z Westinghouse Research and Development Center, Pittsburgh
15. H. Hirata, N. Inoue: Jpn. J. Appl. Phys. 1985, 11, 1399
16. T. Suzuki, N. Isawa, Y. Okubo, K. Hoshi: Cz silicon crystals grown in a transverse magnetic field, Sony Corporation, Semiconductor Division
17. K. Hoshi, N. Isawa, T. Suzuki, Y. Okubo: J. Electrochem. Soc.: Solid-State Science and Technology, 1985, 3, 693
18. Własności kryształów krzemu otrzymywanych w obecności pionowego pola magnetycznego, Cwietnyje Metalle, 1987, 7, 72
19. M. Ohwa, T. Higuchi, E. Toji, M. Watanabe: Growth of large diameter silicon single crystal under horizontal or vertical magnetic field, Materiały z Toshiba Research and Development Center, Toshiba Ceramics Co., Ltd., Japan
20. K. G. Barraclough, R. W. Series, G. J. Rae, D. S. Kemp: Axial magnetic Cz silicon growth Royal Signals and Radar Establishment, UK
21. T. Braggins, H. M. Hobgood, R. N. Thomas: Effect of axial magnetic field on gallium segregation in Czochralski silicon crystal growth, Abstract No. 241, Westinghouse, Research and Development Center Pittsburgh
22. Gołowin, Szaszko: Cwietnyje metalle 1986, 10
23. R. Wadas: Materiały Elektroniczne 1989, 4 (68)