

## TECHNICZNE PROBLEMY KRYSTALIZACJI METODĄ CZOCHRALSKIEGO

Tadeusz Łukasiewicz, Zygmunt Łuczyński, Jarosław Kisielewski

W pracy omówiono czynniki technologiczne wpływające na jakość kryształów otrzymywanych metodą Czochralskiego. Przeprowadzono analizę wpływu gradientu temperatury, szybkości wzrostu oraz wpływ pól temperaturowych na doskonałość strukturalną kryształów wytwarzanych w laboratorium im. Jana Czochralskiego w ITME.

### WSTĘP

Szybki rozwój elektroniki wiąże się z rosnącym zapotrzebowaniem na materiały o określonych własnościach. Zdecydowana większość materiałów stosowanych jako optycznie czynne elementy w technice laserowej to monokryształy tlenkowe otrzymywane w skali produkcyjnej metodą Czochralskiego. Szczególnie szybki rozwój tej metody nastąpił w ciągu ostatnich 20 lat kiedy okazało się, że umożliwia ona otrzymywanie kryształów o wyjątkowo dużych średnicach do 6" i długości dochodzącej do 2 m.

Prosta pozornie zasada, na której oparta jest metoda Czochralskiego jest w istocie procesem skomplikowanym zależnym od wielu czynników. Do powierzchni stopionego w tyglu materiału opuszczona jest obracająca się monokryształiczna zaródź. Po zetknięciu się z powierzchnią cieczy zaródź podnoszona jest do góry. Szybkość podnoszenia i obrotów dobierane są na ogół doświadczalnie. Na powierzchni zarodzi następuje dobudowywanie monokryształicznej fazy stałej - wzrost kryształu. Proces wzrostu zachodzi w ściśle określonych warunkach termodynamicznych na powierzchni międzyfazowej, przesuujących równowagę ciała stałe - ciecz w kierunku tworzenia się fazy stałej.



## PODSTAWOWE PARAMETRY METODY CZOCHRALSKIEGO

Poziomy przepływ ciepła od ścianek tygla w kierunku środka i pionowy do przestrzeni nad tygłem powoduje tworzenie się poziomych i pionowych gradientów temperatury w postaci odpowiednio ukształtowanego pola temperatur. Istnienie gradientów temperatury niezbędnych do tworzenia się fazy stałej wywołuje naturalny ruch konwekcyjny cieczy w tyglu. Intensywność tego ruchu opisuje kryterialna liczba Grashofa

$$Gr = g\beta\Delta TR^3v^{-2} ,$$

gdzie:  $g$  - przyspieszenie grawitacyjne,  
 $\beta$  - współczynnik rozszerzalności objętościowej,  
 $\Delta T$  - różnica temperatur przy ściance tygla i w punkcie środkowym na powierzchni cieczy,  
 $R$  - promień tygla,  
 $v$  - kinematyczny współczynnik lepkości cieczy.

Dla niewielkich wartości  $Gr$  obserwuje się laminarny, niezależny od czasu przepływ cieczy. W miarę wzrostu wartości  $Gr$  przepływ staje się bardziej intensywny i dla  $Gr > 10^8$  wystąpi przepływ burzliwy [1, 2].

Prostopadle do stykającej się z powierzchnią cieczy powierzchni wirującego kryształu tworzy się strumień skierowany przeciwnie do kierunku strumienia konwekcji naturalnej. Strumień cieczy unosi się i następnie jest odrzucany w kierunku ścianek tygla. Ten przepływ określany jako strumień konwekcji wymuszonej charakteryzuje liczba Reynoldsa

$$Re = \pi d^2 v v^{-1} ,$$

gdzie:  $d$  - średnica kryształu,  
 $v$  - liczba obrotów kryształu na jednostkę czasu.

W większości przypadków dąży się do zrównoważenia strumieni konwekcji naturalnej i wymuszonej, co można wyrazić równością liczb  $Gr=Re^2$  [2,3]. Prowadzi to do formowania się płaskiego frontu krystalizacji mającego wpływ na jakość kryształu. Ciepło wydzielające się na froncie krystalizacji w wyniku obniżenia się temperatury cieczy do temperatury krystalizacji oraz ciepło krystalizacji odprowadzane jest na drodze przewodnictwa poprzez kryształ i następnie wypromieniowywane przez boczne ścianki kryształu do otoczenia. Pewna ilość ciepła odprowadzana jest z bocznych ścianek na drodze konwekcji. Intensywność wymiany ciepła zależy od gradientu temperatury w obszarze wzro-



stu, rozkładu temperatury w otoczeniu kryształu, współczynnika przewodzenia ciepła, emisyjności krystalizowanego materiału i wymiarów kryształu.

Przy określonych i niezmiennych właściwościach fizycznych cieczy i tworzącego się kryształu takich jak: przewodnictwo cieplne, lepkość, ciepło właściwe, ciepło krystalizacji, emisyjność, dopasowywane są następujące parametry technologiczne: szybkość wyciągania kryształu, prędkość obrotowa kryształu, radialne i poosiowe gradienty temperatury na granicy kryształu z cieczą, rozkład temperatury w przestrzeni otaczającej rosnący kryształ. W wyniku tego dopasowania na froncie krystalizacji powstają odpowiednie warunki do prawidłowego wzrostu kryształu. Wahania tych wielkości w czasie krystalizacji wpływają bezpośrednio na jakość wytwarzanych kryształów. Wymagania dotyczące stabilności warunków wzrostu rosną w miarę zwiększania wymiarów wytwarzanych kryształów. Jeszcze wyższy stopień stabilności jest potrzebny w przypadku wzrostu domieszkowanych kryształów dla techniki laserowej. W przypadku kryształów domieszkowanych zwłaszcza gdy wartość efektywnego współczynnika podziału wyrażonego równaniem [4]

$$k_e = \frac{k_m}{k_m + (1 - k_m) e^{\frac{f\delta}{D}}}, \quad (1)$$

gdzie:  $k_m$  - wartość współczynnika podziału dla obszaru przy powierzchni wzrostu,

$f$  - prędkość wyciągania,

$\delta$  - grubość warstewki granicznej przy powierzchni rozdziału faz, w której ruch odbywa się na drodze dyfuzji,

$D$  - współczynnik dyfuzji dla domieszki,

jest bardzo mała, wahania szybkości wzrostu w jeszcze większym stopniu wpływają na jakość kryształu.

Występujące na granicy faz zjawisko segregacji powoduje powstanie obszaru przejściowego o znacznie podwyższonej koncentracji domieszki odprowadzanej z pewną prędkością w głąb cieczy, na drodze dyfuzji. Przy określonej prędkości wzrostu ustala się pewien stan równowagi wyrażony względnie stałym stosunkiem koncentracji domieszki w kryształach i obszarze przejściowym. Zbyt duża szybkość wzrostu powoduje nadmierne nagromadzenie się domieszki co prowadzi do tworzenia się w kryształach wydzieleni wykluczających kryształy z praktycznych zastosowań. Maksymalna szybkość wyciągania może być



określona z równania:

$$V = \left( \frac{dT}{dz} \right) D \frac{k_m}{m C_o (1 - k_m)} \quad , \quad (2)$$

gdzie:  $\frac{dT}{dz}$  - gradient temperatury na froncie krystalizacji,  
m - nachylenie linii likwidusa na wykresie fazowym,  
D - współczynnik dyfuzji domieszki,  
 $C_o$  - koncentracja domieszki w cieczy poza obszarem przejściowym.

Szybkość wzrostu w przypadku kryształu domieszkowanego, w porównaniu z szybkością wzrostu kryształu bez domieszki jest zwykle kilkakrotnie niższa. Zmiany szybkości wzrostu naruszają ustalony stan równowagi. Wahania o niewielkiej amplitudzie ujawniają się w postaci mikrosegregacji. Przy większych wahanach szybkości wzrostu obserwuje się wyraźne różnice w rozkładzie domieszki, aż do wystąpienia makrowydzieleń.

Z istnieniem obszaru przejściowego o znacznie podwyższonej koncentracji domieszki wiąże się niebezpieczeństwo wystąpienia zjawiska przechłodzenia stężeniowego. Front krystalizacji staje się niestabilny co prowadzi do tworzenia się w kryształach struktury komórkowej. Warunek wystąpienia przechłodzenia stężeniowego można wyrazić jako [5]

$$\left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0} < m \left( \frac{\partial C}{\partial z} \right)_{z=0} \quad , \quad (3)$$

gdzie:  $\left( \frac{\partial C}{\partial z} \right)_{z=0}$  - gradient koncentracji domieszki na froncie krystalizacji.

Prowadzenie krystalizacji przy wyższym gradiencie temperatury oddala niebezpieczeństwo wystąpienia przechłodzenia, jednakże gradient temperatury nie może być nadmiernie duży, co prowadziłoby do zniekształcenia optymalnych warunków cieplnych, ujawniającego się zahamowaniem wzrostu, nadtapianiem się zarodzi lub tworzeniem się fazy polikrystalicznej.

Utrzymanie prawidłowych warunków wzrostu sprządza się do zachowania dokładnie ustalonej szybkości wzrostu poprzez zapewnienie stałej szybkości podnoszenia kryształu i wysoce stabilnych warunków termicznych z zachowaniem pełnej symetrii pól temperaturowych.



## WPLYW WARUNKÓW ZEWNĘTRZNYCH

Nowoczesne urządzenia do wytwarzania kryształów metodą Czochralskiego umożliwiają zachowanie stabilności warunków wzrostu. Za pomocą elektronicznych układów kontrolno-pomiarowych prowadzi się ciągły pomiar i rejestrację przyrostu lub ubytku masy kryształu w tyglu. Mierzone wartości porównywane są z założonym programem wpisanym w pamięć komputera. Odchylenia korygowane są automatycznie poprzez zmiany mocy przekazywanej przez generator indukcyjny. Poprawne funkcjonowanie takiego układu jest możliwe przy zachowaniu odpowiednich warunków zewnętrznych takich jak: stała temperatura otoczenia, stałe napięcie zasilające, utrzymanie stałego ciśnienia i temperatury w układzie chłodzenia.

Poprawność funkcjonowania elektronicznego układu regulacji w bardzo wyraźny sposób zależy od temperatury otoczenia. Wahania temperatury zmieniają charakterystyki półprzewodnikowych elementów układu. Wywiera to bezpośredni wpływ na wartości wielkości mierzonych jak np. przyrost masy kryształu, od czego zależy wielkość mocy przekazywanej z generatora a to wpływa na termiczne warunki w układzie wzrostu. Błędne wskazania przekazywane z układu kontroli wywołują niewłaściwe reakcje w układzie grzejnym.

Napięcie zasilające w sieci może się zmieniać w czasie w dość szerokich granicach 200-240 V. Zależy to od: pory dnia, roku, liczby i rodzaju odbiorców zasilanych z tego samego źródła.

Czuły układ stabilizacji warunków wzrostu funkcjonujący w aparaturze do krystalizacji zapewnia wysoką stabilność pracy zawężając jednocześnie dopuszczalny zakres zmian zewnętrznych. Nadmierna amplituda wahań sprawia, że układ nie jest w stanie utrzymać stałych warunków i wzrost odbywa się praktycznie podczas ciągłych zmian.

Wzbudnik indukcyjnego układu grzejnego chłodzony jest wodą. Moc wydzielana wyraża wzór:  $P = I^2 R$ , gdzie  $I$  - natężenie prądu,  $R$  - sumaryczny opór układu zależny od wartości oporu umieszczonego we wzbudniku tygla i oporu samego wzbudnika, co można zapisać

$$P = I^2 ( R_t + R_w ) . \quad (4)$$

Ustabilizowana moc generatora będzie rozkładana na dwie wartości składowe zależne od  $R_t$  i  $R_w$ . Przy stałym praktycznie oporze tygla  $R_t$  opór chłodzonego wodą wzbudnika  $R_w$  może się zmieniać w zależności od temperatury wody chłodzącej. Przy zmieniającej się temperaturze wody chłodzącej zmieniać



się będzie wartość traconej w obwodzie wzбудnika mocy, a tym samym zmieniać się będzie wartość mocy wydzielanej w ściankach tygla. Publikowane wyniki badań podają, że podczas krystalizacji bezdomieszkowych granatów itrowo-glinowych, przy zmianach temperatury wody chłodzącej o 5°C obserwowano zmiany średnicy kryształu o ok. 0.4 mm. W przypadku krystalizacji YAG:Nd zmiana temperatury wody chłodzącej o 1°C wywoływała zmianę średnicy kryształu o ok. 0.2 mm [6]. Zmiany tego rodzaju choć trudno dostrzegalne gołym okiem stają się przyczyną wystąpienia mikrosegregacji i dodatkowych lokalnych naprężeń obniżających jakość kryształów. W przypadku kryształów laserowych, z których wycina się pręty w kierunku długości kryształu, defekty tego rodzaju mogą być przyczyną dużych strat materiału. Dąży się do zbudowania układu, w którym wydzielana w ściankach tygla moc będzie niezależna od zmian w obwodzie wzбудnika.

Instalowanie urządzeń do badania procesów krystalizacji, prowadzenie prac badawczych mających na celu poszukiwanie nowych materiałów, prac podnoszących jakość materiałów już wytwarzanych, wytwarzanie kryształów do zastosowań w praktyce winno być dokonywane w odpowiednio przygotowanych do tego pomieszczeniach.

## **LABORATORIUM IM. JANA CZOCHRALSKIEGO**

W 1992 r. w Zakładzie Technologii Monokryształów Tlenkowych Instytutu Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie wybudowano halę technologiczną do potrzeb krystalizacji spełniającą wymagania stawiane obecnie tego typu obiektom (decyzja inwestycyjna KBN nr 142/IB/225/91)

### **Wyposażenie**

Fundamentowanie aparatury badawczej odizolowane od otoczenia systemem dylatacji eliminuje przenoszenie się wstrząsów, drgań i innych tego typu zakłóceń. Jest to szczególnie ważne dla poprawnej pracy układu ważącego.

Zainstalowany klimatyzator produkcji austriackiej firmy LTG Lufttechnische GmbH gwarantuje stałą temperaturę z dokładnością  $\pm 1^\circ\text{C}$  i wilgotność w hali 60%. Daje to pełną niezależność od warunków zewnętrznych i zapewnia stabilną pracę układów kontrolno-pomiarowych. Układ klimatyzacji wyposażono w zespół filtrów zapewniający wymaganą klasę czystości pomieszczenia (klasa 100000).



Zasilanie z sieci odbywa się poprzez stabilizator napięcia (Uninterruptable Power System) produkcji holenderskiej (typ Holec static UPS-120). Przy zmieniającym się w ciągu doby napięciu od 200 do 240 V napięcie na wyjściu wynosi dokładnie 220 V.

W przypadku nieprzewidzianych przerw w dostawie energii elektrycznej stabilizator automatycznie przejmuje zasilanie z własnego źródła (bateria akumulatorów), które może być kontynuowane przez pewien czas, zależny od obciążenia. Z chwilą ponownego pojawienia się napięcia w sieci, UPS automatycznie wyłącza własne źródło podejmując ponownie zasilanie napięciem z zewnątrz.

Chłodzenie wodne (woda dejonizowana o oporności powyżej 10  $\Omega\text{cm}$ ) realizowane jest w zamkniętym obiegu zapewniającym stałe ciśnienie i temperaturę. Woda tłoczona ze stacji pomp do zainstalowanych w hali urządzeń posiada stałą temperaturę  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ . Po wyjściu schładzana jest w baterii wymienników ciepła zasilanych wodą ziębniczą z instalacji ogólnozakładowej skąd ponownie wraca do chłodzonych urządzeń. Stabilność ciśnienia zapewnia specjalny zawór redukcyjny i zbiornik wyrównawczy. Stabilność temperatury utrzymywana jest za pomocą czujnika mierzącego temperaturę wody obiegu wewnętrznego i połączonego z automatycznym zaworem regulującym przepływ wody obiegu zewnętrznego.

Do wszystkich aparatów doprowadzane są gazy technologiczne: azot, tlen, wodór, używane w zależności od potrzeb zainstalowanych w hali urządzeń doświadczalnych angielskiej firmy Metals Research (MSR) oraz polskiej firmy Spexon pracujące 14-17 lat. Mimo znacznego stopnia zużycia eksploatowane we właściwych warunkach funkcjonują zadowalająco. Licząc się z możliwością uzyskania środków finansowych przewidziano miejsce na nową, bardziej nowoczesną aparaturę doprowadzając energię elektryczną, gazy techniczne, wodę chłodzącą. Zainstalowanie i uruchomienie aparatury może się dokonać natychmiast po dowiezieniu na miejsce i po najniższych kosztach ograniczonych jedynie do kosztów zakupu aparatury.

Wyposażenie hali zapewnia wysoki stopień stabilności warunków pracy, co znalazło swoje odbicie w uzyskiwanych wynikach badań. W stosunkowo krótkim czasie opracowano warunki otrzymywania wielu kryształów. Niektóre z nich o niekwestionowanej jakości, sprawdzonej w zastosowaniach praktycznych podano w tabeli 1.

Wykonane z kryształów  $\text{LiNbO}_3$  modulatory elektrooptyczne potwierdziły dobrą jakość kryształów (kontrast  $> 200:1$ ). Badania przydatności kryształów  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  są prowadzone w ITME i uzyskane wyniki przedstawiono na konferencji [7]. Badania prętów laserowych wykonanych z kryształów YAG z wymie-



nionymi domieszkami były wykonane w Instytucie Elektroniki Kwantowej i Instytucie Optoelektroniki WAT. Wyniki wykazujące dobrą ich jakość prezentowano na konferencjach i w publikacjach [8,9,10]. Jakość podłożowych materiałów dla wysokotemperaturowych warstw nadprzewodzących z grupy  $ABCO_4$  ( $SrLaAlO_4$ ,  $SrLaGaO_4$ ,  $CaNdAlO_4$ ) była sprawdzana w laboratorium amerykańskiej firmy CONDUCTUS oraz w laboratorium SINGLE CRYSTALS TECHNOLOGY BV w Holandii.

Kryształy niskotemperaturowej odmiany beta-  $BaB_2O_4$  posiadają bardzo dobre własności nieliniowe. Przemiana fazowa beta- $BaB_2O_4 \longrightarrow$  alfa- $BaB_2O_4$  w temperaturze poniżej punktu topnienia, w wyniku której powstaje centrosymetryczna odmiana pozbawiona własności nieliniowych narzucała sposób krystalizacji z roztworów soli stopionych poniżej temperatury topnienia. Proces wzrostu przebiegał w ciągu 2 miesięcy. Obecnie okazało się możliwe uzyskanie tych kryształów metodą Czochralskiego. Krystalizacja przebiega w ciągu 4-5 dni i prowadzona jest w bardzo wąskim przedziale temperatury z roztopu w warunkach przechłodzenia, co wymaga utrzymania szczególnie stabilnych warunków krystalizacji. Na odpowiednio zorientowanych próbkach wyciętych z otrzymanych metodą Czochralskiego kryształów beta- $BaB_2O_4$  obserwowano generację drugiej harmonicznej światła lasera YAG:Nd [11].

### Prace badawcze

W opisanych warunkach zrealizowano pomyślnie między innymi prace badawcze nad:

- technologią domieszkowania monokryształów YAG jonami ziem rzadkich: Pr, Ho, Er, Tm [12], [21], [22];
- krystalizacją związków typu  $ABCO_4$  [13], [18];
- dwójfomnością, zwłaszcza w materiałach półprzewodnikowych i elektrooptycznych [14];
- otrzymywaniem monokryształu o własnościach nieliniowych [15];
- wpływem domieszek pierwiastków ziem rzadkich Er, Tm,  $Er^{+}$ , Tm, Yb oraz MgO i Cr na własności optyczne i laserowe monokryształów  $LiNbO_3$  [16];
- technologią krystalizacji i obróbki  $CaF_2BaF_2$  [17];
- układem fazowym  $SrLaAlO_4$  materiałów na podłoża pod wysokotemperaturowe warstwy nadprzewodzące [18];
- materiałami monokrystalicznymi do techniki laserowej i optoelektroniki YAG i  $LiNbO_3$  o jakości optycznej [23], [24].

Aktualnie prowadzone są badania w zakresie:



- właściwości optycznych i laserowych monokryształów: YAG: Pr, YAG: Pr+Yb, GGG:Pr, YAP:Pr [19];
- implantacyjno-dyfuzyjnych metod wytwarzania przypowierzchniowych supersieci do urządzeń elektroakustycznych [25].

We współpracy z Instytutem Fizyki PAN, Instytutem Optoelektroniki PW, Katedrą Krystalografii UW, Instytutem Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych we Wrocławiu kontynuowane są także cztery granty w części technologicznej.

### Materiały otrzymane w Zakładzie Monokryształów Tlenkowych ITME

**Tabela 1.** Rodzaj, wymiary i zastosowanie materiałów.

Materiał	Wymiary średnica/długość	Zastosowanie
LiNbO <sub>3</sub>	72/100	optyczne
Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	72/60	akustyczne
YAG:Nd	50/80	laserowe
YAG:Er	32/90	laserowe
YAG:Ho,Tm Cr	31/90	laserowe
YAG:Pr		laserowe
SrLaAlO <sub>4</sub>	22/50	podłoża HTSC
SrLaGaO <sub>4</sub>	22/50	podłoża HTSC
CaNdAlO <sub>4</sub>	22/50	podłoża HTSC
NdGaO <sub>3</sub>	50/60	podłoża HTSC
BaB <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (BBO)	22/50	optyczne

Laboratorium widzi swoją rolę jako centrum technologiczne w zakresie wzrostu kryształów tlenkowych, zapewniające naukowcom polskim pomoc i współpracę w zakresie technologii, wykonywania prac badawczych i itp..



## WNIOSKI

Obecnie rosną wymagania dotyczące czystości i poprawności strukturalnej wytwarzanych kryształów. Kryształy, które tych wymagań nie spełniają są nieprzydatne. Otrzymywanie takich materiałów jest możliwe przy ścisłym zachowaniu ustalonych parametrów technologicznych co jest możliwe w pewnych tylko warunkach. Laboratorium im. Jana Czochralskiego ITME takie warunki zapewnia.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Carruthers J.R., J.Cryst.Growth 32, 1976, 13-26
- [2] Cockayne B., Gates M.P., J.Mat.Science 2, 1967, 118
- [3] Carruthers J.R., J.cryst. Growth 36, 1976, 212
- [4] J.A.Burton, R.C.Prim, W.P.Slichter, J.Chem.Phys. 21,1953, 1987
- [5] Treatise on Solid State Chemistry Vol 5 New York - London: N.B.Hannay Plenum Press
- [6] Bruni F.J., Johnston G.M.: Solid-State Laser Materials Laser Focus World. May 1994, 205
- [7] W.Soluch, Ultrasonics Symposium Proceedings, Baltimore 1993, 237-241
- [8] Z.Frukacz - Elektronika 4, 1992, 16
- [9] Z.Frukacz, J.Kisielewski, J.Szydlak, Opto-Electronics Review 1, 1993, 21
- [10] IV Sympozjum Techniki Laserowej, Szczecin-Świnoujście 1993
- [11] T.Łukasiewicz, J.Kisielewski, Z.Łuczyński, J.Sass, Materials Research Society 329, 1994, 29
- [12] Frukacz Z.: Badania nad technologią domieszkowania monokryształów YAG jonami ziem rzadkich:Pr, Ho, Er, Tm. Projekt badawczy nr 3 1236 91 01
- [13] Pajączkowska A.: Krystalizacja związków typu  $ABCO_4$ . Projekt badawczy ITME nr 8 8035 92 03
- [14] Bajor A.: Opracowanie metody, skonstruowanie i wykonanie przyrządu do badania dwójłomności, zwłaszcza w materiałach półprzewodnikowych i elektrooptycznych. Projekt badawczy ITME nr 8 8008 92 03



- [15] Łukasiewicz T.: Badania nad otrzymywaniem monokryształu o własnościach nieliniowych. Projekt badawczy ITME 7 7318 92 03
- [16] Pracka J.: Badanie wpływu domieszek pierwiastków ziem rzadkich Er, Tm, Er<sup>+</sup>, Tm, Yb oraz MgO i Cr na własności optyczne i laserowe monokryształów LiNbO<sub>3</sub>. Projekt badawczy ITME 8 8006 91 OC
- [17] Łuczyński Z.: Opracowanie technologii krystalizacji i obróbki CaF<sub>2</sub>BaF<sub>2</sub>. Projekt badawczy ITME 8 8003 91 OC
- [18] Pajęczkowska A.: Badanie układu fazowego SrLaAlO<sub>4</sub> materiałów na podłoża pod wysokotemperaturowe warstwy nadprzewodzące. Praca statutowa ITME
- [19] Frukacz Z.: Otrzymywanie monokryształów: YAG: Pr, YAG: Pr+Yb, GGG:Pr, YAP:Pr oraz zbadanie ich właściwości optycznych i laserowych. Projekt badawczy ITME 3 P407 033 06, w toku
- [20] Kapelewski J. Modelowanie domieszkowo modyfikowanych powierzchni podłoży o strukturze quasikompozytowej. Praca statutowa ITME
- [21] Gałązka J. Analiza naprężeń termicznych i resztkowych w monokryształach tlenkowych otrzymywanych metodą Czochralskiego. Praca statutowa ITME
- [22] Frukacz Z., Jabłoński R., Sass J. Pawłowska M.: Próby uzyskania monokryształów Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (YAG), monokryształów YAIO<sub>3</sub> (YAP), domieszkowanych jonami Tm<sup>3+</sup> Nd<sup>3+</sup>, badania ich własności laserowych. Praca statutowa ITME
- [23] Łuczyński Z.: Materiały monokrystaliczne do techniki laserowej i optoelektroniki YAG i LiNbO<sub>3</sub> o jakości optycznej. Projekt celowy ITME
- [24] Surma B.: Badanie optyczne kryształów tlenkowych i YAG. Praca statutowa ITME
- [25] Kapelewski J.: Implantacyjno-dyfuzyjne metody wytwarzania przypowierzchniowych supersiści jako podłoży urządzeń akustoelektroniki. Projekt badawczy ITME 8 S501 01 3806, w toku