

Dwuwbudnikowa nagrzewnica indukcyjna do krystalizacji metodą PVT – koncepcja i symulacja

Streszczenie. Wytwarzanie monokrystalicznych materiałów półprzewodnikowych jest techniką zaawansowaną, wymagającą spełnienia szeregu wymagań. Jakość monokryształów zależy przede wszystkim od warunków termicznych w strefie krystalizacji, zmiennych zarówno w funkcji współrzędnych przestrzennych jak i czasu. W artykule zaproponowano konstrukcję dwuwzbudnikowej nagrzewnicy indukcyjnej, umożliwiającej generację i kontrolę profili temperaturowych we wsadach, w szerokim zakresie. Omówiono konstrukcję modelu urządzenia oraz uzyskane charakterystyki eksploatacyjne. Wykonane prace badawcze, oprócz wykazania możliwości tej techniki grzewczej, stanowiły podstawę do prezentacji charakterystycznych cech oraz problemów przy modelowaniu urządzeń tej klasy.

Abstract. Processing of semiconducting materials is a very advanced and complex technique. The quality of crystals depends on several factors, especially on temperature field within the crystallization zone. In the article, the new two inductors induction heating system was presented. The system enables for generation and precisely control of different temperature profiles within the workpieces. Some details and characteristic of the model were discussed. Tests of device were used to show basic problems of numerical modeling of such devices. (**Two-inductors Induction Heating Device for PVT Semiconductor Processing**).

Słowa kluczowe: monokrystalizacja, nagrzewanie indukcyjne, symulacja

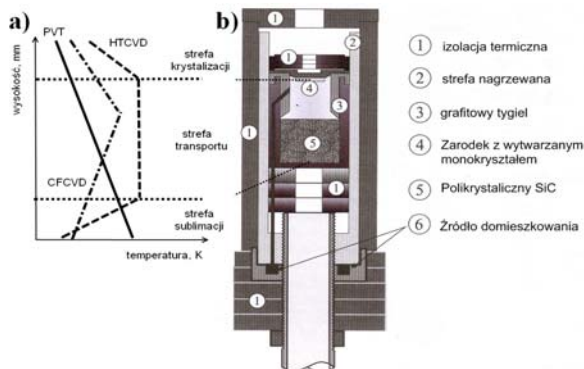
Keywords: PVT crystallization, induction heating, modeling

doi:10.12915/pe.2014.02.10

Wprowadzenie

Monokrystaliczny węgiel krzemu wytwarzany jest zazwyczaj metodą PVT (ang. Physical Vapour Transport), polegającą na sublimacji materiału źródłowego (polikryształy SiC), oraz osadzaniu warstwy półprzewodnika, bezpośrednio z fazy gazowej. Stosowane urządzenia do monokrystalizacji SiC charakteryzują się podobenstwem konstrukcji reaktorów, umożliwiającym podanie uogólnionej konstrukcji układu grzejnego (rys. 1.b) [1], oraz wyodrębnienie najważniejszych stref (sublimacji, transportu i krystalizacji) podczas realizacji procesu.

W strefie sublimacji znajduje się materiał wsadowy SiC w postaci granulatu. Jest to obszar o najwyższej temperaturze oscylującej w granicach 2300°C. Zarodek w postaci monokrystalicznej płytki 6H-SiC jest umiejscowiony w najzimniejszym miejscu komory w strefie krystalizacji (o temperaturze około 2100°C). Pomiedzy tymi strefami można wyróżnić strefę transportu, w której następuje transport wcześniej wysublimowanych składników SiC od strefy sublimacji do strefy krystalizacji. W strefie transportu, gradient temperatury wynosi podczas procesu około 1.0 – 2.5 K/mm [1]. Pary SiC osadzają się na monokrystalicznym zarodku, w wyniku czego otrzymuje się monokryształ SiC [1, 2]. Na rysunku 1 podano uogólnioną konstrukcję reaktora do krystalizacji SiC, wraz z rozkładem temperatury podczas osadzania materiału półprzewodnikowego.



Rys. 1. Rozkłady temperatury (a) oraz widok reaktora do realizacji techniki PVT [1]

Mimo stosunkowo prostego opisu metody, wytwarzanie pożądanego materiału 6H-SiC wymaga precyzyjnej kontroli

szeregu parametrów technologicznych. Rozważając rozkład temperatury podczas procesu stwierdzono, iż w zależności od fazy procesu oraz stosowanej odmiany techniki PVT [1], optymalne rozkłady różnią się (rys. 1.a) i mają na celu podniesienie jakości wytwarzanych monokryształów poprzez eliminację wtrąceń oraz defektów sieci krystalicznej [1].

Urządzenia elektrotermiczne stosowane w opisywanej technologii należą do grupy wyspecjalizowanych nagrzewnic indukcyjnych. Zazwyczaj wykorzystywany jest pojedynczy wzbudnik, umieszczony poza komorą próżniową. Realizacja zróżnicowanych warunków temperaturowych wymaga stosowania urządzeń umożliwiających przesuw wzbudnika względem wsadu. Rozwiązania te, oprócz komplikacji mechanicznych konstrukcji urządzeń grzejnych, mogą negatywnie wpływać na jakość wytwarzanych monokryształów poprzez wprowadzanie drgań mechanicznych. Z uwagi na ograniczoną liczbę pracujących urządzeń oraz tajemnice handlowe, nie są znane dokładne rozwiązania konstrukcyjne pracujących nagrzewnic.

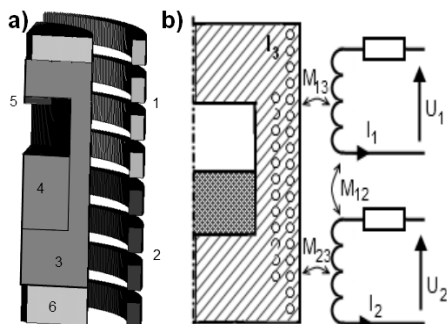
W niniejszej pracy zaproponowano wykorzystanie wielowzbudnikowego urządzenia do nagrzewania indukcyjnego, umożliwiającego generację wymaganych pól temperatury. W zamyśle autorów, rozwiązanie takie będzie charakteryzowało się znacznie lepszymi parametrami eksploatacyjnymi, a w szczególności możliwością kształtowania i modyfikowania pól temperatury we wsadzie w szerokich granicach, przy zachowaniu wysokiej sprawności nagrzewania.

W artykule zaprezentowano problematykę modelowania wielowzbudnikowych, wieloczęstotliwościowych nagrzewnic indukcyjnych, konstrukcję modelu nagrzewnicy dwuwzbudnikowej, oraz wybrane wyniki badań symulacyjnych.

Zasady modelowania wielowzbudnikowych indukcyjnych urządzeń grzejnych

Prace obliczeniowe wykonano w oparciu o numeryczny model odzwierciedlający układ do monokrystalizacji węgla krzemu metodą PVT. Symulowano najbardziej istotne elementy reaktora, przyjmując jego uśrednione wymiary na podstawie prac [1, 2, 3]. Widok modelu pokazano na rysunku 2.a. Składa się on z dwóch podobnych miedzianych wzbudników (1 i 2 na rys. 2), o średnicach 160 mm i wysokościach 110 mm. Wewnątrz układu wzbudników

znajduje się reaktor wykonany z grafitu (3 na rys. 2) oraz elementów izolacyjnych (6 na rys. 2). Założono, iż średnica reaktora wynosi 100 mm a jego wysokość – 200 mm Odzwierciedlono również obecność polikrystalicznego (4 na rys. 2) oraz monokrystalicznego (5 na rys. 2) węgla krzemu. Parametry materiałowe przyjęto zgodnie z danymi podanymi w [4], uwzględniając ich zależność od temperatury.



Rys. 2. Widok geometrii układu grzejnego (a) oraz odpowiadającego mu modelu obwodowego (b)

Zaprezentowany model obwodowy (rys. 2.b) nagrzewnicy jest w wielu przypadkach wykorzystywany do efektywnego modelowania urządzeń tej klasy, z uwzględnieniem parametrów źródła energii. Układ taki jest opisywany równaniem macierzowym typu (1) [5].

$$(1) \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \\ \bar{U}_3 = 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + j\omega L_1 & j\omega M_{1-2} & j\omega M_{1-3} \\ j\omega M_{2-1} & R_2 + j\omega L_2 & j\omega M_{2-3} \\ j\omega M_{3-1} & j\omega M_{3-2} & R_3 + j\omega L_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \end{bmatrix}$$

gdzie: R_i , R_j - rezystancje wzбудników, R_3 - rezystancja wsadu; L_i - impedancje własne, $M_{i,j}$ - impedancje wzajemne.

Posługiwanie się modelem obwodowym jest utrudnione ze względu na brak możliwości analitycznego wyznaczenia impedancji wzajemnych pomiędzy poszczególnymi wzbudnikami i wsadem (M_{i-3}). Problem ten rozwiązuje się poprzez wykorzystywanie metod numerycznych lub metod identyfikacji [5]. Dysponując fizycznym modelem obiektu, możliwe jest wyznaczenie poszczególnych impedancji poprzez pomiary napięć indukowanych w poszczególnych elementach, przy zasilaniu tylko jednej sekcji grzejnej (2).

$$(2) \quad \bar{Z}_{i,j} = \frac{U_i}{I_j} e^{j\varphi}$$

gdzie: φ - kąt przesunięcia pomiędzy napięciem U_i oraz prądem I_j .

Podstawowe założenia do niniejszej pracy koncentrują się na możliwości opracowania nagrzewnicy indukcyjnej o parametrach umożliwiających:

- kształtowanie pól temperatury w obszarach roboczych urządzeń do wytwarzania monokrystalicznego węgla krzemu w szerokich granicach, umożliwiających realizację różnicowanych wersji technologii oraz prowadzenie prac rozwojowych;

- ograniczenie energochłonności procesu poprzez racjonalny dobór częstotliwości roboczych, gwarantujących pracę przy wysokich sprawnościach elektrotermicznych.

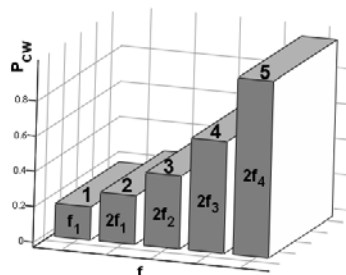
Przyjęto możliwość zasilania wzбудników prądami o różniących się częstotliwościach. Założenie to wynika z chęci kształtowania powierzchniowych i promieniowych rozkładów mocy grzejnych.

Zmiana częstotliwości roboczych prądów we wzbudnikach jest istotnym czynnikiem determinującym

wartość mocy całkowitych (3) oraz szybkość tłumienia energii elektromagnetycznej we wsadach. Na rysunku 3 pokazano przykładowe względne (odniesione do maksymalnej) wartości mocy wydzielanej w cylindrycznym wsadzie nagrzewanym indukcyjnie, przy stałych wartościach prądów we wzbudnikach.

$$(3) \quad p_V = H_0^2 \frac{2\rho}{\delta^2} \frac{J_1\left(\frac{\sqrt{2}r}{\delta} \cdot j^{\frac{3}{2}}\right)}{J_1\left(\frac{\sqrt{2}r_0}{\delta} \cdot j^{\frac{3}{2}}\right)}$$

gdzie: J_j - funkcja Bessela pierwszego rzędu; ρ - rezystywność wsadu; H_0 - natężenie pola magnetycznego na powierzchni wsadu; δ - głębokość wnikania; r - promień wsadu; r_0 - promień zewnętrzny wsadu.

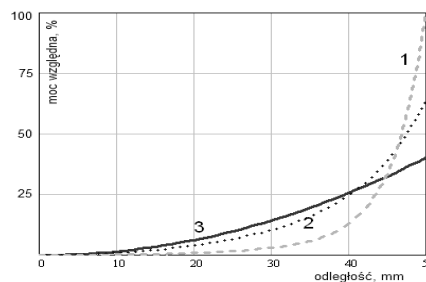


Rys. 3. Moce wydzielane w jednorodnym wsadzie cylindrycznym przy stałym prądzie wzbudnika oraz zmiennych częstotliwościach. 1- 1000 Hz; 2- 2000 Hz; 3- 4000 Hz; 4- 8000 Hz; 5- 16000 Hz

Zgodnie z podstawami techniki PVT, większość elementów konstrukcyjnych w strefach roboczych (reaktorach) wykonywana jest z grafitu. Z uwagi na znaczną rezystywność, elementy te charakteryzują się relatywnie dużą głębokością wnikania. Fakt ten umożliwia wykorzystanie idei zmiennej częstotliwości w poszczególnych sekcjach grzejnych, do lokalnego kształtowania rozkładów temperatury w funkcji promienia. Wykorzystując podstawowe zależności (4), wyznaczono rozkłady mocy w grafitowym cylindrze o promieniu 50 mm, odwzorowującym modelowany układ roboczy. Na rysunku 4 pokazano względne, odniesione do maksymalnej, rozkłady mocy grzejnych, przy założeniu stałej wartości prądu płynącego przez uzwojenie wzbudnika.

$$(4) \quad p_v(\xi, l, P_0) = \frac{P_0(\tau)}{r} \cdot \xi \frac{ber'^2(\xi \cdot l) + bei'^2(\xi \cdot l)}{ber(\xi)ber'(\xi) + bei(\xi)bei'(\xi)}$$

gdzie: P_0 - moc czynna powierzchniowa; $ber(z)$, $bei(z)$, $ber'(z)$, $bei'(z)$ - funkcje Kelwina oraz ich pierwsze pochodne, $l=r/r_0$ - bezwymiarowa zmienna przestrzenna, ξ - współrzędna względna.



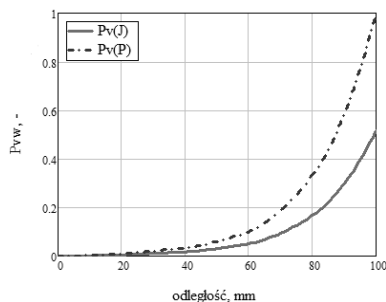
Rys. 4. Rozkłady mocy w grafitowym cylindrze dla częstotliwości 100 Hz (3), 1000 Hz(2) i 10 kHz (1)

Wykonane analizy potwierdziły potencjalną możliwość realizacji urządzenia grzejnego do technik monokrystalizacji, w oparciu o przyjęte założenia zasilania wzбудników sygnałami o różniących się częstotliwościach. Fakt ten w praktyce uniemożliwia opracowanie obwodowego modelu urządzenia, bazującego na zasadach określonych zależnościami typu (1) i (2). Do dalszych prac wykorzystano polowe modele numeryczne, zaimplementowane w dedykowanym środowisku MES. Zgodnie z klasycznymi algorytmami obliczeniowymi dla tego rodzaju zagadnień, w pierwszej kolejności wykonywane są obliczenia pól elektromagnetycznych, dla podstawowej harmonicznej [6]. Na podstawie rozkładu gęstości prądów, wyliczane są elementarne moce (5) stanowiące wymuszenia do analiz cieplnych. Wartości temperatur w kolejnych chwilach czasowych mogą być zazwyczaj transponowane do zagadnień elektromagnetycznych, w celu uwzględnienia zmienności parametrów materiałowych.

$$(5) \quad p_E = \operatorname{Re} \left(\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [\rho] [J_{t,i}] \cdot [J_{t,i}]^* \right)$$

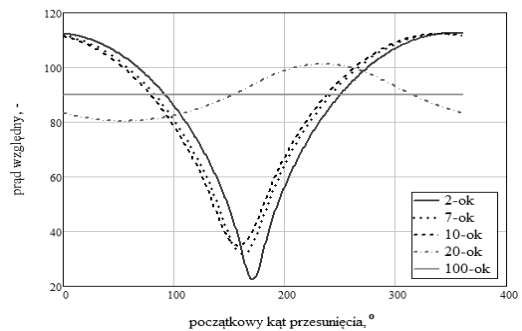
gdzie: n - liczba punktów całkowania, $[\rho]$ - macierz rezystywności, $J_{t,i}$ - wektor prądów w i -tym elemencie, $J_{t,i}^*$ - wektor sprzężony z $J_{t,i}$.

Podstawowe algorytmy stosowane w systemach obliczeniowych typu MES nie umożliwiają bezpośredniej analizy indukcyjnych układów grzejnych złożonych z wielu wzбудników pracujących przy odmiennych częstotliwościach. Proponowane w literaturze [7, 8] rozwiązania bazujące na superponowaniu mocy cieplnych (5) we wsadzie, na podstawie oddzielnych analiz dla poszczególnych wzбудników są zazwyczaj wykorzystywane. Wykonane autorskie obliczenia analizowanego układu umożliwiły stwierdzenie znaczących błędów tego podejścia. Przykładowe rozkłady elementarnych mocy cieplnych w funkcji promienia walca pokazano na rysunku 5.



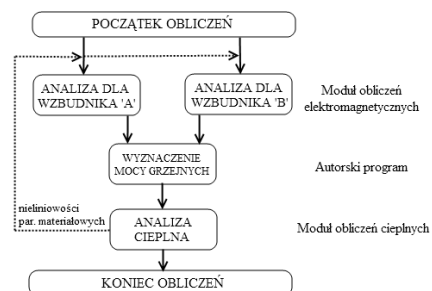
Rys. 5. Względne wartości mocy grzejnych w funkcji promienia. $p_v(P)$ - moc wyznaczona na podstawie superpozycji mocy grzejnych od poszczególnych wzбудników; $p_v(J)$ - moc wyznaczona na podstawie superpozycji gęstości prądów od poszczególnych wzбудników

Autorskie badania [9], polegające na wielowariantowych obliczeniach zjawisk występujących w wielowzбудnikowych nagrzewnicach indukcyjnych, umożliwiły stwierdzenie, że superpozycja wektorów gęstości prądów w każdym elemencie skończonym, oraz wyznaczenie na tej podstawie wartości mocy grzejnych, jest podejściem prawidłowym, umożliwiającym otrzymywanie wyników o wysokiej dokładności. Na rysunku 6 zaprezentowano wyniki superponowania chwilowych wartości prądów dla przebiegów różniących się częstotliwością o 1%, w funkcji początkowego kąta przesunięcia między wynikami.



Rys. 6. Względne wartości skuteczne prądów w zależności od początkowego kąta przesunięcia fazowego, wyznaczone dla przebiegów różniących się pod względem częstotliwości o 10%

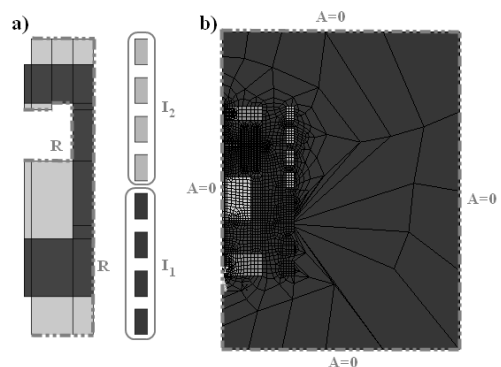
Wyniki obliczeń wykazały, iż w przypadkach różnic pomiędzy częstotliwościami prądów w poszczególnych wzбудnikach, początkowy kąt przesunięcia między sygnałami odgrywa rolę jedynie podczas obliczeń dla niewielkiej liczby okresów. Stałe czasowe przebiegów cieplnych są znacznie dłuższe niż elektrycznych. W tym rodzaju zagadnieniach, wartości mocy cieplnych są zatem uśrednione dla znacznej liczby okresów przebiegów elektrycznych. Jak wykazano, możliwe jest posługiwanie się zespolonymi wartościami prądów. Opracowano autorskie algorytmy obliczeniowe stanowiące uzupełnienie komercyjnych systemów typu MES (rys. 7). Algorytmy te wykorzystano do analiz układu grzejnego stanowiącego podstawę niniejszej pracy.



Rys. 7. Podstawowy algorytm obliczeniowy nagrzewnicy

Modelowanie układu do monokrystalizacji

Widok modelu 2D, zaimplementowanego w systemie Ansys pokazano na rysunku 8.



Rys. 8. Geometria (a) oraz siatka (b) modelu symulacyjnego wielowzбудnikowej nagrzewnicy indukcyjnej. R- radiacja; I- prąd, A- magnetyczny potencjał wektorowy

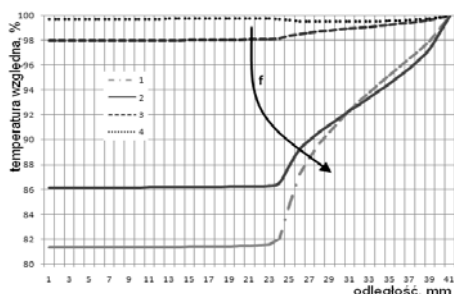
W charakterze wymuszeń zastosowano skuteczne wartości prądów w poszczególnych wzбудnikach. Z uwagi na niskie ciśnienie w obszarze roboczym, przyjęto, iż wymiana ciepła będzie zachodziła jedynie na drodze

radiacji (6), w warunkach ograniczonych wymiarami komory próżniowej oraz układu wzбудniki - wsad.

$$(6) \quad \sum_{i=1}^N \left(\frac{\delta_{ji} - \varphi_{ji}}{\varepsilon_i} \cdot \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} \right) \cdot \frac{1}{F_i} \cdot P_i = \sum_{i=1}^N (\delta_{ji} - \varphi_{ji}) \cdot \sigma_0 \cdot T_i^4$$

gdzie: ε_i - emisyjność całkowita powierzchni „i”; F_i - wielkość powierzchni i-tego elementu skończonego; P_i - moc dostarczana do elementu „i”; δ_{ji} - delta Kroneckera; T - temperatura w skali Kelwina; φ - współczynnik konfiguracji; σ_0 - stała Steffana – Boltzmana.

Kompletny model numeryczny wykorzystano do wielowariantowych obliczeń uwzględniających zmienną częstotliwość oraz odległość pomiędzy wzбудnikami i wsadem. Najbardziej istotnymi wielkościami podczas realizacji symulowanego procesu technologicznego są rozkłady temperatury w funkcji wysokości, w strefie transportu, oraz promieniowe rozkłady temperatury w strefie krystalizacji. W strefie krystalizacji wymaga się jednorodności pola temperatury, co umożliwia wytwarzanie jednorodnej struktury krystalicznej. Wykonane obliczenia dla stanu ustalonego, przy różnych częstotliwościach prądu w górnym wzбудniku, pokazano na rysunku 9.

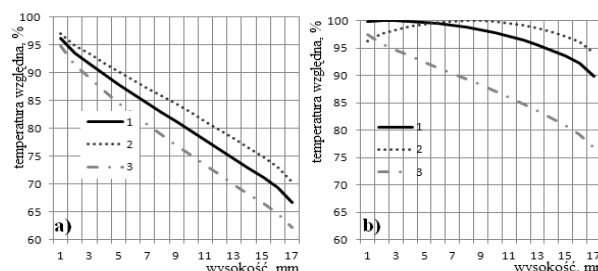


Rys. 9. Promieniowe rozkłady temperatury w strefie krystalizacji, przy różnych częstotliwościach prądów. 1- $f=100$ kHz; 2- $f=10$ kHz; 3- $f=1$ kHz; 4- $f=100$ Hz

Charakter rozkładów temperatury, odniesionych do wartości maksymalnej wykazuje możliwość kontroli i profilowania, w zależności od częstotliwości roboczej indukcyjnego układu grzejnego. Fakt ten wynika ze znacznej głębokości wnikania, porównywalnej z wymiarami poprzecznymi grafitowego reaktora. Stosowanie proponowanej koncepcji jest w tym przypadku zasadne i może stanowić konkurencyjne rozwiązanie w stosunku do wykorzystywanych urządzeń, w których odpowiedni profil temperatury uzyskuje się poprzez stosowanie układów termoizolacyjnych, pogarszających dynamikę procesów grzejnych.

Jak zaznaczono we wstępie niniejszej pracy, rozkłady temperatury w strefie transportu powinny być dostosowywane do zróżnicowanych warunków procesowych, poprzez umożliwienie kształtowania gradientów temperatury. Symulacja pracy proponowanej nagrzewnicy przy zróżnicowanych częstotliwościach udowodniła słuszność przyjętych założeń. Na rysunku 10 pokazano względne (odniesione do maksymalnych dla danej serii) rozkłady temperatur w strefie transportu, w funkcji wysokości. Badania wykonano dla dwóch zakresów częstotliwości w granicach 1 kHz oraz 10 kHz. Na podstawie uzyskanych wyników udowodniono możliwość kontroli rozkładów temperatury w modelu grafitowego reaktora. Zwiększenie częstotliwości roboczej prowadzi do bardziej intensywnych zmian mocy grzejnej (oraz temperatury), przy tych samych (procentowych) zmianach częstotliwości prądów jednego ze wzбудników. Uzyskiwana

dokładność kształtowania rozkładów temperatury oraz sprawność procesu grzejnego wzrastają wraz ze zmniejszaniem odległości pomiędzy wzбудnikiem i wsadem.



Rys. 10. Rozkłady temperatury w strefie transportu przy częstotliwości podstawowej 1 kHz(a) oraz 10 kHz (b). 1- praca wzбудników przy jednakowych częstotliwościach; 2- częstotliwość górnego wzbudnika zwiększona o 40%; 3- częstotliwość górnego wzbudnika zmniejszona o 40%

Podsumowanie

W pracy przedstawiono podstawowe zagadnienia techniki PVT w odniesieniu do wymagań profilowania pól temperatury. Omówiono koncepcję nowego typu systemu do nagrzewania indukcyjnego, opierającego się na wykorzystaniu odmiennych częstotliwości prądów zasilających poszczególne wzбудniki. Omówiono problematykę modelowania urządzeń tej klasy, wraz z podaniem algorytmów obliczeniowych. Wykonane prace umożliwiły stwierdzenie potencjalnej prawidłowości funkcjonowania proponowanego układu wielowzбудnikowej, wieloczęstotliwościowej nagrzewnicy indukcyjnej w zagadnieniach technologii PVT.

Niniejsza praca jest współfinansowana przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, projekt „Program Rozwojowy Politechniki Warszawskiej”.



LITERATURA

- [1] Wijesundara M., Azevedo R.: Silicon Carbide Microsystems for Harsh Environments, Springer (2011), ISBN: 978-1-4419-7120-3;
- [2] Geiser J., Klein O., Philip P.: Transient Numerical Study of Temperature Gradients During Sublimation Growth of SiC, *IMA Preprint Series#2079 / 2005*;
- [3] Drachev R., Deyneka E., Rhodes C., Schupp J., Sudarshan T.: Fundamental Limitations of SiC PVT Growth Reactors with Cylindrical Heaters, *Material Science Forum Vols. 527-529* (2006), pp. 15-20;
- [4] www.matweb.com, 20.10.2013;
- [5] M. Souley, A. Spagnolo, O. Pateau, B. Paya, J.C. Hapiot, P. Ladoux, P. Maussion, “Methodology to characterize the impedance matrix of multi-coil induction heating device,” *Electromagnetic Properties of Materials EPM*, (2009)
- [6] Souley M., Egalon J., Caux S., Pateau O., Maussion P.: Modeling and control of a multi phase induction system for metal disc heating, *IEEE Trans. Magn.*, 10 (2010), pp 556 - 561
- [7] Souley M., Egalon J., Caux S., Pateau O., Maussion P.: Modeling and control of a multi phase induction system for metal disc heating, *IEEE Trans. Magn.*, 10 (2010), pp 556 - 561
- [8] Nacke B., Wrona E.: Numerical Simulation Methods for Design of Complex Induction Hardening Problems by Means of Numerical Simulation, *Archives of Electrical Engineering*, Vol. 54 nr 4-2005, ISSN 0004-0746
- [9] Wesołowski M., Niedbała R.: Koncepcja wielomikroprocesorowego urządzenia do nagrzewania indukcyjnego, *Elektronika*, nr 2012/12.

Autorzy: dr inż. Marcin Wesołowski, dr inż. Ryszard Niedbała Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, marcin.wesolowski@ien.pw.edu.pl, ryszard.niedbala@ien.pw.edu.pl.