

Laura Jasińska, Karol Malecha
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

WYBRANE ASPEKTY WYTWARZANIA ELEMENTÓW MIKROFALOWYCH W UKŁADACH CERAMICZNYCH LTCC

SELECTED ASPECTS OF DEVELOPING MICROWAVE ELEMENTS IN LTCC MODULES

Streszczenie: Artykuł prezentuje aspekty techniczne, które są istotne podczas wykonywania oraz projektowania zintegrowanych układów mikroprzepływowo-mikrofalowych. Zastosowanie techniki mikrofalowej w układach mikroprzepływowych otwiera nowe możliwości, które stanowią rozwiązanie części problemów występujących w układach mikroprzepływowych, takich jak wykorzystanie i dostarczanie energii cieplnej. Ponadto, mikrofałe stanowią atrakcyjną alternatywę dla spotykanych obecnie metod charakteryzacji parametrów substancji umieszczonych w kanale mikroukładu. W związku z tym, przedstawiono typowe obszary zastosowań techniki mikrofalowej w modułach mikroprzepływowych. Opisano typowe podłoża, które są stosowane podczas wytwarzania wspomnianych układów, wraz z wyszczególnieniem ich cech charakterystycznych i porównaniem. Wskazano na korzyści płynące z zastosowania ceramiki LTCC (ang. low temperature cofired ceramics, niskotemperaturowa ceramika współwypalana), jako materiału podłożowego pod układy mikroprzepływowo-mikrofalowe. Wyszczególniono możliwe do wykonania techniką LTCC typy przewodnic falowych wraz z odpowiednim położeniem mikrokanalu w ceramicznym podłożu oraz dokonano krótkiego podsumowania.

Abstract: This paper describes aspects, which are significant during the process of designing and developing of integrated microfluidic-microwave modules. The application of microwaves in microfluidic modules ensures the new possibilities, such as a providing a heat to the selected parts of a microsystem. Furthermore, the microwaves are the alternative solution of characterization of parameters the substance in the microchannel. Therefore, the usual fields of microwave technique in microfluidic modules are presented. The most used substrates in mentioned devices are described and compared. The benefits of using the LTCC as the substrate of microfluidic-microwave devices are indicated. Furthermore, the most common used wave guides integrated with the geometry of microchannels in LTCC modules are presented.

Słowa kluczowe: LTCC, technika mikrofalowa, mikrokanal, przewodnice falowe

Keywords: LTCC, microwaves, microchannel, wave guides

1. Wstęp

Początki technologii niskotemperaturowej ceramiki współwypalanej (ang. Low Temperature Cofired Ceramics, LTCC) w elektronice datuje się na lata osiemdziesiąte dwudziestego wieku [1]. Z racji na wysoką odporność na trudne warunki środowiskowe, z powodzeniem od lat jest wykorzystywana w przemyśle kosmicznym, militarnym i górniczym [1,2]. Z kolei dzięki możliwości projektowania wielowarstwowych ścieżek przewodzących, jednym z pierwszych zastosowań ceramiki LTCC były obudowy dla układów wysokiej skali integracji (ang. Very Large Scale Integration, VLSI) [3]. Wśród innych typowych zastosowań ceramiki LTCC wymienia się układy antenowe (pracujące w zakresie częstotliwości radiowych) [4]. Jednym z rozwiązań, zyskujących coraz większą popularność jest integracja

mikrofalowych monolitycznych układów scalonych (ang. Monolithic Microwave Integrated Circuits, MMICs) z podłożami LTCC [5]. Od kilku lat obserwuje się tendencję zastosowania ceramiki LTCC jako podłoża pod układy mikroprzepływowe, co jest stosunkowo nowym trendem [1, 6].

2. Obszary zastosowań mikrofal w układach mikroprzepływowych

Wśród zastosowań mikrofal w układach mikroprzepływowych można zauważyć dwa wiodące trendy. Pierwszym z nich jest określanie parametrów elektrycznych substancji znajdujących się w mikrokanale i na tej podstawie oznaczanie między innymi składu wspomnianej substancji. Drugim jest wykorzystanie obwodu mikrofalowego (najczęściej w formie linii mikro-

paskowych bądź paskowych), jako emitera energii cieplnej. W literaturze można również znaleźć doniesienia dotyczące wpływu obecności zmiennego pola elektromagnetycznego o częstotliwości zawierającej się w paśmie mikrofalowym na zmianę kinetyki reakcji chemicznych [7,8]. Większość typów zastosowań wymaga wykonania pomiarów układu w dziedzinie częstotliwości za pomocą wektorowego analizatora sieci (ang. Vector Network Analyzer, VNA). W wyniku otrzymuje się parametry macierzy rozproszenia (ang. scattering parameters, macierzy S). Dzięki temu, na podstawie stopnia odbicia i transmisji sygnału (fali prądowo-napięciowej) jest możliwe między innymi określenie przybliżonej wartości energii mikrofalowej rozproszonej w formie ciepła lub wyznaczenie wybranych parametrów elektrycznych substancji [9, 10].

Wśród metod, znanych w technice mikrofalowej i od niedawna wykorzystywanych przy projektowaniu układów mikroprzepływowych służących do detekcji substancji, można wyróżnić metody rezonansowe oraz inne, takie jak metody różnicowe i odbiciowe. Pierwsza z wymienionych polega na badaniu odpowiedzi częstotliwościowej układu, gdzie wraz ze zmianą parametrów układu następuje zmiana częstotliwości rezonansowej. Po obliczeniach, na podstawie wielkości zmiany częstotliwości, wyznacza się parametry elektryczne materiału (substancji w mikrokanale) oraz porównuje z cechami charakteryzującymi znane substancje bądź innym punktem odniesienia. Jedną z metod różnicowych jest metoda dwóch linii mikropaskowych (metoda zmiennej fazy). Polega ona na pomiarze odpowiedzi układu w szerokim paśmie częstotliwości za pomocą dwóch linii mikropaskowych (bądź paskowych), gdzie długość jednej linii jest wielokrotnością drugiej [11]. Metody odbiciowe, w przeciwieństwie do wcześniej opisanych, polegają na pomiarze jedynie refleksyjności układu, co wymaga podłączenia układu nie do dwóch portów VNA, lecz jednego.

W przypadku zastosowania mikrofal, jako źródła ciepła, należy zaprojektować obwód mikrofalowy (najczęściej za pomocą linii paskowej bądź mikropaskowej) w taki sposób, by stanowił emiter ciepła umiejscowiony jak najbliżej mikrokanalu, w którym znajduje się substancja. Dzięki precyzyjnej kontroli dostarczania mocy mikrofalowej oraz zastosowaniu odpowiedniej geometrii ścieżek, możliwe jest dokładniejsze –

selektywne – grzanie substancji znajdujących się w mikrokanale. Ze względu na właściwości dielektryczne ceramiki LTCC (małe straty dielektryczne), energia promieniowania mikrofalowego rozpraszana jest głównie w przepływającym medium. W rezultacie, podgrzaniu ulega tylko płyn w mikrokanale. Biorąc pod uwagę, że najczęściej obecnie wykorzystywane rozwiązanie, jakim jest grzanie oporowe niesie za sobą efekt uboczny w postaci wzrostu temperatury całego modułu, wspomniana możliwość grzania za pomocą mikrofal stanowi niewątpliwą zaletę.

3. Podłoża oraz ogólna klasyfikacja planarnych przewodnic falowych

Z perspektywy techniki mikrofalowej, najczęściej wykorzystywanym typem materiałów pod obwoły mikrofalowe są laminaty szklano-epoksydowe, które umożliwiają wykonanie we względnie łatwy sposób mozaiki ścieżek przewodzących (miedzianych). Ponadto, laminaty charakteryzują się odpowiednimi parametrami materiałowymi, czyli niską wartością przenikalności elektrycznej oraz niewielkimi stratami dielektrycznymi. Ponadto, są one od lat wykorzystywane jako podłoża pod układy elektroniczne. Jednakże, oprócz wspomnianych zalet, materiał tego typu charakteryzuje się względnie niską odpornością na trudne warunki środowiskowe oraz długotrwałe narażenie na czynniki chemiczne i wilgoć. Wspomniane cechy, przy jednoczesnej trudności wykonywania mikrokanalów oraz innych struktur przestrzennych w podłożach wykonanych z laminatów szklano-epoksydowych, czynią ten typ materiału mniej atrakcyjnym z punktu widzenia wytwarzania zintegrowanych układów mikroprzepływowych.

Biorąc pod uwagę wspomniane wady laminatów szklano-epoksydowych, przy zastosowaniach w technice systemów mikroprzepływowych coraz częściej wykorzystuje się tworzywa polimerowe. Niesie to za sobą większą łatwość wykonywania struktur przestrzennych w podłożu wraz z większą odpornością na czynniki chemiczne i wilgoć niż w przypadku laminatu szklano-epoksydowego. Jednakże, z perspektywy wytwarzania układów mikroprzepływowo-mikrofalowych, problematyczna jest wrażliwość większości materiałów tego typu na zmiany temperatury i niestabilność wartości względnej przenikalności elektrycznej wraz ze wzrostem częstotliwości. Ponadto, kolejnym wyzwaniem jest trudność integracji elementów

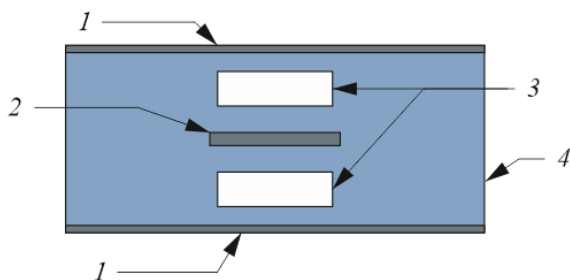
elektronicznych ze wspomnianym typem podłoża.

Materiałem, który jest wykorzystywany coraz częściej jako podłoże pod układy mikroprzepływowo-mikrofalowe jest ceramika LTCC.

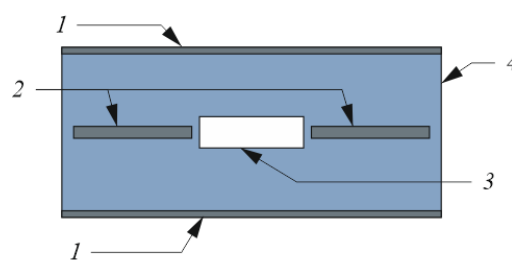
Wśród argumentów, przemawiających za zastosowaniem ceramiki LTCC w mikrofalowych układach mikroprzepływowych można wymienić przede wszystkim łatwość wykonania połączeń elektrycznych (wraz z możliwością integracji z podłożem podzespołów elektronicznych) przy jednoczesnej możliwości wykonywania struktur przestrzennych w podłożu. Niesie to za sobą możliwość wykonywania mikrokanalów oraz innych elementów charakterystycznych dla układów mikroprzepływowych. Ponadto, odporność chemiczna i termiczna wyższa niż w przypadku laminatów szklano-epoksydowych czyni z ceramiki LTCC atrakcyjną alternatywę dla stosowanych powszechnie materiałów podłożowych. Nisko-temperaturowa współwypalana ceramika umo-

żliwia integrację obwodów mikrofalowych oraz wykonywanie struktur przestrzennych układów mikroprzepływowo-mikrofalowych, co znajduje potwierdzenie w doniesieniach literaturowych [5, 8, 10]. Co więcej, ceramika LTCC charakteryzuje się stabilną wartością względnej przenikalności dielektrycznej w szerokim zakresie częstotliwości i niską wartością kąta strat, który to dla ceramiki LTCC zawiera się najczęściej w przedziale 0,001-0,003, podczas gdy tworzywa polimerowe charakteryzują się wartościami z zakresu 0,002-0,004, a laminat epoksydowo-szkłany FR-4 o rząd więcej – 0,02.

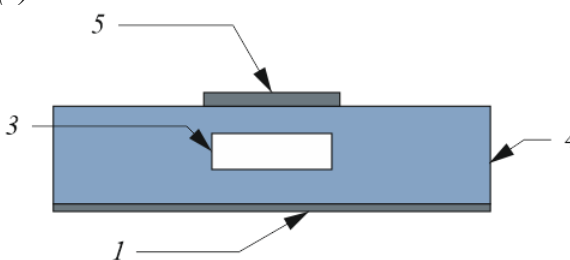
Ze względu na specyfikę technologii LTCC, obwody mikrofalowe wykonuje się w postaci linii paskowych oraz mikropaskowych, które charakteryzują się planarną geometrią. Przykłady struktur mikrofalowo-mikroprzepływowych wykonanych techniką LTCC zaprezentowano na Rys. 3-6.



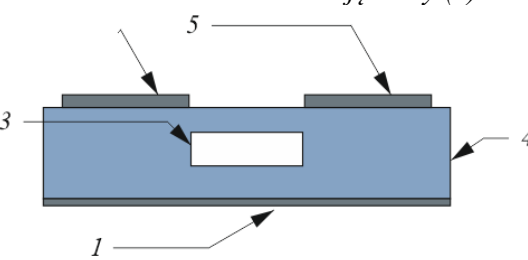
Rys. 1. Linia paskowa (2) przebiegająca pomiędzy dolną i górną częścią mikrokanalu (3). Podłoże LTCC oznaczono (4), natomiast metalizację masy (1)



Rys. 2. Dwie sprzężone linie paskowe (2) wraz z mikrokanalem (3), znajdujące się w podłożu LTCC (4), na którego wierzchniej i spodniej warstwie naniesiono metalizację masy (1)



Rys. 3. Linia mikropaskowa (5) umiejscowiona nad mikrokanalem (3)



Rys. 4. Dwie sprzężone linie paskowe (5) wraz z mikrokanalem (3) umiejscowionym w podłożu (4)

Etapy procesu technologicznego LTCC, które zdają się wpływać na parametry dielektryczne podłoża, to laminacja oraz współwypalanie. Pierwszy z wymienionych wpływa na gęstość materiału, co przekłada się bezpośrednio na wartość stałej dielektrycznej. Surowe folie

LTCC łączy się ze sobą (laminuje) w prasie izostaticznej lub jednoosiowej. Z kolei podczas współwypalania następuje zmniejszenie wymiarów modułu (skurcz ceramiki LTCC), co przekłada się na zmianę wymiarów geometrycznych zarówno samego podłoża, jak i linii

paskowych oraz mikropaskowych. Na Rys. 7a i 7b przedstawiono prasę izostatyczną oraz piec

komorowy wykorzystywane do laminowania i współwypalania arkuszy LTCC.



a)



b)

Rys. 7. Prasę izostatyczną (a) oraz piec komorowy Nabertherm HTC 03/16 znajdujące się na wyposażeniu Laboratorium Mikrosystemów Grubowarstwowych Wydziału Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki Politechniki Wrocławskiej [12]

Trudność kontroli skurczu ceramiki LTCC wpływa na niedokładność wymiarów podzespołów mikrofalowych i całego finalnego układu. Nieznaczna zmiana szerokości linii mikrofalowej ma bezpośredni wpływ na zmianę jej impedancji charakterystycznej, co z kolei może spowodować niedopasowanie impedancyjne układu i pracę przy częstotliwości innej niż zaprojektowana.

4. Podsumowanie

Układy mikroprzepływowe wymagające odpowiednich warunków termicznych do poprawnego działania znajdują zastosowanie m.in. w analityce (bio)chemicznej. W technice systemów mikroprzepływowych najczęściej stosowaną metodą dostarczania energii cieplnej jest grzanie oporowe, pomimo trudności sterowania poziomem i rozkładem temperatury w układzie mikroprzepływowym w trakcie przeprowadzenia tego procesu. Prowadzi ono do podgrzewania zarówno cieczy, jak i całego mikrosystemu. Rozwiązaniem problemu dostarczenia energii cieplnej jest zastosowanie grzania za pomocą mikrofal. Zastosowanie odpowiedniej geometrii obwodu mikrofalowego umożliwia dostarczanie mocy bezpośrednio do cieczy w mikrokanale. Współczesne układy tego typu wykonywane są z różnych materiałów np. laminatów, polimerów czy ceramiki. Nowoczesna ceramika LTCC i związana z nią technologia

zdaje się być idealnym rozwiązaniem do wykonywania układów mikrofalowo-mikroprzepływowych. Podkreślić należy, że ceramika LTCC charakteryzuje się bardzo dobrymi właściwościami elektrycznymi (stabilność względnej przenikalności elektrycznej, niewielki współczynnik strat dielektrycznych) w zakresie częstotliwości mikrofalowych, jak również łatwością kształtowania przestrzennego ceramiki LTCC. Dzięki temu istnieje możliwość wykonywania różnych podzespołów mikroprzepływowych (kanały, wnęki, zbiorniki) o wymiarach charakterystycznych rzędu 50-100 μm . Jednak ze względu na specyfikę technologii LTCC niezbędna jest optymalizacja poszczególnych etapów procesu wytwarzania układów mikrofalowo-mikroprzepływowych. Działania te umożliwią lepszą kontrolę geometrii wykonywanych podzespołów mikrofalowych. Podsumowując, obszar ten wymaga dalszych badań.

5. Literatura

- [1]. L.J. Golonka, T. Zawada, J. Radojewski, H. Roguszcak, M. Stefanow, „LTCC Microfluidic System”, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, nr 3, s. 150-156, 2006.
- [2]. L. Golonka, Z. Ianelli, H. Roguszcak, H. Sztajer, P. Wojtas, P. Wisznowski, D. Babecki, „LTCC wireless module”, *Elektronika*, nr 3, s. 25-27, 2011.

- [3]. L. Golonka, „Zastosowanie ceramiki LTCC w mikroelektronice”, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, 2001
- [4]. S. H Kim, J.S. Kim, N.K. Kang, J.C. Kim, H.G. Yang, J.G. Yook, „Package-Level Integrated LTCC Antenna for RF Package Application”, *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, tom 30, s. 132-141, 2017
- [5]. M. Kirsch, B. Haußermann, W. Konrath, „Buried Microwave Designs using LTCC Multilayer Technology for High Density Integrated Space Hybrids”, *Micro- and Millimetre Wave Technology and Techniques Workshop – materiały pokonferencyjne*, 2014
- [6]. K. Malecha., L.J. Golonka, J. Bałdyga, M. Jasińska, P. Sobieszuk, „Serpentine microfluidic mixer made in LTCC”, *Sensors and Actuators B: Chemical*, tom 143, s. 400-413, 2009
- [7]. B. Barteczka, P. Słobodzian, J. Macioszczyk, L. Golonka, „A Comparison of Two Practical Methods for Measurement of the Dielectric Constant of LTCC Substrates”, *Microwaves, Radar, and Wireless Communication (MIKON) - materiały pokonferencyjne*, s. 1-4, 2014
- [8]. J. Macioszczyk, O. Rac-Rumijowska, P. Słobodzian, H. Teterycz, K. Malecha, „Microfluidical Microwave Reactor for Synthesis of Gold Nanoparticles”, *Micromachines* 8(11), 2017
- [9]. L. Jasińska, J. Macioszczyk, K. Malecha, P. Słobodzian „Integracja obwodu mikrofalowego z mikroprzepływowym układem wykonanym w technologii LTCC”, *Elektronika*, nr 10, s. 3-6, 2017
- [10]. N. Jankovic, V. Radonic, “A Microwave Microfluidic Sensor Based on a Dual-Mode Resonator for Dual-Sensing Applications”, *Sensors* 17(12), 2017
- [11]. M.B. Gawande, S.N. Shelke, R. Zboril, R.S. Varma, “Microwave-assisted Chemistry: Synthetic Applications for Rapid Assembly of Nanomaterials and Organics”, *Acc. Chem. Res.*, tom 47, s. 1338-1348, 2014
- [12]. Strona internetowa Laboratorium Mikrosystemów Grubowarstwowych Zakładu Techniki Elektronicznych i Fotonicznych Wydziału Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki Politechniki Wrocławskiej <http://w12.pwr.wroc.pl/lmg/>

Autorzy

Adres korespondencyjny:
laura.jasinska@pwr.edu.pl

Podziękowania

Praca została sfinansowana przez Narodowe Centrum Nauki (nr 2016/23/B/ST7/00932).