

Możliwości zastosowania niskotemperaturowej współwypalanej ceramiki w przemyśle wydobywczym

Streszczenie: W artykule opisano technologię LTCC (niskotemperaturowa współwypalana ceramika, ang. *Low Temperature Co-fired Ceramic*) pod względem możliwości jej wykorzystania w przemyśle górniczym. Wskazano unikalne cechy technologii LTCC, które są istotne w przypadku wytwarzania układów elektronicznych przeznaczonych do pracy w trudnych warunkach środowiskowych, takich jak podwyższona temperatura, ciśnienie oraz wilgotność. Opisano przykładowe rozwiązania bazujące na technice LTCC obecne w literaturze przedmiotu, wskazujące na możliwość ich zastosowania w przemyśle wydobywczym.

Słowa kluczowe: LTCC, układy elektroniczne, przemysł wydobywczy.

The possibility to use the low-temperature co-fired ceramics (LTCC) in the mining industry

Summary: This article presents LTCC (Low Temperature Co-Fired Ceramic) in terms of using ceramic substrates as base of electronic devices in the mining industry. Technological attributes of substrate material are significant aspects of the perspective of choosing type of electronic systems in harsh environment (such as elevated temperatures, pressures and humidity). Technological process of manufacturing LTCC multilayer was described. Examples of LTCC-based solutions are presented, with particular emphasis on wireless sensor system tested in coalmine.

Keywords: Key words: LTCC, electronic devices, mining industry.

1. Wprowadzenie

Technologia niskotemperaturowej współwypalanej ceramiki (ang. *Low Temperature Co-fired Ceramic* – LTCC) powstała pod koniec lat 80. XX w., jednak jej największy rozwój przypada na kolejną dekadę. Pierwotnym zastosowaniem ceramiki LTCC były obudowy i elementy układów o bardzo wysokiej skali integracji (*Very Large Scale Integration* – VLSI) [1]. Z czasem zostały opracowane folie charakteryzujące się zróżnicowanymi właściwościami w zależności od docelowych zastosowań, czego przykład stanowią folie

ferroelektryczne [2] lub piezoelektryczne [3]. Z tego względu technologia LTCC znalazła zastosowanie w wytwarzaniu systemów o różnorodnym przeznaczeniu, jak moduły wielowarstwowe MCM (ang. *Multi Chip Module*) [1], mikrosystemy analityczne μ TAS (ang. *Micro Total Analysis System*) i mikroreaktory chemiczne [4]. Główne etapy wytwarzania typowych wielowarstwowych układów LTCC zostały zaprezentowane na rysunku 1.



Rys. 1. Etapy wytworzenia typowych wielowarstwowych układów LTCC [5]

Źródło: oprac. własne na podstawie [5].

Po obróbce termicznej (przeprowadzanej w temperaturze 100–120° w czasie 10–20 minut) w atmosferze powietrza następuje wycięcie otworów i znaczników pozycjonujących za pomocą wykrojnika mechanicznego lub lasera. Pozwala to na precyzyjne umiejscowienie poszczególnych elementów i warstw w późniejszych etapach procesu wytwarzania warstwowej struktury LTCC. Następnie wycina się oraz wypełnia otwory przelotowe, które najczęściej pełnią rolę połączeń elektrycznych pomiędzy warstwami modułu. Kolejnym etapem jest sitodruk, za pomocą którego wykonywane są ścieżki przewodzące, pola kontaktowe i elementy bierne. Następnie naniesione warstwy suszy się w podwyższonej temperaturze. Warstwy ceramiczne z wyciętymi kształtami oraz naniesionymi warstwami przewodzącymi, rezystywnymi i dielektrycznymi składane są w stos dzięki otworom

pozycjonującym, a następnie laminowanie w prasie izostatycznej (lub osiowej) pod ciśnieniem wynoszącym najczęściej 20 MPa oraz w temperaturze 70° w czasie 10 minut. Kolejnym etapem jest współwypalanie w piecu komorowym lub tunelowym (w zależności od zaleceń producenta danej folii LTCC) przy zastosowaniu odpowiedniego profilu temperaturowego. W przypadku naniesienia grubowarstwowych elementów na wypalone ceramiczne podłoże następuje kolejny cykl wypalania. Wykonany moduł poddawany jest testom mechanicznym i elektrycznym. Ostatnim etapem jest cięcie gotowego układu do zadanej wielkości (np. za pomocą piły diamentowej).

2. Cechy technologii LTCC

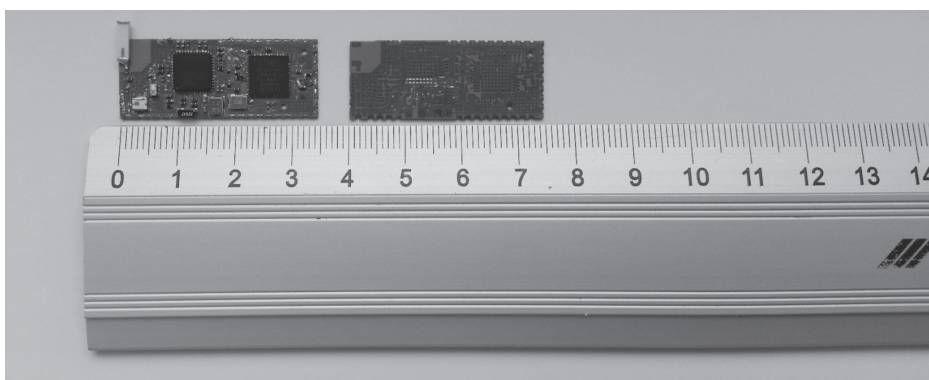
Moduły wykonywane za pomocą technologii LTCC są układami wielowarstwowymi, bardzo często zawierającymi elementy zagrzebane oraz struktury przestrzenne. Połączenia elektryczne mogą być zaprojektowane przykładowo jako ścieżki przewodzące i pola kontaktowe na górnej części modułu (jako substytut PCB) lub też mogą stanowić część wnętrza układu. Połączenia elektryczne wykonywane są z past przewodzących na bazie metali szlachetnych lub ich stopów (Ag, Au, Pd, Ag, Pt). Oprócz materiałów przewodzących do wykonywania zintegrowanych elementów biernych wykorzystuje się również materiały rezystywne oraz dielektryczne [5].

Ze względu na możliwość wykonywania otworów i innych elementów przestrzennych (np. kanałów, wnęk itp.) ceramika LTCC z powodzeniem jest wykorzystywana jako podłoże pod takie układy jak czujniki przepływu gazu i detektory jonów metali ciężkich [4]. Z kolei szeroki zakres wartości przenikalności elektrycznej (dla różnych folii LTCC) i możliwość precyzyjnego zaprojektowania zarówno grubości ceramicznego podłoża, jak i kształtu ścieżek przewodzących (o bardzo wysokiej przewodności) umożliwiły zastosowanie technologii LTCC do wykonywania modułów mikrofalowych [6].

Dodatkowo ceramika LTCC posiada rozszerzalność termiczną zbliżoną do krzemu, dzięki czemu na jej powierzchni można montować nieobudowane układy scalone, stosując techniki montażu powierzchniowego SMT (ang. *Surface Mount Technology*) lub flip-chip, co dodatkowo zwiększa gęstość upakowania elementów i sprzyja miniaturyzacji.

3. Możliwości zastosowania przemysłowego technologii

W ostatnich latach powstały rozwiązania czujnikowe i bezprzewodowe przeznaczone do funkcjonowania w trudnych warunkach środowiskowych (do których zalicza się również kopalnie, m.in. ze względu na podwyższoną temperaturę oraz wilgotność). Przykładem modułu łączności bezprzewodowej na podłożu ceramicznym z LTCC jest system, którego element czynny stanowi układ scalony TN100, opracowany oraz wykonany w Laboratorium Mikrosystemów Grubowarstwowych Politechniki Wrocławskiej, przedstawiony na rysunku 2 [7].

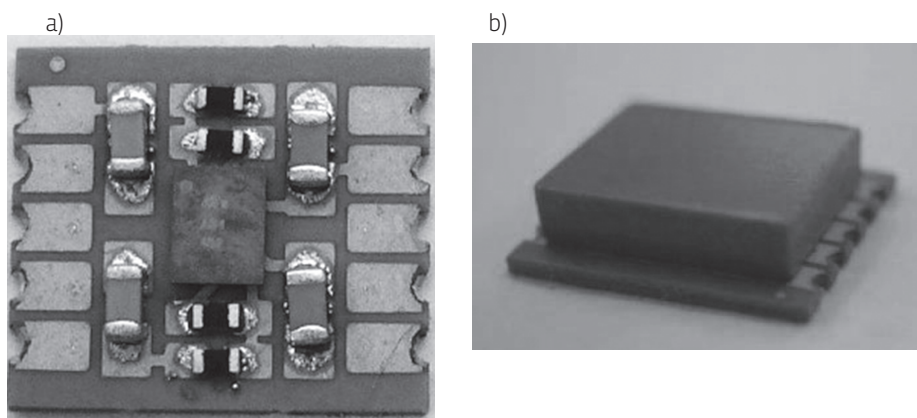


Rys. 2. Moduł łączności bezprzewodowej wykonany na podłożu LTCC przed (po prawej) i po montażu podzespołów elektronicznych (po lewej) (DuPont943)

Źródło: oprac. własne. na podstawie [7].

Moduł łączności bezprzewodowej wykonany na podłożu z LTCC (DuPont 943), w przeciwieństwie do podłoża PCB (FR-4), dla częstotliwości sygnału równej 2,54 GHz charakteryzuje się mniejszą stratnością dielektryczną, co jest jednym z kluczowych parametrów układów pracujących w częstotliwościach mikrofalowych (stratność dla FR-4 wyniosła 16 dB/m, a dla LTCC DuPont 943 – 0,47 dB/m). Ponadto dla kompozytu straty dielektryczne zwiększały się wprost proporcjonalnie wraz z odległością modułu od źródła sygnału (10 dB dla dystansu równego 0,6 m, a ta sama odległość dla ceramiki LTCC spowodowała zwiększenie strat o ok. 0,5 dB) [7]. Oprócz zalet istotnych z perspektywy parametrów elektrycznych podłoża ceramika LTCC, w odróżnieniu od kompozytu FR-4, charakteryzuje się takimi cechami jak: możliwość integracji z podłożem mikrofalowych układów dopasowujących i anten, doskonała stabilność oraz możliwość zamknięcia całości urządzenia wewnątrz obudowy ceramicznej w celu ochrony elementów podatnych na degradację przed wpływem trudnych warunków środowiskowych. Opisywany moduł został z powodzeniem przetestowany w kopalni węgla, gdzie poddano go czynnikom narażeniowym typowym dla przemysłu górniczego [7].

Inny system elektroniczny wykonany na podłożu z LTCC, gdzie zastosowano technikę montażu powierzchniowego i flip-chip, przedstawiono w artykule [8]. Wykonany wielowarstwowy moduł, oprócz nieobudowanego układu scalonego i dyskretnych elementów biernych, został wyposażony w obudowę wykonaną techniką LTCC, która zapewniała ochronę przed wpływem czynników środowiskowych [8]. Wspomniany układ elektroniczny przed i po umieszczeniu w obudowie LTCC zaprezentowano na rysunku 3.



Rys. 3. a) Podłoże wykonane w technologii LTCC z zamontowanymi elementami SMT i flip-chip, b) układ zamknięty w obudowie ceramicznej

Źródło: oprac. własne na podstawie [8].

Wśród przykładów innych urządzeń spełniających swoje zadania w trudnych warunkach środowiskowych można wymienić bezprzewodowy czujnik ciśnienia [9] i zintegrowany system czujników z komunikacją bezprzewodową [10], wykonane w technologii LTCC. Zastosowanie w przemyśle górniczym zintegrowanego systemu nadajników i odbiorników wykonanych na podłożach LTCC niesłoby wiele korzyści, m.in. mniejszą awaryjność. Ponadto, co istotne z perspektywy przemysłu górniczego, elementy wykonane na podłożu ceramicznym z powodzeniem integrują się z istniejącymi podzespołami elektronicznymi, co pozwala na zminimalizowanie kosztów opracowywania i wdrażania nowych rozwiązań od podstaw.

4. Podsumowanie

Ceramika LTCC wydaje się być bardzo dobrym materiałem podłożowym pod układy elektroniczne stosowane w przemyśle górniczym. Ze względu na takie cechy jak odporność na podwyższoną temperaturę oraz wysoka wilgotność powietrza obecne w kopalniach rud miedzi (przy konieczności systematycznego zwiększania głębokości wydobycia), ceramika LTCC może zapewnić atrakcyjną alternatywę dla układów i systemów monitorujących, wykonanych na podłożach z laminatów FR4. Mniejsze prawdopodobieństwo degradacji podłoża oraz uszkodzenia układu zapewnia wyższy poziom bezpieczeństwa w stanach zagrożenia, a co za tym idzie, szybszy powrót do normalnej pracy kopalni.

Badania zostały sfinansowane przez Politechnikę Wrocławską (grant statutowy nr Z12/Z6 0401/225/16) oraz Narodowe Centrum Nauki (grant nr 2016/23/B/ST7/00932).

Literatura

- [1] Golonka L., *Zastosowanie ceramiki LTCC w mikroelektronice*, Wrocław 2001.
- [2] Jantunen H., Hu T., Uusimäki A., Leppävuori S., *Ferroelectric LTCC for Multilayer Devices*, „Journal of the Ceramic Society of Japan” 2004, nr 112, s. 1552–1556.
- [3] Dąbrowski A., *Zintegrowane czujniki piezoelektryczne wykonane z materiałów ceramicznych*, rozprawa doktorska, maszynopis, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2015.
- [4] Malecha K., *Systemy mikroprzepływowe wykonane techniką LTCC*, rozprawa doktorska, maszynopis, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2009.
- [5] Nowak D., *Wysokotemperaturowe właściwości elementów, struktur i układów LTCC*, rozprawa doktorska, maszynopis, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2013.
- [6] Brown R. L., Polinski P. W., Shaikh A. S., *Manufacturing of microwave modules using low-temperature cofired ceramics*, „Microwave Symposium Digest” 1994, IEEE MTT-S International.
- [7] Golonka L., Ianelli Z., Roguszczak H., Sztajer H., Wojtas P., Wiszniowski P., Babecki D., *LTCC wireless module*, „Elektronika” 2011, R. 52, nr 3, s. 25–27.
- [8] Jurków D., Malecha K., Czok M., Roguszczak H., Babiarz M., Golonka L., *Design and Technology of Flip Chip and SMD Devices Integrated with LTCC Module*, International Conference „Mixed design of integrated Circuits and Systems”, materiały pokonferencyjne, Wrocław 2010, s. 458–461.
- [9] Xiong J., Li Y., Hong Y., Zhang B., Cui T., Tan Q., Zheng S., Liang T., *Wireless LTCC-based capacitive pressure sensor for harsh environment*, „Sensors and Actuators A: Physical” 2013, t. 197, s. 30–37.
- [10] Lee J. H., Kidera N., Dejean G., Pinel S., Laskar J., Tentzeris M. M., *A V-band front-end with 3-D integrated cavity filters/duplexers and antenna in LTCC technologies*, „IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques” 2006, t. 54, s. 2925–2936.