

**Leszek Golonka**

**ZASTOSOWANIE CERAMIKI LTCC  
W MIKROELEKTRONICE**

Wrocław 2001

## SPIS TREŚCI

Akronimy .....	4
1. WSTĘP .....	5
2. MODUŁY WIELOSTRUKTUROWE MCM .....	10
2.1. Moduły typu MCM-D .....	14
2.2. Moduły typu MCM-L .....	21
2.3. Moduły typu MCM-C .....	24
3. TECHNOLOGIA GRUBOWARSTWOWA .....	28
3.1. Informacje ogólne .....	28
3.2. Etapy wytwarzania .....	29
4. TECHNOLOGIA I PROJEKTOWANIE MODUŁÓW LTCC .....	43
4.1. Materiały .....	43
4.2. Procesy technologiczne .....	53
4.3. Właściwości modułów LTCC .....	59
4.4. Projekt .....	61
5. ZASTOSOWANIA LTCC .....	69
5.1. Mikrofałe .....	69
5.2. Wielostrukturalne układy scalone (MCIC – <i>Multichip Integrated Circuits</i> ) .....	73
5.3. Czujniki, mikrosystemy .....	79
5.3.1. Półprzewodnikowy czujnik gazu .....	79
5.3.2. Elektrochemiczny czujnik gazu .....	80
5.3.3. Impulsowa woltmetria temperaturowa .....	82
5.3.4. Czujnik prędkości przepływu cieczy .....	83
5.3.5. Czujnik ciśnienia .....	83
5.3.6. Czujniki do pomiaru właściwości plazmy .....	88
5.3.7. Czujnik zbliżeniowy .....	93
5.3.8. Mikrosystemy (mezosystemy) wykonywane techniką LTCC .....	95
5.4. Układy chłodzące, grzejne i analizujące rozkład temperatury .....	98
5.4.1. Rura cieplna .....	98
5.4.2. Układy chłodzące .....	101
5.4.3. Układy grzejne .....	106
5.4.4. Sieć termistorów do analizy rozkładu temperatury w module LTCC .....	110
5.5. Obudowy układów MEMS .....	113
5.6. Wyświetlacze plazmowe .....	116
6. ZAKOŃCZENIE .....	121
Literatura .....	124

## Akronimy

<b>Akronim</b>	<b>Nazwa w języku angielskim</b>	<b>Nazwa w języku polskim</b>
BGA	Ball Grid Array	metoda montażu typu BGA
CSP	Chip Size Package	obudowa wielkości chipu
GF	Gauge Factor	współczynnik czułości odkształceniowej
HDP	High Density Packaging	obudowy wielkiej gęstości upakowania
LTCC	Low Temperature Cofired Ceramic	niskotemperaturowa współwypalana ceramika
LTCC-M		układ LTCC na podłożu metalicznym
MCM	Multichip Module	moduły wielostrukturwe
MCM-C	Multichip Module-Ceramics	moduły wielostrukturwe ceramiczne
MCM-D	Multichip Module-Deposition	moduły wielostrukturwe wykonywane metodą nanoszenia warstw cienkich
MCM-L	Multichip Module-Lamination	moduły wielostrukturwe wykonywane metodą laminatowych obwodów drukowanych
MCIC	Multichip Integrated Circuits	moduł wielostrukturowy zawierający elementy bierne zagrzebane
MEMS	Micro Electro Mechanical System	mikrosystem
MMIC	Monolithic Microwave Integrated Circuits	mikrofalowy monolityczny układ scalony
MOEMS	Micro Opto Electro Mechanical Systems	mikrosystem optoelektroniczny
PDP	Plasma Display Panel	panel wyświetlacza plazmowego
PWB	Printing Wiring Board	obwód drukowany
SMD	Surface Mounting Device	układ do montażu powierzchniowego
SMT	Surface Mounting Technique	metoda montażu powierzchniowego
TFM	Thick Film Multilayer	grubowarstwowy układ wielowarstwowy
TOS	Tape On Substrate	folia LTCC na podłożu
ZST	Zero Shift Shrinkage	skurcz zerowy folii LTCC
μTAS	micro Total Analysis System	mikrosystem do analizy

## 1. WSTĘP

Wielowarstwowe moduły mikroelektroniczne typu LTCC (*Low Temperature Cofired Ceramic*) są wytwarzane z surowej ceramiki (tzw. *green tape*). Folia LTCC grubości wyjściowej od około 100  $\mu\text{m}$  do 200  $\mu\text{m}$  jest mieszaniną ceramiki, szkła i nośnika organicznego. Na poszczególnych foliach wykonuje się techniką sitodruku warstwy o różnych właściwościach elektrycznych (np. ścieżki przewodzące, rezystory, termistory itp.). Po wycięciu otworów połączeniowych i nadrukowaniu odpowiednich warstw poszczególne folie są składane razem w stos wielowarstwowy, laminowane pod ciśnieniem 200 atm i wypalane w temperaturze około 850 °C. Technologią LTCC można wykonać nie tylko obudowy układów mikroelektronicznych z siecią wewnętrznych ścieżek przewodzących tworzących połączenia elektryczne, ale również elementy bierne o stałych skupionych (rezystory, kondensatory, cewki) [63, 81, 85, 87, 99, 149, 214].

Technologia LTCC powstała w latach osiemdziesiątych. Pierwszy układ LTCC zastosowano praktycznie w roku 1989 w urządzeniu radarowym samolotu F-22. Wykonały go dwie firmy amerykańskie – DuPont i Hughes. Prawdziwy rozwój tej technologii nastąpił na początku lat dziewięćdziesiątych, gwałtowny wzrost różnorodnych zastosowań natomiast pod koniec lat dziewięćdziesiątych.

Na podstawie obserwacji rozwoju technologii LTCC na przestrzeni lat można wyróżnić trzy różne generacje tych układów:

Pierwsza generacja – początki technologii LTCC w latach osiemdziesiątych. Stosowano technologię LTCC do wykonywania wielowarstwowych układów MCM (*Multi-chip Modules* – moduły wielostrukturalne) zawierających wewnątrz struktury tylko ścieżki przewodzące o bardzo dużej gęstości upakowania. Na powierzchni struktury montowano obudowane lub nieobudowane układy wielkiej skali integracji oraz wykonywano bierne elementy powierzchniowe techniką grubowarstwową lub cienkowarstwową.

Druga generacja – układy LTCC zawierające dodatkowo bierne elementy elektroniczne (rezystory, kondensatory, cewki, warystory) wykonane wewnątrz struktury LTCC (elementy zagrzebane).

Trzecia generacja struktur LTCC składa się z wielowarstwowego układu ścieżek przewodzących, elementów biernych powierzchniowych i zagrzebanych (płaskich typu 2D i przestrzennych typu 3D) oraz sensorów i mikrosystemów. Mogą to być układy typu MCM z dołączonymi z zewnątrz układami o wielkiej skali integracji lub samodzielne

urządzenia hybrydowe, jak np. obudowy struktur MEMS, układy  $\mu$ TAS, emitery polowe, wskaźniki, mikrozawory itp.

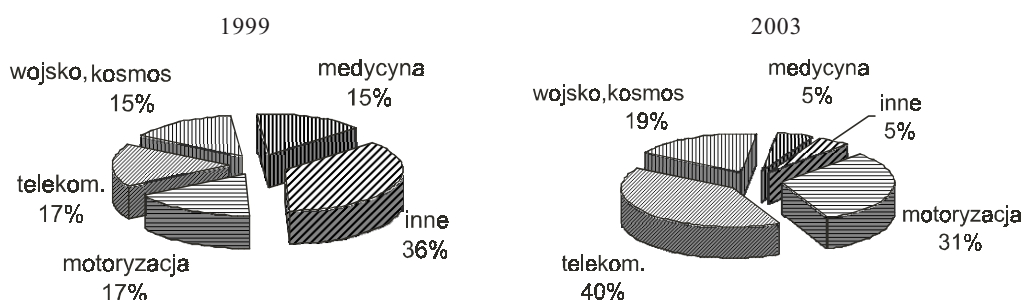
W porównaniu z innymi technologiami wykonywania układów MCM, pod względem kosztów produkcji, LTCC jest zaliczana do średniej. Jest droższa od techniki obwodów drukowanych, ale jest konkurencyjna względem technologii grubowarstwowych układów wielowarstwowych (TFM).

Rynek produktów LTCC zwiększył się gwałtownie w ciągu ostatnich kilku lat. Technologia ta odgrywa i będzie odgrywać znaczącą rolę w wytwarzaniu obudów MCM o największej gęstości upakowania elementów i o doskonałych parametrach elektrycznych i mechanicznych. Technologia LTCC ma wiele właściwości, które umożliwiają wykonywanie tanich układów MCM o bardzo dużej niezawodności.

Rozwój nowych systemów folii ceramicznych oraz biernych elementów zagrzebanych zmniejszył koszt modułów z jednoczesną poprawą ich parametrów. Technologia LTCC może być rozszerzana na wiele nowych komercyjnych i przemysłowych zastosowań dzięki poprawie właściwości termicznych, małym stratom dielektrycznym oraz pojawieniu się nowych folii ceramicznych do zastosowań wysokoczęstotliwościowych o zarówno małych, jak i dużych stałych dielektrycznych.

Główne obszary aktualnych zastosowań LTCC to motoryzacja (ABS, poduszki powietrzne, układ zapłonowy, automatyczne skrzynie biegów), układy scalone (obudowy MCM), telekomunikacja bezprzewodowa (telefony komórkowe, telefony bezprzewodowe), zasilacze urządzeń RF, elektronika satelitarna, stacje radarowe powietrzne i naziemne, pojazdy kosmiczne, sprzęt wojskowy, układy MEMS (obudowy), czujniki (przepływu, światła, gazu, zbliżeniowe, grzejniki do czujników, mikrosystemy), komputery (stacje dysków, laptopy), sprzęt medyczny, sprzęt powszechnego użytku (magnetowidy, kamery, sprzęt DVD).

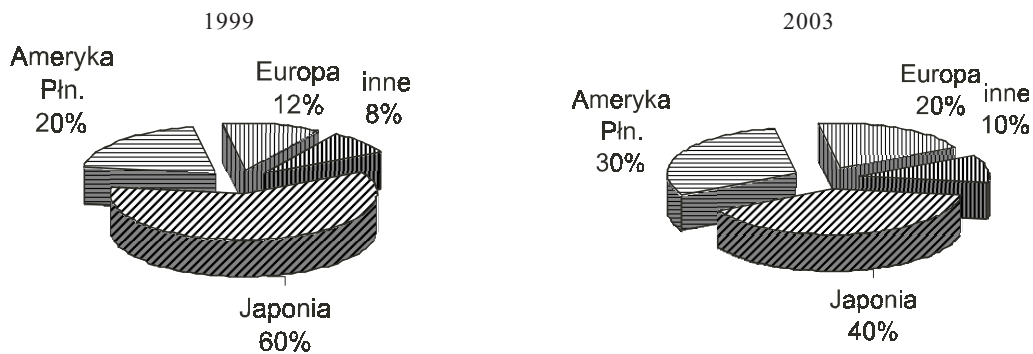
W roku 1999 po około 17% układów LTCC stosowano w motoryzacji i telekomunikacji (rys. 1.1). Przewiduje się, że w roku 2003 liczba ta zwiększy się odpowiednio do 31% i 40%. Największą potęgą w zakresie technologii LTCC była w roku 1999 Japonia, gdzie wyprodukowano aż 60% układów LTCC w skali globalnej. W Europie wytwarzano w tym czasie tylko 12% układów. Ostatnio obserwuje się bardzo szybki roz-



Rys. 1.1. Rynek LTCC – podział ze względu na zastosowania

wój technologii LTCC w Ameryce Płn. i Europie. Przewiduje się, że w 2003 r. udział Japonii zmniejszy się do 40%, a Ameryki Północnej i Europy zwiększy się natomiast odpowiednio do 30% i 20% (rys. 1.2) [100].

Amerykańska firma JPL zastosowała technologię LTCC do wytwarzania sprzętu elektronicznego znajdującego się na pokładzie statku kosmicznego Deep Space II wyrzuczonego w kierunku Marsa w 1999 r. Projektuje się wykorzystanie modułów LTCC



Rys. 1.2. Rynek LTCC – podział geograficzny

w pojazdach kosmicznych, które wezmą udział w planowanych misjach kosmicznych na Europę (księżyc Jowisza) [175]. Scramton i Gravier uważają, że „LTCC jest technologią teraźniejszości i będzie w przyszłości kamieniem węgielnym nowych obudów i montażu elementów elektronicznych” (*“The authors believe that LTCC is today's technology and will be tomorrow's electronic packaging cornerstone”*) [175].

Oprócz zmniejszenia kosztów oraz zwiększenia gęstości i stopnia integracji obudów, technologia LTCC umożliwia wykonanie elementów o następujących właściwościach:

- bardzo wąskie ścieżki oraz minimalne odstępki między nimi (po zastosowaniu procesu fotolitografii nawet  $35\div 50\ \mu\text{m}$ ),
- otwory o bardzo małych średnicach,
- małe rezystancje ścieżek przewodzących ( $\approx 5\ \text{m}\Omega/\square$  – Ag, Au),
- doskonałe charakterystyki wysokoczęstotliwościowe (małe straty w zakresie mikrofal, mały  $\text{tg } \delta$  i mała przenikalność dielektryczna  $\epsilon$ ),
- elastyczność w projektowaniu różnorodnych struktur (np. obudowy MEMS),
- możliwość wykonywania zagrzebanych elementów biernych.

Na module LTCC można wykonać różne elementy cienko- i grubowarstwowe, co dodatkowo zwiększa możliwości wykorzystania obudowy wykonanej tą technologią. Grubowarstwowe rezystory, kondensatory i cewki mogą być wykonywane zarówno na powierzchniach górnej, jak i dolnej struktury LTCC z tolerancją po korekcji 1–2%. Zagrzebane elementy biernie grubowarstwowe wykonuje się z dużą precyzją: rezystory z dokładnością  $\pm 15\text{--}30\%$ , kondensatory  $\pm 10\text{--}20\%$ , cewki  $\pm 5\text{--}10\%$  [175]. Rezystory i kon-

densatory o jeszcze lepszych właściwościach mogą być dołączane do wykonanych pól montażowych po obu stronach struktury LTCC, w końcowym procesie metodą montażu powierzchniowego.

Są trzy podstawowe ograniczenia technologii LTCC: skurcz w czasie współwypalania, wytrzymałość mechaniczna i przewodność cieplna.

Skurcz modułu LTCC w kierunku osi  $x$  i  $y$  po wypaleniu wynosi najczęściej około  $15 \pm 0,2\%$ . Specjalne techniki eliminują skurcz w kierunku osi  $x$  i  $y$ . Metodą TOS (*Tape on Substrate*) i ZST (*Zero Shrink*) można wykonać moduł, którego skurcz jest mniejszy od  $1 \pm 0,02\%$  [175]. Wytrzymałość na zginanie dotychczasowych struktur LTCC jest około połowę mniejsza od wytrzymałości podłoża  $Al_2O_3$ . Ostatnio udało się poprawić właściwości mechaniczne folii. Najnowsza folia EMCA T8800 ma wytrzymałość na zginanie porównywalną z wytrzymałością ceramiki alundowej, z zachowaniem doskonałych właściwości elektrycznych.

Mała przewodność cieplna folii LTCC ( $\approx 3$  W/(m·K)) może stanowić duże ograniczenie w razie zastosowania technologii LTCC do wykonywania typowych modułów MCM. Bardzo duże gęstości mocy występujące w najnowszych modułach tego typu wymagają odprowadzania dużych ilości ciepła z wnętrza modułu w celu zapewnienia odpowiedniej temperatury i dużej niezawodności. Rozwiązaniem tego problemu, w przypadku modułów LTCC, stanowi wykonywanie otworów termicznych wypełnionych srebrem lub złotem, poprawiających efektywną przewodność do 70 W/(m·K). W przypadku konieczności dalszego zwiększenia ilości odprowadzanego ciepła można stosować warstwy przewodzące na spodzie lub wewnątrz struktury lub montować moduły LTCC na materiale o bardzo dużej przewodności ciepła (np. CuW lub CuMoCu). Metoda ta (nazywana TOS lub LTCC-M) poprawia przewodność struktury, ponieważ moduł jest wytwarzany na podłożu o dużej przewodności cieplnej.

W typowych zastosowaniach MCM tylko niewielka liczba elementów jest źródłem dużej ilości ciepła. W większości przypadków ciepło w wystarczającym stopniu jest odprowadzane przez otwory termiczne i warstwy o dużej przewodności cieplnej. W wyjątkowych przypadkach elementy elektroniczne o dużej mocy mogą być montowane wprost do radiatorów (*heat spreader*) techniką „chip down”. Można to wykonać w prosty i tani sposób w technice LTCC, tworząc specjalne wnęki [175].

Innymi metodami zwiększania ilości odprowadzanego ciepła z modułu LTCC jest stosowanie różnego typu układów chłodzących wykonanych wewnątrz struktury (rura cieplna „heat pipe”, kanały chłodzące z obiegiem wody itp.). Układy takie opisano w rozdziale 5.

Prezentowana monografia informuje o podstawach, procesach wytwarzania i możliwościach technologii LTCC. Przeznaczona jest dla szerokiego kręgu odbiorców – studentów i specjalistów z wielu dziedzin nauki, w których LTCC znalazła, lub może znaleźć zastosowanie. Z tego względu w niniejszej monografii bardzo szeroko zaprezentowano różnego typu moduły LTCC. Przedstawiono kilka konkretnych rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych struktur LTCC, mających zastosowania w bardzo różnych dziedzinach.

Podano ogólne informacje o technologii LTCC, jej wadach i zaletach oraz kierunkach zastosowań (rozdz. 1).

Opisano różne techniki wykonywania modułów MCM – struktury typu MCM-D (*Multichip Module – Deposition*), MCM-L (*Multichip Module – Lamination*) i MCM-C (*Multichip Module – Ceramics*) (rozdz. 2).

Opis technologii grubowarstwowej, będącej podstawą techniki LTCC zawarto w rozdz. 3.

Przedstawiono szczegółowo materiały stosowane w technologii LTCC, poszczególne procesy technologiczne i właściwości modułów LTCC (rozdz. 4). W rozdziale tym podano również podstawowe informacje dla osób projektujących struktury LTCC. Opisano w nim także specjalne metody wytwarzania modułów LTCC.

Obszerny przegląd zastosowań struktur LTCC - układy mikrofalowe do telekomunikacji bezprzewodowej, układy MCIC (*Multichip Integrated Circuits*), czujniki i mikrosystemy zawiera rozdz. 5. Podano konstrukcję, technologię, zasadę działania i parametry różnych czujników (gazu, ciśnienia, temperatury, prędkości przepływu, przemieszczenia). Opisano sondę LTCC do pomiaru właściwości plazmy, układy chłodzące i grzejne, mikroawary, mikrokanały, urządzenia  $\mu$ TAS i wskaźniki PDP.

W podsumowaniu przedstawiono najważniejsze informacje na temat właściwości i zastosowań LTCC oraz perspektywy rozwoju i kierunki badań LTCC w przyszłości.



## 2. MODUŁY WIELOSTRUKTUROWE MCM

Rozwój urządzeń elektronicznych zmierza w kierunku zmniejszenia ich wymiarów i wagi, poprawy właściwości (większe częstotliwości pracy, większe szybkości działania, lepsza niezawodność) oraz obniżenia ceny. Ciągłe rośnie stopień integracji układów oraz liczba wyprowadzeń. Zależność między liczbą wyprowadzeń, a liczbą bramek scalonych w układzie można wyrazić wzorem empirycznym Renta [92]:

$$N = Kn^a$$

gdzie:  $N$  – liczba wyprowadzeń,

$K$  – stała,

$n$  – liczba bramek w układach scalonych,

$a$  – 0,4–0,7 współczynnik zależy od technologii i typu układu.

Coraz doskonalsze technologie są stosowane w celu uzyskania jak największej gęstości połączeń elektrycznych między coraz mniejszymi strukturami układów scalonych umieszczanymi jak najbliżej siebie. Gęstość ścieżek przewodzących na podłożu przedstawia równanie Seraphina [195]:

$$G_p = 2,25 \frac{N}{S}$$

gdzie:  $G_p$  – gęstość linii połączeniowych,

$N$  – liczba wyprowadzeń układów scalonych,

$S$  – skok (raster) ustawienia struktur układów scalonych.

Maksymalną gęstość upakowania elementów elektronicznych można osiągnąć stosując moduły wielostrukturalne MCM (*Multichip Modules*).

Moduł MCM może być zdefiniowany jako struktura wielowarstwowa o bardzo dużej liczbie wewnętrznych połączeń elektrycznych pomiędzy nieobudowanymi układami scalonymi, głównie VLSI, zajmującymi minimum 20% powierzchni podłoża, połączonymi w dużą jednostkę funkcjonalną mogącą pracować dla częstotliwości powyżej 50 MHz (zapewniająca możliwość transmisji sygnałów z prędkością większą niż 50 MB). Układ stanowi sztywną konstrukcję mechaniczną [203]. Produkcja układów MCM szybko zwiększa się. Wartość wyprodukowanych w Ameryce Północnej układów wynosiła około 350 mln \$ w roku 1993 [173]. Przewidywane wartości układów MCM produkowanych w latach 1995–2005 przedstawiono w tabeli 2.1.

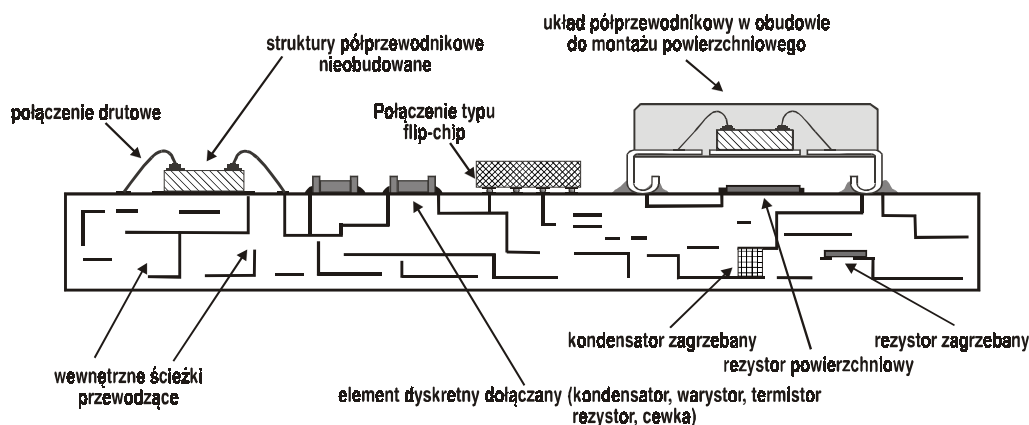
Tabela 2.1. Wartość modułów MCM produkowanych w latach 1995–2005 (w mln. \$) [48]

Miejsce	Rok		
	1995	2000	2005
Azja	950	6 800	12 000
USA	5 200	12 000	15 000
Europa	250	3 800	9 000
Suma	6 400	22 600	36 000

Moduły MCM można podzielić na 3 podstawowe typy:

- **MCM-D** (*D deposition* – osadzanie) wytworzone przez osadzanie cienkich warstw metalicznych lub dielektrycznych na krzemie, diamencie, ceramice lub podłożu metalowym.
- **MCM-L** (*L lamination* – laminowanie) wykonane podobnie jak laminatowe wielowarstwowe obwody drukowane.
- **MCM-C** (*C ceramics* – ceramika) zbudowane z podłoży ceramicznych wielowarstwowych współwypalanych (*cofired ceramics*) lub wielowarstwowych układów grubowarstwowych na podłożu ceramicznym.

Moduł MCM składa się z wielu warstw izolacyjnych, sieci ścieżek przewodzących i otworów zapewniających połączenie elektryczne między poszczególnymi poziomami lub spełniających specjalną rolę w odprowadzaniu ciepła. Połączenia elektryczne pól kontaktowych chipów i struktury MCM wykonuje się metodami *wire bonding* (połączenia drutowe), *TAB* (*tape automated bonding*) i *flip chip*. Na rysunku 2.1 przedstawiono przekrój przez przykładowy moduł MCM.



Rys. 2.1. Przekrój przez moduł MCM

Główną zaletą układów MCM jest możliwość wykonania ekstremalnie gęstej sieci połączeń elektrycznych dla dołączenia maksymalnej liczby chipów. W celu porównania właściwości różnych modułów MCM wprowadzono współczynnik  $F_p$  (*packaging efficiency* – wydajność upakowania) zdefiniowany przez Recke [160] jako:

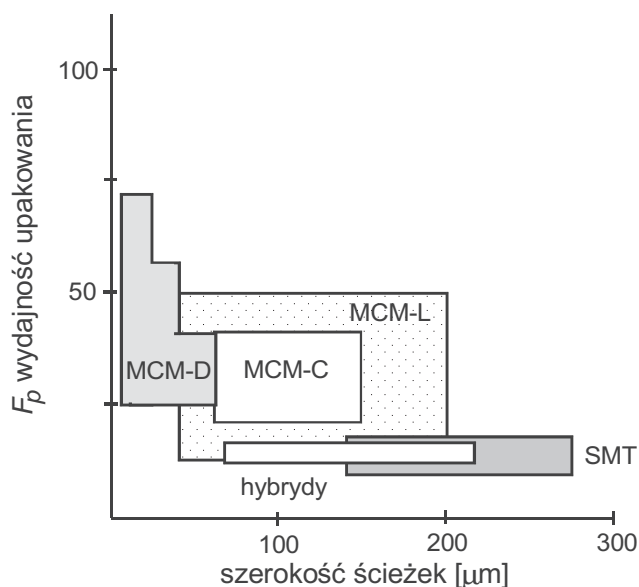
$$F_p = 100 \frac{A_{sc}}{A_p}$$

gdzie:  $F_p$  – wydajność upakowania,  
 $A_{sc}$  – powierzchnia chipu,  
 $A_p$  – powierzchnia obudowy.

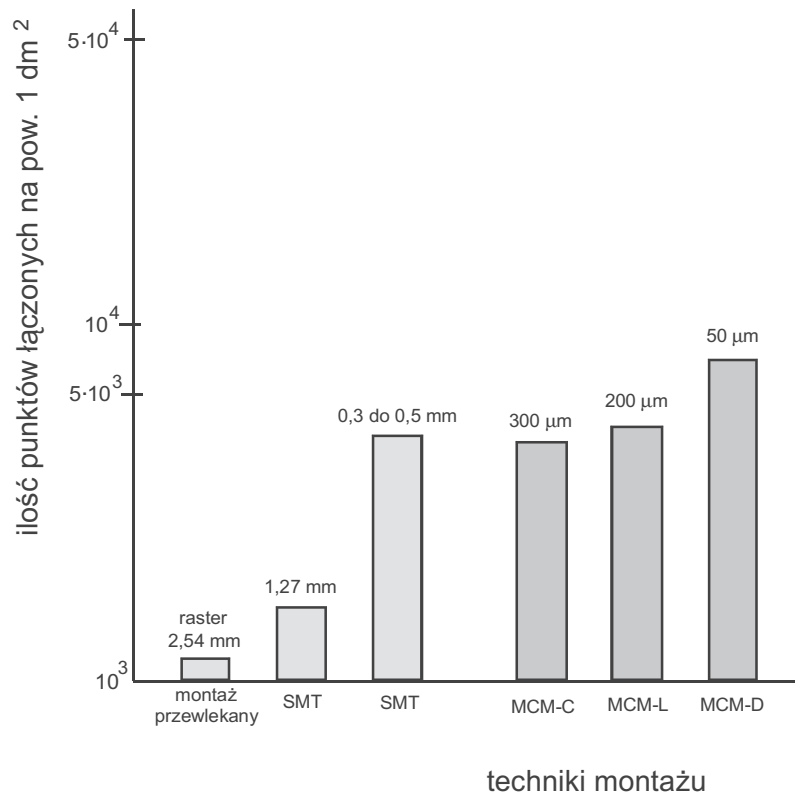
Porównanie wydajności  $F_p$  różnych typów modułów MCM pokazano na rys. 2.2.

Na rysunku 2.3 przedstawiono liczbę połączeń możliwych do uzyskania z zastosowaniem różnych technik montażu.

Pierwsze próby wytwarzania układów wielowarstwowych typu MCM podjęto pod koniec lat sześćdziesiątych. Prawdziwy rozwój układów MCM nastąpił w latach osiemdziesiątych. Obecnie prace nad technologiami MCM prowadzi się w wielu ośrodkach. Liczba firm zajmujących się tą tematyką przekracza 100. Liczba publikacji poświęconych MCM stale zwiększa się (~200 rocznie) [92]. Porównanie różnych technik wytwarzania układów MCM przedstawiono w tabelach 2.2 i 2.3 [49, 80].



Rys. 2.2. Porównanie wydajności upakowania  $F_p$  różnych typów modułów MCM



Rys. 2.3. Zależność liczby łączonych punktów od rodzaju techniki montażu

Tabela 2.2. Porównanie technik wytwarzania układów MCM

	MCM-D	MCM-L	MCM-C
Podłoże	Polimery na krzemie	PWB – laminat	Ceramika współwypalana
Materiał	Poliimid BCB	Epoksyd szklany	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Przenikalność dielektryczna	2,6–4	2,8–4,5	4,5–10
Odprowadzanie ciepła	średnie	małe	wysokie
Szerokość ścieżki [μm]	12–50	75–750	90–125
Raster	wysoki	niski	średni
Gęstość I/O	wysoka	niska	średnia
Koszt podłoża MCM	wysoki	niski	średni

Tabela 2.3. Porównanie różnych technologii

	Ceramika		Materiał organiczny		
	LTCC	warstwy cienkie	FR-4	materiał zaawansowany	PTFE
Właściwości termiczne	++	+	-	-	-
Właściwości elektryczne	++	+	-	-	++
Rezystory	+	+	-	-	-
Zintegrowane elementy bierne	++	-	-	-	-
Struktury 3D	++				
Gęstość połączeń	+	+	-	-	-
Rozmiar płyta/podłoże	-	-	++	+	+
Proces przyjazny mikroelektronice	+	+	-	-	-
Niezawodność	+	-	+	+	+
Infrastruktura projektowania	-	-	++	+	+
Infrastruktura wykonania	-	-	++	+	-

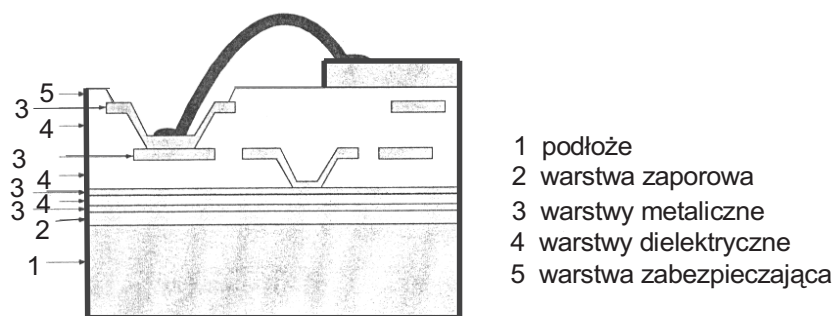
++ wskaźnik wielkości zalet

## 2.1. Moduły typu MCM-D

W przypadku układów MCM-D (D – *deposition* – osadzanie) podłoże pełni rolę elementu konstrukcyjnego. Warstwy przewodzące i dielektryczne nakłada się techniką cienkowarstwową. Układy MCM-D stwarzają największe możliwości w zakresie miniaturyzacji spośród wszystkich typów modułów MCM i dlatego są obecnie najbardziej intensywnie rozwijane [22, 75, 110, 148, 154].

Typowy przykład układu MCM-D przedstawiono na rys. 2.4.

Podstawowe informacje na temat materiałów najczęściej stosowanych do wytwarzania układów MCM-D zamieszczono w tabeli 2.4.



Rys. 2.4. Typowy przykład układu MCM-D

Tabela 2.4. Podstawowe informacje o układach MCM-D

	Jednostka	Typowe materiały lub wartości
Podłoże		Si, Al, ceramiki $Al_2O_3$ , AlN
Warstwa przewodząca		Al, Cu, Ag, Au
Liczba warstw		2–5
Grubość warstwy przewodzącej	$\mu m$	2–5
Szerokość ścieżki przewodzącej	$\mu m$	min. 10, zwykle 25
Odległość między środkami ścieżek	$\mu m$	min. 50
Pole kontaktowe		Al lub Ni/Au
Warstwa dielektryczna		$SiO_2$ , poliimid, BCB
Grubość warstwy dielektrycznej	$\mu m$	3–15
Średnica otworu	$\mu m$	10–50
Sposób dołączania elementów zewnętrznych		druty Al lub Au, flip chip

### Podłoża

Podłoże musi spełniać odpowiednie wymagania termiczne, elektryczne i mechaniczne. Aby osiągnąć optymalne parametry układów MCM-D, podłoże powinno mieć następujące właściwości [203]:

- dużą przewodność cieplną,
- odpowiedni współczynnik rozszerzalności termicznej (dostosowany do dołączanych elementów i obudowy),
- wytrzymałość na wysokie temperatury procesu,
- wysoką rezystywność izolacji,
- małą wartość stałej dielektrycznej,
- odporność chemiczną na stosowane procesy technologiczne,
- gładką powierzchnię bez defektów,
- płaskość powierzchni (całkowite wygięcie mniej niż 50–100  $\mu m$ ),
- mały koszt.

Do wytwarzania układów MCM-D najczęściej stosuje się podłoże z ceramiki  $Al_2O_3$ . Charakteryzują się one dużą wytrzymałością mechaniczną, stabilnością termiczną i chemiczną oraz dużą rezystywnością elektryczną. Główną wadą ceramiki  $Al_2O_3$  jest mała przewodność cieplna. Większą przewodnością cieplną charakteryzują się ceramiki AlN, BeO i SiC. Współczynniki rozszerzalności termicznej AlN i SiC są zbliżone do współczynnika Si. Główną wadą ceramiki AlN jest trudność w uzyskaniu dobrej adhezji warstw metalicznych wskutek braku możliwości wytworzenia wiązań poprzez tlenki metali. Duże ziarna ceramiki AlN są przyczyną występowania dużych otworów na powierzchni. Wadą SiC jest duża przenikalność dielektryczna. Toksyczność tlenków BeO jest głównym problemem występującym w produkcji tego typu ceramiki.

Różne rodzaje metali stosuje się na podłożu układów MCM-D – najczęściej Al i Cu. Podłoża metalowe charakteryzują się dużą przewodnością cieplną, łatwością obróbki

mechanicznej i niską ceną. Wadą podłoży Al i Cu jest podatność na trawienie stosowanymi zwykle środkami trawiącymi oraz duża wartość współczynnika rozszerzalności termicznej, znacznie większa niż współczynnik dla krzemu.

Ze względu na duży moduł elastyczności i małą wartość współczynnika rozszerzalności termicznej dobrymi materiałami na podłoże jest molibden i wolfram. Niestety, metale te mają duży ciężar właściwy i są trudne do obróbki. Molibden stosuje się do odprowadzania ciepła i jako materiał do kompensacji różnicy współczynników rozszerzalności termicznej.

Krzem jest korzystnym materiałem podłożowym ze względu na dużą przewodność cieplną i idealne dopasowanie rozszerzalności termicznej do krzemowych układów scalonych. Główną wadą krzemu jest mała wartość modułu mechanicznego oraz dużo mniejsza rozszerzalność termiczna niż rozszerzalność warstw dielektrycznych, co powoduje wyginanie układów podczas stosowania poliimidów o dużych współczynnikach rozszerzalności termicznej.

Ostatnio zaczęto stosować diament jako materiał na podłoże. Jest to spowodowane ekstremalnie dużą przewodnością cieplną diamentu ( $1600 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ), czterokrotnie większa od przewodności miedzi, bardzo dużymi wartościami modułów mechanicznych i rozszerzalnością termiczną, zbliżoną do rozszerzalności krzemu. Niestety, podłoże diamentowe jest bardzo drogie.

Parametry różnych materiałów na podłoże stosowanych w technice MCM-D przedstawiono w tabeli 2.5.

### Metalizacja

Materiały przewodzące mają trojaki rodzaj zastosowania w technologii układów MCM-D [203]:

- ścieżki przewodzące tworzące sieć połączeń elektrycznych,
- metale nanoszone na powierzchnie graniczne spełniające rolę bariery dyfuzyjnej lub materiału zwiększającego przyczepność,
- ścieżki górne, do których są dołączane elementy zewnętrzne.

Właściwości metali najczęściej stosowanych w technice MCM-D przedstawiono w tabeli 2.6 [203].

Typowe procesy metalizacji, stosowane w układach MCM-D, pokazano na rysunku 2.5. Materiały metaliczne nanosi się techniką rozpylania, parowania, platerowania jonowego i elektroplaterowania. Najważniejsze wymagania stawiane warstwom przewodzącym tworzącym sieć połączeń elektrycznych to duża przewodność elektryczna i niezawodność. Najczęściej warstwy te wykonuje się z aluminium, miedzi lub złota. Przewodność elektryczna aluminium jest wystarczająca dla większości zastosowań. Oznacza się ono dobrą przyczepnością do dielektryków i niską ceną.

Miedź ma największą przewodność elektryczną i niską cenę. Wadą miedzi jest zła przyczepność do większości dielektryków i możliwość reagowania z dielektrykiem na bazie poliimidów. Prowadzi to do pogorszenia stabilności.

Tabela 2.5. Właściwości materiałów stosowanych na podłoże układów MCM-D [45]

Materiał	Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	Współczynnik rozszerzalności cieplnej [ppm/K]	Moduł Younga [GPa]	Przewodność cieplna [W/(m·K)]
Poliimid	1,4	40	2,5	0,15
Si	2,3	2,6	113	148
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (99,6%)	3,9	6,3–6,7	360	20–35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (92% współwypalany)	3,6	6,7	275	17-20
BeO (99,5%)	30	6,9	350	251
AlN	3,3	4	340	160–190
SiC	3,1	3,7	400	270
Mo	10,2	4,9	324	138
Cu	8,9	16,8	110	398
Al	2,7	2,5	62	237
Stal (AISI 1010)	7,9	11,3	192	64
Cu/Invar/Cu (20/60/20)	8,4	6,4	134	170
Cu/Mo/Cu (20/60/20)	9,7	7	248	208
Cu/Mo/Cu (13/74/13)	9,9	5,7	269	242
Kovar (FeNiCo)	8,4	6,1	138	16
Diament naturalny	3,5	1,1		2000
Diament CVD	3,5	1,5–2,0	890–970	400–1600

Uwagi: 1. Wartości parametrów podano dla temperatury 25 °C,

2. W przypadku materiałów platerowanych podano przewodność cieplną zmierzoną dla kierunku poprzecznego.

Złoto oznacza się większą przewodnością elektryczną od aluminium oraz doskonałą odpornością na korozję. Wadą złota jest zła przyczepność do materiału dielektrycznego i wysoka cena.

Jako materiały zwiększające przyczepność i stanowiące barierę dyfuzyjną stosuje się chrom, tytan, platynę, pallad i nikiel.

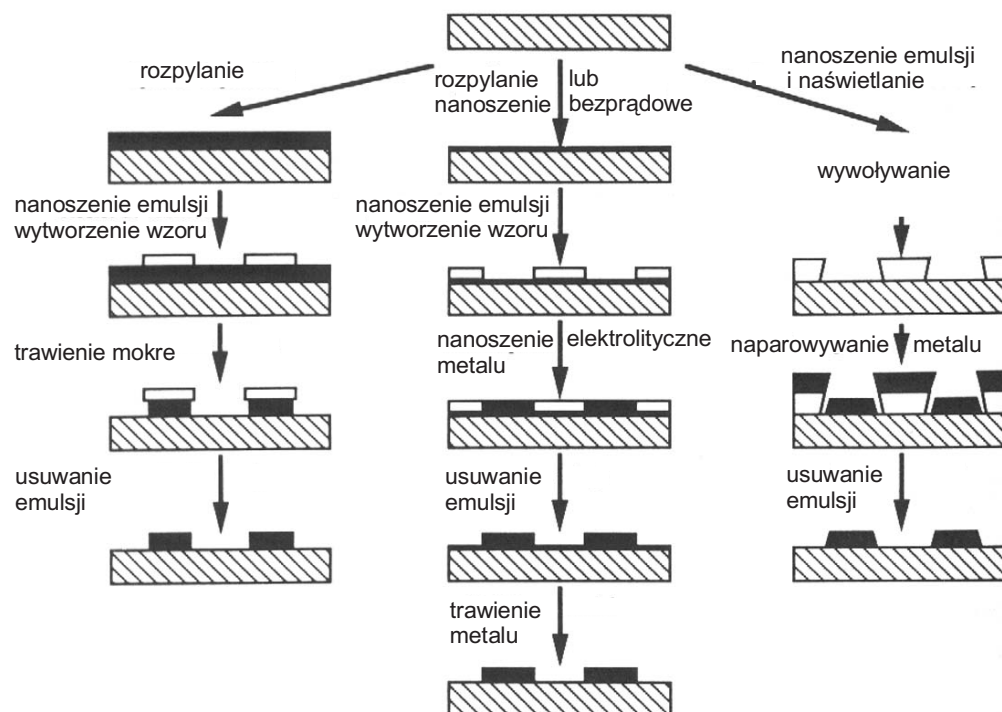
Na pola kontaktowe, na powierzchni modułu MCM-D (odporność na korozję, możliwość połączeń) stosuje się Au, Ni i Cr.

### Materiały dielektryczne

Stosowane materiały dielektryczne powinny mieć następujące właściwości [203]:

- minimalną higroskopijność,
- możliwość uzyskiwania płaskich powierzchni,
- stabilność termiczną,
- małą przenikalność dielektryczną,





Rys. 2.5. Procesy metalizacji stosowane w układach MCM-D [203]  
copyright ©1994 John Wiley & Sons (za zgodą John Wiley & Sons Inc.)

Tabela 2.6. Właściwości metali stosowanych w technologii MCM-D [203]  
copyright ©1994 John Wiley & Sons (za zgodą John Wiley & Sons Inc.)

Metal	Symbol	Rezystywność [ $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ]	Temperatura topnienia [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Współczynnik rozszerzalności cieplnej [ppm/K]	Współczynnik przewodności cieplnej [W/(m·K)]
Miedź	Cu	1,67	1083	19,7 (17)	418 (393)
Złoto	Au	2,35	1064	14,2	297
Glin	Al	2,65 (4,3)	660	23,0	240
Wolfram	W	5,52	3415	4,5	200
Nikiel	Ni	6,9	1455	13,3	92 (89)
Tytan	Ti	55	1667	8,9	22
Platyna	Pt	10,52	1774	9,0	71 (73)
Pallad	Pd	10,75	1550	11	70 (75)
Chrom	Cr	12,99 (20,2)	1900	6,3	66
Tantal	Ta	15,63	2980	6,5	58

- małe straty dielektryczne,
- małe naprężenia,
- dobre właściwości mechaniczne (sztywność, wytrzymałość),
- dobrą przyczepność do podłoża, warstw przewodzących i dielektrycznych,
- łatwość wytwarzania,
- mały koszt.

Wybór dostępnych materiałów dielektrycznych jest bardzo duży, ale niestety, żaden z dostępnych materiałów nie spełnia wszystkich wymagań. Najczęściej jako materiał dielektryczny stosuje się dwutlenek krzemu lub polimery. W tabeli 2.7 [203] przedstawiono informacje na temat dostępnych materiałów dielektrycznych, ich właściwości elektrycznych i mechanicznych.

W układach MCM-D najczęściej stosuje się dielektryki oparte na poliiimidach. Oznaczają się one dobrymi właściwościami mechanicznymi, są odporne na rozpuszczalniki oraz są wytrzymałe na wysokie temperatury występujące w czasie wytwarzania modułu MCM-D. Główną wadą poliiimidów jest wchodzenie w reakcje chemiczne

Tabela 2.7. Właściwości materiałów dielektrycznych stosowanych w układach MCM-D [203]

Nazwa polimeru	Typ polimeru	$\epsilon$	$\text{tg } \delta$	$\gamma$ [ $10^{-6}/\text{K}$ ]	$T_g$ [°C]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Wydłużenie [%]	Absorpcja wilgoci [% wag.]
Amoco Ultradel 7501	fotoczuły poliiimid	2,8	0,004	24	>400			3,4
Du Pont PI-2545	standardowy poliiimid	3,5	0,002	20	>400	105	40	2-3
Du Pont PI-2555	standardowy poliiimid	3,3	0,002	40	>320	135	15	2-3
Du Pont PI-2610D/2611D	poliiimid	2,9	0,002	3(xy)	>400	350	25	0,5
Du Pont PI-2732/33	fotoczuły poliiimid	2,9		25	>400	192	8	1,5
Hitachi PIQ-13	standardowy poliiimid	3,4	0,002	45	>350	130	20	2,3
Hitachi PIQ-L100	poliiimid	3,2	0,002	3	410	380	22	1,3
Toray UR-3800	fotoczuły poliiimid	3,2	0,002	40	280	140	11	1,1

- $T_g$  – temperatura zeszklenia,  
 $\gamma$  – współczynnik rozszerzalności cieplnej,  
 $\epsilon$  – względna przenikalność dielektryczna,  
 $\text{tg } \delta$  – współczynnik strat.

z miedzią. Czasem stosuje się poliimidy światłoczułe, które upraszczają technologię wykonywania otworów i połączeń elektrycznych między różnymi poziomami.

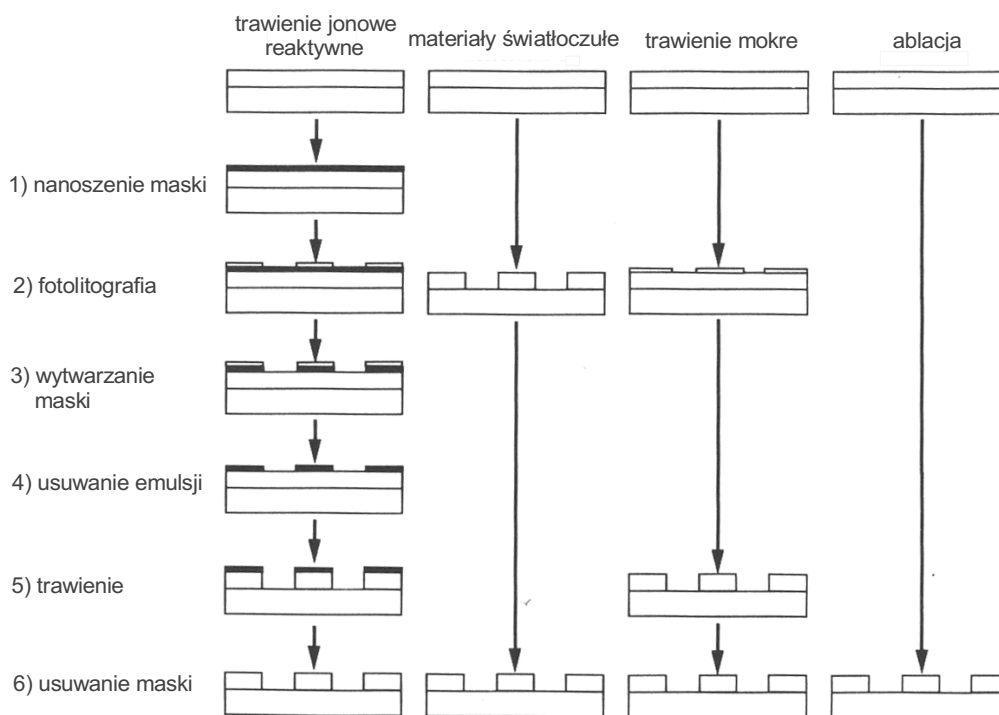
Dielektryki polimerowe są nanoszone techniką nakładania na wirówce lub przez natryskiwanie.

### Połączenia wewnętrzne

Wykonanie połączeń wewnętrznych wymaga stosowania kilku procesów technologicznych. Pierwszym etapem jest wykonanie otworów w warstwie dielektrycznej, następnym wypełnienie otworów materiałem przewodzącym. Najczęściej stosuje się cztery metody wykonywania sieci połączeń elektrycznych:

- trawienie na mokro,
- wykorzystanie polimerów światłoczułych,
- trawienie na sucho,
- ablacja laserowa.

Schematycznie etapy wytwarzania połączeń między różnymi poziomami układu przedstawiono dla każdej z metod na rys. 2.6.



Rys. 2.6. Etapy wytwarzania połączeń między różnymi poziomami układu [203]  
Copyright ©1994 John Wiley & Sons (za zgodą John Wiley & Sons Inc.)

## 2.2. Moduły typu MCM-L

Układy MCM-L (L – *lamination* – laminowanie) wykonuje się analogicznie do laminatowych wielowarstwowych obwodów drukowanych [20, 21, 45, 68, 145, 146, 154, 203]. Warstwy metalizacji są laminowane wstępnie do folii organicznych, a następnie wykonywane są otwory techniką laserową lub wiercenia mechanicznego (średnice do 150  $\mu\text{m}$ ). Kolejnym krokiem jest zastosowanie techniki platerowania do wypełnienia otworów materiałem przewodzącym elektrycznie. Układy MCM-L różnią się od zwykłych obwodów drukowanych większą precyzją wykonania oraz innym materiałem izolacyjnym o małej wartości stałej dielektrycznej  $\epsilon$  ( $\epsilon$  poniżej 4). Są to najczęściej laminaty szklano-teflonowe, szklano-poliimidowe oraz aramidowe [92]. Właściwości stosowanych materiałów dielektrycznych przedstawiono w tabeli 2.8.

Podstawowe parametry układów MCM-L [69, 203]:

- szerokości ścieżek i odległości między ścieżkami 50–150  $\mu\text{m}$ ,
- średnice otworów 200–300  $\mu\text{m}$ ,
- odległości między otworami 300–450  $\mu\text{m}$ ,
- minimalna grubość warstwy dielektrycznej 50  $\mu\text{m}$ ,
- średnia liczba warstw 6–8,
- gęstość połączeń 50  $\text{cm}/\text{cm}^2$ .

Układy MCM-L są tańsze od układów MCM-C i MCM-D [169]. Ze względu na gorszą stabilność i mniejszy zakres temperatur pracy układy MCM-L mają mniejsze zastosowanie, niż pozostałe moduły. Główną wadą układów MCM-L jest mała przewodność cieplna oraz duży temperaturowy współczynnik rozszerzalności liniowej.

Podstawowe procesy wytwarzania układu MCM-L [45]:

1. Wykonanie indywidualnych warstw dielektrycznych pokrytych folią Cu.
2. Obróbka fotolitograficzna, trawienie i wytworzenie sieci ścieżek przewodzących,

Tabela 2.8. Właściwości materiałów dielektrycznych stosowanych w technice MCM-L [92, 203]

Material	Stała dielektryczna	Przewodność cieplna [W/(m·K)]	Współczynnik rozszerzalności liniowej [·10 <sup>6</sup> /K]	Temperatura zeszklenia $T_g$ [°C]	Absorpcja wody [%]
Epoksyd BT	4,3	–	15–16	180	0,05
FR4	4,8	–	13–18	125	0,10
Poliimid	4,2	–	10–14	250	0,35
Cyanate ester	3,6	–	8–10	230	0,08
Fluoro polymer composite	2,9	–	16	327	0,05
Epoxy /nonwoven aramid	3,9	–	6–9	180	0,85
Laminat szklano poliimidowy	4,3	0,4	40	–	–
Laminat szklano teflonowy	2,4	0,2	99	–	–

3. Wiercenie otworów w indywidualnych warstwach lub/i na całą grubość laminatu (otwory przelotowe).

4. Proces laminacji – laminacja indywidualnych warstw w przypadku otworów zagrzebanych i ślepych. Jeden proces laminacji w przypadku gdy nie ma otworów ślepych i zagrzebanych.

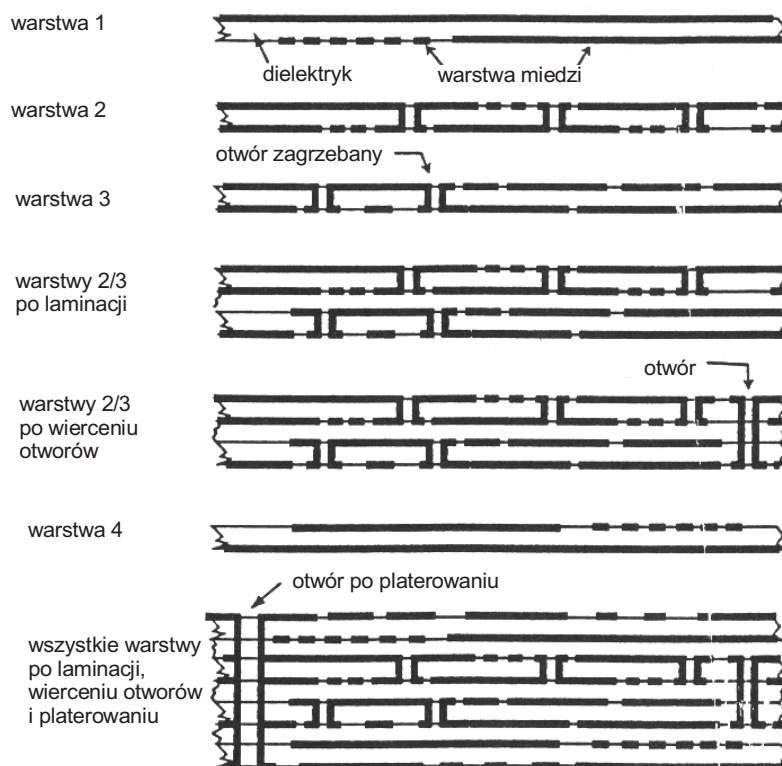
5. Platerowanie otworów w pojedynczych warstwach lub częściowo z laminowanych. Platerowanie warstw przewodzących na powierzchni.

Na rysunku 2.7 [45] pokazano typową konstrukcję układu MCM-L.

Do wytworzenia układu MCM-L stosuje się następujące rodzaje materiałów [45]:

- warstwy dielektryczne rdzenia – materiał sztywny,
- elastyczne warstwy dielektryczne,
- materiał przewodzący – najczęściej trawiona folia Cu,
- materiały pokryć końcowych umożliwiające dołączenie elementów zewnętrznych (Sn–Pb, Ni–Au, Pd) nanoszone metodą platerowania.

Właściwości materiałów stosowanych do wytwarzania MCM-L zamieszczono w tabeli 2.9 [45].



Rys. 2.7. Typowa konstrukcja układu MCM-L [45]

Tabela 2.9. Właściwości materiałów stosowanych w układach MCM-L [45]

Materiał	$\gamma$ osie x,y [ppm/K]	$\gamma$ oś z [ppm/K]	$T_g$ [°C]	$k$ [W/m·K]	$\epsilon$ (1 MHz, 25 °C)	$\rho$ [Ω·cm]	tg $\delta$ [%]
FR4 (epoxy-E glass)	16–18	60/320 <sup>a)</sup>	125–140	0,16–0,4	4,0–5,5	4,00·10 <sup>14</sup>	2,2
Polyimide (PI)-E glass	13–15	40/190 <sup>a)</sup>	255–260	0,3–0,6	4,0–5,0	4,00·10 <sup>14</sup>	1,3
Teflon-E glass	20		75	0,26	2,3–2,6	1,00·10 <sup>10</sup>	0,2
Epoxy-aramid (PPDETA)	6,5		172	0,18	3,7		2,6
PI-Kevlar 108	5–8	85	250		3,51		1,1
PI-fused silica	6–12	30	250			4,00·10 <sup>9</sup>	
BT epoxy-Kevlar 120		73,7			3,51		1,1
High $T_g$ epoxy-fused silica #525	6–12	65					1,3
'Gore-Ply' (cyanate ester- expanded PTFE)	55		190		2,6	>10·10 <sup>7</sup>	0,3
PI-unwoven Kevlar' ROHSI 2800' (Rogers)	16	24	Thermoplast.		2,8		0,3
PI film: Kapton H	20–25				3,5	1·10 <sup>12</sup>	0,25
Upilex S					3,5	1·10 <sup>11</sup>	0,13
Polyester film	25–30				2,8–3,2		0,3–1,6
Epoxy resin (#5010)	55				3,8		
PTFE	224	224			2,2		
'S'-glass	2,3				5,3		
Miedź (CDA 102)	17,3	17,3		393		1,67·10 <sup>-6</sup>	
Glin (elemental)		22,1		240		2,66·10 <sup>-6</sup>	
Glin (6061)		21,1		200		4,30·10 <sup>-6</sup>	
Molibden	5	5		146			
Kovar		5,3		17		4,70·10 <sup>-5</sup>	
Cu/Invar/Cu:20/60/20	5,5			169			
Cu/Invar/Cu:12,5/75/12,5	3,15			114			
Cu/Mo/Cu: 20/60/20	6,7 (20°C)			141		3,30·10 <sup>-6</sup>	
Cu/Mo/Cu: 13/74/13	5,8 (20°C)			122		3,80·10 <sup>-6</sup>	

$\gamma$  – współczynnik rozszerzalności cieplnej,

$T_g$  – temperatura zeszklenia,

$k$  – współczynnik przewodności cieplnej,

$\epsilon$  – względna przenikalność dielektryczna,

$\rho$  – rezystywność skrośna,

tg  $\delta$  – współczynnik strat,

a) – ( $<T_g$ ) / ( $>T_g$ ).

### 2.3. Moduły typu MCM-C

Moduły MCM-C mają powszechne zastosowanie w urządzeniach o dużej niezawodności, przystosowanych do pracy w trudnych warunkach klimatycznych [171].

Pierwsze układy typu MCM-C wykonywano na początku lat sześćdziesiątych jako wielowarstwowe układy grubowarstwowe.

W latach osiemdziesiątych układy MCM-C wykonywano z ceramiki wysokotemperaturowej (HTCC), wypalanej w temperaturze 1800 °C w atmosferze wodoru. Wolframowe lub molibdenowe warstwy przewodzące nanoszono techniką sitodruku.

Szybki rozwój układów MCM-C nastąpił na początku lat dziewięćdziesiątych, po opracowaniu ceramiki niskotemperaturowej (LTCC) wypalanej w powietrzu, w temperaturze 850 °C. Obniżenie temperatury współwypalania pozwoliło na zastosowanie typowych materiałów grubowarstwowych (warstwy przewodzące ze srebra, złota lub miedzi wypalanej w azocie).

Moduły **MCM-C** można podzielić na trzy grupy:

- wielowarstwowe układy grubowarstwowe,
- **HTCC** (*High Temperature Cofiring Ceramics*) – układy z ceramiki wysokotemperaturowej,
- **LTCC** (*Low Temperature Cofiring Ceramics*) – układy z ceramiki niskotemperaturowej.

#### Wielowarstwowe układy grubowarstwowe

Grubowarstwowy układ typu MCM został wyprodukowany po raz pierwszy przez firmę UNIVAC (obecnie Unysis) w roku 1980. Układ składał się z 5 warstw przewodzących oraz rezystorów.

Technologia układów wielowarstwowych polega na kolejnym nanoszeniu techniką sitodruku, na przemian, past przewodzących i dielektrycznych. Warstwy są suszone oddzielnie i następnie wypalane wspólnie w jednym procesie (w temperaturze 500–850 °C) lub wypalane indywidualnie po każdym suszeniu. Na podłoże stosuje się ceramikę alundową lub azotek aluminium. Ścieżki przewodzące wykonuje się z typowych past PdAg, PtAg, Au, Cu. Kształt ścieżek przewodzących oraz otworów w warstwach dielektrycznych uzyskuje się metodą druku precyzyjnego, trawiąc wypalone ścieżki przewodzące typową metodą fotolitografii lub stosując specjalne pasty światłoczułe i metodę fotolitografii wysuszonych warstw. Precyzyjne otwory w warstwach dielektryka można wykonać metodą Diffusion Patterning (maskowanie dyfuzyjne). Dokładniej technologię grubowarstwową opisano w rozdz. 3.

#### Układy z ceramiki wysokotemperaturowej (HTCC)

Materiałem wyjściowym jest w tym przypadku surowa, nie wypalona folia ceramiczna (green tape). Na folię z wywierconymi otworami do metalizacji nanosi się metodą sitodruku warstwy grube przewodzące z wolframu lub molibdenu. Otwory w folii wy-

konuje się przy pomocy wykrojników (średnice 75–200  $\mu\text{m}$ ) lub laserem (15–50  $\mu\text{m}$ ). Folie ceramiczne po wysuszeniu naniesionych warstw są składane w stos, prasowane, cięte na odpowiednie wymiary i wypalane w temperaturze 1600–1800 °C w atmosferze wodoru. Po wypaleniu pola kontaktowe są pokrywane techniką platerowania nikiel lub złotem w celu zmniejszenia rezystancji i uzyskania odpowiedniej jakości powierzchni do montażu. Moduły MCM-C wykonane techniką HTCC mają największą odporność na narażenia klimatyczne oraz największą niezawodność. Wadą modułów jest duża rezystancja ścieżek przewodzących. Ceramika HTCC składa się najczęściej z 88–96%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i 4–12% szkła poprawiającego proces zagęszczania w niższych temperaturach spiekania. Moduły HTCC charakteryzują się dużą wytrzymałością mechaniczną (~420 MPa), współczynnikiem rozszerzalności liniowej  $\sim 7 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ , przenikalnością dielektryczną  $\sim 9,5$ , przewodnością cieplną  $\sim 20 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  [80].

### Układy z ceramiki niskotemperaturowej (LTCC)

Proces wytwarzania układu LTCC przebiega podobnie jak w przypadku układu HTCC. Najważniejszą różnicą jest obniżenie temperatury wypalania do 850 °C. Stało się to możliwe dzięki zastosowaniu specjalnego tworzywa szklano-ceramicznego. Używanie niższej temperatury wypalania umożliwiło stosowanie typowych past przewodzących (Au, Ag, PdAg, Cu) na ścieżki przewodzące oraz wykonanie biernych elementów grubowarstwowych nie tylko na powierzchni modułu, ale również w jego wnętrzu.

Dodatkową zaletą materiału LTCC, w porównaniu do HTCC, jest niższa przenikalność dielektryczna oraz dopasowanie współczynnika rozszerzalności cieplnej do współczynnika struktur półprzewodnikowych (Si lub GaAs), co zwiększa niezawodność połączeń nieobudowanych chipów.

Stosowane są dwa rodzaje materiałów do wytworzenia surowej ceramiki LTCC. Pierwszy typ ceramiki LTCC składa się ze szkieleł ulegających krystalizacji w czasie wypalania. W wyniku tego procesu powstaje szkło-ceramika. Najczęściej stosowanymi szklami krystalizującymi w czasie procesu wypalania są:  $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ ,  $\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ ,  $\text{ZnO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ . Drugi sposób wytwarzania ceramiki LTCC, stosowany przede wszystkim przez firmy japońskie, polega na zastosowaniu mieszaniny składnika krystalicznego i szkła. Po spieczeniu struktura LTCC ma charakter kompozytu szkło+ceramika. W układach tego typu wykorzystuje się szkła  $\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{PbO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  oraz jako krystaliczny wypełniacz kordieryt, kwarc,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i mullit [184].

Opracowana przez firmę IBM szkło-ceramika o przenikalności dielektrycznej równej 5 ma skład zbliżony do kordierytu:  $\text{SiO}_2$  (50–55%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (18–23%),  $\text{MgO}$  (18–25%),  $\text{P}_2\text{O}_5$  i  $\text{B}_2\text{O}_3$  (0–3%) [196]. Współczynnik rozszerzalności liniowej wypalonego materiału LTCC jest równy 3,0 ppm/K.

Firma Ferro wytwarza szkło-ceramikę przeznaczoną do układów pracujących dla wielkich częstotliwości opartą na szkłe  $\text{CaO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  krystalizującą w postaci faz  $\text{CaO}\cdot\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ , i  $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$  [178, 183]. Stała dielektryczna ceramiki wynosi 5,9, współczynnik rozszerzalności liniowej 6,5 ppm/K, a współczynnik strat 0,002.



Firma Du Pont produkuje ceramikę *green tape*, przeznaczoną do układów pracujących dla wielkich częstotliwości, będącą mieszaniną szkła krystalizującego z wytworzeniem kordierytu lub anortytu, oraz szkliwa borokrzemowego o małej przenikalności dielektrycznej i niskim współczynniku strat, ułatwiającego zagęszczanie tworzywa w procesie spiekania niskotemperaturowego [184].

Firma NEC produkuje tworzywo typu szkło+ceramika przeznaczone do MCM dla układów VLSI o bardzo dużej szybkości działania. Struktura LTCC składa się z mieszaniny szkła krzemionkowego i szkła borokrzemowego.

Do podstawowych zalet układów LTCC należą:

- możliwość wykonywania struktur trójwymiarowych,
- niska temperatura wypalania,
- mała grubość i związana z tym mała masa i bezwładność cieplna,
- możliwość stosowania typowych past wewnątrz i na powierzchni LTCC,
- możliwość integrowania różnych elementów elektronicznych,
- dobre właściwości mechaniczne (podobne do ceramiki alundowej),
- hermetyczność układu – odporność na wpływ otoczenia,
- możliwość pracy w wysokiej temperaturze i uciążliwym środowisku.

Układ LTCC może składać się z kilkudziesięciu warstw. Przewodność elektryczna warstw przewodzących ze złota wynosi 2–5 mΩ/□. Przewodnictwo cieplne struktury LTCC można zwiększyć, stosując specjalne otwory termiczne odprowadzające ciepło z układu. Otwory wypełnia się złotem lub srebrem. Przewodnictwo cieplne takich otworów wynosi odpowiednio 70 W/(m·K) i 120 W/(m·K). Właściwości ceramiki LTCC produkowanych przez różne firmy przedstawiono w tabeli 2.10.

Liczba układów LTCC stosowanych w przemyśle elektronicznym zwiększa się dzięki doskonałym właściwościom elektrycznym, mechanicznym i niezawodnościowym. Oprócz typowych zastosowań w układach VLSI, ceramika LTCC może być wykorzystana do wytwarzania elementów biernych oraz czujników.

Tabela 2.10. Porównanie właściwości różnych podłoży

Parametr	LTCC DuPont 951	LTCC Ferro A6	LTCC ESL D-101C	Podłoże AlN	Podłoże alundowe
Przenikalność dielektryczna $\epsilon$	7,8	5,9	8–9	10	9,5
Przewodność cieplna [W/(m·K)]	3	2	–	140–170	10–35
Współczynnik rozsz. cieplnej [ppm/K]	5,8	7	7	4,6	7,3
Gęstość po wypaleniu [g/cm <sup>3</sup> ]	3,1	2,5	3,16	3,3	–
Skurcz [%] w kierunku osi z	15	25	16	–	–
osi x i y	13	15	12		
Grubość po wypaleniu [μm]	95, 137, 211	95	100–130		

Elementy bierne (rezystory, kondensatory, cewki, linie transmisyjne, warystory) mogą być wytwarzane jako elementy planarne na powierzchni ceramiki LTCC lub jako za-grzebane (2D i 3D) wewnątrz struktury LTCC [85].

Opis różnego typu czujników wykonanych techniką LTCC znajduje się w rozdziale 5. (czujniki do diagnostyki plazmy, czujniki gazu, temperatury, ciśnienia, grzejniki do czujników). Technologia LTCC oferuje kilka nowych rozwiązań konstrukcyjnych w produkcji różnego typu czujników. Wielką zaletą ceramiki LTCC jest możliwość tworzenia trójwymiarowych struktur wielowarstwowych. Układy 3D składają się z obszarów izolacyjnych, pustych wnęk, ścieżek przewodzących i rezystywnych, grzejników oraz obszarów o dużej i małej przewodności cieplnej.

Dzięki możliwości drukowania obwodów na każdej z laminowanych warstw otrzymujemy układy o bardzo dużej gęstości upakowania. Zastosowanie technologii LTCC do produkcji sensorów umożliwia budowanie zarówno wewnątrz, jak i na powierzchni podłoża zintegrowanych czujników wraz z układami elektronicznymi do przetwarzania otrzymanych danych. Technologia ta może być także stosowana do wytwarzania różnych mikrosystemów.

## 3. TECHNOLOGIA GRUBOWARSTWOWA

### 3.1. Informacje ogólne

Technika wykonywania elementów grubowarstwowych polega na nanoszeniu odpowiednich past na podłoże izolacyjne techniką sitodruku. Warstwy po wysuszeniu są wypalane w piecach tunelowych w temperaturze maksymalnej około 850 °C, w czasie 10 minut (w temperaturze maksymalnej). Technika sitodruku jest bardzo stara. Stosowali ją już Chińczycy kilka tysięcy lat temu w celu nanoszenia złotych ozdób na wyroby ceramiczne. Do celów elektronicznych została zastosowana po raz pierwszy w latach trzydziestych XX wieku. Wykonywano tą techniką elektrody srebrne kondensatorów ceramicznych. Pierwszy układ hybrydowy grubowarstwowy wykonano w 1945 r. w USA. Był to układ elektroniczny czujnika zbliżeniowego stosowanego w bombach lotniczych. Został zaprojektowany przez grupę inżynierów z Milwaukee. Układ składał się ze srebrnych ścieżek przewodzących i rezystorów polimerowych wykonanych na podłożu ceramicznym.

Masowa produkcja hybrydowych układów grubowarstwowych z dołączanymi elementami czynnymi rozpoczęła się w latach sześćdziesiątych. W latach osiemdziesiątych, po rozpowszechnieniu technologii montażu powierzchniowego (SMT), nastąpiło zmniejszenie produkcji grubowarstwowych układów hybrydowych. Ponowny wzrost znaczenia technologii grubowarstwowej nastąpił w latach dziewięćdziesiątych. Technologia ta znalazła powszechne zastosowanie, oprócz tradycyjnego pola zastosowań, w układach MCM, sensorach i mikrosystemach [85]. W rozdziale 3 podano podstawowe informacje na temat technologii grubowarstwowej. Opisano poszczególne etapy wytwarzania układu grubowarstwowego, stosowane materiały i zasady projektowania.

Zalety technologii grubowarstwowej:

- niski koszt,
- łatwość automatyzacji,
- opłacalność krótkich serii,
- miniaturyzacja,
- dobre właściwości elektryczne,
- różnorodność wykonywanych elementów,
- odporność na wysokie temperatury i uciążliwe warunki klimatyczne,
- dobra wytrzymałość mechaniczna.

Przykłady różnych elementów i układów elektronicznych wykonywanych technologią grubowarstwową:

- ścieżki przewodzące,
- rezystory,
- warstwy izolacyjne,
- kondensatory,
- cewki
- układy wielowarstwowe TFM,
- układy wielowarstwowe LTCC,
- termistory,
- warystory,
- elementy grzejne,
- elementy nadprzewodzące,
- czujniki (temperatury, gazu, ciśnienia, wilgotności itp.),
- przetworniki,
- mikrosystemy.

### 3.2. Etapy wytwarzania

Technologią grubowarstwową wykonuje się warstwy o różnych właściwościach elektrycznych, zależnych od składu nadrukowanej pasty. Grubości wypalonych warstw zależą od gęstości sita, grubości emulsji i lepkości pasty. Najczęściej warstwy przewodzące i rezystywne mają po wypaleniu 5-15  $\mu\text{m}$  grubości, a warstwy dielektryczne 35–45  $\mu\text{m}$ . Minimalna szerokość warstwy dla druku zwykłego wynosi około 300  $\mu\text{m}$ , dla druku precyzyjnego 50–75  $\mu\text{m}$ , a w razie stosowania trawienia i procesu fotolitografii około 15  $\mu\text{m}$ .

Wysokotemperaturowe układy grubowarstwowe (stosowane również w strukturach LTCC) są wypalane najczęściej w temperaturze 850 °C. Układy niskotemperaturowe – polimerowe, są utwardzane w temperaturach 200–400 °C.

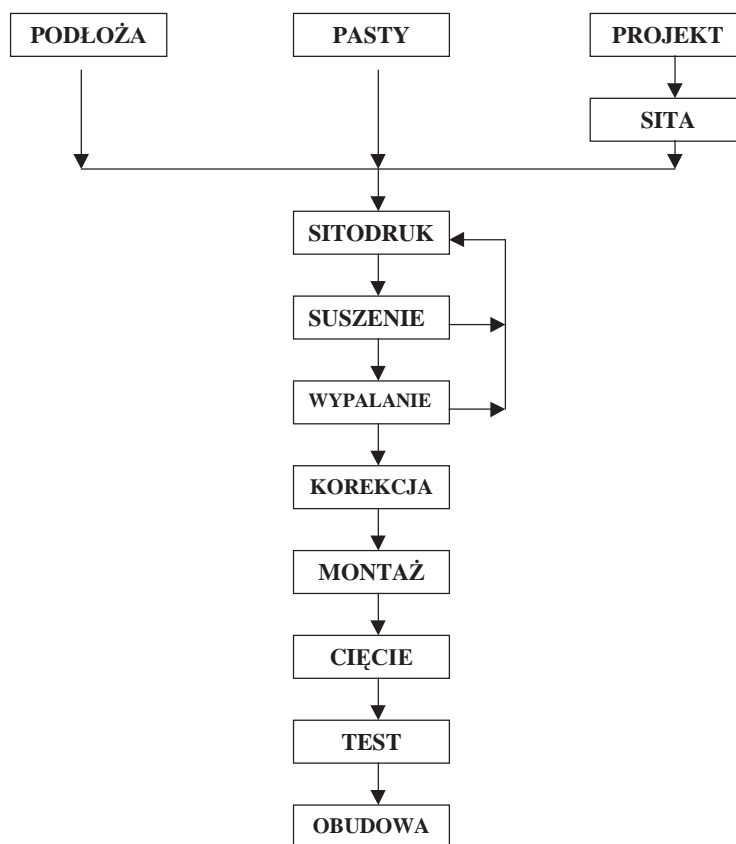
Na rysunku 3.1 przedstawiono etapy wytwarzania układu wysokotemperaturowego.

#### Podłoża

Materiał na podłoże musi charakteryzować się następującymi właściwościami:

- odpornością na wysokie temperatury (proces wypalania),
- dobrą przewodnością cieplną (odprowadzanie ciepła z układu),
- dobrą izolacją elektryczną (brak zwarc między elementami),
- dobrą płaskością powierzchni i powtarzalnymi wymiarami geometrycznymi (proces sitodruku).

Najczęściej na podłoża stosuje się ceramikę alundową (96%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), berylową ( $\text{BeO}$ ) lub z azotku glinu ( $\text{AlN}$ ). Czasami na podłoże używa się stal emaliowaną. Najważniejsze parametry ceramik podłożowych zestawiono w tabeli 3.1.



Rys. 3.1. Etapy wytwarzania układu grubowarstwowego

Tabela 3.1. Najważniejsze parametry ceramik podłożowych

Ceramika	AlN	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	BeO	LTCC
Przewodność termiczna [W/(m·K)]	140–170	10–35	150–250	2–3
Rozszerzalność termiczna [10 <sup>-6</sup> /K]	4,6	7,3	5,40	5,8–7
Rezystywność [Ω·m]	4·10 <sup>11</sup>	>10 <sup>14</sup>	10 <sup>13</sup> –10 <sup>15</sup>	>10 <sup>12</sup>
Przenikalność dielektryczna ε (1 MHz)	10	9,5	7	5,9-9

### Pasta

Trzy podstawowe elementy składowe wchodzi w skład past wysokotemperaturowych:

- Składnik podstawowy – drobno sproszkowany materiał (wielkość ziaren poniżej 1 μm) decydujący o właściwościach elektrycznych wytworzonej warstwy. W przypadku pasty przewodzącej jest to najczęściej proszek złota, srebra lub stopu PdAg, pasty

rezystywnej dwutlenek rutenu ( $\text{RuO}_2$ ), dwutlenek irydu ( $\text{IrO}_2$ ) lub rutenian bizmutu ( $\text{Bi}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$ ).

- Szkło – proszek o wielkości ziaren rzędu pojedynczych  $\mu\text{m}$ . Szkło zapewnia doskonałą przyczepność warstwy do podłoża. Najczęściej stosuje się szkło ołowiowo-borowo krzemowe ( $\text{PbO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ) ze względu na bardzo dużą rezystywność elektryczną, stabilność, właściwy współczynnik rozszerzalności termicznej (dopasowany do podłoża) i odpowiednie zmiany lepkości z temperaturą w czasie procesu wypalania.

- Nośnik organiczny – ciecz o odpowiednich właściwościach reologicznych, dzięki którym można precyzyjnie nanosić warstwy na podłożu techniką sitodruku. W skład nośnika wchodzi rozpuszczalnik i etyloceluloza. Zadaniem rozpuszczalnika jest korekcja lepkości, zmniejszenie napięcia powierzchniowego oraz poprawa zwilżalności elementów stałych pasty. Etyloceluloza utwardza się w procesie suszenia, zapewniając wstępną przyczepność warstwy do podłoża. Dzięki temu można proces sitodruku wykonywać kilkakrotnie (np. podczas nanoszenia pasty dielektrycznej lub pasty rezystywnej o różnej rezystywności), wypalając równocześnie kilka nałożonych warstw. Nośnik organiczny rozkłada się i jest usuwany z warstwy w czasie wypalania.

Wszystkie składniki pasty są doskonale wymieszane ze sobą. Z 1 g pasty można nadrukować od 40 do 90  $\text{cm}^2$  powierzchni (w zależności od rodzaju pasty, gęstości sita i grubości emulsji). Z pasty przewodzącej można wykonywać warstwy przewodzące o rezystancji powierzchniowej w zakresie od 2 do 100  $\text{m}\Omega/\square$ . W skład pasty wchodzi najczęściej Au, Ag, PtAu, PdAu, PtAg lub PdAg. Zestawienie rezystancji powierzchniowej warstw przewodzących zamieszczono w tabeli 3.2.

W skład past rezystywnych wchodzi najczęściej tlenki platynowców o strukturze rutyłu ( $\text{RuO}_2$ ,  $\text{IrO}_2$ ) lub pirochloru ( $\text{Bi}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$ ). Podstawowe właściwości warstw rezystywnych przedstawiono poniżej:

a) Rezystancja powierzchniowa  $R_{\square}$ :

$$R_{\square} = \frac{\rho}{d} = 10^{-7} [\Omega/\square],$$

gdzie:  $\rho$  – rezystywność warstwy rezystywnej,

$d$  – grubość warstwy,

Tabela 3.2. Rezystancje powierzchniowe  $R$  różnych warstw przewodzących

Materiał	$R_{\square}$ [ $\text{m}\Omega/\square$ ]	Materiał	$R_{\square}$ [ $\text{m}\Omega/\square$ ]
Au	2–10	PdAg	10–50
Pt-Au	15–100	Pt	50–80
Pd-Au	10–100	Cu*	2
Ag	2–10	Ni*	7–40

\*Proces wypalania w atmosferze azotu.

b) Temperaturowy współczynnik rezystancji  $TWR$ :

$$TWR = \frac{(R_2 - R_1) \cdot 10^6}{R_1(T_2 - T_1)} = \pm(50 \div 300) \text{ ppm/K}$$

gdzie:  $R_1$  – rezystancja w temperaturze  $T_1$ ,

$R_2$  – rezystancja w temperaturze  $T_2$ .

Dla rezystorów grubowarstwowych podaje się tzw. „zimny”  $TWR$  ( $T_1 = 25^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = -55^\circ\text{C}$ ) lub „gorący”  $TWR$  ( $T_1 = 25^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = 125^\circ\text{C}$ ).

c) Obciążalność  $p_r$  – parametr określający maksymalną gęstość mocy, jaka może być rozproszona w warstwie rezystywnej bez pogorszenia jej właściwości:

dla podłoży alundowych 96%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  chłodzonych swobodnie

$$p_r = \frac{P}{s_r} = 8 \div 15 \text{ W/cm}^2$$

gdzie:  $p_r$  – gęstość mocy w warstwie,

$P$  – moc rozproszona w warstwie,

$s_r$  – powierzchnia warstwy rezystywnej.

Ponadto nie może być przekroczona dopuszczalna gęstość mocy na powierzchni całej płytki podłożowej  $p_p$ , która dla podłoży alundowych wynosi 0,25–1  $\text{W/cm}^2$

d) Współczynnik czułości odkształceniowej  $GF$  charakteryzujący właściwości piezorezystywne:

$$GF = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} = 10 \div 20$$

gdzie:  $\Delta R$  – przyrost rezystancji,

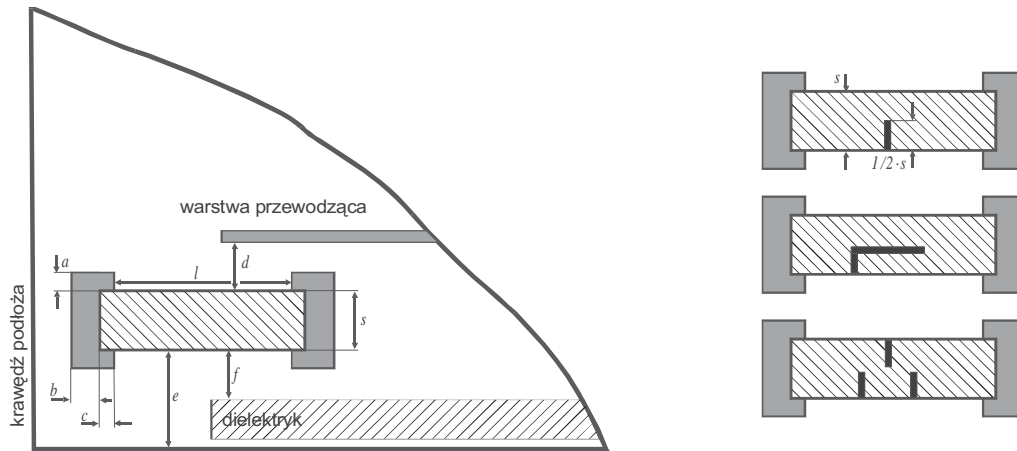
$R$  – rezystancja początkowa,

$\Delta l$  – przyrost długości,

$l$  – długość początkowa.

### Projekt

Typowe kształty, dopuszczalne wymiary elementów grubowarstwowych drukowanych w zwykły sposób oraz odległości między warstwami przedstawiono na rysunkach 3.2 i 3.3 oraz podano w tabelach 3.3 i 3.4. Dokładne informacje na temat projektowania układów grubowarstwowych można znaleźć w książce [177].

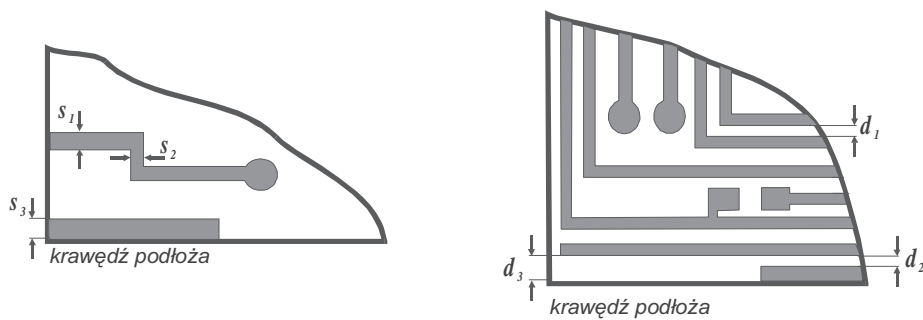


Rys. 3.2. Typowe wymiary rezystorów oraz nacięcia stosowane przy korekcji laserowej

Tabela 3.3. Typowe wymiary rezystorów grubowarstwowych (rys. 3.2)

Oznaczenie	Długość [ $\mu\text{m}$ ]	Uwagi
$l$	1000 (500)	$0,5 < l/s < 5$ ( $0,3 < l/s < 10$ ) szerokość zależy od tolerancji i mocy
$s$		
$a$	250 (125)	zakładka odległość od warstwy przewodzącej odległość od krawędzi podłoża odległość od warstwy dielektrycznej
$b$	250 (125)	
$c$	250 (200)	
$d$	500 (375)	
$e$	750 (500)	
$f$	500 (500)	

(i) – w nawiasach podano wartości minimalne



Rys. 3.3. Typowe wymiary ścieżek przewodzących



Tabela 3.4. Typowe wymiary ścieżek przewodzących (rys. 3.3)

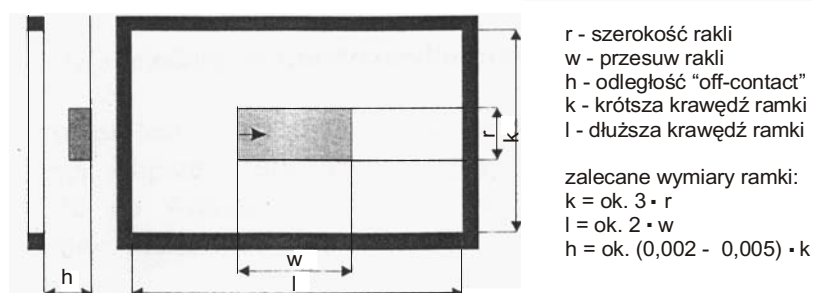
Oznaczenie	Wymiar [ $\mu\text{m}$ ]	Uwagi
$s_1$	(125)	zależy od natężenia prądu lub rezystancji
$s_2$	250 (125)	
$s_3$	500 (375)	metalizacja łącząca elementy po obu stronach podłoża
$d_1$	250 (200)	długość ścieżki < 375 $\mu\text{m}$
$d_1$	375 (250)	długość ścieżki $\geq$ 375 $\mu\text{m}$
$d_2$	375 (250)	
$d_3$	250 (250)	

(i) – w nawiasach podano wartości minimalne

### Sita

Proces sitodruku jest wykonywany przez sita nylonowe, fosforobrazowe lub ze stali nierdzewnej. Najlepsze, ale i najdroższe, są sita stalowe. W zależności od rodzaju pasty oraz grubości warstw jakie chcemy uzyskać, stosuje się sita o różnej gęstości. Gęstość sita jest podawana w liczbie oczek na 1 cm długości (oznaczenie T) lub 1 cal długości (oznaczenie M lub mesh). Pastę dielektryczną drukuje się przez sita najbardziej rzadkie (100–200 mesh), pastę rezystywną przez sita o średniej gęstości (około 200 mesh), a pastę przewodzącą przez najbardziej gęste (300–400 mesh).

Sita naklejane są na specjalne ramy dla ściśle określonej siły naciągu i odpowiednio zachowanych proporcjach między wielkością ramy i wielkością podłoża (rys. 3.4). Wzory na sitach można wykonać nanosząc emulsję światłoczułą bezpośrednio na sito (tzw. emulsja bezpośrednia), lub stosując emulsję pośrednią na specjalnej polimerowej folii nośnej. Proces obróbki fotograficznej odbywa się w tym przypadku bez sita, a emulsja jest nanoszona na sito po wywołaniu i utrwaleniu wzoru. Grubość nanoszonej emulsji jest dostosowana do rodzaju nanoszonej pasty i precyzji wykonanego wzoru. Najczęściej grubość emulsji mieści się w granicach 5–10  $\mu\text{m}$ . Podczas drukowania

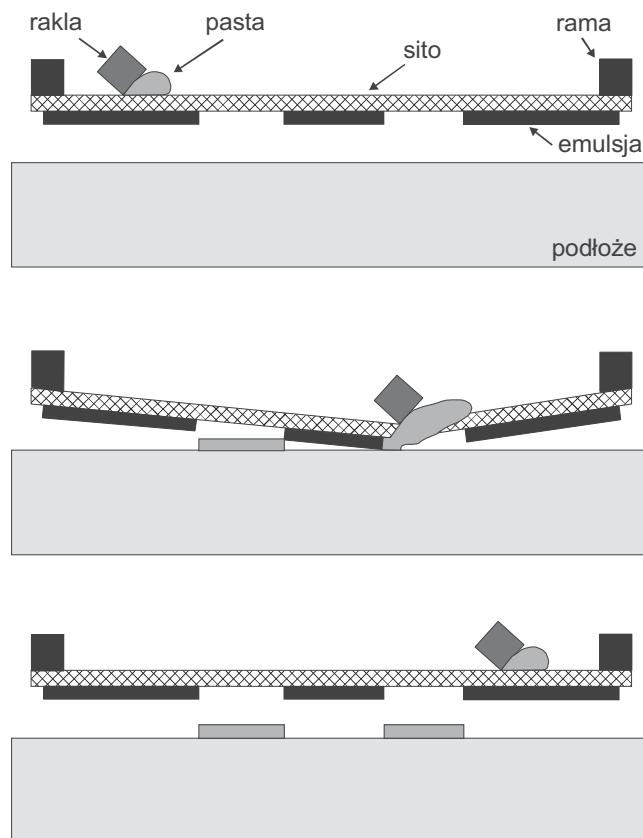


Rys. 3.4. Zalecane proporcje między wymiarami sita i wymiarami wzoru na sicie [64]

precyzyjnych wzorów stosuje się specjalne sita kalendrowane o dużej gęstości. Bardzo dobre wyniki uzyskuje się też, stosując zamiast sita cienkie folie metalowe z wytrawioną siatką w miejscu wzoru [64]. Lepkość i właściwości reologiczne pasty do druku precyzyjnego muszą być utrzymywane w ściśle określonych granicach, a proces sitodruku jest wykonywany w pomieszczeniach o odpowiedniej klasie czystości. Inne metody nanoszenia precyzyjnych ścieżek i wytwarzania otworów w układach wielowarstwowych opisano w dalszej części (w punkcie omawiającym nanoszenie past).

### Nanoszenie pasty – sitodruk

Pastę nanosi się na podłoże najczęściej techniką sitodruku. Jakość naniesionych warstw oraz ich właściwości elektryczne zależą w istotny sposób od precyzji procesu sitodruku. Bardzo ważna jest kontrola grubości nanoszonych warstw [211]. Schemat tego procesu przedstawiono na rys 3.5. Pasty jest przeciskana przez niezapełnione emulsją oczka sita za pomocą elastycznej rakli wykonanej z tworzywa sztucznego. Kilka wielkości wpływa na dokładność odwzorowania. Precyzja wykonanego wzoru zależy



Rys. 3.5. Proces sitodruku

od gęstości sita, grubości emulsji, odległości spoczynkowej sito–podłoże, naciągu sita, siły nacisku rakli, szybkości przesuwu rakli i właściwości reologicznych pasty. Właściwości reologiczne to lepkość pasty oraz jej zależność od kilku czynników zewnętrznych (temperatury, siły nacisku itp.). Pasty są cieczami nieniutonowskimi typu tiksotropowego. W przeciwieństwie do cieczy niutonowskich, z którymi spotykamy się najczęściej, lepkość pasty zależy od szybkości ścinania. Podstawowe parametry opisujące właściwości reologiczne cieczy to naprężenie styczne  $\tau$ , lepkość  $\eta$  i szybkość ścinania  $R$ . Wielkości te opisują następujące równania:

$$\tau = \eta R$$

$$\tau = \frac{F}{\Delta S}$$

$$R = \frac{dv}{dz}$$

gdzie:  $F$  – siła tarcia wewnętrznego,

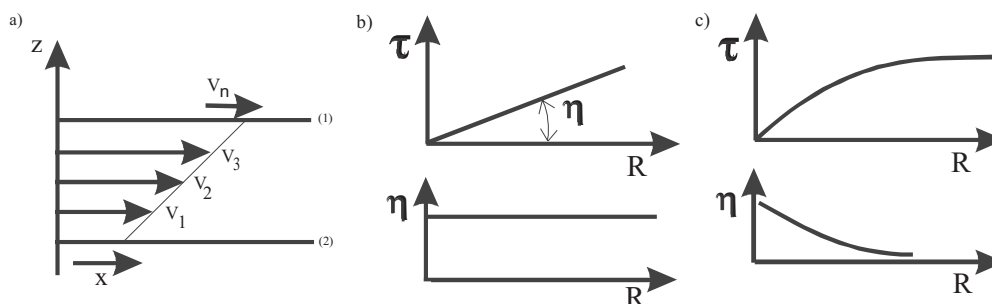
$\Delta S$  – pole powierzchni warstw cieczy, między którymi występuje siła  $F$ ,

$v$  – szybkość przepływu cieczy,

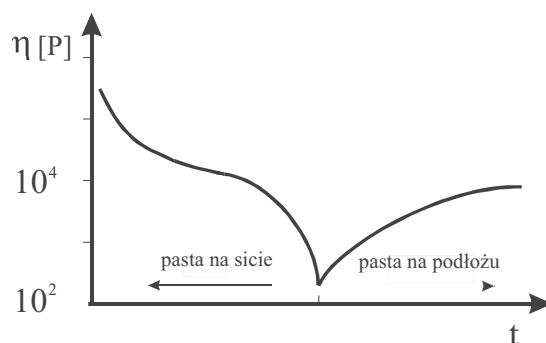
$z$  – odległość w kierunku osi  $z$ .

Znaczenie poszczególnych parametrów wyjaśnia rys. 3.6a. Zaznaczono na nim dwie równoległe powierzchnie znajdujące się w płaszczyźnie  $x$ – $y$ . Powierzchnia 2 jest nieruchoma, natomiast powierzchnia 1 porusza się z szybkością  $v_n$ . Poszczególne warstwy cieczy, znajdujące się między tymi powierzchniami, poruszają się z szybkościami  $v_1, v_2, \dots, v_j$ . Podstawowe charakterystyki reologiczne cieczy niutonowskich i nieniutonowskich zamieszczono na rys. 3.6b i c.

Na rysunku 3.7 przedstawiono zmiany lepkości pasty w czasie procesu sitodruku. Najmniejszą lepkość ma pasta w momencie przechodzenia przez sito. Druk precyzyjny do którego stosuje się specjalne sita kalandrowane [64], umożliwia wykonanie ścieżek

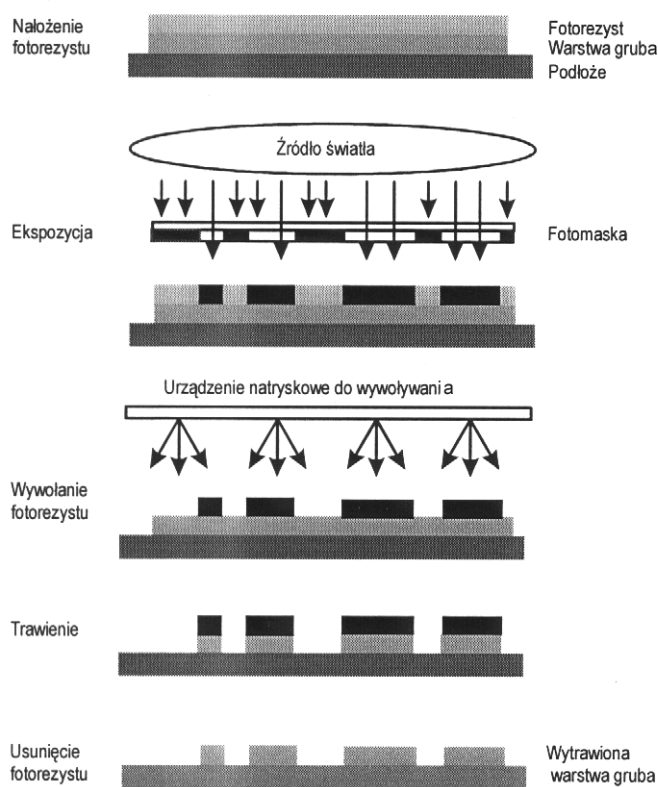


Rys. 3.6. Właściwości reologiczne cieczy: a) ciec między dwiema płaszczyznami równoległymi, b) ciec niutonowska, c) ciec nieniutonowska



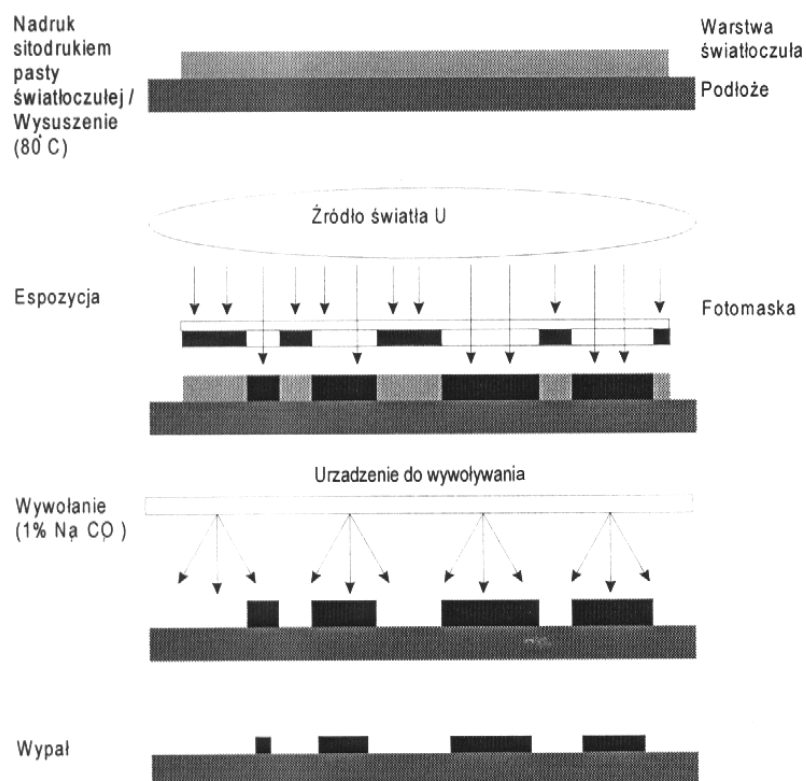
Rys. 3.7. Zmiany lepkości pasty w czasie procesu sitodruku

o szerokości około  $50\ \mu\text{m}$ . Inne metody wykonywania precyzyjnych wzorów to trawienie wypalanej warstwy (rys. 3.8), trawienie pasty światłoczułej po wysuszeniu (technologia FODEL [2, 16, 209, 215], rys. 3.9), nanoszenie warstw metodą *gravure offset* [94, 124, 128, 125] (rys. 3.10) lub wycinanie wzorów w wysuszonej warstwie przy po-

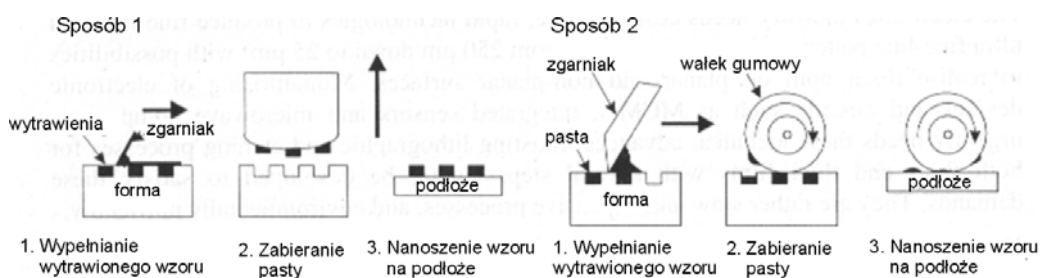


Rys. 3.8. Technologia trawienia wypalanej warstwy grubej [64]

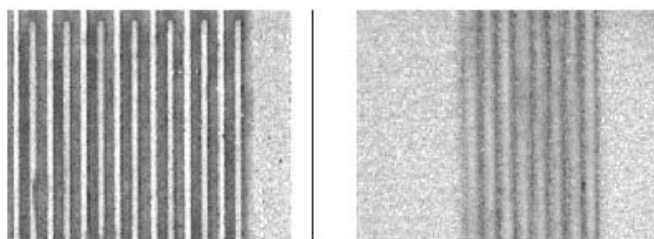
## Schemat procesu FODEL



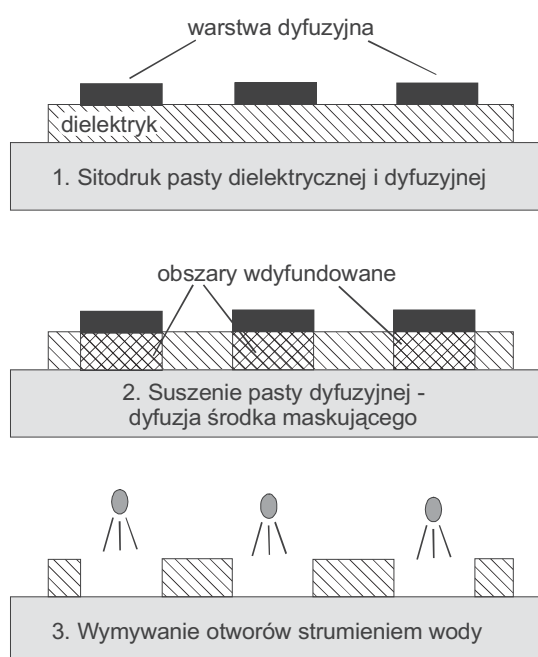
Rys. 3.9. Technologia trawienia warstwy grubej wykonanej ze światłoczułej pasty FODEL [64]

Rys. 3.10. Nanoszenie warstw metodą *gravure offset* [128]

mocy lasera (rys. 3.11) [115]. W technologii wielowarstwowej TFM (*thick film multilayer*) wykorzystuje się metodę *diffusion patterning* do wykonywania precyzyjnych otworów w warstwie dielektrycznej [2, 70] (rys. 3.12). Można w ten sposób wykonać otwory o średnicach minimalnych, około 50  $\mu\text{m}$ .



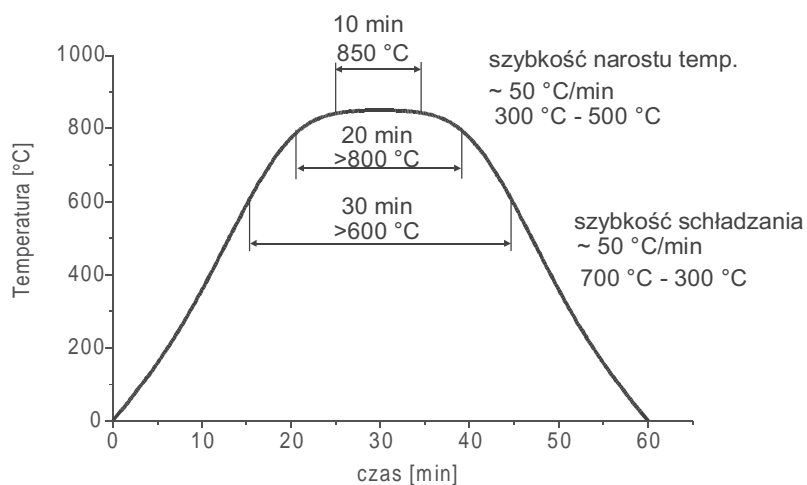
Rys. 3.11. Przykład ścieżek przewodzących wyciętych w warstwach Pt (a) i PdAg (b) za pomocą lasera (szerokość/odległość 50/80  $\mu\text{m}$ )



Rys. 3.12. Technologia wykonywania otworów metodą *diffusion patterning* (maskowanie dyfuzyjne)

### Wypalanie

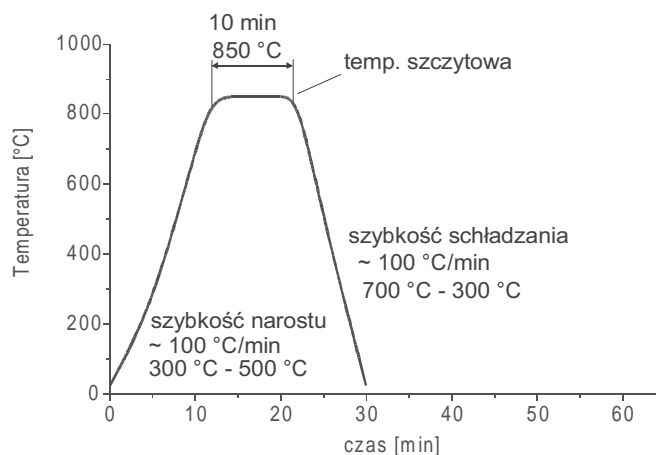
Typowe warstwy grube naniesione na podłoże alundowe po wysuszeniu (w temperaturze 110–130 °C, w czasie 10 min.) są wypalane w temperaturze maksymalnej 850 °C (czas przetrzymania 10 min.) w piecach tunelowych w cyklu 60-minutowym (rys. 3.13) lub 30-minutowym (rys. 3.14). W czasie suszenia wyparowuje rozcieńczalnik organiczny i polimeryzuje etyloceluloza wchodząca w skład nośnika pasty (rys. 3.15b). W czasie wypalania są usuwane składniki organiczne i następuje zagęszczanie struktury warstwy (rys. 3.15c i 3.16).



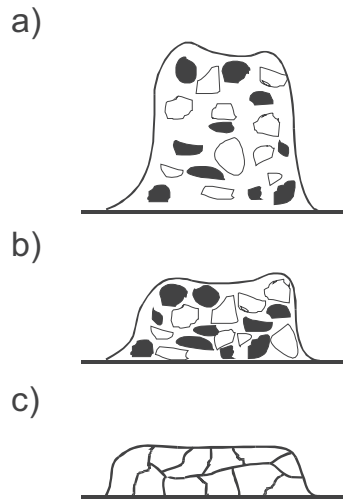
Rys. 3.13. Typowy profil wypalania warstw grubych

W czasie wypalania typowej warstwy rezystywnej zachodzą następujące procesy:

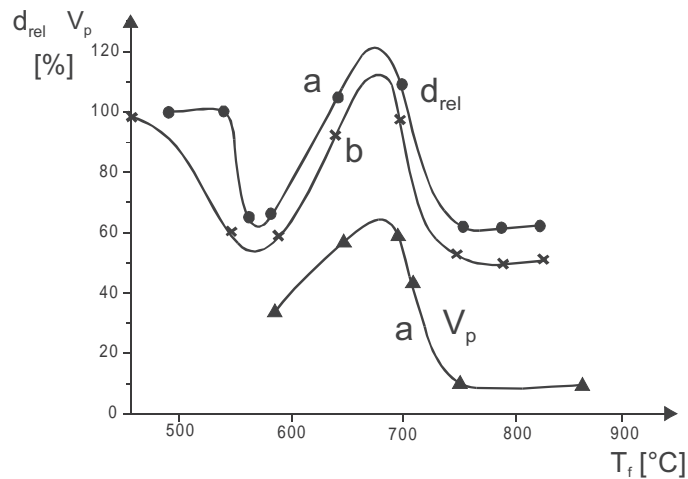
- wypalanie składnika organicznego (<450 °C),
- spiekanie szkła (400–500 °C),
- zwilżanie cząstek przewodzących przez szkło (>400 °C),
- przemieszczanie się cząstek przewodzących (>400 °C),
- zagęszczanie szkła (>500 °C),
- wydzielanie się gazu – tworzenie porów (550–750 °C),
- spiekanie ziaren przewodzących (>800 °C),
- wzrost dużych ziaren przewodzących (>850 °C),



Rys. 3.14. Skrócony profil wypalania warstw grubych



Rys. 3.15. Grubości warstwy grubej: a) po nadruku, b) po wysuszeniu, c) po wypaleniu



Rys. 3.16. Względna zmiana grubości warstwy ( $d_{rel}$ ) i zawartości objętościowej porów ( $v_p$ ) w zależności od temperatury wypalania: a – rezystor  $Bi_2Ru_2O_7$ , b – samo szkliwo [122]

- dyfuzja materiału ziaren przewodzących do warstwy szkliwa między ziarnami przewodzącymi ( $>800^\circ C$ ),
- dyfuzja materiałów między warstwą rezystywną i warstwą przewodzącą,
- dyfuzja materiałów między warstwą rezystywną i podłożem,
- dyfuzja materiałów między warstwą przewodzącą i podłożem,
- powstawanie naprężeń termicznych,
- ewentualne reakcje chemiczne.

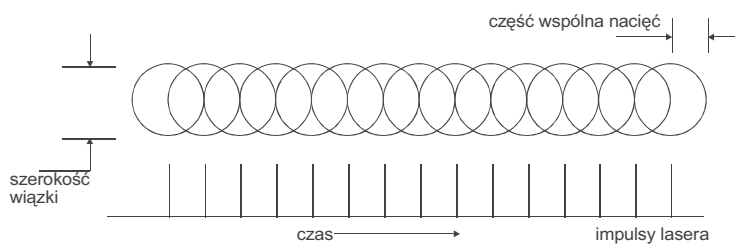


### Korekcja

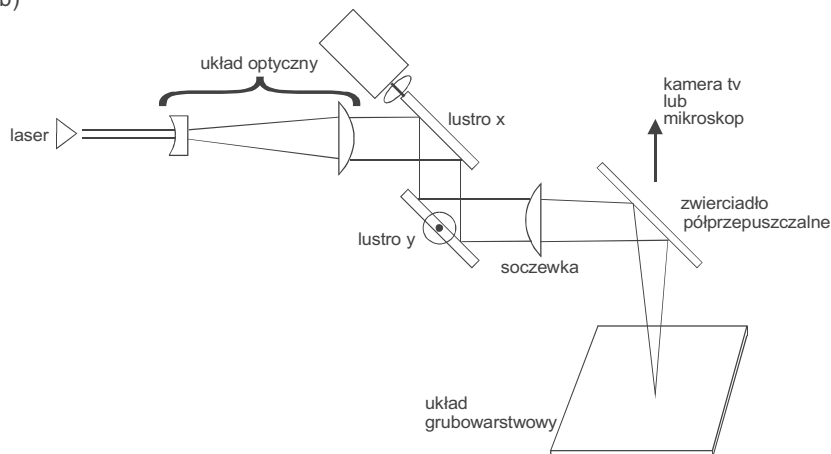
Rozrzuty rezystancji rezystorów grubowarstwowych po procesie wypalania mogą dochodzić do 20%. Przez wycinanie części warstwy rezystywnej, metodą korekcji piaskowej lub laserowej, można doregulować wartość rezystancji ( $\pm 0,1\%$ ). W czasie korekcji następuje zwiększenie rezystancji (rys. 3.17). Przykład laserowego urządzenia do korekcji pokazano na rys. 3.18, a rodzaje wykonywanych nacięć na rys. 3.2. Najczęściej do korekcji stosuje się laser Nd-YAG (domieszkowany neodymem granat itrowo-aluminiowy) o długości fali 1064 nm, pracujący w modzie TEM<sub>00</sub>, o mocy 5–10 W. Jakość nacięcia można poprawiać dobierając odpowiednio częstotliwość wiązki laserowej, jej moc i szybkość przesuwu względem warstwy rezystywnej.

Po korekcji układy grubowarstwowe są testowane – dołącza się elementy zewnętrzne (najczęściej metodą montażu powierzchniowego), tnie się na poszczególne układy i dołącza wyprowadzenia, na koniec zabezpiecza lub montuje w obudowach.

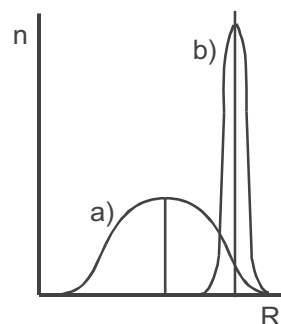
a)



b)



Rys. 3.18. Urządzenie do korekcji laserowej. a) wygląd nacięcia, b) droga optyczna wiązki [34]

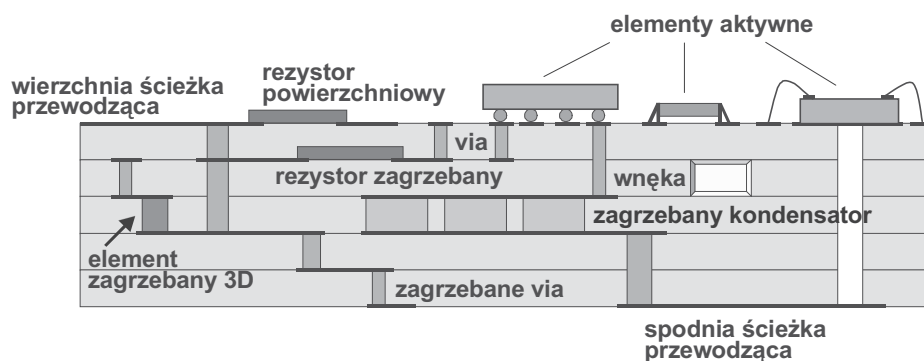


Rys. 3.17. Rozkład rezystancji:  
a) po wypalaniu i b) po korekcji.  
 $R$  – rezystancja,  $n$  – liczność

## 4. TECHNOLOGIA I PROJEKTOWANIE MODUŁÓW LTCC

W rozdziale podano podstawowe informacje na temat wyjściowego materiału LTCC, struktury krystalograficznej materiału LTCC w różnych stadiach procesu oraz wyniki pomiarów termogravimetrycznych wykonanych w czasie procesu wypalania folii LTCC. W dalszej części podano informacje na temat poszczególnych etapów wytwarzania struktury LTCC, właściwości wypalonego materiału oraz zasad projektowania modułu LTCC.

Na rysunku 4.1 przedstawiono przekrój przez gotowy moduł LTCC. Wewnątrz struktury zaznaczono zagrzebane elementy bierne typu 2D (dwuwymiarowe) i 3D (trójwymiarowe), otwory termiczne odprowadzające ciepło, otwory wypełnione pastą przewodzącą tworzące sieć połączeń elektrycznych między poszczególnymi elementami oraz



Rys. 4.1. Przekrój przez strukturę LTCC zawierającą zintegrowane elementy bierne

kanaly i wnęki, przez które może być przepuszczany gaz lub ciecz. Na powierzchni struktury są wykonane elementy grubowarstwowe wypalane razem z modułem LTCC (*cofiring*) lub nadrukowane na wypaloną strukturę LTCC i wypalane oddzielnie (*postfiring*). Na powierzchni znajdują się ponadto elementy czynne typu SMD dołączone metodą SMT lub *ball grid*.

### 4.1. Materiały

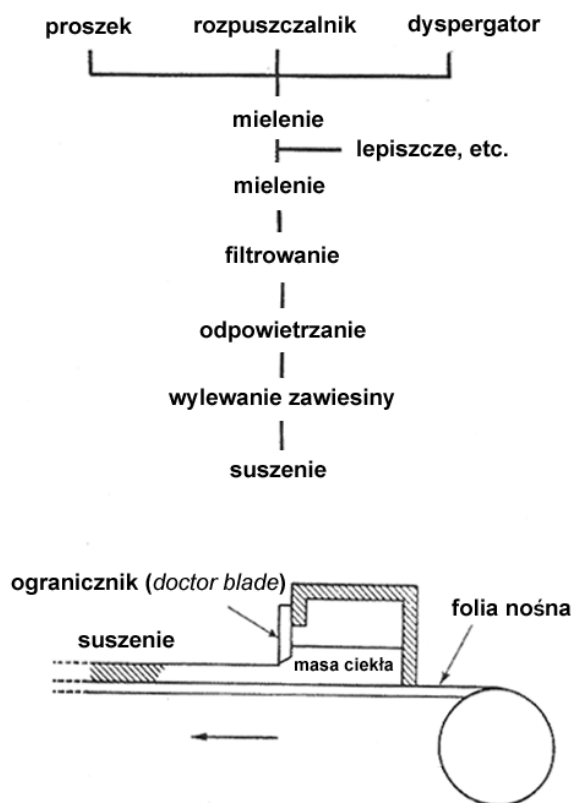
Firmy produkujące folie LTCC o małej stałej dielektrycznej przy doborze wyjściowego składu stosują dwa rozwiązania. Pierwsze rozwiązanie polega na użyciu szkieł

ulegających krystalizacji i uzyskaniu w wyniku procesu krystalizacji układu LTCC stanowiącego szkło-ceramikę. Najczęściej stosowanymi szklami ulegającymi krystalizacji podczas procesu wypalania są:  $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ,  $\text{CaO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ,  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ,  $\text{BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ,  $\text{ZnO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  [184].

W drugiej metodzie za materiał wyjściowy stosuje się mieszaninę składnika ceramicznego i szkła, która po procesie wypalania tworzy kompozyt szkło+ceramika. Jako składnika ceramicznego wykorzystuje się kordieryt, kwarc,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i mulit. Najczęściej używane szkła ulegające krystalizacji to:  $\text{B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{PbO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  [184].

Właściwości tworzyw ceramicznych, szkieł i kompozytów szkło+ceramika zamieszczono w tabeli 4.1 [184]. W tabeli 4.2 podano informacje o modułach szklano-ceramicznych LTCC o małej stałej dielektrycznej wytwarzanych przez różnych producentów. Na rysunku 4.2 pokazano sposób wytwarzania folii LTCC.

Firma DuPont opracowała technologię *green tape*, która umożliwiła otrzymanie modułów LTCC o małej stałej dielektrycznej (4,8), małym współczynniku strat ( $<0,003$ ) i współczynniku rozszerzalności cieplnej dopasowanym do krzemu ( $4,4 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ) [95, 184]. Materiał *green tape* jest mieszaniną trzech składników:



Rys. 4.2. Wytwarzanie folii LTCC

Tabela 4.1. Właściwości tworzyw ceramicznych, szkieł i kompozytów szkło+ceramika o małej stałej dielektrycznej [93, 184, 196]

Materiał	$\epsilon$ (1 MHz)	$\gamma$ (20–200°C) [10 <sup>-6</sup> /K]	Wytrzymałość na zginanie [MPa]	Przewodność cieplna [W/(m·K)]
Ceramika				
Kwarc (SiO <sub>2</sub> )	3,9	11,2		
Kordieryt (2MgO·2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·5SiO <sub>2</sub> )	4,5	2,2	90	2
Mulit (3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub> )	6,7	4,0	200	7
Forsteryt(2MgO·SiO <sub>2</sub> )	6,2	9,4	180	3
Steatyt (MgO·SiO <sub>2</sub> )	5,7	4,2		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,4	6,5	300	25
Szkło				
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,2			
SiO <sub>2</sub>	3,8	0,6	70	2
SiO <sub>2</sub> + B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>	3,9	1,9	140	
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>	4,0	3,2	70	2
MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>	5,0			
CaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>	6,0–7,7	5,5–6,5	130	
LiO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub>	6,5			
PbO-B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>	7,0			
Szkło+ceramika				
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> + kordieryt	5,0	7,9	150	
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> + kordieryt + kwarc	4,4	3,2	160	
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,6	4,0		
MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> + kwarc	5,0			
MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> + mulit	6,0			
MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,5			
MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> + kwarc	5,0	3,0–7,9		
Li <sub>2</sub> O-SiO <sub>2</sub> + kwarc	5,0			
CaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,9			
PbO-CaO-B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + kwarc	7,5	4,2		

$\gamma$  – współczynnik rozszerzalności liniowej,

$\epsilon$  – stała dielektryczna.

- szkła krystalizującego z wytworzeniem kordierytu (2MgO·2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·5SiO<sub>2</sub>) lub anortytu (CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>),
- dodatku ceramicznego regulującego współczynnik rozszerzalności cieplnej (tlenek glinu, kwarc lub stabilizowany krystalit),

Tabela 4.2. Właściwości modułów szklano-ceramicznych LTCC o małej stałej dielektrycznej wytwarzanych przez różnych producentów [93, 178, 184, 196]

Firma	Rodzaj szkła	Rodzaj wypełniacza ceramicznego	Ścieżki przewodzące	$\epsilon$	$\text{tg } \delta$	$\gamma$ $10^{-6}/\text{K}$
Alcoa	$\text{B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	$\text{SiO}_2$	Au, PdAg	3,9–4,2	<0,003	2,5–3,5
Du Pont	krystalizujące szkło	krystalizuje kordieryt anortyt	Ag, Au	5,9	0,002–0,003	4,4–4,5
Ferro	$\text{CaO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	krystalizuje $\text{CaO}\cdot\text{B}_2\text{O}_3$ , $\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$ , $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$	Ag, Au	5,9	0,002	6,5
Fujitsu	$\text{B}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{SiO}_2$	Cu	4,9		4,0
IBM	$\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	krystalizuje kordieryt, klinoenstatyt	Cu	5		3,0
Kyocera	$\text{ZnO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{SiO}_2$	Cu	5		4,4
NEC	$\text{B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	kordieryt, $\text{SiO}_2$ , 13–49% porowatości	Au	2,9–4,2	0,002	1,5–3,2
NEC	$\text{B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ , $\text{SiO}_2$		PdAg	3,9	<0,003	1,9
NGK	$\text{ZnO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	kordieryt	Ag, Au	5,2–5,5	0,001	1,3–1,5
Murata	$\text{BaO-CaO-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$		Cu	6,1	0,0007	8,0
Tektronix	$\text{MgO-CaO-SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	Ag, Au	5,8	0,0016	4,6
Westinghouse	$\text{CaO-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	Au	4,6	0,001	9,6

$\gamma$  – współczynnik rozszerzalności liniowej,

$\epsilon$  – stała dielektryczna.

$\text{tg } \delta$  – stratność.

• szkliwa ułatwiającego zagęszczanie tworzywa w czasie procesu spiekania nisko-temperaturowego (najczęściej borokrzemowego).

Ceramika *green tape* może być współwypalana z warstwami grubymi złotymi lub miedziowymi. Moduły tego typu są przeznaczone do pracy w częstotliwościach do 10 GHz.

Wyjściowy skład ceramiki firmy Ferro jest oparty na szkłe  $\text{CaO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  krystalizującym w czasie procesu wypalania. Fazami krystalicznymi powstającymi w czasie wypalania są  $\text{CaO}\cdot\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  i  $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$  [178]. Stosunek ilościowy poszczególnych faz zależy od czasu, temperatury, szybkości ogrzewania i chłodzenia.

Szkło-ceramika firmy IBM przeznaczona do współwypalania z warstwami Cu ma skład zbliżony do kordierytu:  $\text{SiO}_2$  (50–55%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (18–23%),  $\text{MgO}$  (18–25%),  $\text{P}_4\text{O}_{10}$

i  $B_2O_3$  (0–3%) [196]. Nadmiar MgO w stosunku do stechiometrycznego kordierytu, sprzyja spiekaniu, tworzy roztwór stały z kordierytem i zwiększa zbyt mały dla czystego kordierytu współczynnik rozszerzalności.  $B_2O_3$  podnosi temperaturę krystalizacji szkła i umożliwia pełne zagęszczenie spiekanego proszku przed krystalizacją.  $B_2O_3$  i  $P_4O_{10}$  sprzyjają powstawaniu fazy  $\alpha$ -kordierytu. Powstający kordieryt (główna faza) i klinoenstatyt umożliwiają dokładne dopasowanie współczynnika rozszerzalności cieplnej do monokrystalicznego krzemu ( $3 \cdot 10^{-6}/^\circ C$ ). Bardzo ważnym problemem przy spiekaniu wielowarstwowych układów szkło-ceramika/miedź jest konieczność całkowitego usunięcia rozpuszczalnika, organicznych substancji wiążących i plastyfikatorów. Pozostałości węgla w spieczonej ceramice LTCC zwiększają wartość stałej dielektrycznej. Usuwanie węgla w czasie procesu wypalania następuje aż do temperatury  $800^\circ C$ , co wymaga, aby szkło pozostało nie zagęszczone aż do tej temperatury [184].

Firma NEC opracowała tworzywo typu szkło+ceramika otrzymane z mieszaniny szkła krzemionkowego (35% wag.) i szkła borokrzemowego (65% wag.), przeznaczone na wielowarstwowe podłoże dla układów VLSI o bardzo dużej szybkości działania [180, 184]. Materiał LTCC odznacza się bardzo małą stałą dielektryczną (3,9) i małym współczynnikiem strat (poniżej 0,003). Moduły LTCC odznaczają się małą wytrzymałością mechaniczną (140 MPa) ze względu na to, że zawierają dużą ilość zamkniętych porów. Współczynnik rozszerzalności cieplnej jest za niski ( $1,9 \cdot 10^{-6}/^\circ C$ ) i wymaga poprawy dla lepszego dopasowania do krzemowych struktur półprzewodnikowych.

Firma Westinghouse wytwarza materiał LTCC zawierający szkło borokrzemowe z wypełniaczem w postaci krystalicznego kwarcu [150, 184]. Do wytwarzania ceramiki stosuje się submikronowy proszek szkła borokrzemowego, nie zawierający zanieczyszczeń na poziomie ppm i drobny proszek  $\alpha$ -kwarcu o średnicy ziarn 1–2  $\mu m$ . Dla zawartości wypełniacza kwarcowego wynoszącej 35% obj. uzyskuje się dopasowanie współczynnika rozszerzalności do monokrystalicznego GaAs ( $6,5 \cdot 10^{-6}/^\circ C$ ). Ceramika LTCC jest współwypalana w zakresie temperatur  $800$ – $1000^\circ C$  z warstwami Au i rezystorami. Moduł LTCC charakteryzuje się bardzo małą stałą dielektryczną (3,9) i małym współczynnikiem strat (0,001).

Wyniki badań właściwości chemicznych, strukturalnych i mechanicznych folii LTCC firm Du Pont (951 i 943), Ferro (A6), Heraeus (CT700 i CT800) i Motorola (T2000) przedstawiono w pracy [104]. Sposób wytwarzania folii LTCC przedstawiono na rysunku 4.2.

Dokładny sposób wytwarzania surowych folii można znaleźć w literaturze [19, 132]. Oprócz typowych materiałów izolacyjnych folie można wykonywać również z materiałów o specjalnych właściwościach dielektrycznych.

Przedstawiono wyniki badań makro- i mikrostruktury podłoży: analizę rentgenowską surowej, wysuszonej i wypalanej ceramiki LTCC oraz analizę termiczną i termograwimetryczną w czasie procesu wypalania ceramiki LTCC [59, 86].

Obserwacje wykonane za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego pokazują, że obrazy mikrostruktury warstw grubych wykonanych na ceramice alundowej i ceramice LTCC są bardzo podobne.

Tabela 4.3. Materiały stosowane do wytwarzania folii LTCC [197]

Materiał	Temp. wypalania [°C]	$\gamma$ [ $\cdot 10^{-6}/K$ ]	$\epsilon$ (1 MHz)	Wytrzymałość na zginanie [MPa]	Materiał przewodzący	Firma
Szkła krystalizujące w czasie wypalania (kordieryt)						
FC-01	900–1050	2,2–3,5	4,9–5,6	170	AuCu	NTK
Zn–kordieryt					Ag/Pd	Fujitsu
Kordieryt	850–950	2,4–5,5	5,3–5,7	180–230	Cu	IBM
$\beta$ –spodumen		2,83	5,65		Cu	IBM
Szkło+ceramika						
Borokrzemiany+alund	1000	4,0	5,6	240	Cu	Fujitsu
Pb+borokrzemiany+alund	900	4,2	7,5	300	Au	NEC
CaO–Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –SiO <sub>2</sub> –B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +alund	880	5,5	7,7	200	Au, Ag/Pd	Narumi
MgO–Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –SiO <sub>2</sub> –B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +krzemionka	850–950	3–7,9	4,25–5	150	Ag, Ag/Pd	Hitachi
Szkło+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +CaZrO <sub>3</sub>	850	7,9	8,8	210	Au,Ag	DuPont
SiO <sub>2</sub> –B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +alund+2MgOSiO <sub>2</sub>	850–950	6,0	6,5	200	Ag/Pd	Asahi Glass
Ceramika						
BaSn(BO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	960–980	5,5	8,5	170	Ag/Pd	Toshiba
CaO–Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –SiO <sub>2</sub> –B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	950	4,8	6,7	250	Cu, Ni	Taiyo Yuden
BaO–CaO–Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –SiO <sub>2</sub> –B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	950–1000	8,0	6,1	200	Ag, Ag/Pd	Murata

$\gamma$  – współczynnik rozszerzalności cieplnej,

$\epsilon$  – stała dielektryczna.

### Analiza rentgenowska ceramiki LTCC

W skład surowej ceramiki (folii) LTCC, oprócz składnika ceramicznego, wchodzi najczęściej dwa rodzaje materiałów:

- szkło ulegające krystalizacji w procesie obróbki wysokotemperaturowej (w wyniku procesu krystalizacji uzyskuje się układ LTCC stanowiący szkło–ceramikę),
- mieszanina składnika krystalicznego i szkliva (po procesie wypalania tworzy się kompozyt szkło+ceramika).

W dalszej części przedstawiono wyniki analizy rentgenowskiej różnych materiałów LTCC sprzedawanych przez firmy Ferro, DuPont i Heraeus. Badania przeprowadzono na różnych etapach procesu technologicznego: analizowano właściwości materiału wyjściowego (surowe folie LTCC), folii po procesie suszenia (po usunięciu lepiszczy organicznych z surowej ceramiki) oraz końcowego produktu po właściwym (całkowitym)

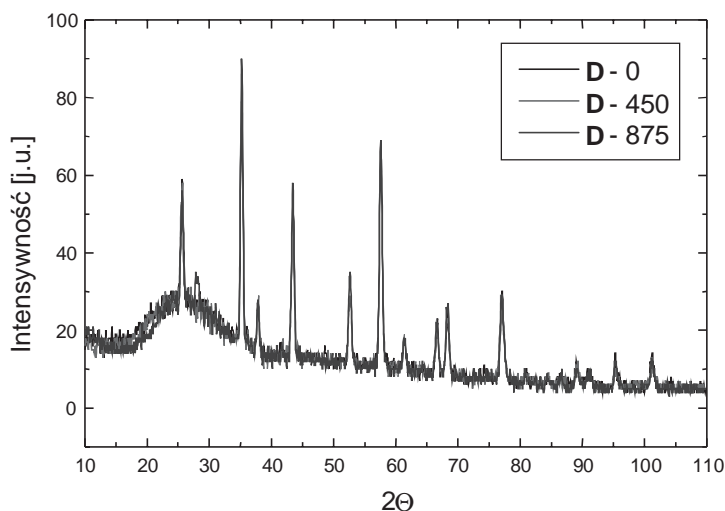
Tabela 4.4. Materiały LTCC poddane analizie rentgenowskiej [86]

Symbol firmowy	Producent	Oznaczenia stosowane na rysunkach		
		„surowa ceramika”	ceramika wysuszona	ceramika wypalona
DP 951	DuPont	D-0	D-450	D-875
A6-M (brązowa)	Ferro	F1-0		F1-850
A6-M (biała)	Ferro	F2-0		F2-850
CT 700	Heraeus	H-0	H-350	H-850

procesie wypalania. Badane materiały zebrano w tabeli 4.4, a ich rentgenogramy przedstawiono na rys. 4.3–4.7. Skład surowej ceramiki LTCC zależy w istotny sposób od producenta i typu.

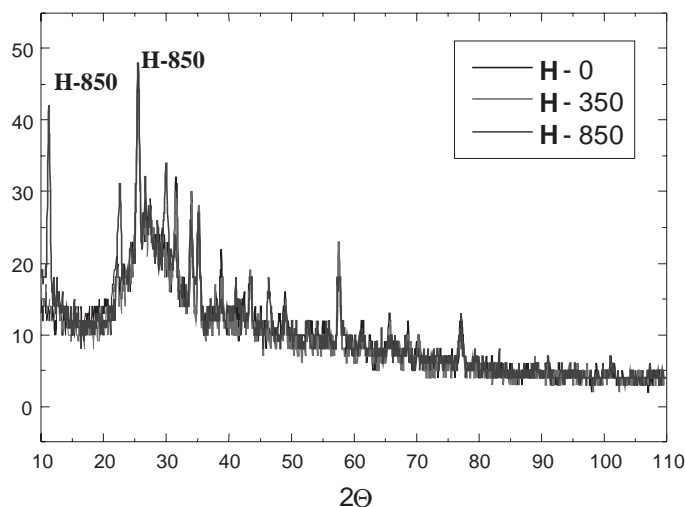
Materiałem najbliższym krystalograficznie do standardowych podłoży alundowych jest folia DP 951 firmy DuPont. Jediną fazą krystaliczną obecną w tym materiale jest  $\text{Al}_2\text{O}_3$  o strukturze korundu (rys. 4.3). Intensywność pików charakterystycznych dla tej fazy jest zawsze taka sama i nie zależy od tego, czy jest to materiał „surowy”, wysuszony w temperaturze  $450^\circ\text{C}$ , czy wypalony w temperaturze  $875^\circ\text{C}$  (produkt finalny – ceramika). Proces tworzenia się ceramiki DP 951 jest związany głównie z procesami charakterystycznymi dla amorficznej fazy szklistej.

Inaczej jest w przypadku ceramiki CT 700 firmy Heraeus. W surowej i wysuszonej ( $350^\circ\text{C}$ ) ceramice CT 700 fazą krystaliczną stanowi  $\text{Al}_8\text{B}_2\text{O}_{15}$ , który jest stabilny do temperatury  $1550^\circ\text{C}$ . Materiał ten powstaje w temperaturze  $1400^\circ\text{C}$  z fluorku glinu,



Rys. 4.3. Skład fazowy folii DP 951 „surowej”(0), wysuszonej (450) i wypalonej (875) – wszystkie wykresy są bardzo podobne [86]

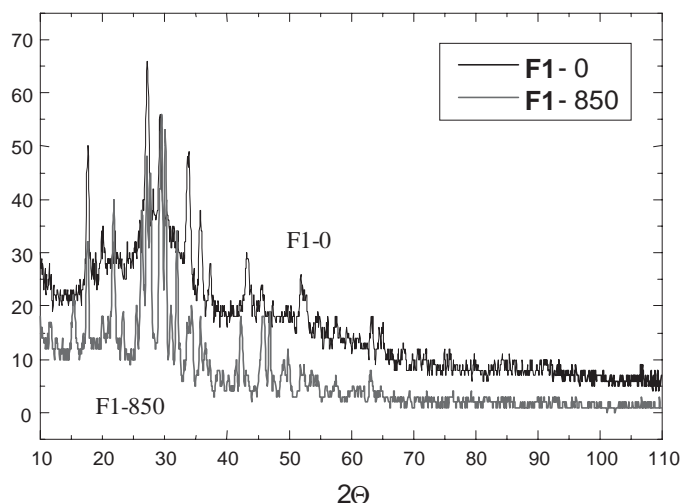




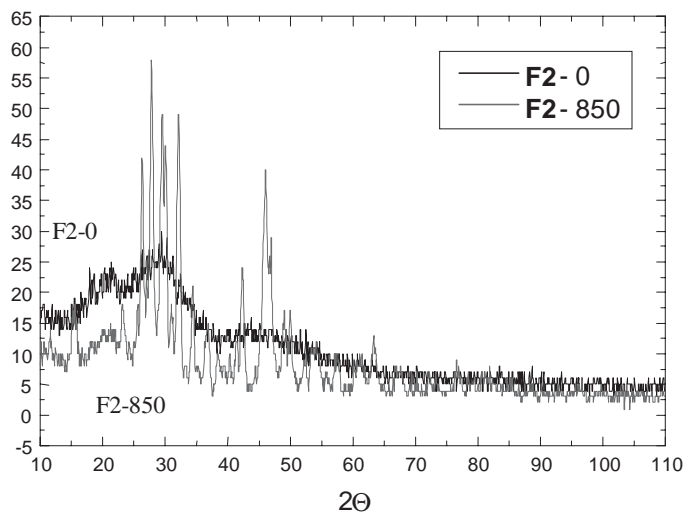
Rys. 4.4. Skład fazowy folii CT 700 „surowej”(0), wysuszonej (350) i wypalanej (850) [86]

boranu sodu i tlenku boru. Podczas procesu wypalania folii CT 700 tworzy się dodatkowo faza krystaliczna o składzie  $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ . Po wypaleniu w temperaturze  $850^\circ\text{C}$  zawartość obu faz jest porównywalna (rys. 4.4).

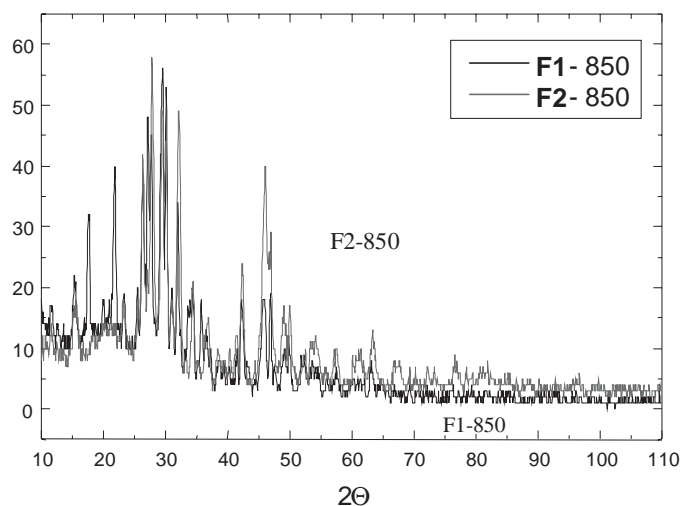
W foliach A6-M firmy Ferro, produkowanych w kolorach białym i brązowym, występują wyraźne różnice składu fazowego pomiędzy „surową” folią i wypaloną ceramiką oraz duże różnice w strukturze krystalograficznej materiałów wyjściowych. W folii białej (oznaczonej F2) wyjściowy materiał jest amorficzny. Faza krystaliczna pojawia się dopiero w procesie wypalania ceramiki F2. Natomiast w „surowej” folii F1 (brązowej) występuje wollastonit ( $\text{CaSiO}_3$ ). W obu rodzajach folii w czasie procesu wypala-



Rys. 4.5. Rentgenogramy „surowej” i wypalanej brązowej folii A6-M firmy Ferro [86]



Rys. 4.6. Rentgenogramy „surowej” i wypalonej białej folii A6-M firmy Ferro [86]

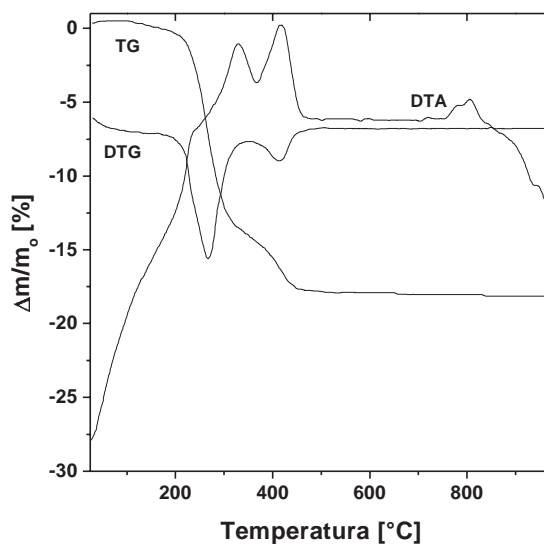


Rys. 4.7. Porównanie składu krystalicznego ceramiki A6-M firmy Ferro o kolorze brązowym (F1) białym (F2) [86]

nia powstaje wollastonit (rys. 4.5 i 4.6). Po procesie obróbki wysokotemperaturowej w temperaturze 850°C występują różnice w składzie krystalicznym ceramiki F1 i F2 (rys. 4.7), co związane jest ze składem fazowym struktury niewypalonej.

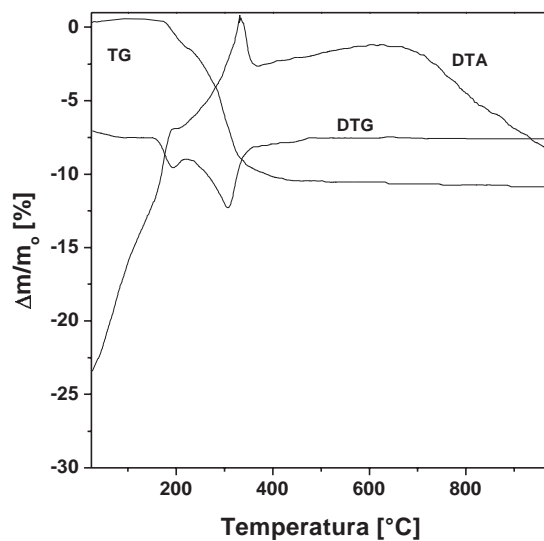
### Analiza termiczna i termogravimetryczna ceramiki LTCC

Analizę termiczną i termogravimetryczną różnych folii LTCC, zarówno „surowych” jak i po wysuszeniu, wykonano na derywatografie C produkcji MOM Budapeszt w In-



Rys. 4.8. Analiza termiczna (DTA) i termogravimetryczna (TG, DTG) białej folii A6-M firmy Ferro [86]

stytucie Chemii Nieorganicznej i Metalurgii Pierwiastków Rzadkich Politechniki Wrocławskiej [59, 86]. Rejestrowano jednocześnie ubytek masy próbki (krzywe TG i DTG) oraz efekty cieplne (krzywe DTA). Badania prowadzono w temperaturze 25–1000 °C w powietrzu, stosując naważki próbek  $m = 100$  mg oraz liniową prędkość narostu temperatury  $\beta = 5$  °C/min. Jako odnośnik zastosowano  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. W tabeli 4.5 przedstawio-



Rys. 4.9. Analiza termiczna (DTA) i termogravimetryczna (TG, DTG) folii DP 951 firmy DuPont [86]

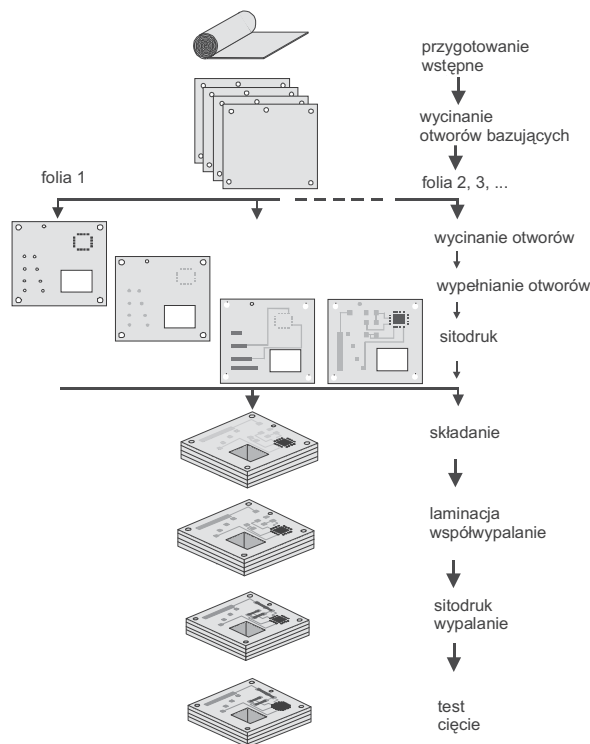
no wyniki analizy termicznej folii LTCC pochodzących od różnych wytwórców. Przykładowe krzywe TG, DTG i DTA zmierzone dla surowych folii DP 951 i białej A6-M przedstawiono na rys. 4.8 i 4.9.

W przypadku „surowych” ceramik obserwowane efekty cieplne to efekty egzotermiczne rejestrowane w temperaturze 80–550 °C. Po wysuszeniu folii i usunięciu składników organicznych, praktycznie nie obserwuje się efektów cieplnych. Śladowe efekty termiczne, którym nie towarzyszą zmiany masy, notuje się w foliach Heraeus i Ferro (zarówno „surowych” jak i wysuszonych) w temperaturach powyżej 700 °C. Związane są one ze zmianami struktury krystalicznej tych materiałów. W folii DP 951, której skład fazowy jest praktycznie niezależny od stanu obróbki wysokotemperaturowej, efekty te nie występują.

## 4.2. Procesy technologiczne

Poszczególne etapy wytwarzania układu LTCC przedstawiono na rys. 4.10.

Opisano kolejne czynności, jakie należy wykonać w celu wytworzenia modułu LTCC. Parametry poszczególnych procesów podano na przykładzie folii DuPont DP 951 [49]. Mogą one być różne dla innych typów folii. Opis procesu wytwarzania modułów LTCC z folii Ferro można znaleźć w pracy [72].



Rys. 4.10. Etapy wytwarzania układu LTCC

Tabela 4.5. Wyniki analizy termicznej i termogravimetrycznej różnych folii LTCC [86]

Lp.	Nazwa próbki	Temperatura [°C]	DTG <sub>min</sub> [°C]	DTA <sub>pik</sub> [°C]	Ubytek masy [% wag.]
1	Ferro A6-M (brązowa)	99–370	281	254 (przeg.)	14,11
		370–544	352	435	3,76 (Σ = 17,8)
			431	785–790 (przeg.)	–
				920–934	–
2	Ferro A6-M (biała)	83–375	284	257	14,56
		375–525	352	444	3,65 (Σ = 18,21)
			440	865	–
				950 (przeg.)	–
3	DuPont DP 951	170–240	211	217 (przeg.)	1,81
		240–510	329	357	9,09 (Σ = 10,90)
4	Heraeus CT 700	162–351	233 (przeg.)	246 (przeg.)	6,18
			280	329	1,73 (Σ = 7,91)
		351–487	411	414	
				868 (przeg.)	
5	Ferro A6-M brązowa, wysuszona			755	–
				785	–
				931	(Σ = 0)
6	DP 951, wysuszona				(Σ = 0)
7	CT 700, wysuszona			429	0,57
				852–874 (przeg.)	– (Σ = 0,57)

### Cięcie

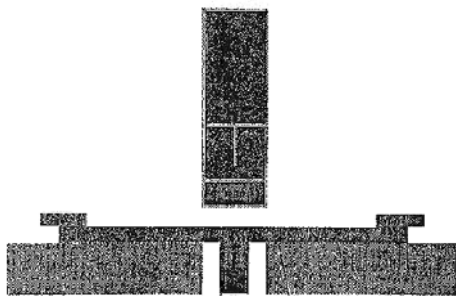
Po rozwinięciu z rolki i usunięciu folii nośnej w strumieniu zjonizowanego powietrza, folię LTCC tną się ostrym narzędziem na mniejsze odcinki (większe od wyjściowej folii LTCC).

### Obróbka wstępna

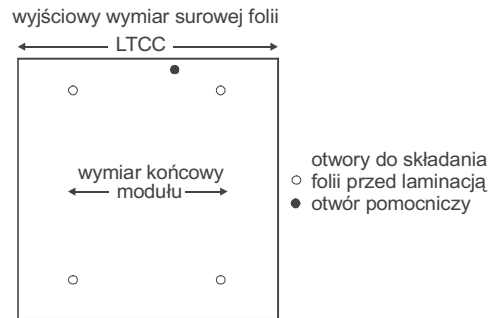
Po pocięciu folie wygrzewa się w temperaturze 120 °C w czasie 20–30 min. w atmosferze powietrza (lub przetrzymuje w czasie 24 godz. w suchym azocie w temperaturze pokojowej). Celem operacji jest usunięcie naprężeń.

### Wykrawanie

Za pomocą wykrojnika (rys. 4.11) wycina się otwory bazujące i pomocnicze oraz uzyskuje odpowiedni wymiar wyjściowej folii LTCC (przeważnie 3"×3" lub 5"×5"), dostosowany do wielkości stolika sitodrukarki i komory roboczej prasy izostaticznej



Rys. 4.11. Wykrojniki

Rys. 4.12. Wyjściowa folia LTCC [49]  
(za zgodą DuPont Microcircuit Materials)

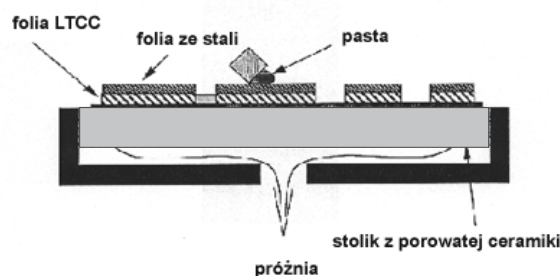
(lub prasy jednoosiowej)  $7,5 \times 7,5$  cm lub  $12,5 \times 12,5$  cm (rys. 4.12 [49]). Otwór pomocniczy informuje o orientacji folii względem kierunku zwinięcia na rolce (jest on wykorzystywany podczas składania folii przed procesem laminacji).

### Wykonywanie otworów

Otwory przelotowe wykorzystywane do połączeń elektrycznych między elementami na różnych foliach (różne poziomy modułu LTCC) lub do odprowadzania ciepła z wnętrza struktury, wykonuje się za pomocą wykrojnika mechanicznego lub lasera. Na tym etapie wytwarzania modułu wycina się również specjalne otwory (kanały, wnęki) w układach chłodzących, czujnikach i mikrosystemach.

### Wypełnianie otworów przelotowych

Otwory połączeniowe są wypełniane najczęściej metodą konwencjonalnego sitodruku [40]. Specjalny porowaty stolik sitodrukarki (rys. 4.13) po podłączeniu do pompy próżniowej zapewnia odpowiednią stabilność położenia folii w czasie procesu sitodruku [102]. Pozycjonowanie folii odbywa się z wykorzystaniem bazowania mechanicznego lub systemu optycznego do automatycznego ustawiania folii. Specjalną pastę przewo-

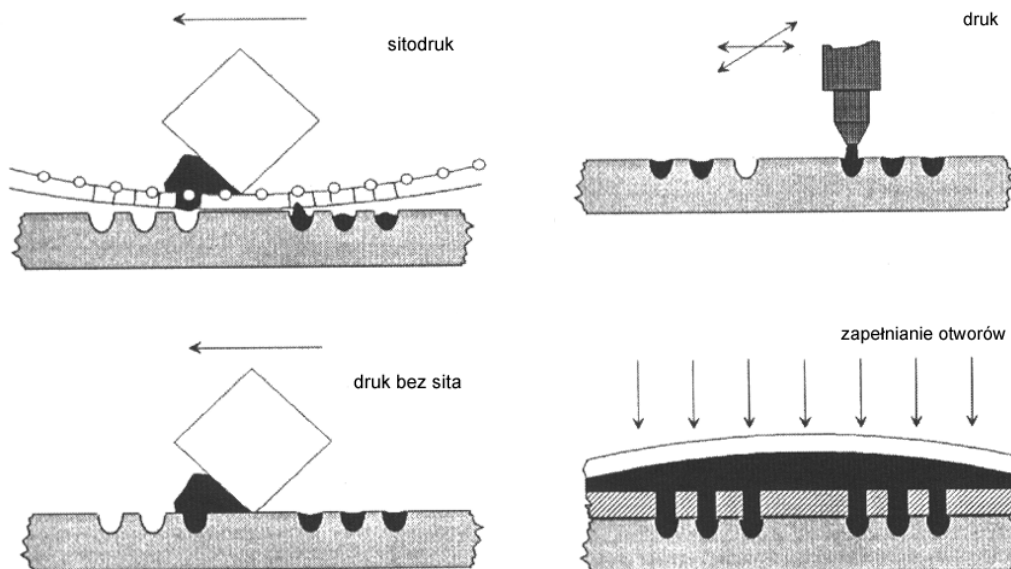


Rys. 4.13. Stolik z porowatej ceramiki

dzącą nanosi się techniką *on-contact* (sito przylega do podłoża) przez sita z przyklejona cienką folią z mosiądzu lub stali nierdzewnej. W folii są wycięte otwory w miejscach odpowiadającym położeniu otworów przelotowych w folii. Czasem otwory przelotowe i wycięte w folii LTCC kanały wypełnia się pod ciśnieniem (rys. 4.14).

### Drukowanie warstw grubych

Pasty o specjalnym składzie, dobranym do ceramiki LTCC, są наносzone techniką zwykłego sitodruku przez sita stalowe ze standardową emulsją. Folie, podobnie jak w przypadku wypełniania otworów przelotowych, są umieszczane na stoliku z porowatej ceramiki. Najpierw nanosi się pasty przewodzące, a potem, po wysuszeniu, pasty rezystywne, dielektryczne i inne.



Rys. 4.14. Różne sposoby wypełniania otworów i kanałów w foliach LTCC [136]

### Suszenie

Wypełnione otwory przewodzące i naniesione pasty są suszone w temperaturze 120°C w czasie 5 minut (w przypadku folii DuPont). Inni producenci mogą zalecać inną temperaturę i czas (np. temp. 70°C).

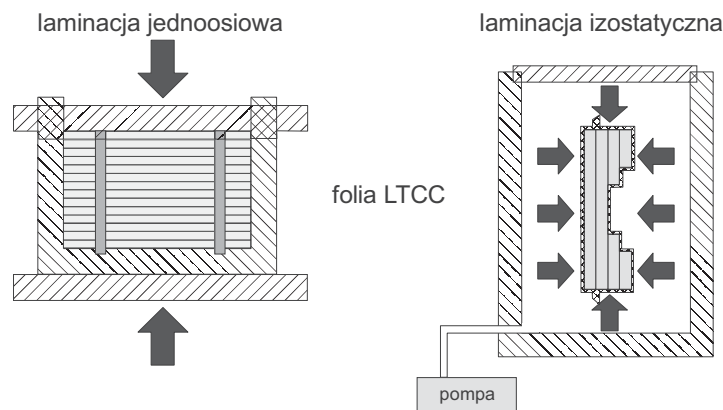
### Składanie folii

Po kontroli jakości sitodruku na poszczególnych foliach LTCC przy pomocy mikroskopu optycznego są one składane razem w jeden moduł w specjalnym uchwycie zapewniającym odpowiednie bazowanie przez wykorzystanie otworów bazujących i po-

mocniczych. Kolejne folie są obracane o  $90^\circ$  względem siebie w celu kompensacji ewentualnych naprężeń pozostałych po procesie wytwarzania folii. Wykorzystuje się w tym celu otwory pomocnicze informujące o kierunku zwinięcia folii na rolce.

### Proces laminacji

Proces laminacji odbywa się w prasie jednoosiowej lub izostatycznej pod ciśnieniem 20 MPa w temperaturze  $70^\circ\text{C}$ , w czasie 10 min. W prasie izostatycznej proces laminacji odbywa się w ogrzewanej wodzie destylowanej lub dejonizowanej. W tym przypadku moduły LTCC są umieszczane w próżniowo zamykanych woreczkach plastikowych, chroniących układ LTCC przed kontaktem z wodą. Zasadę działania prasy jednoosiowej i izostatycznej pokazano na rys. 4.15. W niektórych przypadkach po procesie laminacji wyjściową strukturę LTCC tną się na poszczególne moduły za pomocą wykrojników mechanicznych lub lasera. Podczas cięcia płytki trzeba pamiętać o skurczu ceramiki w czasie wypalania i o związanych z tym niedokładnościach końcowych wymiarów modułu. Obie metody umożliwiają wycinanie struktur o dowolnych kształtach. Inną metodę laminacji, wykorzystującą folie z warstwą kleju, opisano w pracy [168]. Proces laminacji prowadzono w temperaturze pokojowej pod niskim ciśnieniem.



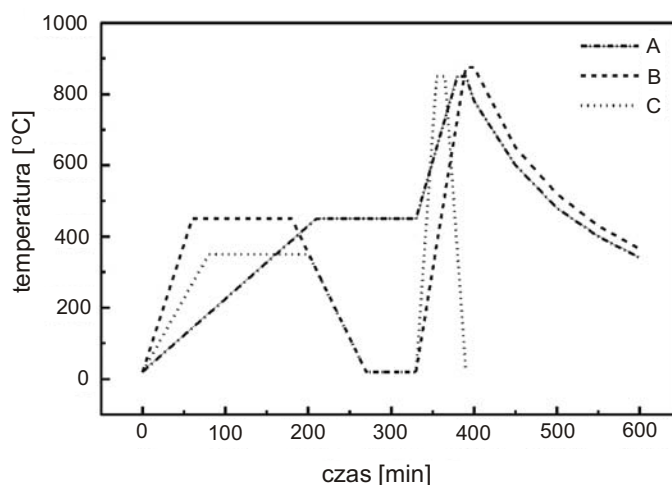
Rys. 4.15. Prasa jednoosiowa i izostatyczna

### Proces współwypalania

Po procesie laminacji moduły LTCC są wypalane w powietrzu, najczęściej w jednym piecu komorowym o odpowiednim profilu temperaturowym. Moduł LTCC leży w czasie procesu wypalania na płaskiej płytce. Niektóre firmy zalecają prowadzenie procesu wypalania w dwóch piecach – najpierw do temperatury około  $450^\circ\text{C}$  w piecu komorowym, a następnie, po przeniesieniu, w drugim, typowym piecu tunelowym. Profil i sposób wypalania zależą od rodzaju folii i producenta. Całkowity cykl wypalania trwa kilka godzin. W pierwszym cyklu, w temperaturze  $200\text{--}500^\circ\text{C}$  następuje wypalenie skła-



dnika organicznego folii. Ceramika LTCC powinna przebywać w tym zakresie temperatury przynajmniej przez 1 godzinę. W wyższej temperaturze następuje właściwe spiekanie materiału ceramicznego folii. W czasie procesu wypalania folie zmieniają swoje wymiary. Zależy to wyraźnie od aktualnej temperatury w piecu, co potwierdzają przeprowadzone *in situ* obserwacje [105, 208]. Maksymalna temperatura wypalania zawiera się w granicach od 850 °C do 875 °C w zależności od składu modułu LTCC. Czas przebywania ceramiki w maksymalnej temperaturze powinien wynosić przynajmniej 15 minut. W przypadku folii DP 951 maksymalna temperatura wypalania wynosi 875 °C, a czas około 15 minut. Profile wypalania dla różnych systemów LTCC przedstawiono na rys. 4.16. Od profilu temperaturowego w piecu zależy powtarzalność wymiarów po skurczu oraz właściwości elementów grubowarstwowych wykonanych we wnętrzu lub na powierzchni modułu LTCC.



Rys. 4.16. Profile wypalania dla różnych systemów LTCC  
(A – Ferro, B – DuPont, C – Heraeus)

### Procesy dodatkowe po wypaleniu

Na powierzchni wypalonego modułu LTCC można wykonać typowe układy grubo- lub cienkowarstwowe. W przypadku wykonywania dodatkowego układu grubowarstwowego moduł razem z naniesionymi warstwami grubymi jest ponownie wypalany, tym razem jednak w typowym, krótkim procesie wypalania w temperaturze 850 °C (czas trwania całego cyklu wynosi 60 min. – tzw. proces *postfiring*).

### Testy elektryczne

Po współwypaleniu i operacjach dodatkowych wszystkie moduły są testowane na jakość połączeń elektrycznych i izolacji.

### Podział na poszczególne układy

Stosuje się następujące metody podziału dużej struktury LTCC na pojedyncze moduły:

- cięcie piłą mechaniczną – metoda ta jest w praktyce stosowana najczęściej w przypadku prostokątnych kształtów modułów; uzyskuje się powtarzalne wymiary struktur o wysokiej jakości naciętych krawędzi,
- cięcie wiązką laserową – pocięte moduły charakteryzują się dużą dokładnością i powtarzalnością wymiarów, jednak jakość krawędzi nie jest najlepsza; koszt operacji jest niski,
- cięcie za pomocą ultradźwięków – proces jest bardzo wolny i bardzo drogi.

### Testy końcowe

Wszystkie wykonane moduły są testowane wizualnie na zgodność z założonymi wymiarami oraz mierzone ich właściwości mechaniczne, elektryczne i stabilnościowe. Po testach do modułów są dołączane różnymi technikami elementy zewnętrzne. Są to najczęściej układy o wielkiej skali integracji i o dużej liczbie wyprowadzeń. Stosowane metody połączeń to najczęściej lutowanie, klejenie i metoda *flip chip (ball grid)* [24, 25, 141].

## 4.3. Właściwości modułów LTCC

Na przykładzie ceramiki *green tape DP 951* firmy DuPont [49] podano parametry modułów LTCC

### Właściwości fizyczne

skład materiału	tworzywo szklano-ceramiczne; ~50% alundu
kolor	ciemnoniebieski
chropowatość powierzchni	< 0,25 $\mu\text{m}$ (ASTM F 109)
falistość powierzchni	$\leq 50 \mu\text{m}$ (ANSI B46.1)
wygięcie	< 3 $\mu\text{m}/\text{mm}$ (ASTM F 109)
gęstość	> 3,1 $\text{g}/\text{cm}^3$ (ASTM C 20)
materiał przewodzący:	
wewnętrzny	Ag, Au
zewnętrzny	Ag, PdAg, Au, PtAu, Cu
grubość folii (po wypaleniu) [ $\mu\text{m}$ ]	95 (typ AT) / 137 (A2) / 211 (AX)
współczynnik rozszerzalności cieplnej (25–300°C)	5,8·10 <sup>-6</sup> /K (ASTM C 327)

przewodność cieplna (w 25°C):

folia LTCC	3,0 W/(m·K)
folia z otworami termicznymi	10–25 W/(m·K)

ciepło właściwe [J/(g·°C)]

w temp. 100°C	0,825
w temp. 150°C	0,879
w temp. 300°C	0,989

### Właściwości elektryczne

rezystancja powierzchniowa:

Ag zagrzebany:	3,3 mΩ/□ (grubość 6 μm)
Au zagrzebany:	5,0 mΩ/□ (grubość 6 μm)
Ag powierzchniowy:	2,0 mΩ/□ (grubość 15 μm)
PdAg powierzchniowy:	15 – 40 mΩ/□ (grubość 15 μm)
Au powierzchniowy:	4,0 mΩ/□ (grubość 8 μm)
PtAu powierzchniowy:	80 mΩ/□ (grubość 15 μm)
Cu powierzchniowy:	2,0 mΩ/□ (grubość 15 μm)

maksymalne natężenie prądu dla ścieżek zagrzebanych Ag o szerokości 100 μm

1 A

względna przenikalność

dielektryczna (1 MHz) 7,8 (ASTM D 150)

stratność (1 MHz) < 0,15% (ASTM D 150)

rezystancja izolacji > 10<sup>12</sup> Ω (100 VDC)

napięcie przebicia > 40 V/μm (ASTM D 116)

wytrzymałość dielektryczna > 40 kV/mm (ASTM D 116)

właściwości rezystorów grubowarstwowych:

rezystancja powierzchniowa 30 Ω/□–100 kΩ/□

TWR ±200 ppm/K

stabilność < 1%

właściwości przy wysokich

częstotliwościach: 1 GHz 15 GHz

względna przenikalność dielektryczna 7,8 7,8

tg δ 0,005 0,010

### Właściwości mechaniczne

wygięcie	0,2 mm/50 mm	(ASTM C 20)
moduł elastyczności Younga	100–120·10 <sup>3</sup> kg/cm <sup>2</sup>	(ASTM C 623)
moduł na zginanie	700 kg/cm <sup>2</sup>	(ASTM F 417)
wytrzymałość na rozciąganie	2–2,5·10 <sup>3</sup> kg/cm <sup>2</sup>	(ASTM F 417)
wytrzymałość sprężystości	44·10 <sup>3</sup> kg/cm <sup>2</sup>	
wytrzymałość na pęknięcie	150–200 kg/cm <sup>2</sup>	

## 4.4. Projekt

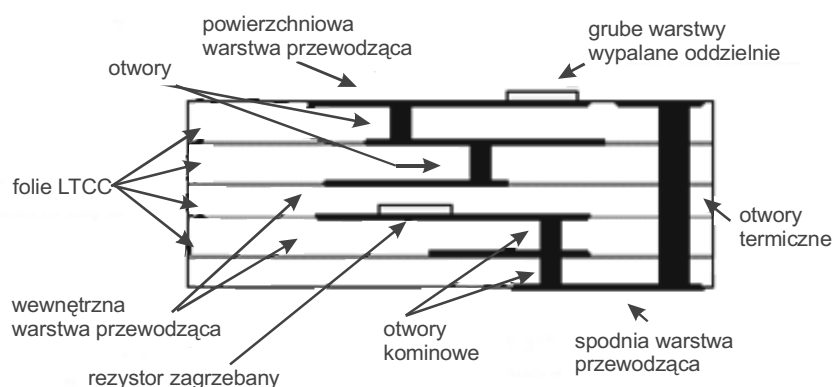
Zasady projektowania modułów LTCC przedstawiono na przykładzie firmy DuPont. [49]. Podstawowe dane potrzebne do projektowania układów zamieszczono w tabelach 4.6 i 4.7. Podobne reguły projektowania, dotyczące materiałów LTCC, można znaleźć na stronach internetowych firm CSL, Ferro, Murata, Scramtom, itp. [41, 72, 134, 176].

### Metalizacja

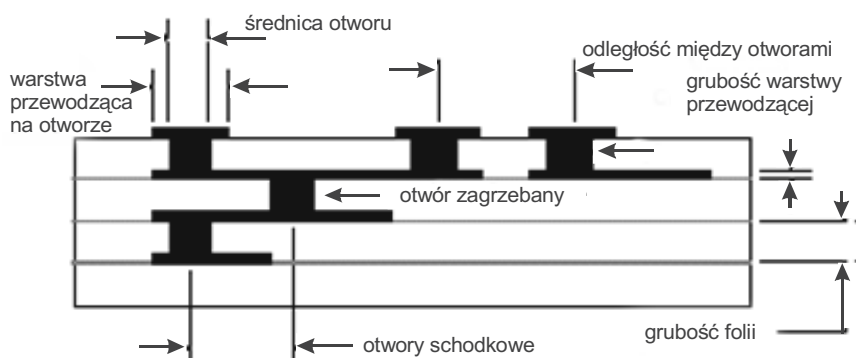
Pasty przewodzące Ag i Au dostosowane do współwypalania z folią DP951 są dostępne na rynku. Wiele różnych materiałów może być nadrukowanych na powierzchni modułu LTCC i wypalanych oddzielnie w procesie *postfiring*. Najczęściej na połączenia wewnętrzne stosuje się Ag, a na połączenia zewnętrzne Au. Specjalne materiały są stosowane jako bariery między Au i Ag. Likwidują one całkowicie, lub znacznie redukują, procesy migracji i wytwarzania porów.

### Duże powierzchnie metaliczne

Nierównomierne pokrycie folii LTCC warstwą metaliczną może powodować nierównomierny skurcz folii w czasie procesu współwypalania. Efekt ten przedstawiono



Rys. 4.17. Terminologia stosowana w modułach LTCC [49]  
(za zgodą DuPont Microcircuit Materials)

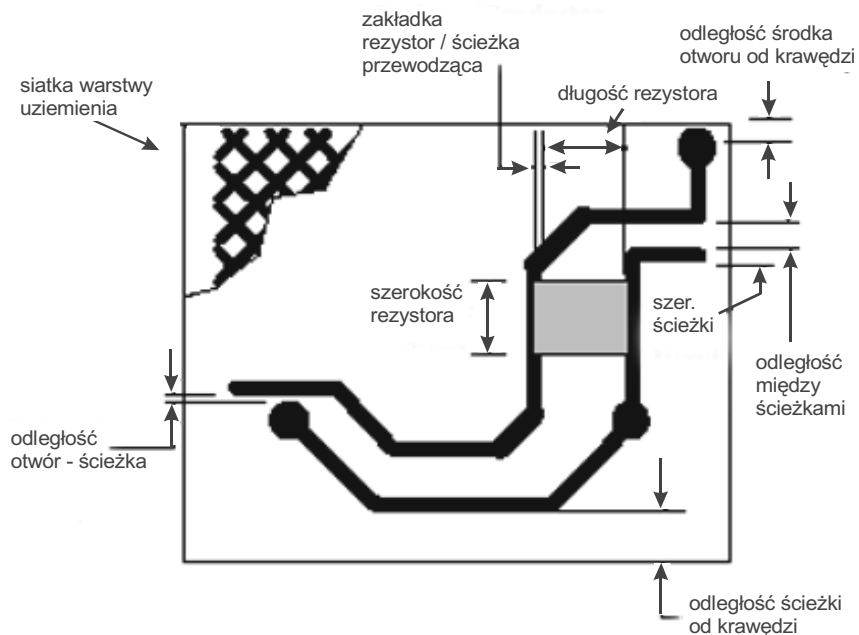


Rys. 4.18. Terminologia stosowana w modułach LTCC – przekrój [49]  
(za zgodą DuPont Microcircuit Materials)

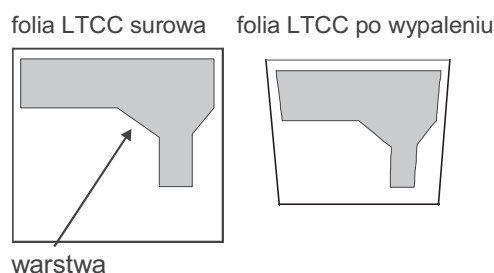
na rysunku 4.20. Jeżeli nie da się uniknąć takiego przypadku, to dodaje się dodatkowe folie LTCC (nazywane foliami martwymi *dummy layers*), które umożliwiają zminimalizowanie niepożądanego efektu.

### Folie dielektryczne

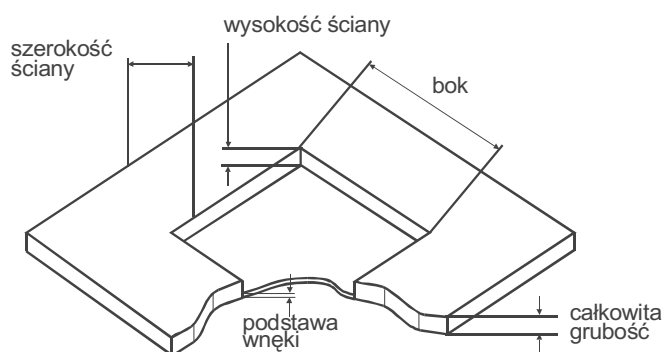
Folie *green tape* są dostępne o różnych grubościach. W jednym module LTCC można stosować różne folie w celu osiągnięcia odpowiedniej grubości modułu lub uzyskania



Rys. 4.19. Terminologia stosowana w modułach LTCC – widok z góry [49]  
(za zgodą DuPont Microcircuit Materials)



Rys. 4.20. Wpływ nierównomiernego pokrycia folii LTCC warstwą metaliczną na jej skurcz [49]  
(za zgodą DuPont Microcircuit Materials)



Rys. 4.21. Wnęka w module LTCC [49]  
(za zgodą DuPont Microcircuit Materials)

obszarów o różnych właściwościach elektrycznych (np. folie o różnych przenikalnościach dielektrycznych). Folie należy składać symetrycznie, aby zminimalizować efekt niesymetrycznego skurczu w czasie procesu współwypalania.

### Skurcz

Tolerancja skurczu folii *green tape* wynosi  $\pm 0,3\%$ . W czasie etapu projektowania modułu LTCC należy uwzględnić ewentualne rozrzuty położzeń wynikające z nierównomiernego skurczu. Na rysunku 4.22 pokazano, jaki wpływ ma uwzględnienie skurczu folii na projekt modułu LTCC. Przedstawiono najgorszy z możliwych przypadków, w którym stosuje się sitodruk na wypalanej strukturze LTCC (*post fire printing*) i jest konieczne pokrycie całego otworu. W tym przykładzie kwadratowy moduł LTCC o boku 15 cm ma wykonany otwór o średnicy 200  $\mu\text{m}$  w odległości 10 cm od środka płytki. W tym przypadku należy wykonać warstwę przewodzącą pokrywającą o boku 600  $\mu\text{m}$  (kwadratową lub okrągłą), aby uwzględnić wszystkie możliwe położenia otworu.

Na rysunku 4.23 przedstawiono zależność minimalnych wymiarów warstwy przewodzącej pokrywającej otwór o średnicy 200  $\mu\text{m}$  od odległości od centrum modułu

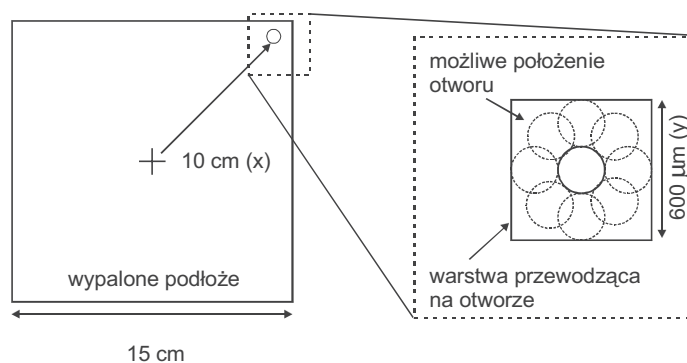
Tabela 4.6. Podstawowe dane do projektowania układów LTCC [45,49,80]

Materiał przewodzący	Ag zagrzebane	3,3 mΩ/□ (6 μm)
	Au zagrzebane	5,0 mΩ/□ (6 μm)
	Ag powierzchniowe	2,0 mΩ/□ (15 μm)
	PdAg powierzchniowe	15–40 mΩ/□ (15 μm)
	Au powierzchniowe	4,0 mΩ/□ (8 μm)
	PtAu powierzchniowe	80 mΩ/□ (15 μm)
	Cu powierzchniowe	2,0 mΩ/□ (15 μm)
Wartości rezystancji	0,1 Ω–1 MΩ	
Szerokość/odstęp/rozstaw ścieżek (min.)	Standard	wykonanie specjalne
	200/250/400 μm	100/100/200 μm
	Średnica/odstęp/rozstaw otworu	125/300/300 μm
	250/500/500 μm	100/100/200 μm
	Warstwa przewodząca na otworze	1 × <i>via</i> φ
	2 × <i>via</i> φ	1 × <i>via</i> φ
	Średnica otworu cieplnego/odstęp	600/1250 μm
250/500 μm	600/1250 μm	
Głębokość okna (max.)	1000 μm	2500 μm
Wymiary okna min./max.	1000/bez ogr. μm	500/bez ogr. μm
Wymiary układu	≤12,5 cm × 12,5 cm	≤20 cm × 20 cm
Grubość układu min.	1 mm	0,4 mm

z rys. 4.22. Na żadnym z danych rysunków nie uwzględniono błędów wynikających z jakości procesu sitodruku.

### Projektowanie otworów

Otworki połączeniowe przez kilka warstw powinny być wykonywane w formie schodkowej (rys. 4.18), przynajmniej co dwie warstwy, aby zminimalizować nierównomier-



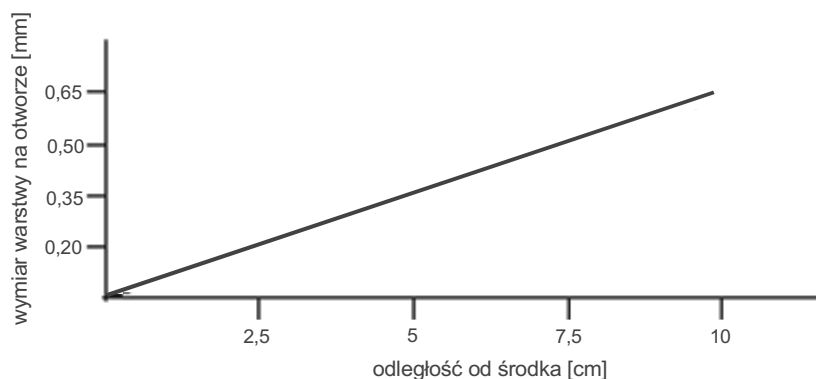
Rys. 4.22. Przykład projektowania warstwy przewodzącej na otworze po uwzględnieniu skurczu folii [49] (za zgodą DuPont Microcircuit Materials)

Tabela. 4.7. Parametry projektowania dla materiałów firmy DuPont [49]  
(za zgodą DuPont Microcircuit Materials)

Właściwość	Standard (wymiary po wypaleniu)	Wykonanie specjalne
Ilość folii w module	20	100
Wymiary podłoża X,Y	15×15 cm	45×45 cm
Grubość podłoża <10×10 cm >10×10 cm	625 μm min. 1,25 mm min.	95 μm 500 μm
Szerokość/odstęp ścieżek Współwypalane Wypalane	125 μm / 125 μm min. 175 μm / 175 μm min.	100 μm / 100 μm 125 μm / 125 μm
Średnica warstwy przewodzącej na otworze	2× średnica otworu	1× średnica otworu
Odległość między otworami min.	3× średnica otworu	2× średnica otworu
Odległość środka otworu od krawędzi	3× średnica otworu	
Odległość warstwy przewodzącej na otworze od ścieżki przewodzącej	125 μm min.	100 μm
Odległość między środkami otworów w układzie schodkowym min.	2× średnica otworu	brak otworów schodkowych
Otwory termiczne średnica otworu / odległość Opcja I Opcja II	250 μm / 750 μm min 375 μm / 1000 μm min	szczeliny termiczne
Odległość ścieżek masa/zasilanie/sygnal do krawędzi (min.)	250 μm	0
Pokrycie masa/zasilanie	70% max (siatka ścieżka/przerwa 250 μm)	100%
Otwory łączące płaszczyzny masa/zasilanie		
Otwory sygnałowe	1250 μm min.	625 μm
Otwory termiczne	1750 μm min.	1250 μm
Rezystory wypalane oddzielnie ( <i>Post Fired Resistors</i> )		
Długość	750 μm min.	250 μm
Szerokość	750 μm min.	250 μm
Zakładka	125 μm min.	125 μm

ności powierzchni zewnętrznej warstwy. Otwory termiczne wykonuje się przez wszystkie warstwy w postaci otworów kominowych (rys. 4.17). W przypadku zbyt dużych nierówności na powierzchni w celu poprawy jej jakości można zastosować proces szlifowania.





Rys 4.23. Zależność minimalnych wymiarów warstwy przewodzącej pokrywającej otwór o średnicy 200  $\mu\text{m}$  od odległości od centrum modułu z rys. 4.22 [49] (za zgodą DuPont Microcircuit Materials)

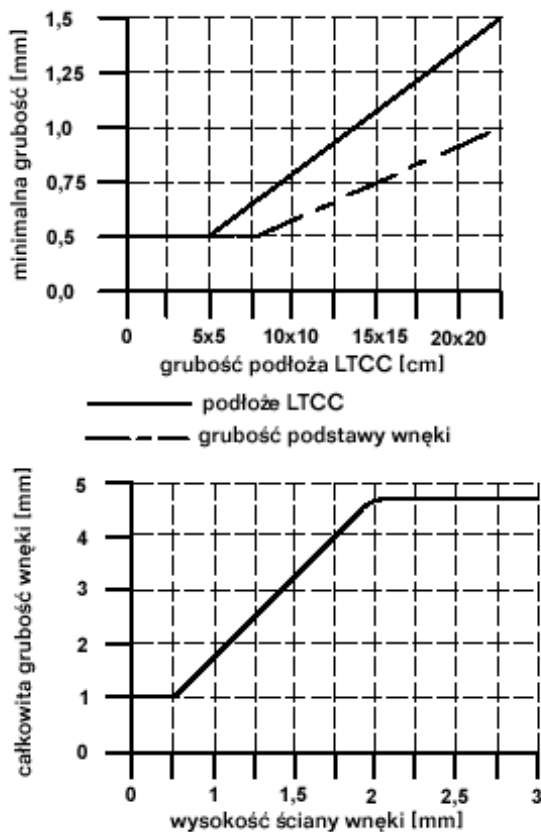
### Projektowanie kanałów i wnęk

Definicja wnęki: bok  $> 5$  mm, dół zaślepiiony, głębokość nie przekracza 3 mm (rys. 4.21, 4.24). Minimalny promień naroża wnęki:

- 0,125 mm dla wnęk o boku  $< 12,5$  mm,
- 0,25 mm dla wnęk o boku od 12,5 mm do 25 mm,
- 0,5 mm dla wnęk o boku  $> 25$  mm.

Tabela 4.8. Właściwości ceramiek *green tape* DP 951 i DP 943 firmy DuPont [36,49]

Parametry	DP 951	DP 943	High TCE tape
Grubość po wypaleniu [ $\mu\text{m}$ ]	951AT/951A2/951AX 95 / 137 / 211	112	
Względna przenikalność dielektryczna (1 MHz)	7,8	7,4	8,4
Rezystancja izolacji (100 VDC)	$10^{12} \Omega$		
Napięcie przebicia [kV/25 $\mu\text{m}$ ]	$> 1$	$> 1$	
Stratność (1 MHz) [%]	0,15	0,1	0,32
Skurcz (x,y) / (z)	12,7% $\pm$ 3% / 15% $\pm$ 0,5%		14,2% $\pm$ 0,3%
Gęstość [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	3,1	3,2	
Chropowatość powierzchni	$< 0,25 \mu\text{m}$		
Wygięcie [ $\mu\text{m}/\text{cm}$ ]	$< 30$	$< 3$	
Wytrzymałość na złamanie [MPa]	320		250
Moduł Younga [GPa]	152		
Współczynnik rozszerzalności [ $\times 10^{-6}/\text{K}$ ]	5,8	4,5	11
Przewodność cieplna [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ]	3,0	4,8	
Ciepło właściwe: w temp. 100 °C/150 °C/300 °C [ $\text{J}/\text{g}\cdot^\circ\text{C}$ ]	0,825/0,879/0,989		



Rys. 4.24. Projektowanie kanałów i wnęk [49]  
(za zgodą DuPont Microcircuit Materials)

Powierzchnia wnęki nie powinna przekraczać 50% całości, jeżeli podstawa wnęki nie jest większa lub równa 0,625 mm. Różne techniki wykonywania kanałów i wnęk opisano w pracach [12, 116, 115, 187].

Właściwości ceramiki *green tape* DuPont 951 zamieszczono w tabeli 4.8. Kilka past przewodzących opartych na Au lub Ag, dostępnych dla modułów LTCC wykonanych z folii DP 951, zamieszczono w tabeli 4.9. Wykorzystanie odpowiedniej pasty zależy od konkretnego projektu i wymaganych właściwości modułu. Pasty 5731 są zalecane do wykorzystania na powierzchni modułu LTCC w systemie mieszanym (Ag wewnątrz, Au na powierzchni). We wszystkich systemach Ag z pasty 6148 wykonywane są wewnętrzne warstwy uziemienia ze względu na bardzo dobrą przyczepność. Na wewnętrzne ścieżki sygnałowe stosuje się pastę 6142. Właściwości ceramik *green tape* DP 951 i DP 943 [49] firmy DuPont zamieszczono w tabeli 4.8. W tabeli podano rów-

Tabela 4.9. Właściwości warstw przewodzących dostosowanych do ceramiki *green tape* DP 951 [49] (za zgodą DuPont Microcircuit Materials)

Pasta	Opis	$R_{\square}$ [m $\Omega$ / $\square$ ]	$d$ [ $\mu$ m]	Zastosowanie
5731	współwypalane Au	5	9	warstwy wewnętrzne i zewnętrzne, montaż drutowy Au
5734	współwypalane Au	<5	9	warstwy wewnętrzne i zewnętrzne, montaż drutowy Au
5738	współwypalane Au – wypełnianie otworów	< 5	grubość folii	wypełnianie otworów
5739	współwypalane Pt/Au	35	10	warstwy zewnętrzne współwypalane, lutowanie SnPb
5742	współwypalane Au	5	9	warstwy wewnętrzne i zewnętrzne współwypalane, montaż drutowy Au/Al
6138	Pd/Ag – wypełnianie otworów		grubość folii	wypełnianie otworów przejściowych
6141D	Ag – wypełnianie otworów	<3	grubość folii	wypełnianie otworów
6146	współwypalane Pd/Ag	30	9	warstwy zewnętrzne współwypalane, lutowanie Sn/Pb
6148	współwypalane Ag	9	8	warstwa przewodząca Ag wewnętrzna
5715	wypalane <i>post fired</i> Au	<5	9	warstwa przewodząca Au zewnętrzna, wypalana oddzielnie, montaż drutowy Au
5725	wypalane <i>post fired</i> Au	6	9	warstwa przewodząca Au zewnętrzna, wypalana oddzielnie, montaż drutowy Al
4597	wypalane <i>post fired</i> Pt/Pd/Au	80	15	warstwa przewodząca Pt/Pd/Au, zewnętrzna wypalana oddzielnie, lutowanie Sn/Pb
9910	wypalane <i>post fired</i> Pt/Au	80	15	warstwa przewodząca Pt/Au, wypalana oddzielnie, lutowanie Pb/In
7484	wypalane <i>post fired</i> Pd/Ag	20	15	warstwa przewodząca Pd/Ag, wypalana oddzielnie, lutowanie Sn/Pb
5704	wypalany <i>post fired</i> dielektryk		12	dielektryk
9615	współwypalany dielektryk		30	dielektryk

$R_{\square}$  – rezystancja powierzchniowa (zależy od grubości wypalanej warstwy),

$d$  – grubość warstw (podana orientacyjnie).

niez właściwości nowej ceramiki tej firmy, przeznaczonej do współpracy z obwodami drukowanymi PWB [36].

## 5. ZASTOSOWANIE LTCC

### 5.1. Mikrofałe

Układy LTCC od wielu lat są stosowane w układach mikrofalowych. Powodem tego są bardzo dobre właściwości elektryczne oraz możliwość wykonania różnych układów elektrycznych w zintegrowanej formie w jednym wielowarstwowym module.

Rynek układów mikrofalowych bardzo szybko się zwiększa. Moduły LTCC będą mogły znaleźć zastosowanie w najszybciej rozwijających się kierunkach urządzeń mikrofalowych. Można do nich zaliczyć [8, 9]:

- telefony komórkowe (0,9–2 GHz), w 1999 r. było 283 mln użytkowników telefonów, planuje się, że w 2003 r. ilość ta osiągnie 1 mld,
- lokalne sieci Bluetooth (2,4 GHz, zakres 10 m),
- satelitarny system pozycjonowania GPS (*Global Positioning System* 1,6 GHz) – normy będą wymagały instalowania GPS we wszystkich telefonach komórkowych,
- systemy: Multipoint Multi-Channel Distribution Systems (MMDS – 5,8 GHz) – tanie przyłącze lokalne i Local Multipoint Distribution Systems (LMDS – 24–40 GHz),
- połączenia satelitarne – globalny internet (30–40 GHz).

Materiały LTCC mają odpowiednie właściwości elektryczne, umożliwiające stosowanie w układach mikrofalowych [3, 7–9, 26, 96, 121, 129, 139, 143, 166, 167, 179, 181, 194]:

- przenikalność dielektryczna folii LTCC jest bardzo różna – od  $\varepsilon = 3,9$  (układy o bardzo dużej szybkości działania), do średnich (układy rezonansowe) i dużych (kondensatory),
- $\text{tg } \delta \approx 1 \cdot 10^{-3}$  (1 GHz),
- stabilność temperaturowa częstotliwości rezonansowej  $T_f < 10$  ppm/K,
- stała grubość folii LTCC lepsza niż  $\pm 5\%$  (istotne dla częstotliwości rezonansowej i impedancji linii),
- bardzo mała rezystywność ścieżek przewodzących, nawet od  $2 \text{ m}\Omega/\square$  [8],
- możliwość wykonania precyzyjnych ścieżek o szerokościach  $100 \mu\text{m}$  ( $50 \mu\text{m}$  techniką fotolitografii),
- wykonywanie otworów połączeniowych (*vias*) o średnicach  $\approx 100 \mu\text{m}$ ,
- możliwość wykonywania struktur 3D typu MCIC.

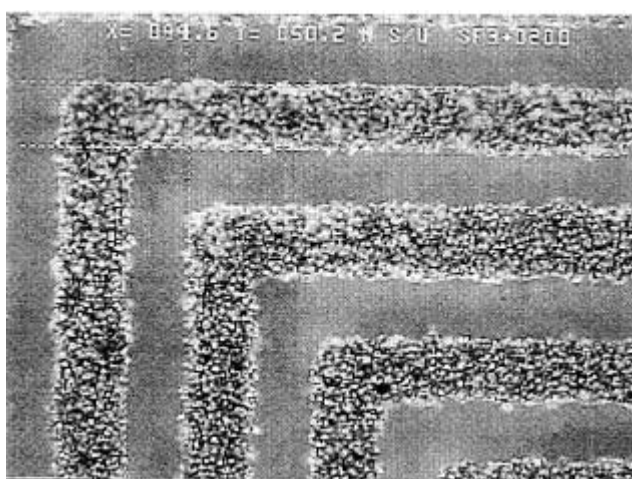


Rys. 5.1. Zdjęcie ścieżek przewodzących Ag wykonanych za pomocą sitodruku precyzyjnego (szerokość ścieżek 75  $\mu\text{m}$ ) [7]

Przykłady wykonania precyzyjnych ścieżek przedstawiono na rys. 5.1 i 5.2. Właściwości dielektryczne różnych materiałów LTCC zestawiono w tabeli 5.1. Bardziej szczegółowe informacje na temat najnowszej bezołowiowej folii 943-A5 firmy DuPont zamieszczono w tabeli 5.2.

Na rysunku 5.3 porównano zależność tłumienia od częstotliwości dwóch różnych systemów LTCC DP 951 i DP 943 z elektrodami Ag oraz układu cienkowarstwowego Au na podłożu 99%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i układu PWB z elektrodami Cu.

Typowe konfiguracje podstawowych elementów elektronicznych układów mikrofalowych wykonywanych w technologii LTCC przedstawiono na rys 5.4 i rys 5.5.



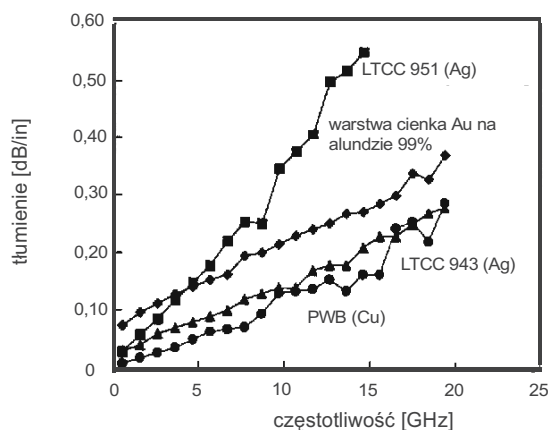
Rys. 5.2. Zdjęcie ścieżek przewodzących Ag wykonanych za pomocą sitodruku i fotolitografii (szerokość ścieżek 50  $\mu\text{m}$ ) [7]

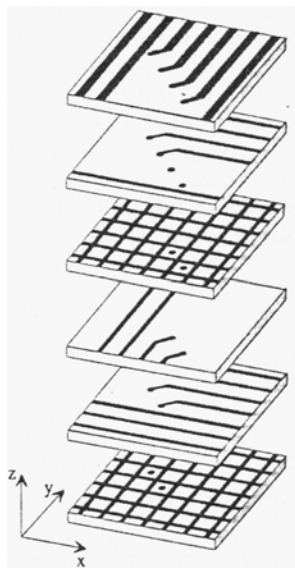
Tabela 5.1. Właściwości dielektryczne różnych folii LTCC i materiałów podłożowych [44, 185]

Materiał	$\epsilon$	$\text{tg } \delta$
FR 4	4	0,025
99,6% $\text{Al}_2\text{O}_3$	9,9	0,0004
Heraeus CT800	7,68	0,0039
DuPont 951	7,65	0,0046
EMCA T880B	7,94	0,0063
Motorola T 2000	9,09	0,0026
DuPont 943	7,63	0,0005
Ferro A6	6,03	0,0006
Terashi Y. [185]	4,8	0,0007

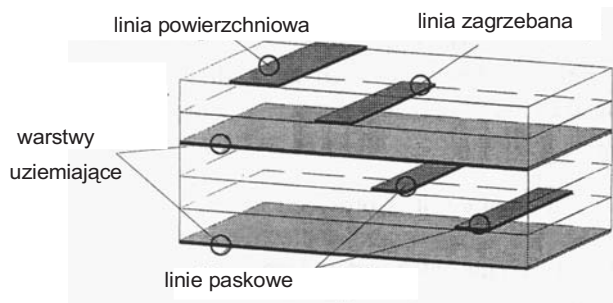
Tabela 5.2. Właściwości elektryczne folii LTCC

Parametry	DP 943-A5	Ferro A6-M	Ferro A6-C	Terashi [185]
$\epsilon$	7,4 (10GHz)	5,75-6,05 (100 MHz)	6,0-6,07 (100 MHz)	4,8 (60 GHz)
$\text{tg } \delta$	0,001 (10 GHz)	< 0,002 (100 MHz)	< 0,005 (100 MHz)	0,0008 (60 GHz)
Napięcie przebicia	> 1 kV/25 $\mu\text{m}$			
Wsp. rozsz. cieplnej [ppm/K]	4,5			5,5
Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	3,2			2,6
Wygięcie [ $\mu\text{m}/\text{cm}$ ]	<3			
Gładkość powierzchni [ $\mu\text{ in}$ ]	<40			
Przewodność cieplna [W/(m·K)]	4,8			
Grubość po wypaleniu [ $\mu\text{m}$ ]	112			

Rys. 5.3. Porównanie tłumienności linii paskowych 50  $\Omega$  wykonanych różnymi technikami [1a]



Rys. 5.4. Możliwe położenia warstw sygnałowych i uziemiających w strukturze LTCC [190a]

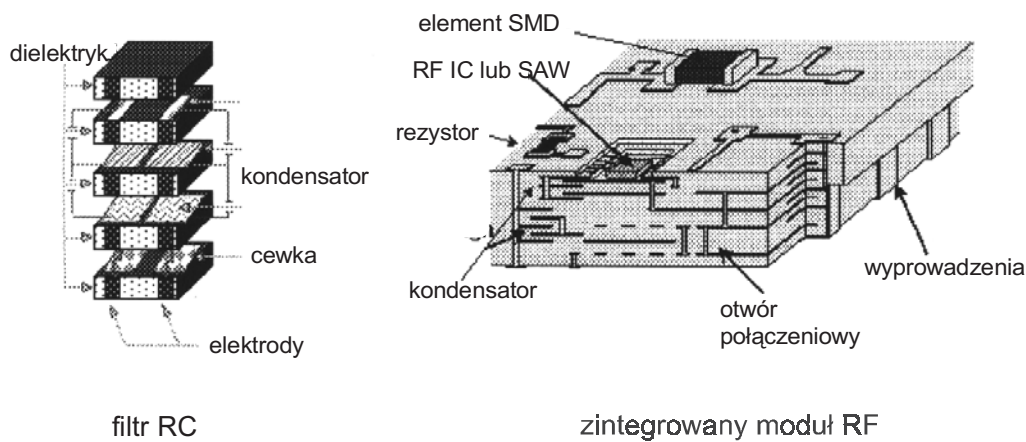


Rys. 5.5. Typy linii transmisyjnych w układach LTCC [136a]

W układach LTCC można wykorzystywać zagrzebane i powierzchniowe elementy bierne (rezystory, kondensatory, cewki), których konstrukcje opisano w rozdz. 5.2. Właściwości zagrzebanych rezystorów w zakresie RF przedstawiono w pracach [35, 101]. Technika LTCC można wykonać kompletny moduł mikrofalowy zawierający zagrzebane i powierzchniowe elementy bierne. Przykład zintegrowanego modułu RF firmy Murata pokazano na rys. 5.6.

Firma Murata [134] wyprodukowała od 1989 r. ponad 950 milionów elementów wielowarstwowych LTCC stosowanych w zakresie mikrofal (filtry LC, sprzęgacze, anteny itp.). Przy projektowaniu układów LTCC w firmie Murata przyjmuje się następujące założenia projektowe [33]:

Podłoże	długość i szerokość	max 10 mm
	grubość	1–2 mm
	grubość folii	50 $\mu\text{m}$ (25, 100, 150 $\mu\text{m}$ )
Ścieżka przewodząca	szerokość/odstęp	100 $\mu\text{m}$ / 100 $\mu\text{m}$
	średnica otworu	130 $\mu\text{m}$
Rezystor	zakres	50 $\Omega$ –100 k $\Omega$
	tolerancje	$\pm 5\%$
	TWR	$\pm 300$ ppm/K
Zagrzebane kondensatory	pojemność C	1 pF/mm <sup>2</sup> $\times$ liczba warstw
	tolerancja	$\pm 5\%$
	TWP	80 $\pm 20$ ppm/K
Indukcyjność	impedancja	100 $\Omega$ max
	indukcyjność	100 nH max



Rys. 5.6. Zintegrowany moduł RF wykonany techniką LTCC [134]  
(za zgodą Murata Electronics)

## 5.2. Wielostrukturalne układy scalone (MCIC – *Multichip Integrated Circuits*)

Elektroniczne elementy bierny stanowią bardzo istotne części składowe układów elektronicznych. W 1997 r. i 2000 r. wytworzono na świecie elementy bierny o łącznej wartości odpowiednio 18 mld \$ i 25 mld \$ [23]. W 1997 r. wyprodukowano łącznie około 1 bilion rezystorów i kondensatorów [38]. Nowoczesne układy elektroniczne, zwłaszcza komputery i przenośne środki komunikacji bezprzewodowej, zawierają coraz większy procent elementów biernych [23, 37, 38, 74, 87, 98, 109, 123, 127, 142, 147, 201, 204, 212] W tabelach 5.3 [201] i 5.4 [157] przedstawiono orientacyjne informacje na ten temat.

W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat zmieniły się technologie wykonywania elementów biernych. Początkowo elementy bierny dołączano do obwodów drukowanych metodą przewlekania, potem wykonywano hybrydowe układy cienko- i grubowarstwowe. Po pojawieniu się techniki SMT elementy SMD dołączano techniką montażu po-

Tabela 5.3. Udział elementów biernych w różnych urządzeniach elektronicznych [201]

Produkt	Łączna liczba elementów elektronicznych	Stosunek liczby elementów biernych do czynnych
Komputer typu laptop	900	6:1
Komputer typu PC	1285	15:1
Telefon komórkowy	380	21:1



Tabela 5.4. Liczba elementów biernych na płycie głównej PC [157]

Procesor	typ 486	Pentium 120 MHz	Pentium 200 MHz	Pentium II 330 MHz	Pentium III
Liczba elementów biernych	165	369	593	1473	2800

wierzchniowego. W latach dziewięćdziesiątych zaczęto wykonywać elementy bierne wewnątrz struktur MCM. Wprowadzono następujące definicje elektronicznych elementów biernych [38, 46, 170, 199, 200]:

- pojedynczy element bierny (rezystor, kondensator, cewka) lutowany lub dołączany techniką SMT (*discrete passive device*),
- kilka elementów biernych o jednej lub wielu funkcjach zamkniętych w jednej obudowie SMT (zwykle 4–12 elementów) (*arrays network*),
- wiele elementów biernych o różnych funkcjach oraz kilka elementów czynnych w jednej obudowie SMT lub jako układ Chip Scale Package (CSP) (*Integrated Passive Device*),
- elementy bierne wykonane na podłożu (lub na układzie LTCC) (*Integrated Passive*),
- elementy bierne wykonane wewnątrz modułu MCM jako elementy zagrzebane (*Integral Passives or Embedded Passives*).

Coraz więcej elementów biernych jest scalonych w sieci lub jest zintegrowanych z układami MCM [38]. W 1997 r. 55 mld rezystorów i kondensatorów zintegrowano w 11 mld sieci (*arrays network*). W następnych latach liczba ta wzrosła do 75 mld RC zintegrowanych w 15 mld sieci w 1999 r. i odpowiednio, 160 mld RC w 32 mld sieci w roku 2000. Prognozowane ilości to 345 mld elementów RC zastąpionych przez 69 mld sieci w 2003 r. i 900 mld zastąpionych przez 150 mld sieci w roku 2009.

Pierwsza generacja układów LTCC zawierała sieć ścieżek przewodzących wykonanych wewnątrz struktury, elementy bierne grubowarstwowe wykonane na powierzchni techniką *postfiring* (wypalanie dodatkowe) oraz inne układy dołączane do zewnętrznych powierzchni modułu.

W drugiej generacji układów LTCC elementy bierne i mikrofalowe wykonuje się dodatkowo wewnątrz jako tzw. elementy zagrzebane (są to tzw. układy MCIC – *Multi-chip Integrated Circuits*). Powstanie nowych układów typu MCIC stanowiło istotny krok w kierunku poprawy właściwości elementów i dalszego zwiększenia produkcji układów LTCC [85].

Elementy bierne wykonane w układzie MCIC mają wiele zalet. Do najważniejszych należą:

- eliminacja zewnętrznych elementów biernych,
- eliminacja wielu połączeń drutowych i lutowanych,
- zmniejszenie wymiarów układu,
- zwiększenie gęstości sieci połączeń elektrycznych,
- zwiększenie niezawodności,

- poprawa właściwości elektrycznych (mniejsze odległości między elementami, stąd większa szybkość działania układów, mniejsze rezystancje połączeń),
- zmniejszenie kosztów.

Według [109] obecne zapotrzebowanie na elementy bierne wygląda następująco:

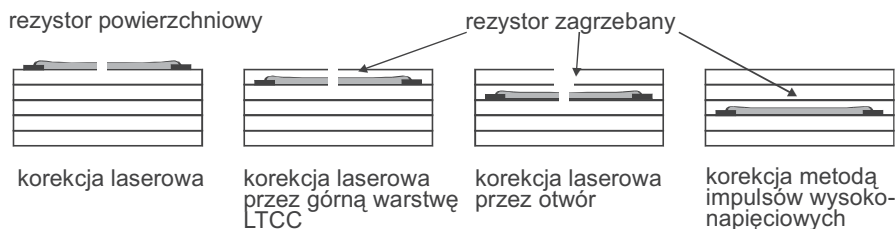
- rezystory: moc  $\leq 50$  mW (90%), rezystancja  $\leq 1$  k $\Omega$  (85%), tolerancja  $\pm 5\%$  (większość),
- kondensatory:  $C \leq 10$  nF (60%),  $C \geq 1$   $\mu$ F (15%), tolerancja  $\pm 5\%$  (większość).

Technologią LTCC można wykonać zagrzebane rezystory, kondensatory, cewki i elementy mikrofalowe.

Konstrukcję rezystorów typu 2D umieszczonych na powierzchni i wewnątrz struktury LTCC zamieszczono na rys. 5.7 [189]. Na rysunku zamieszczono informacje o możliwości korekcji laserowej przez jedną folię LTCC lub przez specjalnie wykonany w foliach otwór.

W przypadku rezystorów zagrzebanych na większej głębokości istnieje możliwość korekcji rezystancji jedynie za pomocą impulsów wysokonapięciowych. W czasie korekcji laserowej zwiększa się rezystancja korygowanej warstwy. Metoda impulsów wysokonapięciowych powoduje wzrost lub zmniejszanie rezystancji w zależności od rezystywności pasty, materiału rezystywnego i parametrów impulsów napięciowych. Zależności te oraz stabilności korygowanych rezystorów zamieszczono w publikacjach [47, 52, 54, 55, 57, 61, 62, 67, 113, 137, 190, 192, 193].

W technologii LTCC rezystory wykonywane są jako powierzchniowe lub zagrzebane [2, 33, 35, 43, 55, 61, 63, 65, 76, 78, 79, 82, 91, 97, 101, 108, 119, 131, 135, 161, 162, 164, 183, 189, 193, 213]. Rezystory powierzchniowe można wykonywać w zakresie rezystancji powierzchniowych od 10  $\Omega/\square$  do 1 M $\Omega/\square$ . Rezystory zagrzebane – od 30  $\Omega/\square$  do 100 k $\Omega/\square$ . Wartości te zależą od stosowanego rodzaju past. Tolerancje rezystorów powierzchniowych wynoszą od 1% do 2%, dla rezystorów zagrzebanych od 10% do 20% (dla małych rezystancji powierzchniowych) i od 30% do 50% (powyżej 10 k $\Omega/\square$ ). Stosując korekcję oraz starzenie wstępne można wykonać rezystory stabilne termicznie i o małych szumach [175]. Temperaturowe charakterystyki zależności rezystancji od temperatury rezystorów zagrzebanych, powierzchniowych (moduły LTCC) i rezystorów grubowarstwowych wykonanych na podłożach alundowych są bardzo podobne [53, 83].



Rys. 5.7. Sposoby rozmieszczenia rezystorów w strukturze LTCC oraz metody korekcji [189]

Kondensatory w układach LTCC są wykonywane w wersji powierzchniowej lub zagrzebanej [31–33, 42, 63, 66, 91, 108, 119, 125, 133, 135, 153, 162, 174, 189, 210, 213]. Zagrzebane kondensatory mogą być umieszczone w bezpośredniej bliskości zagrzebanych rezystorów lub zagrzebanych indukcyjności, tworzą sieci RC i RLC.

W technologii LTCC stosuje się dwie wersje konstrukcyjne kondensatorów [100]:

- Dwuwymiarowe (2D) – kondensatory o największych pojemnościach do 3000 pF i właściwościach typu X7R. Łącząc kondensatory równoległe można otrzymać większe pojemności.

- Trójwymiarowe (3D) – kondensatory o małych i średnich pojemnościach, charakteryzujące się wysokim napięciem przebicia i charakterystykami typu X7R i NPO. Pojedynczy kondensator osiąga pojemności do 200 pF. W celu zwiększenia pojemności kondensatory łączy się równoległe. Kondensatory powierzchniowe mogą mieć 5 razy większą pojemność od kondensatorów zagrzebanych. Właściwości elektryczne kondensatorów wykonanych z folii LTCC i past różnych producentów przedstawiono w tabeli 5.4 [100].

Sposoby wykonywania kondensatorów w strukturach LTCC przedstawiono na rys. 5.8 [189]. Parametry zagrzebanych kondensatorów wykonanych techniką LTCC można znaleźć w publikacjach [125, 128, 135, 189], a ich charakterystyki temperaturowe w pracach [51, 53].

W strukturach LTCC cewki są wykonywane w postaci spiral, meandrów lub pierścieni [33, 63, 73, 124–126, 135, 138, 162, 174, 189, 210, 213]. W niektórych przypadkach zwiększa się grubość warstw przewodzących do 100  $\mu\text{m}$  w celu zwiększenia

Tabela 5.5. Właściwości kondensatorów wykonanych w technologii LTCC [100, 176]  
(kondensatory z elektrodami ze złota charakteryzują się o 20 do 30% niższą pojemnością niż kondensatory z elektrodami ze srebra)

Właściwości elementu	System Ferro		System DuPont		System EMCA	
	2D	3D	2D	3D	2D	3D
Kondensator	2D	3D	2D	3D	2D	3D
Typ dielektryka	X7R	NPO	X7R	NPO	X7R	NPO
Stała dielektryczna $\epsilon$	300	5–6	500	7–8	700	6–7
Zakres pojemności [pF] *	10–4000	1–100	10–6800	1–200	10–9500	1–150
Max. pow. elektrod [ $\text{mm}^2$ ]	49	198	49	198	49	198
$\text{tg } \delta$ [%]	< 2	< 0,3	< 2	< 0,3	< 2	< 0,3
Rezystancja izolacji [ $\Omega$ ] (100 $V_{\text{DC}}$ )	>10 <sup>11</sup>	>10 <sup>12</sup>	>10 <sup>11</sup>	>10 <sup>12</sup>	>10 <sup>11</sup>	>10 <sup>12</sup>
Napięcie przebicia [ $V_{\text{DC}}$ ] (min.)	>200	>500	>200	>500	>200	>500
Tolerancja pojemności [%]	$\pm 20$	$\pm 20$	$\pm 20$	$\pm 10$	$\pm 20$	$\pm 10$
Elektrody	Ag lub Au	Ag lub Au	Ag lub Au	Ag lub Au	Ag lub Au	Ag lub Au

\* Elektrody Ag.

## 1. Zwykła folia LTCC

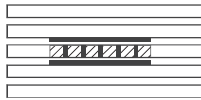
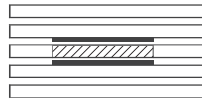
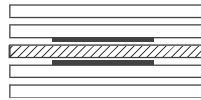
a) kondensator planarny powierzchniowy lub zagrzebany



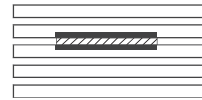
b) kondensator wielowarstwowy

2. Materiał o wysokim  $\epsilon$ 

a) otwory wypełnione pastą lub folią

b) wstawiona warstwa o wysokiej  $\epsilon$ c) warstwa folii LTCC o wysokiej  $\epsilon$ 

d) nadrukowana warstwa dielektryczna

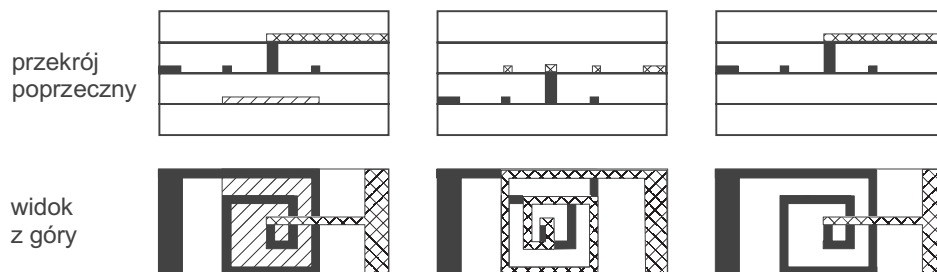


Rys. 5.8. Konstrukcje kondensatorów w strukturze LTCC [189]

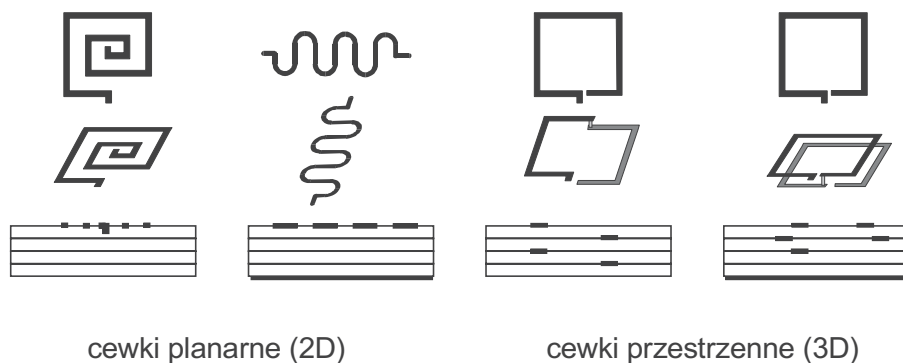
dobroci  $Q$  i dopuszczalnego natężenia prądu. W celu poprawy właściwości indukcyjnych w zakresie małych częstotliwości stosuje się niskotemperaturowe ferryty [77]. Zastosowanie ferrytów zwiększa indukcyjność przeszło 20 razy w porównaniu do cewek produkowanych z zastosowaniem standardowych dielektryków LTCC lub grubowarstwowych.

Konstrukcję cewek wykonywanych technologią LTCC zamieszczono na rys. 5.9 [125] i rys. 5.10 [189]. Parametry wykonanych cewek oraz ich układy zastępcze można znaleźć w publikacjach [124, 125, 128, 135, 136, 189, 191].

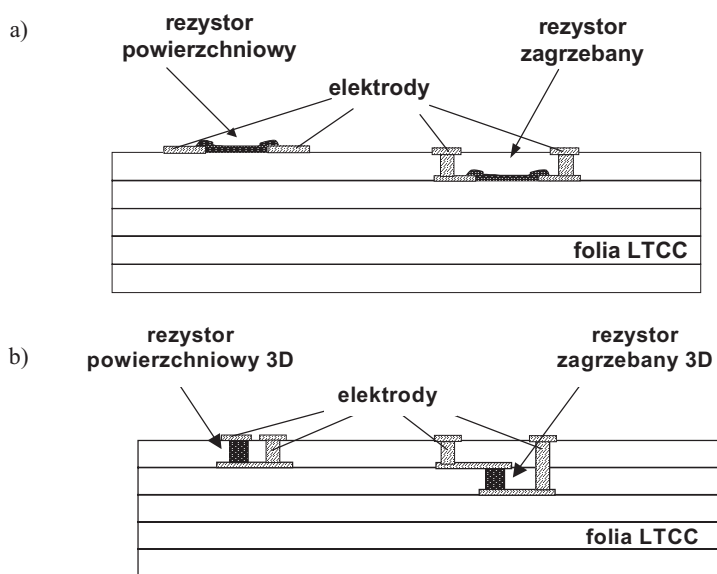
Większe możliwości integracji elementów biernych wykonanych techniką LTCC daje konstrukcja typu 3D, w której wszystkie wymiary są porównywalne ze sobą. Konstrukcję planarną (2D) i przestrzenną (3D) pokazano na rys. 5.11 [54]. Elementy wykonano w typowych otworach w folii LTCC normalnie wypełnianych pastą przewodzącą. W publikacji [54] przedstawiono parametry elektryczne wykonanych w ten sposób rezystorów, termistorów i warystorów. Wymiary elementów były określone przez średnice otworu i grubość folii LTCC. Właściwości elektryczne elementów 3D są podobne do wła-



Rys. 5.9. Różne konstrukcje cewek w strukturze LTCC [125]



Rys. 5.10. Konstrukcje cewek wykonywanych technologią LTCC [189]

Rys. 5.11. Konstrukcje elementów biernych w modułach LTCC:  
a) planarna (2D), b) objętościowa (3D) [54]Tabela 5.6. Porównanie rezystywności w [ $\Omega \cdot m$ ] rezystorów 2D i 3D wykonanych techniką LTCC [54]

Elektroda	Elektrody Ag				Elektrody PdAg
	2D-B	2D-S	3D-B	3D-S	
Rezystor					
FX 87-102	$2,07 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,62 \cdot 10^{-2}$	$1,71 \cdot 10^{-2}$	$4,60 \cdot 10^{-2}$
FX 87-104B	2,94	1,75	0,90	1,92	2,75

S – element powierzchniowy (*surface*), B – element zagrzebany (*buried*)

Tabela 5.7. Porównanie rezystywności  $\rho$  i stałej  $B$  termistorów 2D i 3D wykonanych techniką LTCC [54]

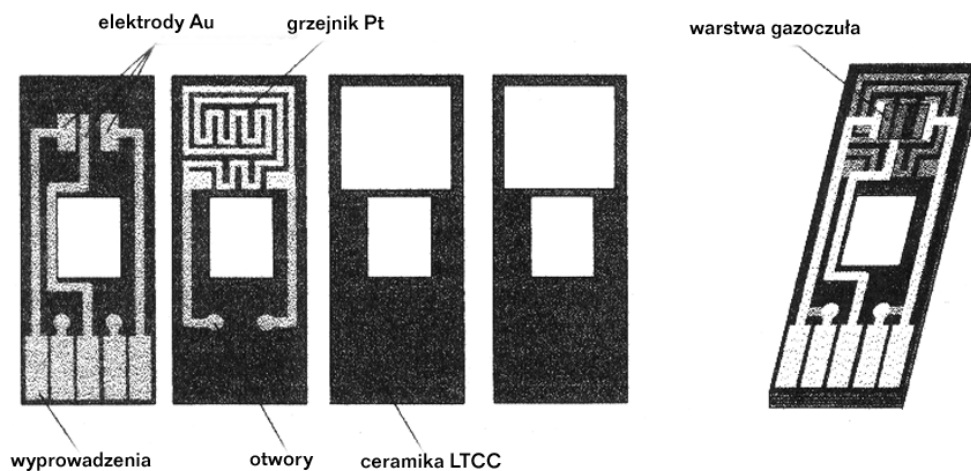
Konfiguracja	Elektroda Ag				Elektroda PdAg		Elektroda PdAg na $\text{Al}_2\text{O}_3$
	2D-B	2D-S	3D-B	3D-S	3D-B	3D-S	
$\rho$ [ $\Omega\cdot\text{m}$ ]	4,28	2,79	0,92	0,83	2,94	4,31	3,00
$B$ [K]	1140	1090	–	1040	2640	2560	2660

ściwości elementów 2D. W tabelach 5.6 i 5.7 [54] zamieszczono porównanie parametrów elektrycznych rezystorów oraz termistorów wykonanych w wersjach 2D i 3D.

### 5.3. Czujniki, mikrosystemy

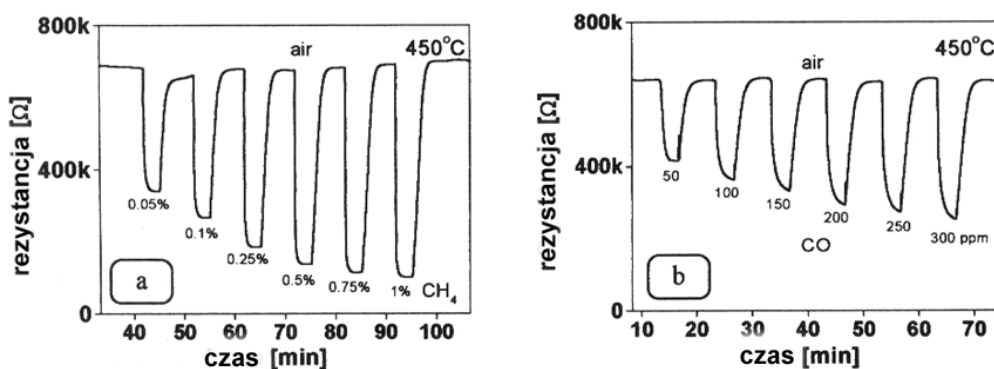
#### 5.3.1. Półprzewodnikowy czujnik gazu

Grubowarstwowy czujnik gazu LTCC wykorzystujący gazoczułą warstwę  $\text{SnO}_2$  opisano w pracach [84, 112, 186]. Konstrukcję czujnika przedstawiono na rys. 5.12. Czujnik składa się z czterech warstw folii LTCC (*Heraeus*), których łączna grubość po wypaleniu wynosi około 400  $\mu\text{m}$ . Na najwyższej folii, na elektrodach Au, naniesiono warstwę gazoczułą  $\text{SnO}_2$ . Na drugiej folii od góry zrobiono grzejnik Pt (pasta ESL 5542). Połączenia elektryczne między warstwami na obu foliach wykonano przez otwory o średnicy 200  $\mu\text{m}$  wypełnione warstwą Au (*Heraeus C 5529*). Warstwę gazoczułą na-



Rys. 5.12. Konstrukcja grubowarstwowego czujnika gazu typu  $\text{SnO}_2$  wykonanego w technice LTCC [186]

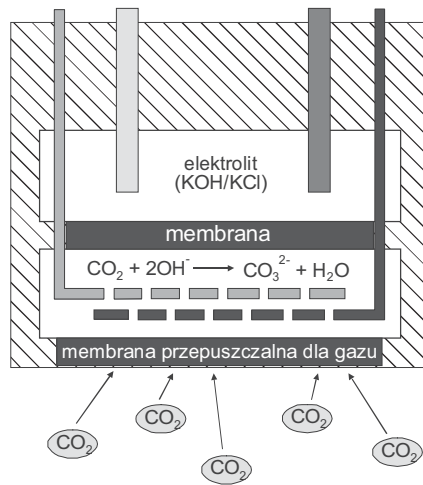
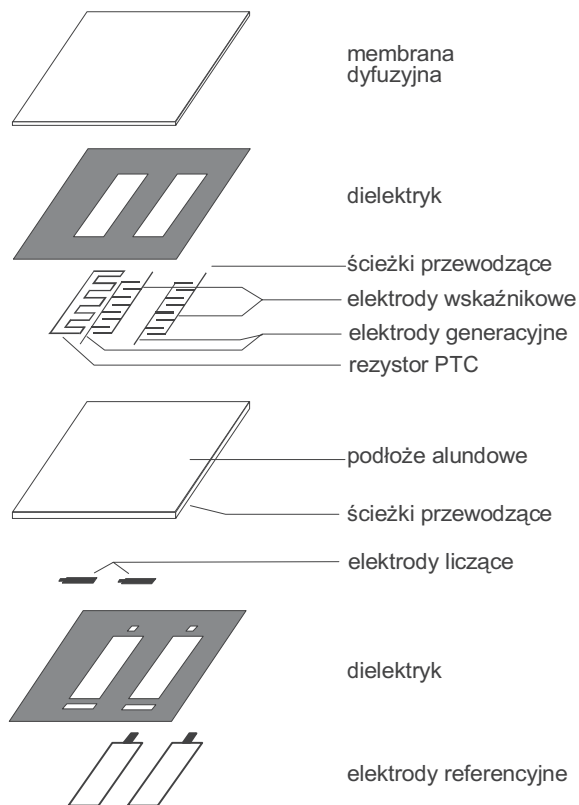
noszono na gotową strukturę LTCC i wypalano oddzielnie. Otrzymano czujnik o właściwościach podobnych jak w przypadku czujnika grubowarstwowego  $\text{SnO}_2$  wykonanego na ceramice alundowej. Zasada działania czujnika gazu wykonanego technologią LTCC jest taka sama jak w przypadku czujnika grubowarstwowego. Rezystancja warstwy  $\text{SnO}_2$  zależy od koncentracji badanego gazu. Czułość sensora zależy w istotny sposób od temperatury warstwy gazoczułej. Zastosowanie ceramiki LTCC umożliwia wykonanie grzejnika bezpośrednio pod warstwą gazoczułą. Odpowiedni kształt warstwy grzejnej zapewnia równomierny rozkład temperatury w obszarze czujnika [117]. Na rysunku 5.13 przedstawiono wyniki pomiarów czujnika w metanie i tlenku węgla. Czasem zamiast warstwy grubej wykonuje się na powierzchni LTCC warstwę cieką  $\text{SnO}_2$ . Można to osiągnąć drogą odpowiedniej obróbki temperaturowej ceramiki LTCC [151].



Rys. 5.13. Odpowiedzi czujnika gazu  $\text{SnO}_2$  na  $\text{CH}_4$  (a) i CO (b).  
Temperatura pracy  $T = 450^\circ\text{C}$  [186]

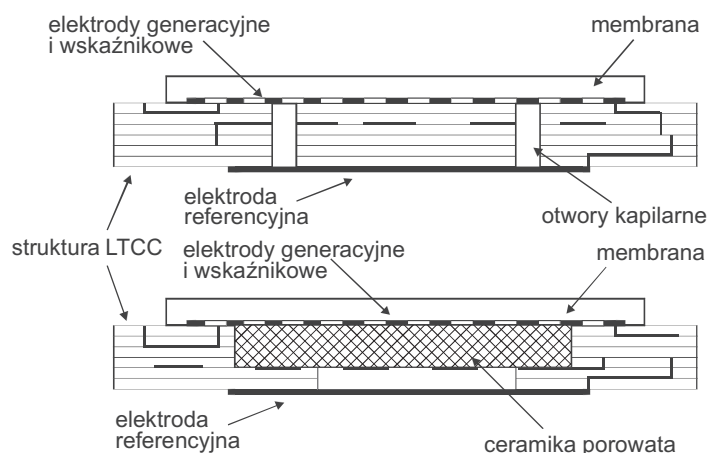
### 5.3.2. Elektrochemiczny czujnik gazu

Grubowarstwowy, elektrochemiczny czujnik gazu omówiono w artykule [130]. W publikacji tej zaproponowano również konstrukcję czujnika LTCC o analogicznej zasadzie działania. Podczas pomiarów koncentracji  $\text{CO}_2$  wykorzystano metodę kulometryczną. Schemat czujnika przedstawiono na rys. 5.14. Na rysunkach 5.15 i 5.16 przedstawiono konstrukcje czujników grubowarstwowego i LTCC. Zasada działania czujnika  $\text{CO}_2$  jest oparta na miareczkowaniu kwasowo-zasadowym. Określona liczba jonów  $\text{OH}^-$  wytwarzana elektrochemicznie na elektrodzie generacyjnej jest kontrolowana przez elektrodę wskaźnikową. Po osiągnięciu górnego pułapu  $\text{pH}_{\text{max}}$  elektroda generacyjna jest wyłączana. Wartość pH zmniejsza się dzięki  $\text{CO}_2$  dyfundującemu przez membranę. Szybkość zmian pH zależy od koncentracji  $\text{CO}_2$  w atmosferze. Po osiągnięciu  $\text{pH}_{\text{min}}$  elektroda generacyjna jest włączana i rozpoczyna się nowy cykl pomiarowy.

Rys. 5.14. Schemat czujnika  $\text{CO}_2$  [130]

Rys. 5.15. Konstrukcja czujnika grubowarstwowego [130]



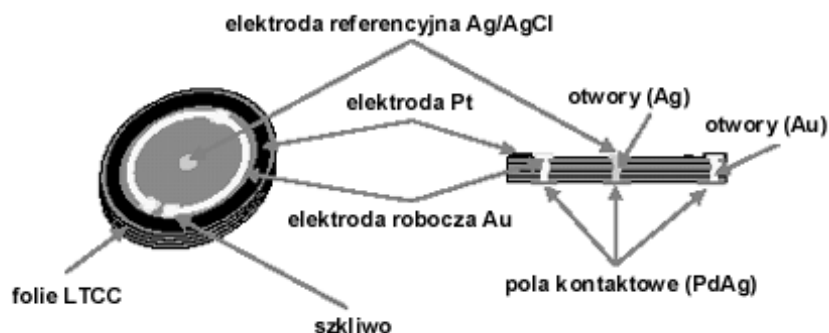


Rys. 5.16. Konstrukcja czujnika LTCC [130]

### 5.3.3. Impulsowa woltametria temperaturowa (*hot layer electrochemistry*)

W artykułach [205–207] przedstawiono konstrukcje i zasadę działania czujnika LTCC stosowanego w impulsowej woltametrii temperaturowej. Czujnik składa się z 4 folii Green Tape™ 951AX. Grubość pojedynczej folii po wypaleniu wynosi 130  $\mu\text{m}$ . Na powierzchni struktury są wytworzone: pierścieniowa elektroda robocza (Au DP 5731 lub DP 9894) o średnicy 4,4 mm i szerokości 130  $\mu\text{m}$ , koncentryczna elektroda licząca (Pt DP9894) oraz w centrum elektroda referencyjna (odniesienia) Ag/AgCl (rys. 5.17). Elektroda robocza jest podgrzewana elektrycznie.

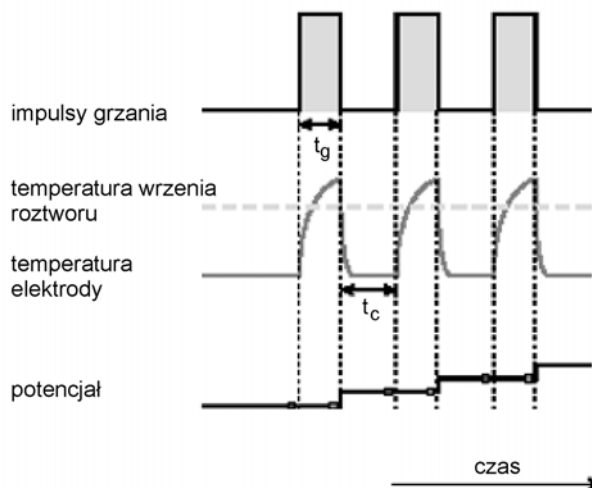
W metodzie impulsowej woltametrii temperaturowej w pobliżu powierzchni elektrody roboczej jest formowana cienka warstwa ogrzewanego roztworu. Mierzone są krzywe woltametryczne powyżej temperatury wrzenia badanego roztworu. Kroki zmian



Rys. 5.17. Konstrukcja czujnika LTCC stosowanego w impulsowej woltametrii temperaturowej [206]

polaryzacji zsynchronizowane są z seriami krótkich impulsów prądu ogrzewających elektrodę roboczą (rys. 5.18). Czas trwania impulsu grzewczego jest zmieniany w zakresie od 1 ms do kilkuset ms.

Impulsowa woltametrija temperaturowa może być stosowana do badania procesów denaturacji i rozwijania występujących w cząsteczkach biologicznych w zastosowaniu do cytochromu *C* na nieosłoniętych elektrodach złotych.



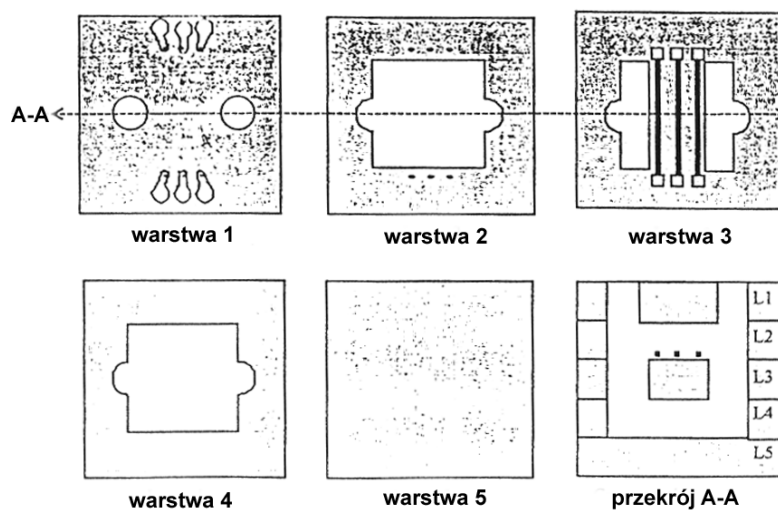
Rys. 5.18. Zasada działania czujnika stosowanego w impulsowej woltametrii temperaturowej [206]  
 $t_c$  – czas chłodzenia,  $t_g$  – czas grzania

#### 5.3.4. Czujnik prędkości przepływu cieczy

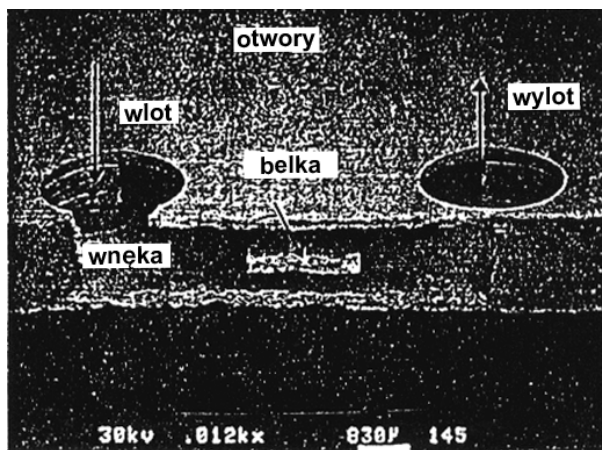
Konstrukcję czujnika szybkości przepływu cieczy pokazano na rys. 5.19 i 5.20 [89]. Podstawowa struktura składa się z grubowarstwowego grzejnika rezystywnego i dwóch termistorów nadrukowanych na termicznie izolowanej belce wytworzonej we wnętrzu układu LTCC. Czujnik wykonano z 5 warstw folii DP 951 (o grubości 200  $\mu\text{m}$  każda), rezystora grzewczego  $\text{RuO}_2$  i termistorów DP typu NTC (stała  $B \approx 2000 \text{ K}$ ). Czujnik przepływu składa się z dwóch identycznych struktur podstawowych połączonych szeregowo. W pierwszym układzie termistory mierzą temperaturę cieczy (bez grzania). W drugim układzie do grzejnika rezystywnego jest przyłożona stała moc. Temperatura termistorów w układzie drugim zależy od szybkości przepływu cieczy. Na rys. 5.21 przedstawiono zależność temperatury belki od natężenia prądu płynącego przez rezystor grzewczy, na rys. 5.22 natomiast zależność różnicy temperatur między belką (struktura 2) i cieczą w funkcji szybkości przepływu cieczy.

#### 5.3.5. Czujnik ciśnienia

Pierwsze grubowarstwowe czujniki ciśnienia pojawiły się na początku lat osiemdziesiątych [27, 28]. W czujnikach, wykonywanych na ceramice alundowej, wykorzy-



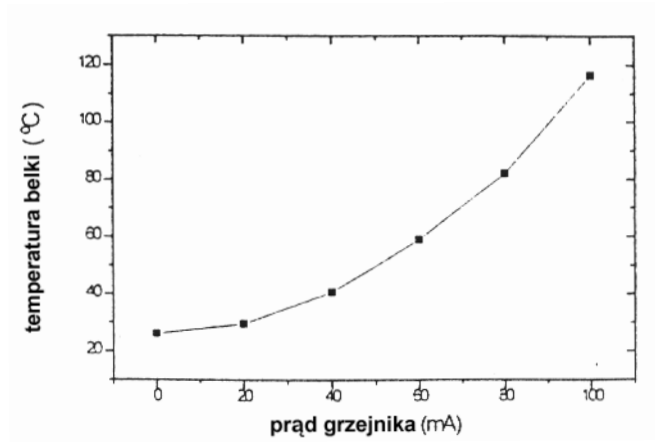
Rys. 5.19. Konstrukcja czujnika przepływu [89]  
(za zgodą Elseviere Science, copyright 2001)



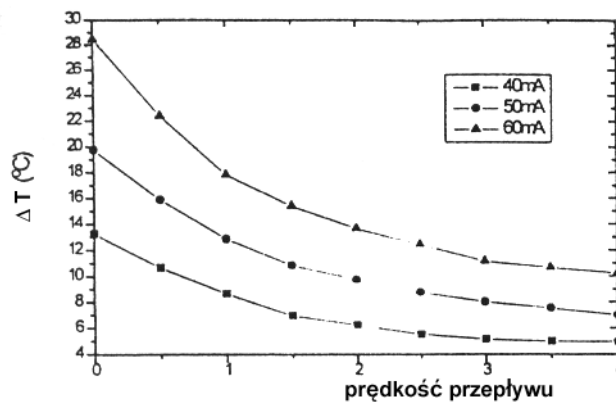
Rys. 5.20. Przekrój przez czujnik prędkości przepływu cieczy. Zdjęcie wykonane za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego [89]  
(za zgodą Elseviere Science, copyright 2001)

stywano efekt piezorezystywny [155, 156]. W technologii LTCC można łatwo wykonać podobne konstrukcje czujnika dodatkowo integrując czujnik z układem elektronicznym przetwornika [6, 106, 107, 165}.

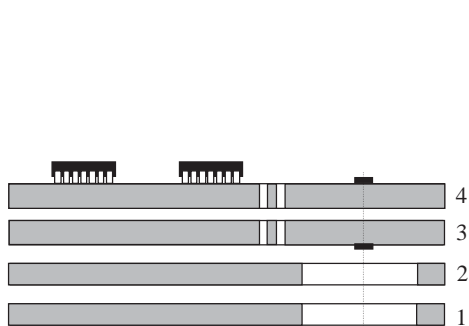
Na rysunkach 5.23 i 5.24 przedstawiono dwie konstrukcje czujnika ciśnienia (2D i 3D) wykonanego techniką LTCC z folii DP 951, w których wykorzystuje się efekt piezorezystywny. W czujniku ciśnienia typu 2D membrana z czterema piezorezystora-



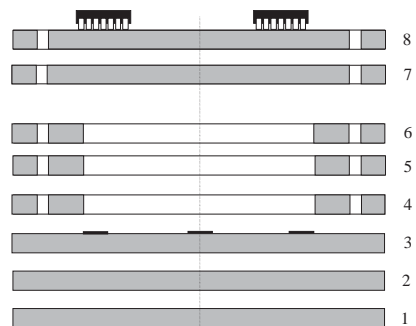
Rys. 5.21. Zależność temperatury belki od natężenia prądu płynącego przez rezystor grzewczy ( $R_h = 74 \Omega$ ) [89] (za zgodą Elsevier Science, copyright 2001)



Rys. 5.22. Zależność różnicy temperatur między belką (struktura 2) i cieczą w funkcji szybkości przepływu cieczy ( $T_{ot} = 27^\circ\text{C}$ ) [89] (za zgodą Elsevier Science, copyright 2001)



Rys. 5.23. Przekrój przetwornika ciśnienia typu 2D [165]



Rys. 5.24. Przekrój przetwornika ciśnienia typu 3D [165]

mi jest umieszczona obok układu elektronicznego. Czujnik składa się z czterech warstw (rys. 5.23). Część dwóch górnych warstw (3 i 4) stanowi membranę, której średnicę określają wycięte w warstwach 1 i 2 otwory (rys. 5.23). W warstwach 3 i 4 są wycięte otwory przelotowe doprowadzające zasilanie mostka i wyprowadzające sygnał niezrównoważenia mostka do układu elektronicznego przetwornika, który znajduje się na najwyższej warstwie.

Czujnik ciśnienia typu 3D (rys. 5.24) składa się z ośmiu warstw ceramiki. Czujnik i przetwornik znajdują się nad sobą w jednej strukturze LTCC. Membranę czujnika tworzą trzy spodnie warstwy, a jej średnicę wyznaczają otwory wycięte w warstwach 4–6. Na membranie znajdują się cztery piezorezystory grubowarstwowe połączone w układzie mostka Wheatstone’a. Przez otwory przelotowe wycięte w warstwach 4–8 i wypełnione warstwą przewodzącą doprowadzane jest zasilanie i wyprowadzany sygnał wyjściowy z mostka. Na najwyższej warstwie jest wykonany układ elektroniczny przetwornika na bazie układu XTR 105 firmy Burr-Brown.

Mostek, przetwarzający zmianę rezystancji piezorezystorów na napięcie niezrównoważenia, jest zasilany ze źródła prądowego 0,8 mA, co zapewnia stabilne warunki pracy. Napięcie wyjściowe mostka jest podawane na wejście układu przetwarzającego sygnał na sygnał prądowy w standardzie 4÷20 mA [165].

Piezorezystory na membranach czujników ciśnienia typu 2D i 3D wykonano z pasty DP 2041 o rezystancji powierzchniowej  $10 \text{ k}\Omega/\square$ . Określono czułość odkształceniową na naprężenia podłużne ( $GF_L$ ) i poprzeczne ( $GF_T$ ) do kierunku prądu przepływającego przez rezystor (tabela 5.8). Wartość współczynnika czułości odkształceniowej  $GF$  (*gauge factor*) wyznaczono z zależności

$$GF = \frac{\Delta R}{R\varepsilon}$$

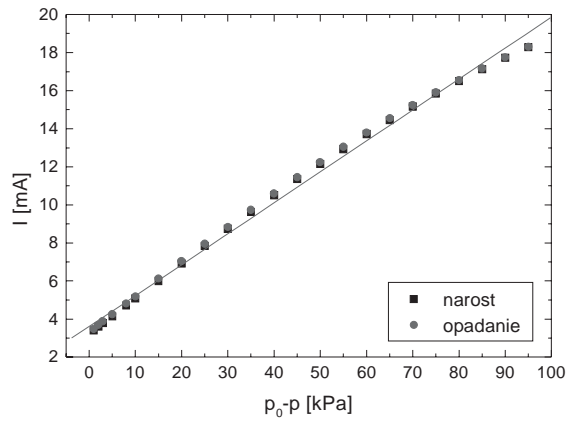
gdzie:  $\Delta R/R$  – względna zmiana rezystancji elementu,

$\varepsilon = \Delta l/l$  – odkształcenie względne

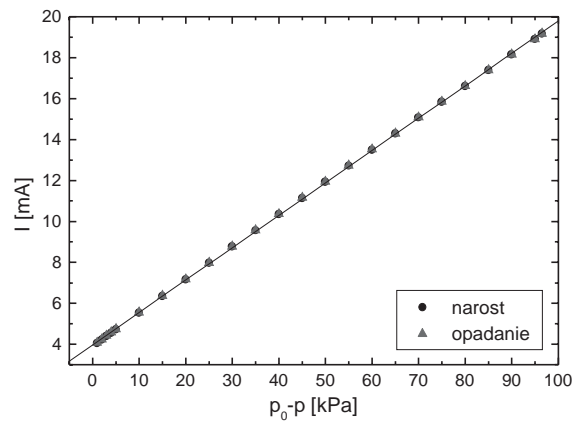
Na rys. 5.25 i 5.26 przedstawiono charakterystyki wyjściowe przetworników ciśnienia typu 2D i 3D. Zastosowany układ elektroniczny umożliwił liniową konwersję sygnału wyjściowego mostka na sygnał prądowy w standardzie 4–20 mA. Przetwornik napięcie–prąd zmniejszył błąd nieliniowości czujnika do  $\pm 0,5\%$  FSO (*Full Scale Output*, pełnej skali na wyjściu, rys. 5.27), nie zmieniając charakteru zmian – maksymalne błędy występowały w środku i na końcach zakresu pomiarowego. W znaczący sposób został skompensowany błąd histerezy (do poziomu  $\pm 0,14\%$  FSO; rys. 5.28).

Tabela 5.8. Wartości współczynników  $GF$  wyznaczone dla rezystorów powierzchniowych i zagrzebanych wykonanych z pasty DP 2041 [165]

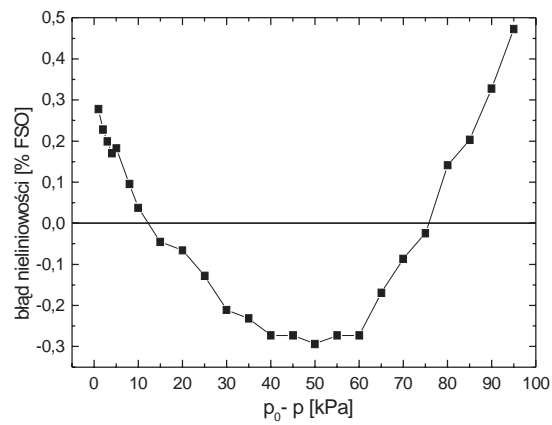
	$R_{\square} [\text{k}\Omega/\square]$	$GF_L$	$GF_T$
Rezystor powierzchniowy	7,4	10,0	6,7
Rezystor zagrzebany	29,6	5,6	3,2



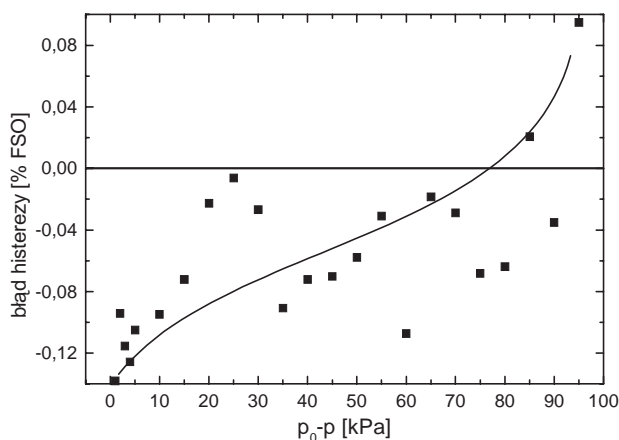
Rys. 5.25. Charakterystyka wyjściowa przetwornika ciśnienia typu 2D [165]



Rys. 5.26. Charakterystyka wyjściowa przetwornika ciśnienia typu 3D [165]



Rys. 5.27. Błąd nieliniowości przetwornika ciśnienia typu 3D [165]



Rys.5.28. Błąd histerezy przetwornika ciśnienia w funkcji ciśnienia różnicowego [165]

W przetworniku typu 3D zoptymalizowano konstrukcję czujnika i zminimalizowano błędy pomiaru ciśnienia. Zmodyfikowany układ elektroniczny umożliwił zmniejszenie dryftu zera i czułości w funkcji temperatury. Parametry przetworników obu typów zamieszczono w tabeli 5.9. Przetwornik ciśnienia 3D charakteryzuje się dobrą czułością w zakresie mierzonych ciśnień, bardzo małymi błędami nieliniowości i histerezy oraz nieznaczną czułością na zmiany temperatury otoczenia.

Tabela 5.9. Zestawienie parametrów użytkowych przetworników ciśnienia w wersjach 2D i 3D [165]

	Typ 2D	Typ 3D
Sygnal wyjściowy [mA]	4–20	4–20
Błąd nieliniowości [% FSO]	± 4,5	± 0,5
Błąd histerezy [% FSO]	± 0,7	± 0,14
TZS [% FSO/50°C]	± 40	± 1,12
TSS [%/50°C]	± 2,5	± 0,67

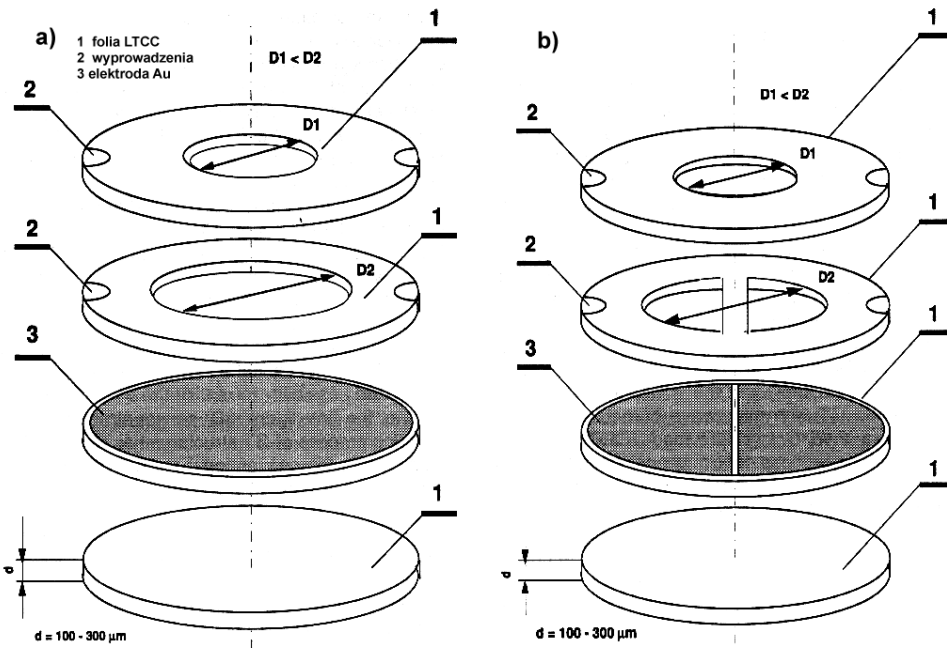
TZS – dryft temperaturowy zera (TZS – *temperature zero shift*),

TSS – dryft temperaturowy czułości (TSS – *temperature sensitivity shift*)

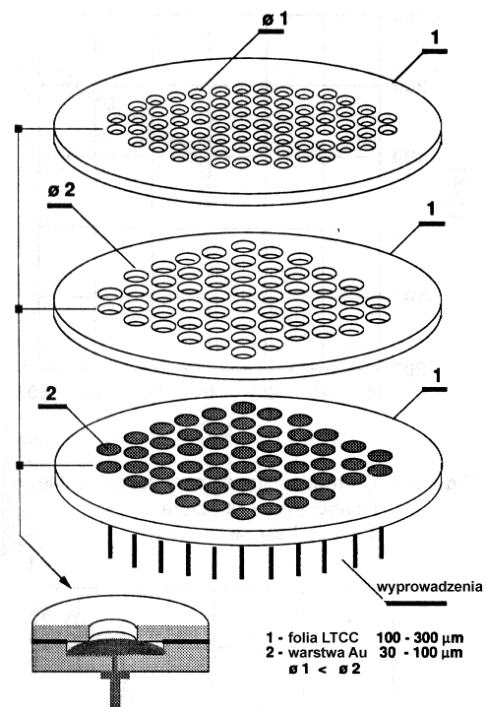
### 5.3.6. Czujniki do pomiaru właściwości plazmy

Planarna matryca sond Langmuira służy do pomiaru podstawowych parametrów plazmy, takich jak: gęstość plazmy, potencjał plazmy, temperatura elektronu i funkcja rozkładu energii elektronu. Parametry te można mierzyć w różnych miejscach przestrzeni i czasu. Konstrukcje czujników przedstawiono na rys. 5.29–5.31 [4].

W układzie pojedynczej sondy (*single probe*) pojedyncza elektroda jest umieszczona w plazmie. Elektrode polaryzuje się różnym napięciem. Natężenie prądu płynącego

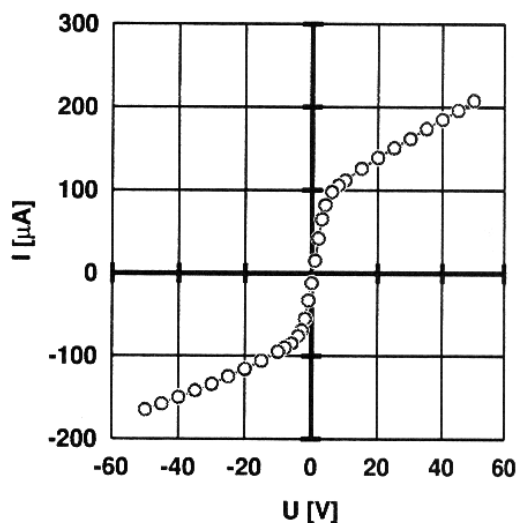


Rys. 5.29. Sonda Langmuira: (a) sonda pojedyncza, (b) sonda podwójna [4]



Rys. 5.30. Planarna matryca sond Langmuira [4]



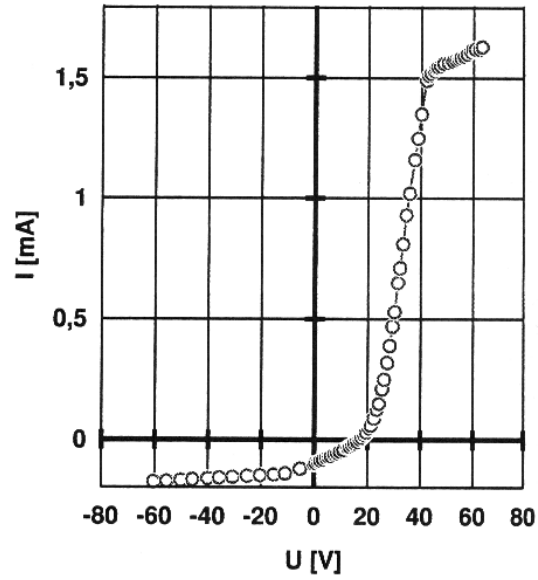


Rys. 5.31. Charakterystyka układu podwójnej sondy [4]

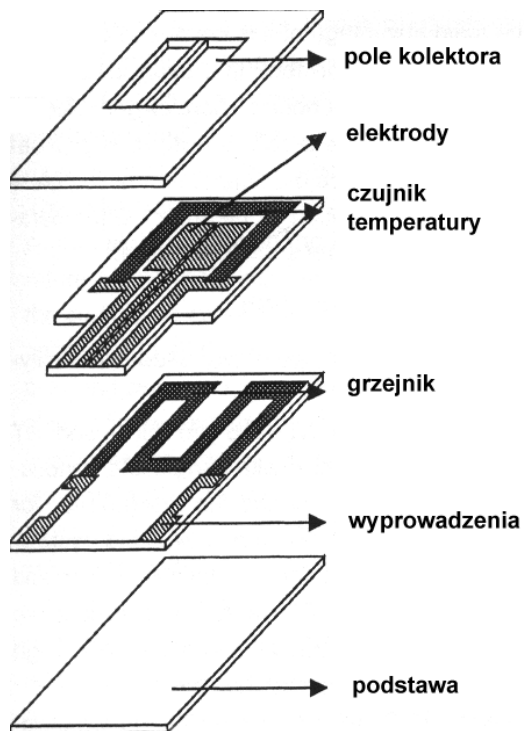
przez sondę jest mierzone w funkcji napięcia. W układzie podwójnej sondy (rys. 5.29b [4]) (*double probe*) element pomiarowy składa się z dwóch elektrod, zwykle o identycznej powierzchni, będących w kontakcie z plazmą. Prąd płynący przez plazmę, między elektrodami, jest mierzony w funkcji przyłożonego do sond napięcia. Planarna matryca sond Langmuira (rys. 5.30 [4]) umożliwia pomiar kompletu charakterystyk w czasie rzeczywistym, w różnych miejscach przestrzeni.

Do wykonania sond stosowano folię firmy DuPont DP Green tape GT 851A1 i pasty przewodzące PdAg 6144D i Au 5717D. Stosowano folie grubości 114 i 320  $\mu\text{m}$ . Skurcz występujący w czasie wypalania znacznie różnił się od wartości podawanej przez producenta. Było to spowodowane nietypowym kształtem struktury wielowarstwowej sondy. Układy LTCC wypalano w sposób konwencjonalny w piecu komorowym lub piecu mikrofalowym (2,64 GHz). Wykonane sondy testowano w urządzeniu wytwarzającym plazmę przy częstotliwości 13,56 MHz w argonie pod ciśnieniem  $3 \cdot 10^{-1}$  Pa. Zmierzone charakterystyki prądowo-napięciowe są przedstawione na rys. 5.31 i 5.32 [4]. W obu przypadkach prąd sondy jest dużo mniejszy od prądu plazmy, co jest warunkiem koniecznym poprawnej pracy układu. Na podstawie zmierzonych charakterystyk wyznaczono temperaturę elektronu i gęstość jonów, uzyskując dużą zgodność z wynikami pomiarów otrzymanych za pomocą typowej sondy cylindrycznej. Wyniki przedstawione na rys. 5.32 [4], otrzymane dla pojedynczej sondy, dają informacje o rozkładzie energii elektronów, potencjale plazmy i potencjale pływającym.

Ulepszoną wersję sondy Langmuira opisano w pracy [5]. Główną zaletą nowej planarnej sondy wykonanej techniką LTCC (rys. 5.33 [5]) jest umieszczenie grzejnika i czujnika temperatury wewnątrz struktury. Elementy te umożliwiają utrzymanie stałej temperatury sondy w czasie pomiaru (350 °C) oraz uniknięcie problemów związanych



Rys. 5.32. Charakterystyka układu pojedynczej sondy [4]



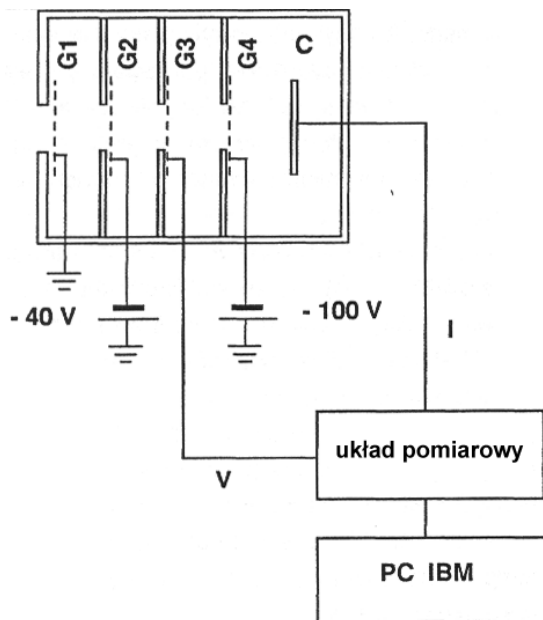
Rys. 5.33. Planarna sonda Langmuira [5]

z zanieczyszczeniami. Temperatura sondy jest niezależna od napięcia polaryzującego sondę.

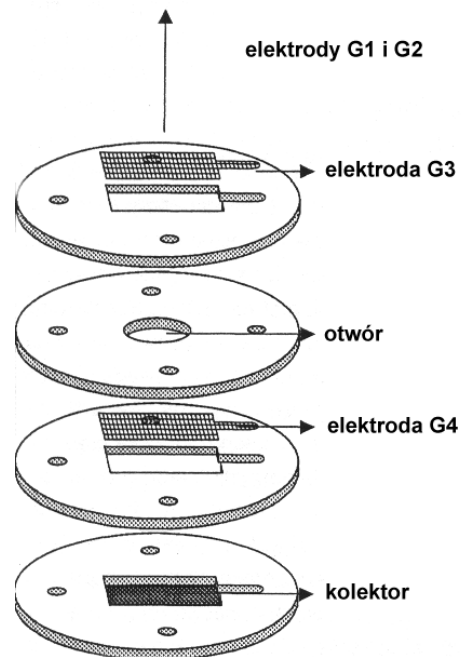
Drugim urządzeniem służącym do analizy właściwości plazmy (pomiar rozkładu energii w plaźmie) opisanym w pracy [5], jest 3D LTCC czterosiatkowy analizator pola hamującego. Służy on do określenia rozkładu energii na brzegu podłoża. Układ zasilania elektrycznego i konstrukcję analizatora przedstawiono na rys 5.34 i 5.35 [5]. Pierwsza siatka, będąca na potencjale masy, jest w kontakcie z plazmą. Druga i czwarta siatka są spolaryzowane ujemnie w celu tłumienia (wygaszania) składników prądu pochodzących od elektronów plazmy i elektronów wtórnych. Potencjał trzeciej siatki wytwarza pole elektrostatyczne hamujące ruch jonów. Natężenie prądu puszki Faradaya jest mierzone w funkcji napięcia hamującego.

Do wytwarzania sondy Langmuira i analizatora [5] używano materiałów firm DuPont lub Ferro. Na sondy wykonane z materiałów firmy DuPont stosowano folie DP GT 851 A1 (grubości 320  $\mu\text{m}$ ) i GT 951 AX (240  $\mu\text{m}$ ), współpracujące z nimi pasty przewodzące (Au 5717 D i PdAg 6148) na elektrody i wyprowadzenia oraz pasty rezystywne QT 013 i QT 021 na grzejnik i czujnik temperatury. Folie LTCC A6 firmy Ferro stosowano razem z pastami rezystywnymi FX 89-012-100 i pastami przewodzącymi FX 33-188. Folia LTCC A6 doskonale nadaje się do pracy w bardzo wielkich częstotliwościach ze względu na małe straty w zakresie  $> 1$  GHz.

Nowe typy sond Langmuira i analizatora stosowano do badań plazmy rf 13,56 MHz i mikrofalowej 2,45 GHz w atmosferze argonu i azotu, pod ciśnieniem  $1 \cdot 10^{-1}$  Pa. Wyniki pomiarowe przedstawiono w pracy [5].



Rys. 5.34. Układ zasilania analizatora LTCC [5]

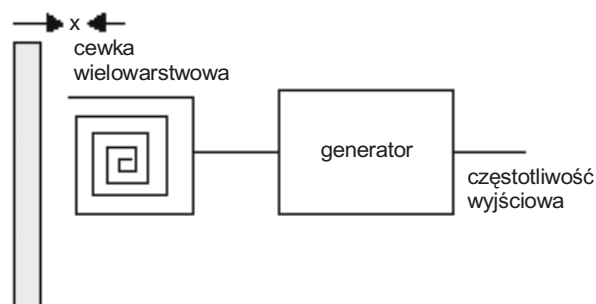


Rys. 5.35. Planarna sonda Langmuira wykonana techniką LTCC [5]

### 5.3.7. Czujnik zbliżeniowy

Czujnik zbliżeniowy wykonany techniką LTCC służy do pomiaru odległości metodą bezkontaktową. Schemat blokowy czujnika przedstawiono na rys. 5.36 [88].

Wielowarstwowa cewka LTCC wchodzi w skład generatora LC Colpitsa. Wokół cewki jest wytwarzane pole elektromagnetyczne, które zgodnie z prawem Lenza indukuje prądy wirowe w metalowym przedmiocie, od którego mierzona jest odległość. Powstające prądy wirowe modyfikują indukcyjność cewki, co powoduje zmianę często-



Rys. 5.36. Schemat blokowy czujnika zbliżeniowego [88]



Rys. 5.37. Geometria cewki i przekrój przez strukturę LTCC [88]

tliwości i amplitudę generowanych drgań. Indukcyjność cewki zmienia się ze zmianą położenia przedmiotu metalowego znajdującego się w zasięgu wytwarzanego pola magnetycznego. Indukcyjność wzajemna  $M$  cewki i przedmiotu zależy od odległości  $x$  między cewką i przedmiotem. Jeżeli w skład układu rezonansowego generatora wchodzi indukcyjność, to w przypadku przedmiotu o dobrej przewodności elektrycznej reaktancja cewki może być wyrażona wzorem:

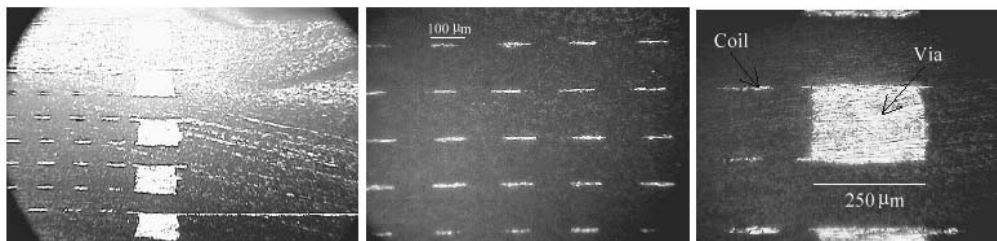
$$X_{eq} \approx \omega \left( L_1 - \frac{M^2}{L_2} \right)$$

gdzie:  $L_1$  i  $L_2$  – indukcyjności cewki i przedmiotu,  $M$  – indukcyjność wzajemna.

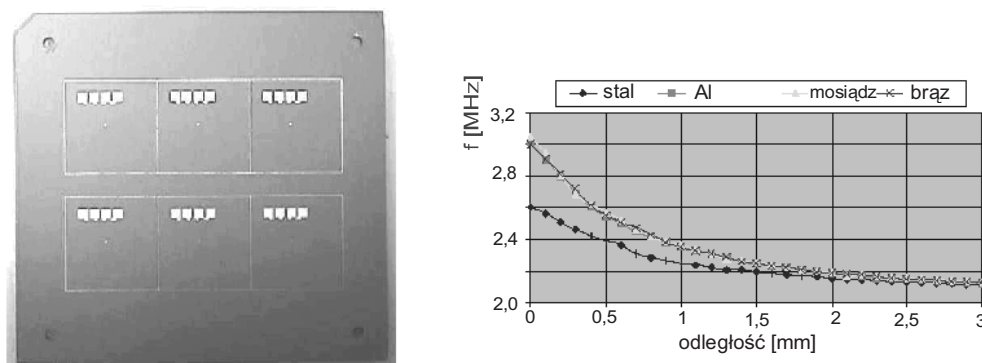
Określając zmiany częstotliwości rezonansowej generatora, możemy określić odległość przedmiotu od wielowarstwowej cewki urządzenia pomiarowego.

Częstotliwość na wyjściu generatora Colpitsa jest proporcjonalna do mierzonej odległości. Sygnał wyjściowy z generatora jest wzmacniany przez wzmacniacz szerokopasmowy wyposażony w AGC (*Automatic Gain Control*) – automatyczną kontrolę wzmocnienia.

Wielowarstwowa cewka pomiarowa została wykonana w technice LTCC na powierzchni  $1 \times 1 \text{ cm}^2$ . Widok masek przez które drukowano cewki na poszczególnych foliach LTCC przedstawiono na rys. 5.37 [90], a przekrój przez strukturę LTCC na rys. 5.37 i 5.38 [90]. Cewki nadrukowano z pasty przewodzącej Ag, wykonując ścieżki przewodzące o szerokości  $80 \mu\text{m}$ , grubości  $10 \mu\text{m}$  i odległości między nimi równej  $80 \mu\text{m}$ .



Rys. 5.38. Przekrój przez strukturę LTCC [88]



Rys. 5.39. Struktura LTCC z 6 czujnikami zbliżeniowymi i charakterystyka czujnika [88]

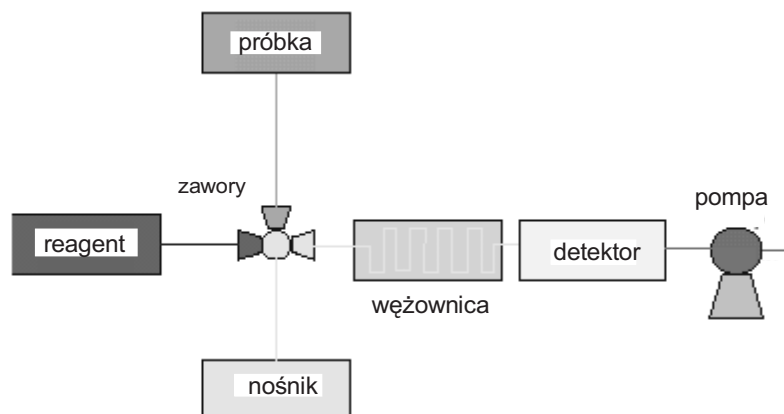
Pojedyncza cewka składała się z 20 kwadratowych spiral. Cewki na różnych foliach były połączone ze sobą przez otwory o średnicy 250  $\mu\text{m}$ . Cewki wykonano na 5 lub 8 foliach DP 951, stosując typowe procesy technologiczne. W jednym procesie, na pojedynczym układzie o wymiarach 7,5 $\times$ 7,5 cm, wykonywano 6 identycznych czujników zbliżeniowych.

Na rysunku 5.39 [90] przedstawiono widok struktury LTCC z 6 czujnikami zbliżeniowymi oraz zależność częstotliwościową na wyjściu czujnika zbliżeniowego w funkcji odległości od przedmiotu wykonanego z różnych materiałów. Czujnik umożliwia pomiar odległości w zakresie do 3 mm. Wykonany czujnik może pracować przy wypełnieniu przestrzeni między badanym przedmiotem a cewką materiałem o różnej przenikalności dielektrycznej. Zaletą czujnika LTCC jest możliwość pracy w wysokiej temperaturze i trudnych warunkach klimatycznych. Wykonany czujnik może być stosowany do pozycjonowania części metalowych, wykrywania otworów, śrub, nitów oraz w różnych innych zastosowaniach przemysłowych.

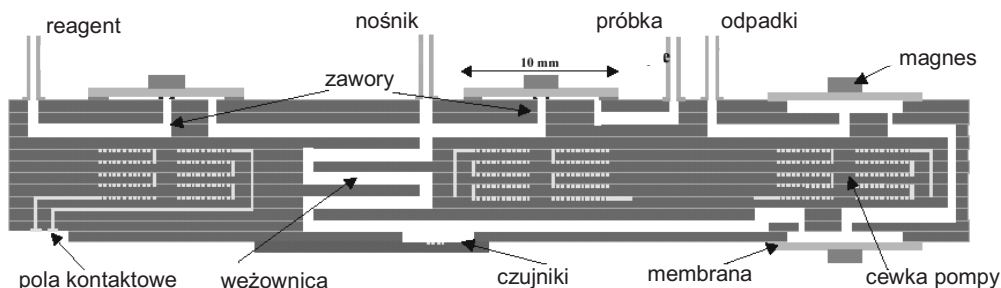
### 5.3.8. Mikrosystemy (mezosystemy) wykonywane techniką LTCC

Systemy kanałów wykonywanych technologią LTCC, w połączeniu ze zintegrowanymi układami zaworów i pomp cieczy lub gazu, mogą być powszechnie wykorzystywane do dozowania lekarstw, monitorowania parametrów materiałów biologicznych, gazowej lub ciekowej chromatografii, w wymiennikach ciepła, separatorach cząstek, w celkach elektroforetycznych, reaktorach, mikrokomorach spalań, mikroreaktorach chemicznych [90]. Jednym z przykładów mikrosystemów jest układ  $\mu\text{TAS}$  (*Micro-Total Analysis System*). Układy tego typu, wykonywane od wielu lat metodami mikromechaniki w krzemie, umożliwiają szybkie określenie parametrów bardzo małych ilości gazu lub cieczy. Są one szeroko stosowane w mikrobiologii i medycynie (np. do analizy krwi). Zasada działania układu polega na zmieszaniu badanego materiału z reagentem w obojętnym gazie lub cieczy nośnej, przepuszczeniu przez węzownicę, w której zachodzą reakcje chemiczne i następnie analizowaniu produktów tych reakcji za pomocą matry-

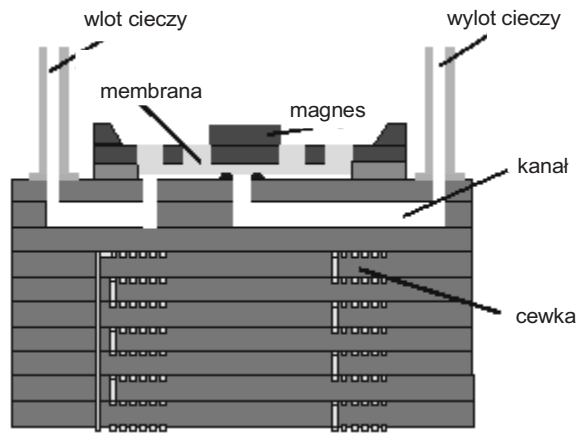
cy czujników (rys. 5.40). Matryca czujników daje informacje o szukanych parametrach badanego materiału. Koncepcję układu  $\mu$ TAS, wykonanego technologią LTCC, przedstawiono na rys. 5.41 [90]. Układ składa się z hybrydowej pompy, dwóch hybrydowych zaworów oraz systemu kanałów i wnęk umożliwiających przepływ i mieszanie cieczy. Do wypalanej struktury LTCC planuje się dołączyć matrycę krzemowych czujników elektrochemicznych. Jednym z podstawowych elementów układu LTCC jest zawór, umożliwiający kontrolowany przepływ mediów przez  $\mu$ TAS. Wykonany przez M.R. Gongora-Rubio i współpracowników [90] hybrydowy zawór LTCC charakteryzuje się małymi wymiarami, krótkim czasem odpowiedzi, małą mocą, możliwością kontrolowanego przepuszczania bardzo małych ilości gazu lub cieczy oraz dobrymi charakterystykami dynamicznymi. Zawór składa się z elastycznej membrany krzemowej wykonanej technologiami mikromechaniki MEMS, z dołączonym od góry magneseSmCo oraz struktury LTCC składającej się z systemu kanałów i elektromagnesu (rys. 5.42–5.44 [90]). Wymiary kanałów są rzędu 400  $\mu$ m, cewki około 12 mm. Wszystkie części elek-



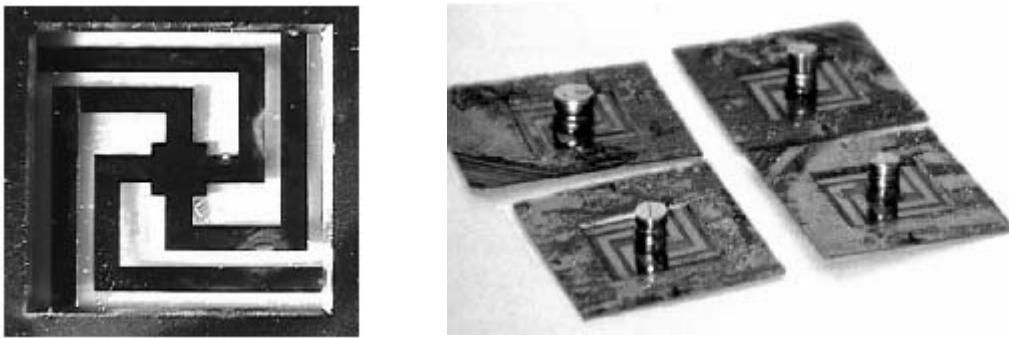
Rys. 5.40. Schemat blokowy układu  $\mu$ TAS [90]  
(za zgodą Elsevier Science, copyright 2001)



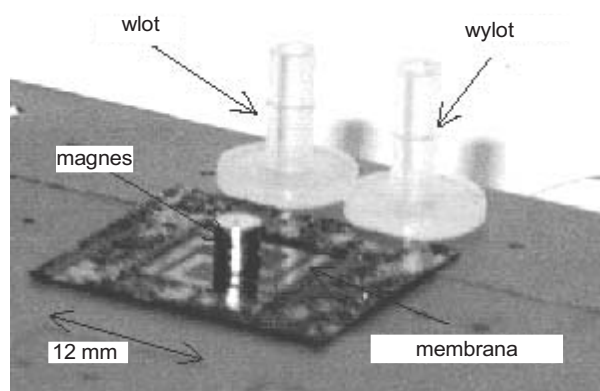
Rys. 5.41. Przekrój przez układ  $\mu$ TAS wykonany techniką LTCC [90]  
(za zgodą Elsevier Science, copyright 2001)



Rys. 5.42. Przekrój przez zawór hybrydowy [90] (za zgodą Elsevier Science, copyright 2001)



Rys. 5.43. Elastyczna membrana wykonana w krzemie [90] (za zgodą Elsevier Science, copyright 2001)

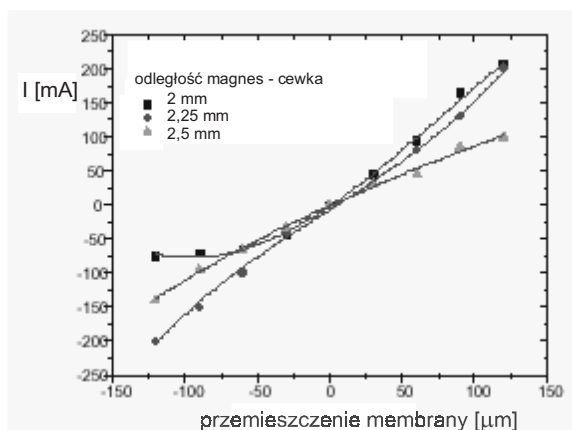


Rys. 5.44. Widok górnej powierzchni zaworu hybrydowego LTCC [90] (za zgodą Elsevier Science, copyright 2001)



tromagnesu i kanałów wykonano w folii DuPont 951, używając sterowanej numerycznie frezarki, wykrojnika lub izotropowego trawienia częściowo wypalanej folii LTCC. Hybrydowy układ LTCC składa się z 5 folii *green tape* z nadrukowanymi spiralnie cewkami. Łączna rezystancja cewki wynosi  $120 \Omega$ , a maksymalne dopuszczalne natężenie prądu 150 mA. Po zastosowaniu magnesu stałego SmCo (900 Gaussów) o średnicy 1 mm, przyklejonego do membrany krzemowej grubości  $30 \mu\text{m}$ , uzyskano zmiany położenia membrany w granicach  $\pm 100 \mu\text{m}$ . Zależność wielkości ugięcia membrany od natężenia prądu przepływającego przez cewkę LTCC przedstawiono na rysunku 5.45 [90].

Przedstawiony zawór hybrydowy może znaleźć powszechne zastosowanie w różnych typach mikrosystemów wykonanych w technologii LTCC.



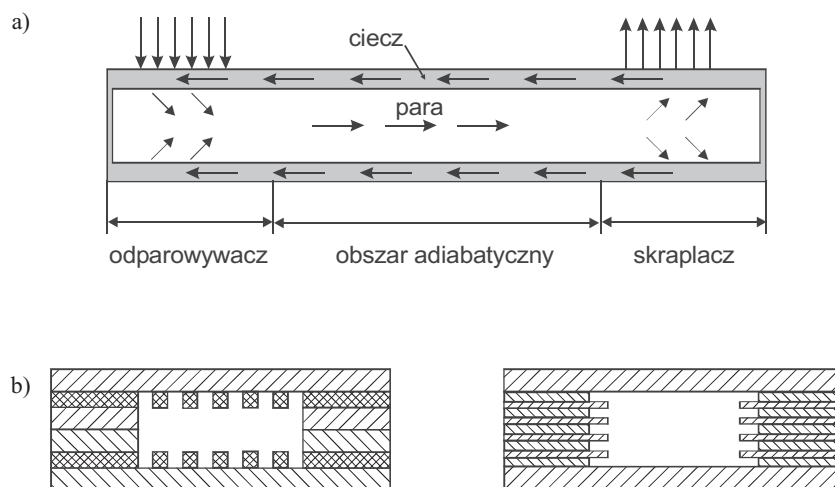
Rys. 5.45. Zależność ugięcia membrany od natężenia prądu przepływającego przez cewkę LTCC [90] (za zgodą Elseviere Science, copyright 2001)

## 5.4. Układy chłodzące, grzejne i analizujące rozkład temperatury

### 5.4.1. Rura cieplna

Miniaturowa rura cieplna (*heat pipe*) wykonana wewnątrz układu LTCC umożliwia odprowadzanie dużej ilości ciepła z układu oraz na wytworzenie obszaru o prawie stałej temperaturze wzdłuż swojej długości. Rura cieplna przenosi ciepło przez odparowanie cieczy na jednym końcu i skroplenie na drugim. Teoretycznie miniaturowa rura cieplna może utworzyć ścieżki termiczne o efektywnej przewodności cieplnej większej niż  $10\,000 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  [103].

Konstrukcję miniaturowej rury cieplnej wytworzonej wewnątrz struktury LTCC przedstawiono na rysunku 5.46 [103]. Rura cieplna składa się z osiowo rowkowanej, zamkniętej z obu stron konstrukcji w kształcie rury, w której następuje przepływ cieczy roboczej (najczęściej wody) od skraplacza do parownika. Konstrukcje i właściwo-

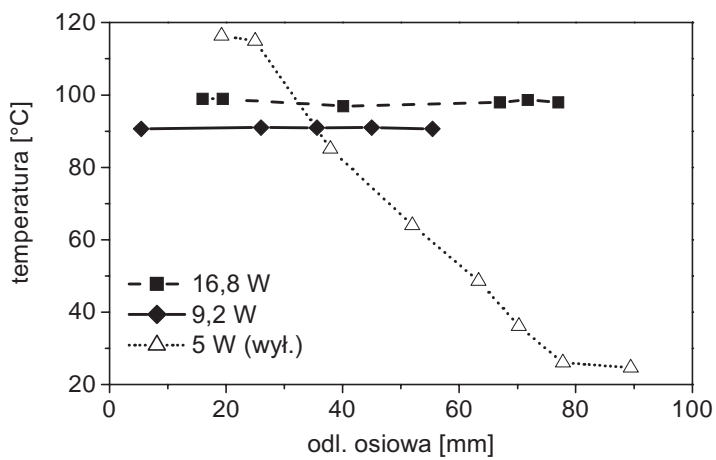


Rys. 5.46. Typowa konstrukcja rury cieplnej: a) przekrój pokazujący obszary pracy i przepływu cieczy, b) przekrój przez osiowo rowkowane wnętrze rury cieplnej pokazujący rowki na górnych i dolnych ścianach pojemnika (rys. lewy) lub na ścianach bocznych [103]

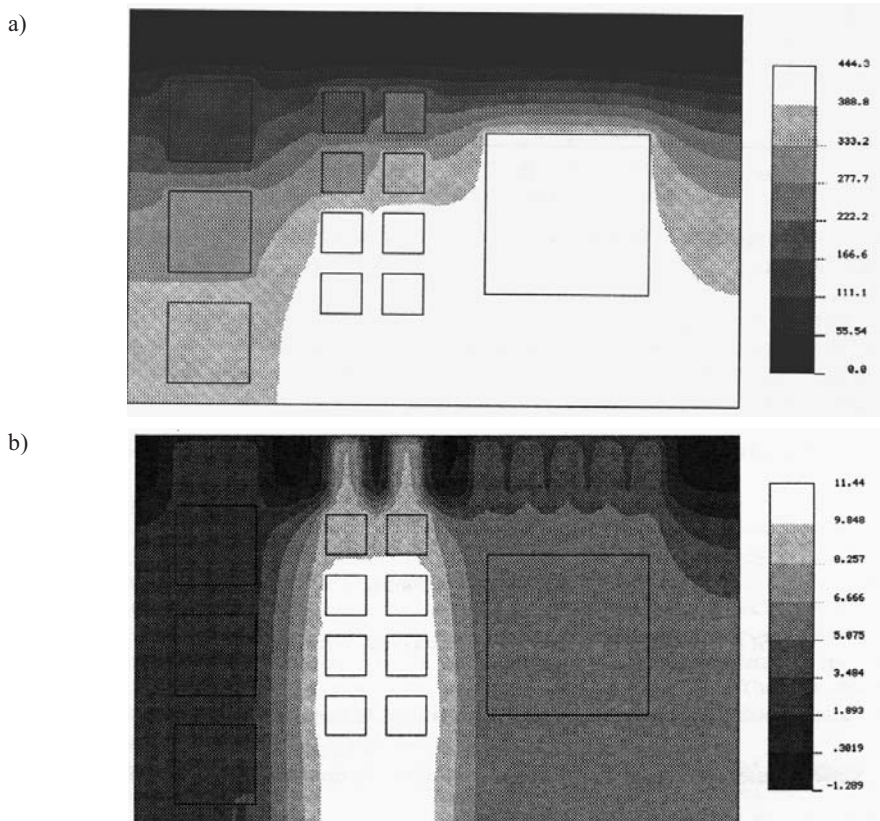
ści miniaturowych rur cieplnych opisano w pracach [103, 105, 216, 217]. Prototypowa rura cieplna, opisywana w pracy [103], odprowadzała 16 W ciepła na odcinku 8 cm, dla różnicy temperatury na tym odcinku mniejszej niż  $5^{\circ}\text{C}$ . Rury cieplne mogą transportować ciepło na względnie dalekie odległości bez dodatkowego zasilania. Rura cieplna składa się ze szczelnego pojemnika, w którym można wyróżnić trzy obszary: parownik, skraplacz i obszar adiabatyczny oddzielający odparowywacz od skraplacza (rys. 5.46). Ciecz robocza absorbuje ciepło parując w parowniku, przenosi je jako para przez obszar adiabatyczny do skraplacza, gdzie oddaje ciepło skraplając się z powrotem do stanu ciekłego. Ciecz robocza powraca do obszaru parownika przez pojemnik o żłobkowanych ścianach, gdzie następuje kapilarny proces pompowania cieczy. Ilość energii cieplnej, którą może przetransportować rura cieplna zależy od ciepła parowania cieczy roboczej i od masy parującej cieczy. Od odpowiedniej konstrukcji pojemnika rury cieplnej zależy transport cieczy i ilość odprowadzanego ciepła. Najczęściej stosowanymi elementami w pojemniku są siatki, sita oraz nacięte osiowo rowki w wewnętrznych ścianach rury cieplnej.

Na rys. 5.47 porównano właściwości cieplne struktury LTCC z włączoną i wyłączoną (bez płynu roboczego) rurą cieplną. Przy pracującej rurze cieplnej temperatura jest prawie stała na całej długości elementu. Bez płynu roboczego rozkład temperatury jest liniowy – od maksymalnej na grzejniku do minimalnej na drugim końcu.

Na rys. 5.48 przedstawiono wyniki obliczeń wykonanych metodą elementów skończonych rozkładu temperatury na podłożu LTCC  $15 \times 8$  cm (grubość 18 mm) z 12 elementami grzejnymi o łącznej mocy 21 W. Maksymalna temperatura na podłożu bez



Rys. 5.47. Porównanie właściwości cieplnych struktury LTCC z włączoną i wyłączoną rurą cieplną [103]



Rys. 5.48. Obliczony rozkład temperatury na powierzchni struktury LTCC: a) bez rur cieplnych  $\Delta T \approx 444^\circ\text{C}$ , b) z 9 włączonymi rurami cieplnymi  $\Delta T \leq 11,5^\circ\text{C}$  [103]

włączonego układu chłodzenia przekraczała 400 °C. Po włączeniu 9 rur cieplnych wewnątrz struktury różnice temperatury są mniejsze niż 11,5 °C [103].

### 5.4.2. Układy chłodzące

Miniaturyzacja elementów elektronicznych oraz wzrost gęstości ich upakowania powoduje gwałtowny wzrost gęstości wydzielanej mocy. Nowe trójwymiarowe struktury zawierają zarówno elementy bierne, jak i czynne umieszczone wewnątrz modułu MCM, będącego jednocześnie obudową i podłożem. Transport ciepła wewnątrz struktury oraz jego odprowadzanie stają się zagadnieniami kluczowymi do poprawy pracy całego układu elektronicznego. Typowe przewodności cieplne różnych materiałów podłożowych zamieszczono w tabeli 5.10 [14].

Tabela 5.10. Przewodności cieplne różnych materiałów podłożowych i LTCC [14]

Materiał	Przewodność cieplna [W/(m·K)]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21
AlN	150
LTCC z Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,4
LTCC z AlN	5,6
FR4 (podłoże obwodu drukowanego)	0,2

Technologia LTCC umożliwia stosowanie różnych technik w celu zwiększenia ilości odprowadzanego ciepła ze środka modułu. Sposoby odprowadzania ciepła możemy podzielić na bierne i aktywne. Do metod biernych zaliczamy wykonywanie odpowiednich kanałów termicznych wewnątrz modułu oraz drukowanie warstw przewodzących odprowadzających ciepło. Do metod aktywnych należą układy kanałów wykonanych we wnętrzu struktury. Przez kanały przepuszczana jest ciecz chłodząca. Obieg cieczy może być wymuszony przez urządzenie zewnętrzne lub wewnętrzne [18, 120, 159, 188, 191].

Różne typy układów odprowadzających ciepło zamieszczono na rysunku 5.49 [187]. Na najwyższej folii struktury testowej (25,4×25,4 mm) nadrukowano rezystor grzewczy (5,08×5,08 mm). Na pozostałych foliach wykonano różne typy elementów biernych odprowadzających ciepło:

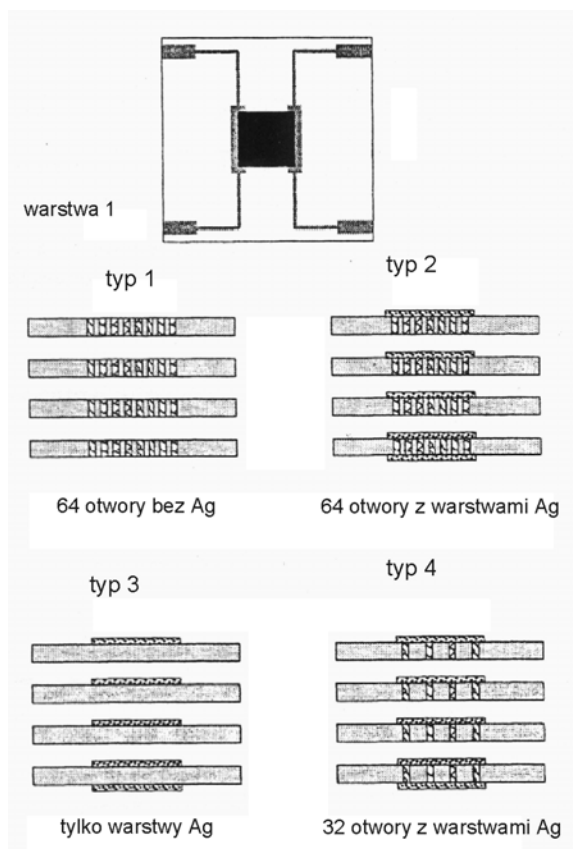
typ 1 – 64 puste otwory,

typ 2 – 64 otwory wypełnione Ag oraz warstwy przewodzące Ag na każdej z folii,

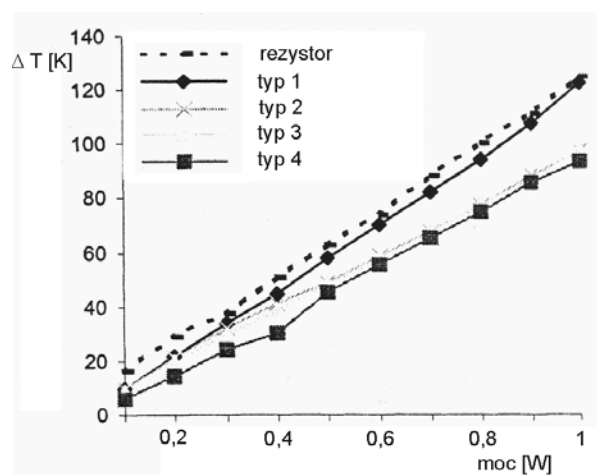
typ 3 – tylko otwory przewodzące,

typ 4 – 32 otwory wypełnione Ag oraz warstwy przewodzące Ag na każdej z folii.

Próbki testowe wykonano z folii DP 951A2. Na rysunku 5.50 przedstawiono zależność maksymalnej temperatury na powierzchni struktury LTCC od mocy rezystora grzewczego. Porównując wyniki badań widać bardzo duży wpływ wewnętrznych warstw



Rys. 5.49. Różne typy otworów i nadrukowanych warstw srebra wykonanych w testowej strukturze LTCC [187]

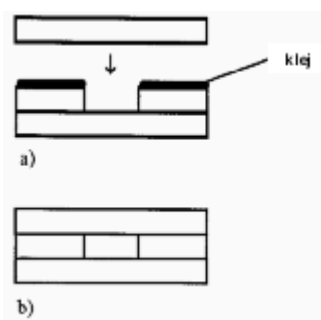


Rys. 5.50. Różnice temperatur dla różnych typów układów testowych [187]

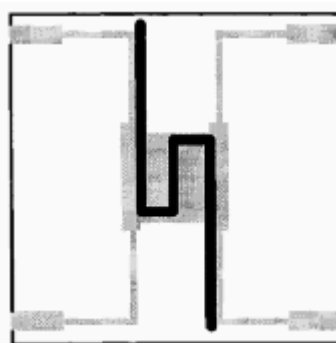
metalicznych na ilość odprowadzanego ciepła. Efektywność chłodzenia można zwiększyć umieszczając radiator na spodzie modułu.

Układy kanałów stosowanych do aktywnego chłodzenia modułu z wykorzystaniem przepływającej cieczy można wykonać, klejąc dwie wypalane części struktury LTCC lub wykonując kanały w surowych foliach laminowanych i wypalanych wspólnie (rys. 5.51) [187].

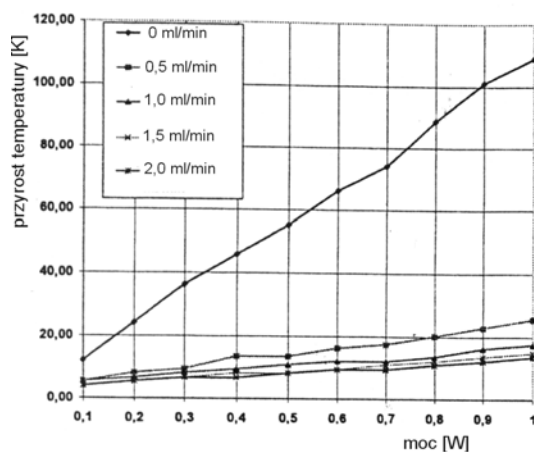
Na rysunku 5.52 [187] przedstawiono układ struktury testowej zawierającej wewnątrz kanał do aktywnego chłodzenia modułu. Przekrój kanału jest prostokątem o wymiarach  $0,8 \times 0,35$  mm. Na górze modułu znajdował się rezystor grzewczy, podobnie jak w przypadku struktury przedstawionej na rys. 5.49 [187]. Wyniki przeprowadzonych testów przedstawiono na rys. 5.53 i 5.54 [187], pokazują wpływ przepływającej cieczy na efektywność chłodzenia. W tabeli 5.11 [187] porównano przyrosty temperatury (względem temperatury otoczenia) dla różnych układów testowych grzanych rezystorem  $5,08 \times 5,08$  mm o mocy 2 W.



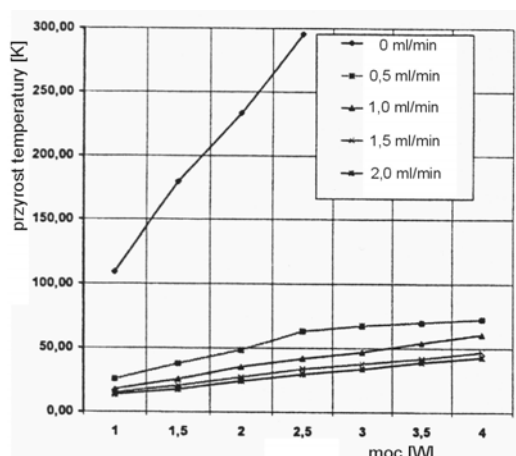
Rys. 5.51. Wytwarzanie mikrokanalów [187]



Rys. 5.52. Widok kanału [187]



Rys. 5.53. Efekt chłodzenia dla mocy w zakresie od 0,1 do 1 W [187]



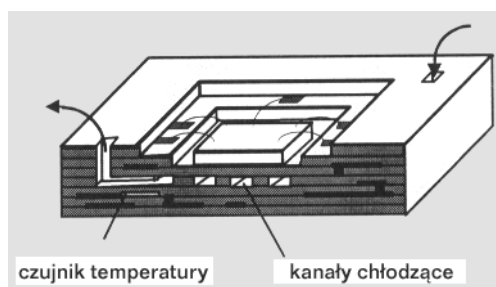
Rys. 5.54. Efekt chłodzenia dla mocy w zakresie od 1 do 4 W [187]

Tabela 5.11. Przyrosty temperatury dla różnych struktur testowych [187]

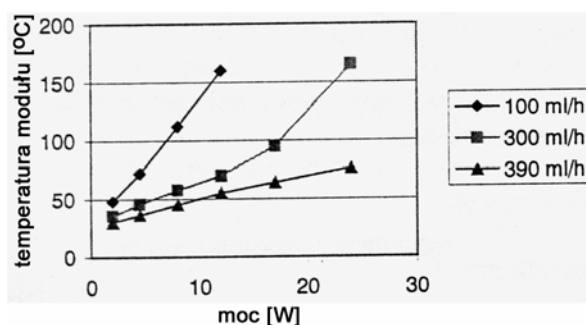
Struktura testowa	Przyrost temperatury [K]
Podłoże $Al_2O_3$	101,9
LTCC (powierzchnia)	187,9
(wnętrze)	238,1
LTCC (chłodzenie wodą)	30

Z porównania wyników testów wynika duża efektywność aktywnej metody chłodzenia z zastosowaniem cieczy przepływającej przez kanały wykonane we wnętrzu struktury.

Konstrukcję innego aktywnego układu testowego, wykonanego w module LTCC na Politechnice w Dreźnie, przedstawiono na rys. 5.55 [14]. Na rys. 5.56 [14] pokazano wpływ szybkości przepływu chłodzącej wody na maksymalną temperaturę na powierzch-



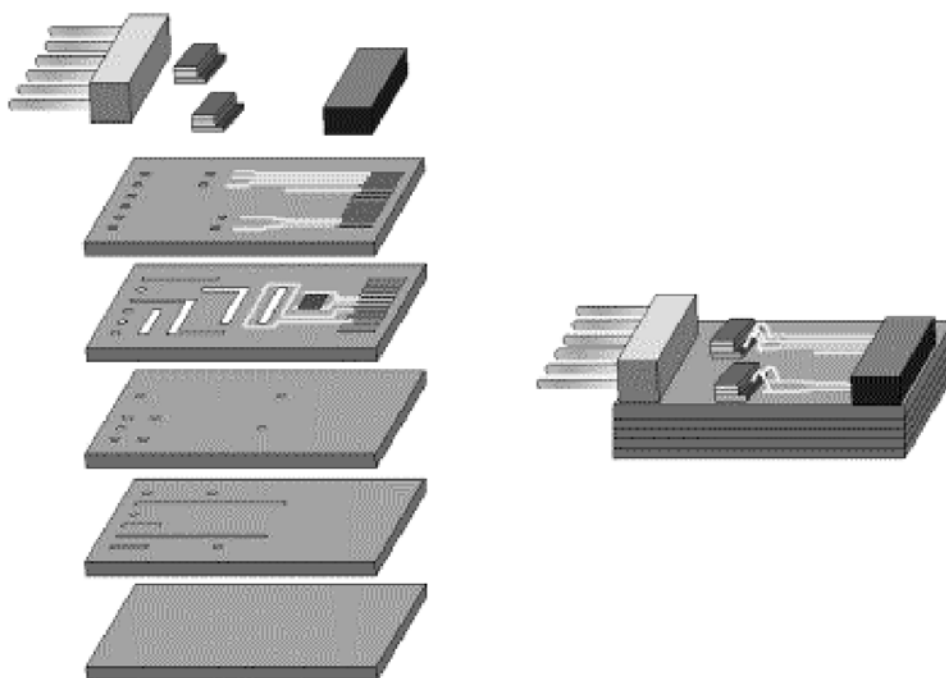
Rys. 5.55. Układ LTCC z aktywnym systemem chłodzenia [14]



Rys 5.56. Zależność efektywności chłodzenia od szybkości przepływu cieczy chłodzącej [14]

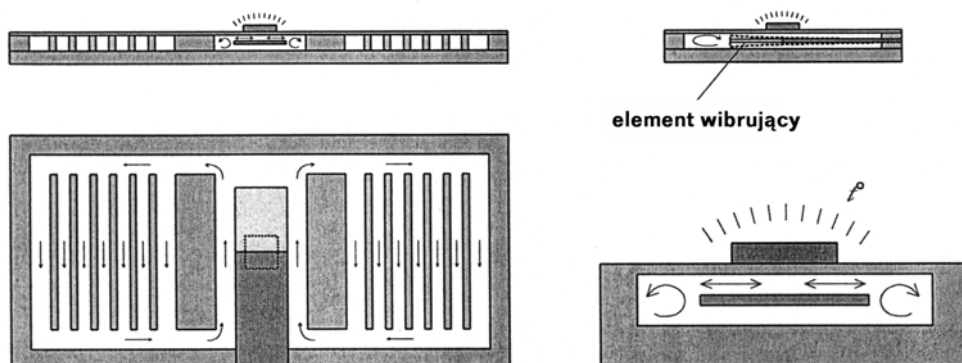
ni modułu. Zmodyfikowany moduł umożliwia pracę układu z mocami przekraczającymi 50 W. Inny przykład struktury testowej pokazano na rys. 5.57 [159].

Nową koncepcję aktywnego chłodzenia cieczą modułu LTCC z zastosowaniem wewnętrznego urządzenia piezoelektrycznego do przemieszczania cieczy przedstawiono na rys. 5.58 na podstawie publikacji [120]. Układ będzie zrealizowany z folii piezoelektrycznej grubości 40  $\mu\text{m}$  umieszczonej wewnątrz typowego modułu LTCC. Wibrujący element piezoelektryczny powoduje przemieszczanie cieczy chłodzącej.



Rys. 5.57. Przykład kanałów wykonanych w strukturze LTCC [159]





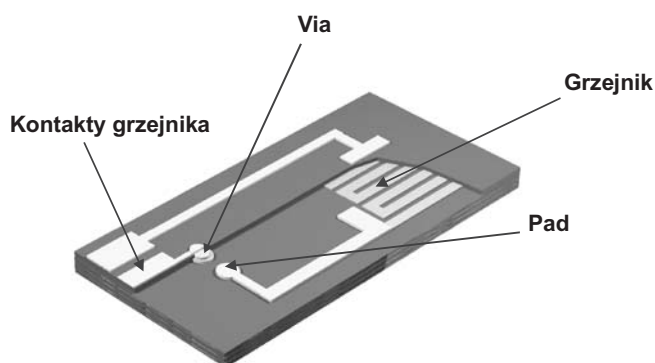
Rys. 5.58. Układ LTCC z systemem chłodzenia wykorzystującym element piezoelektryczny [120]

### 5.4.3. Układy grzejne

Układy grzejne są powszechnie stosowane w czujnikach i mikrosystemach. Przykład zastosowania grzejnika grubowarstwowego przedstawiono w rozdz. 5.3.1, w którym opisano półprzewodnikowy czujnik gazu wykonany techniką LTCC.

Przedstawiono sposób wytwarzania i stabilność wysokotemperaturową zagrzebanych elementów grzejnych wykonanych w strukturze LTCC. Szerzej wyniki badań omówiono w pracach [13, 56, 111, 114]. Grzejniki o odpowiednim kształcie wykonano metodą nacinania wysuszonych struktur przewodzących laserem Nd:YAG. W czterowarstwowej strukturze grzejnik jest umieszczony na warstwie drugiej od góry (rys. 5.59) [56]. Warstwy grzejne z różnych kompozycji przewodzących (Pt, PtAu, PdAg) nanoszono techniką sitodruku na foliach LTCC typu DP 951 (*green tape*). Po wysuszeniu i obróbce laserowej folie laminowano i wypalano.

Uzyskano ścieżki o minimalnej szerokości 50  $\mu\text{m}$  i odległości 80  $\mu\text{m}$ . Wykonane grzejniki miały rezystancje w zakresie 20–45  $\Omega$  w zależności od rodzaju pasty przewo-

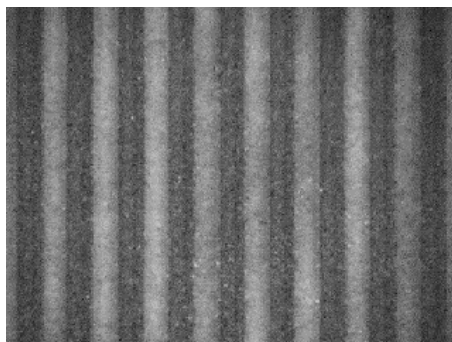


Rys. 5.59. Widok z góry i przekrój struktury LTCC z zagrzebanym grzejnikiem [56]

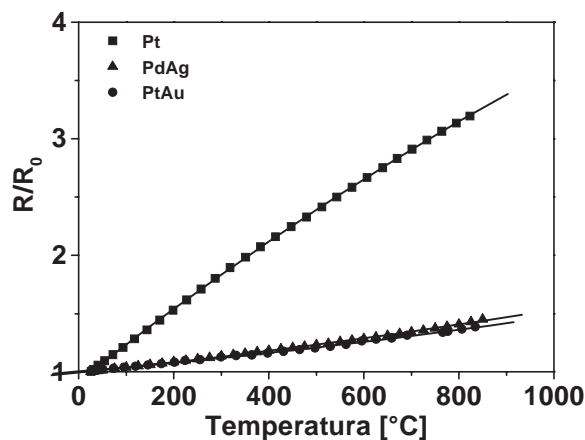
dzącej i szerokości ścieżki. Na rys. 5.60 przedstawiono przykładowy fragment meandru grzejnika ze ścieżkami o szerokości 100  $\mu\text{m}$  [56].

Znormalizowana zależność rezystancji badanych elementów od temperatury określono na podstawie pomiarów w piecu w temperaturze 20–850  $^{\circ}\text{C}$  (rys. 5.61) [56].

Wyniki pomiarów można bardzo poprawnie aproksymować wielomianem drugiego stopnia. Wszystkie elementy wykazują wzrost rezystancji przy wzroście temperatury. Najsilniejszą zależność wykazują grzejniki wykonane z pasty platynowej. W przypadku past PtAu i PdAg ich temperaturowe współczynniki rezystancji (TWR) są dużo mniejsze i zbliżone do siebie.

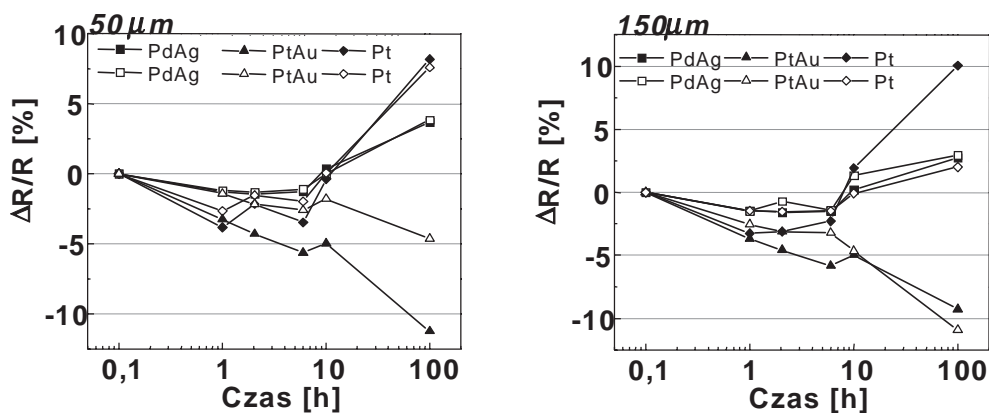


Rys. 5.60. Grzejnik o szerokości ścieżek 100  $\mu\text{m}$  i odstępnie 80  $\mu\text{m}$  [56]



Rys. 5.61. Charakterystyki  $R(T)$  dla warstw przewodzących wykonanych z różnych materiałów [56]

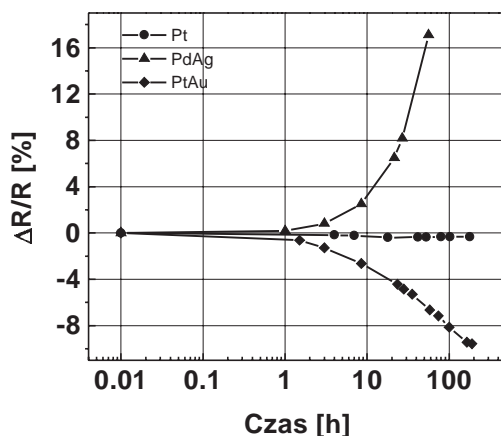
Niezawodność wysokotemperaturową grzejników określono na podstawie starzenia pasywnego (termicznego) i aktywnego (elektrycznego) w temperaturze 600  $^{\circ}\text{C}$  oraz starzenia długoczasowego w impulsowym obciążeniu mocą elektryczną (grzanie – 30 s/ chłodzenie – 90 s). Impulsowe obciążenie zmieniało cyklicznie temperaturę między temperaturą pokojową a temperaturą 600  $^{\circ}\text{C}$ .



Rys. 5.62. Zmiany rezystancji w czasie starzenia termicznego dla różnych materiałów warstw grzejnika [56]

Wyniki starzenia pasywnego prowadzonego w temperaturze 600 °C przedstawiono na rys. 5.62 [56]. Wykreślono względne zmiany rezystancji w czasie, dla grzejników o szerokości ścieżki 50 i 150 μm. Rezystancję mierzono w temperaturze pokojowej. Charakter zmian rezystancji grzejników zależał od typu zastosowanej pasty. W przypadku pasty platynowej i palladowo-srebrowej rezystancja zwiększała się, natomiast dla pasty platynowo-złotej rezystancja grzejnika malała. Zmiany rezystancji badanych grzejników nie przekraczały kilku procent. Nie zaobserwowano znaczącego wpływu szerokości ścieżki na charakter, czy wielkość zmian oporności.

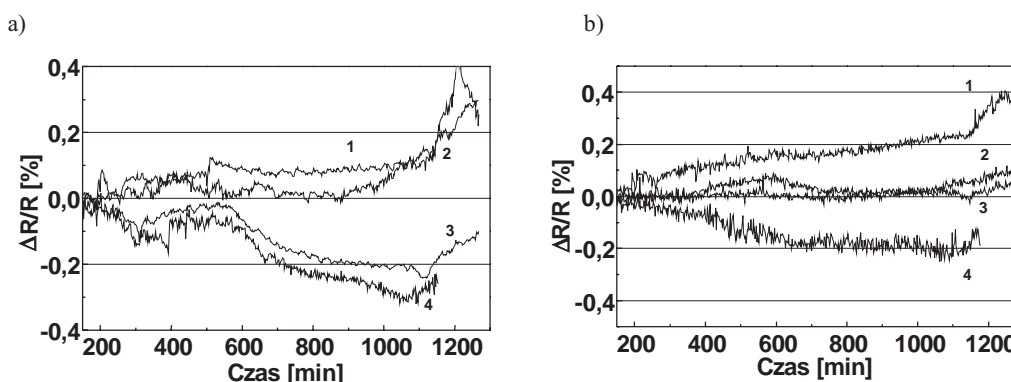
Podczas starzenia aktywnego (elektrycznym) na grzejnik podawano takie napięcie, aby uzyskać temperaturę 600 °C (średnia temperatura grzejnika). Na rys. 5.63 przed-



Rys. 5.63. Względne zmiany rezystancji w trakcie starzenia aktywnego grzejników [56]

stawiono charakterystyki elementów grzejnych o szerokości ścieżki 150  $\mu\text{m}$  wykonanych z różnych materiałów [56]. Test ten daje więcej informacji niż starzenie pasywne. Grzejniki wykonane z past PdAg i PtAu wykazywały dużo większe zmiany rezystancji niż grzejniki platynowe. Charakter zmian był podobny jak w przypadku starzenia pasywnego. Zależał on od składu pasty przewodzącej. Najlepszą stabilnością charakteryzował się grzejnik platynowy. W tym przypadku względne zmiany rezystancji nie przekroczyły 1% po 200 godzinach narażenia.

Badanie stabilności podczas obciążenia impulsowego wywołuje dodatkowe stresse związane z gwałtownym rozgrzewaniem elementu i powstającymi przy tym naprężeniami w strukturze ceramicznej. Na podstawie odpowiedzi termicznej elementu wyznaczono stałe czasowe dla cykli grzania i chłodzenia [114]. Stałe te wynoszą odpowiednio 3–4 s podczas grzania i 10–12 s podczas jego chłodzenia. Warunki narażeń impulsowych określono na podstawie uzyskanych stałych czasowych przyjmując czas grzania 30 s i czas chłodzenia 90 s. Po każdym z cykli (grzanie do temperatury 600 °C i chłodzenie do temperatury otoczenia) wykonywano pomiar rezystancji elementu. Wyniki pomiarów dla kilku próbek zebrano na rys. 5.64. Okazuje się, że zmiany rezystancji nie przekraczały  $\pm 0,4\%$  po 600 cyklach grzania–chłodzenia (1200 min).

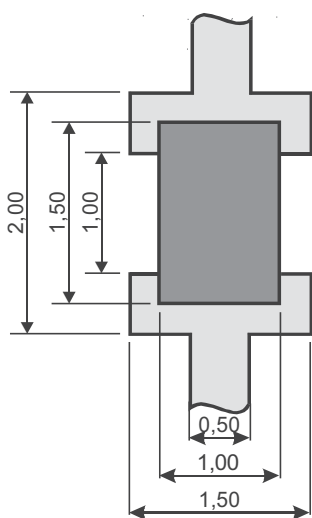


Rys. 5.64. Względne zmiany rezystancji grzejników w warunkach pracy impulsowej – w temperaturze otoczenia (a) oraz w temperaturze 600 °C (b) [56]

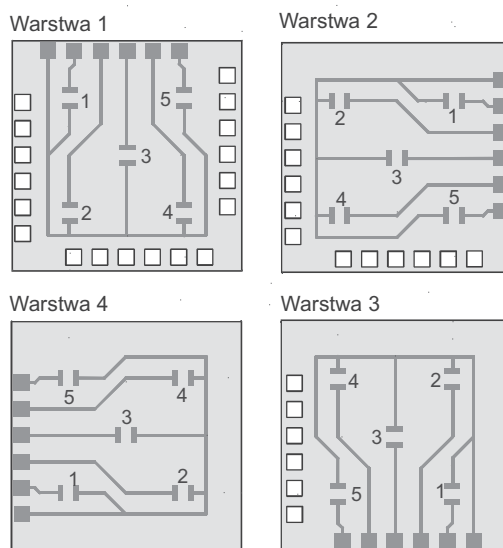
Technologia LTCC umożliwia budowanie układów z zagrzebanymi elementami grzejnymi, które mogą być z powodzeniem wykorzystane m.in. w sensoryce. Wiązką laserową można wytwarzać ścieżki o szerokości 50–150  $\mu\text{m}$  z odstępem 80  $\mu\text{m}$ . Wykonane elementy charakteryzowały się dobrą długoczasową stabilnością wysokotemperaturową zarówno podczas ciągłego, jak i podczas impulsowego obciążenia elektrycznego. Względne zmiany rezystancji podczas starzenia aktywnego grzejników platynowych nie przekroczyły 1%. Grzejnik był odporny na gwałtowne zmiany temperatury. W pracy impulsowej stabilność była lepsza niż  $\pm 0,5\%$ . Temperatura grzejnika zmieniała się bardzo szybko po podaniu napięcia. Stała czasowa procesu grzania wynosiła około 4 sekundy. Można zmniejszyć tę wartość przez zmianę pojemności cieplnej struktury LTCC.

#### 5.4.4. Sieć termistorów do analizy rozkładu temperatury w module LTCC

Analiza zjawisk termicznych w modułach LTCC ma podstawowe znaczenie dla niezawodnej pracy całego układu. Ponad 55% wszystkich uszkodzeń układów związanych jest ze zjawiskami termicznymi [119a]. Nowe układy typu MCIC (*Multichip Integrated Circuits*) zawierają zagrzebane elementy bierne ( $R, L, C$ ) [84, 199]. Mogą one być w postaci elementów typu 2D lub 3D [54]. W niektórych zastosowaniach stosunek liczby elementów biernych do czynnych może być większy niż 20:1. Zwiększenie szybkości działania mikroprocesorów oraz zmniejszanie ich napięcia pracy powoduje dalsze zwiększanie liczby elementów biernych [127]. Gęstość mocy zwiększa się wraz ze zwiększeniem stopnia miniaturyzacji układów MCIC, stąd bardzo istotna jest znajomość temperatury w obszarze całego modułu LTCC oraz temperatury w miejscach źródeł ciepła. Konstrukcję testową, umożliwiającą określenie tych wielkości opisano w pracach [218–221]. Wykonane w opisanej strukturze LTCC termistory spełniały rolę źródeł ciepła oraz czujników temperatury. Do analizy rozkładu temperatury i określenia temperatury źródeł ciepła wykorzystano sieci neuronowe typu RBF (*Radial Basis Function net*). Struktura testowa LTCC przedstawiona jest na rys. 5.65 i 5.66.



Rys. 5.65. Topologia termistora



Rys. 5.66. Ułożenie termistorów na poszczególnych foliach struktury LTCC

Oznaczenie  $p_{i,j}$  oznacza położenie termistora na warstwie  $i$  w miejscu  $j$ . Układ składa się z 4 warstw wykonanych z folii DP 951 AT o grubości przed wypałem po 160  $\mu\text{m}$ . Na każdej z warstw umieszczono po 5 termistorów NTC wykonanych z pasty NT40 firmy DuPont [58]. Ścieżki przewodzące i kontakty wykonano z pasty PdAg DP 6146. Zależność rezystancji od temperatury termistorów można opisać wzorem

$$R = R_{T_o} e^{B(1/T - 1/T_o)}$$

gdzie:  $R_{T_o}$  – rezystancja w temperaturze odniesienia  $T_o$  [K],  
 $B$  – stała termistorowa,  
 $T$  – temperatura [K].

Średnie wartości stałych termistorowych  $B$  wynosiły 1790 K i 1420 K odpowiednio dla termistorów powierzchniowych i zagrzebanych. Pomiary struktury testowej przeprowadzono w stanie ustalonym. Ze względu na dużo mniejszą grubość warstwy LTCC w stosunku do pozostałych wymiarów, do opisu zjawiska przepływu ciepła zastosowano model dwuwymiarowy [119b, 218]:

$$\nabla^2 T(x, y) - \frac{\alpha T(x, y)}{\lambda L_z} = -\frac{U(x, y)}{\lambda L_z}$$

gdzie:  $T(x, y)$  – temperatura mierzona względem temperatury otoczenia  $T_a$ ,  
 $L_z$  – grubość warstwy LTCC,  
 $\lambda$  – przewodność cieplna ceramiki LTCC,  
 $U(x, y)$  – wydajność przestrzennych źródeł ciepła,  
 $\alpha$  – stała związana z przekazywaniem energii do otoczenia.

Po założeniu, że źródła ciepła są punktowe i powierzchnia warstw LTCC nieskończona (założenie możliwe do przyjęcia dzięki bardzo małej przewodności cieplnej LTCC), rozwiązanie równania ma postać [218]:

$$T(x, y) = \sum_{i=1}^I \frac{U_i}{2\pi\alpha} \exp\left(-\frac{(x - \chi_i)^2 + (y - \xi_i)^2}{2\alpha}\right)$$

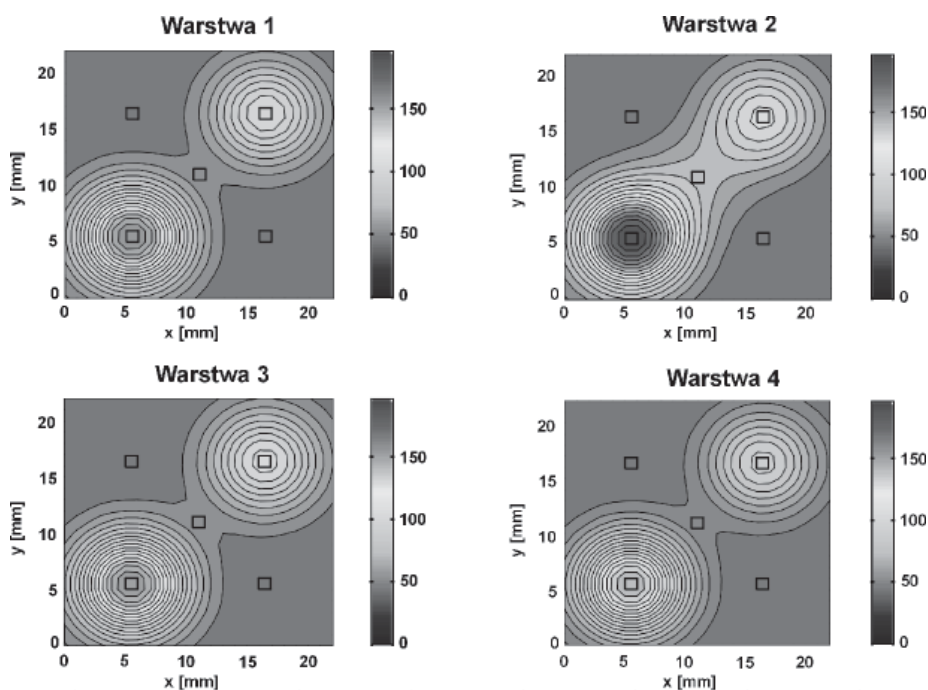
gdzie:  $I$  – liczba źródeł ciepła w punktach  $\sum \sum (\chi_1, \xi_1), (\chi_2, \xi_2), \dots, (\chi_I, \xi_I)$ ,  
 $U_i$  – gęstość mocy źródła  $i$ ,  
 $\alpha$  – stała związana z przewodnością cieplną ceramiki.

Równanie przepływu ciepła może być generowane przez sieć neuronową typu RBF. Na podstawie pomiarów temperatury w różnych miejscach struktury sieć RBF umożliwia określenie rozkładu temperatury w dowolnych punktach modułu LTCC oraz wyznaczenie temperatury źródeł ciepła.

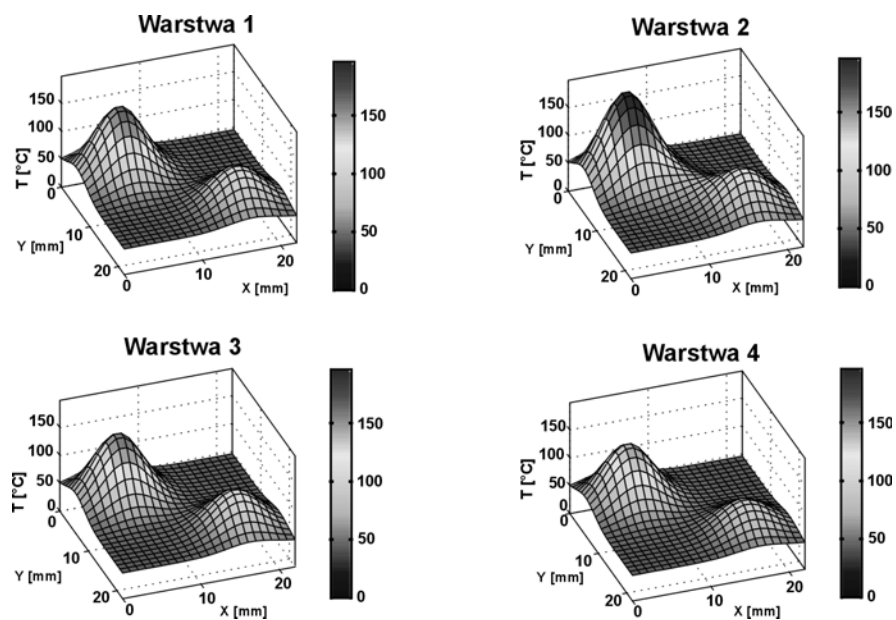
Wyniki aproksymacji rozkładów temperatury z zastosowaniem sieci RBF zamieszczono na rysunkach 5.67 i 5.68 [218]. Przedstawiono rozkłady temperatur na poszczególnych warstwach struktury LTCC w przypadku dwóch źródeł punktowych umieszczonych w punktach p.2.1 i p.2.4 o temperaturach równych odpowiednio 112,8 °C i 202,2 °C (p.2.1 i p.2.4 oznacza termistory umieszczone na warstwie 2 w miejscach 1 i 4).

Na rysunku 5.69 [218] przedstawiono porównanie zmierzonej temperatury grzejnika z temperaturą wyznaczoną za pomocą sieci RBF.

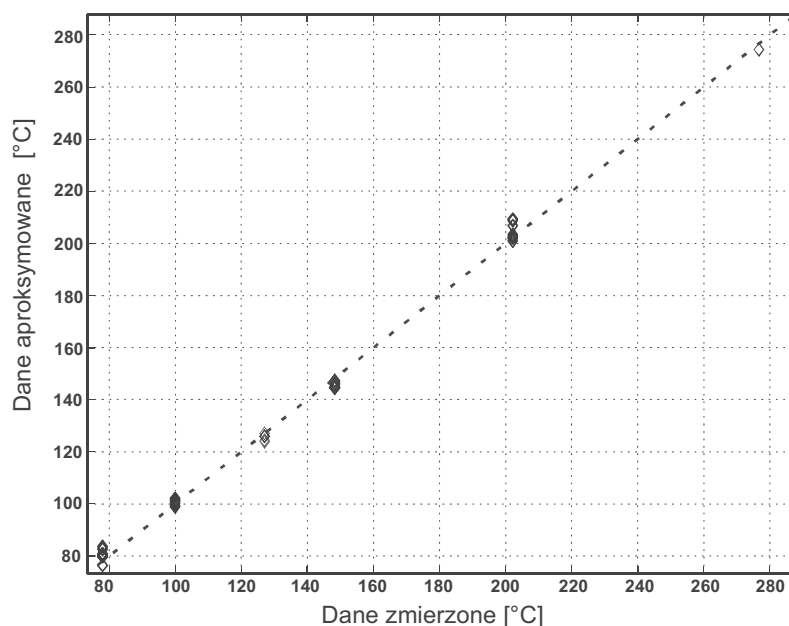
Przedstawiona metoda wykorzystania sieci RBF do wyznaczania rozkładu temperatury oraz temperatury źródeł ciepła może być bardzo przydatna w praktyce. Pomiar temperatury w różnych miejscach modułu LTCC, za pomocą kilku czujników temperatury,



Rys. 5.67. Aproksymacja rozkładu temperatury (2D) za pomocą sieci neuronowej RBF.  
Źródła ciepła umieszczone w punktach p.2.1 (112,8 °C i p.2.4 (202,2 °C)



Rys. 5.68. Aproksymacja rozkładu temperatury (3D) za pomocą sieci neuronowej RBF.  
Źródła ciepła umieszczone w punktach p.2.1 (112,8 °C i p.2.4 (202,2 °C)



Rys. 5.69. Weryfikacja temperatury grzejnika (p.2.4) wyznaczonej za pomocą sieci RBF  
( $T_z$  – temperatura zmierzona,  $T_w$  – temperatura wyznaczona za pomocą sieci RBF)

umożliwia określenie miejsc i wartości maksymalnych temperatur wewnątrz struktury typu MCIC. Temperatury te mają decydujące znaczenie dla poprawnej pracy i niezawodności całego układu.

## 5.5. Obudowy układów MEMS

Obudowy klasycznych mikroprocesorów były jednym z pierwszych zastosowań ceramiki LTCC. Obecnie coraz częściej wykonuje się tą techniką obudowy nowoczesnych układów MEMS [15, 17, 144, 172]. Często mogą one decydować o niezawodności całego urządzenia i poprawnej pracy całego systemu. Cena obudowy może stanowić istotną część wartości całego układu.

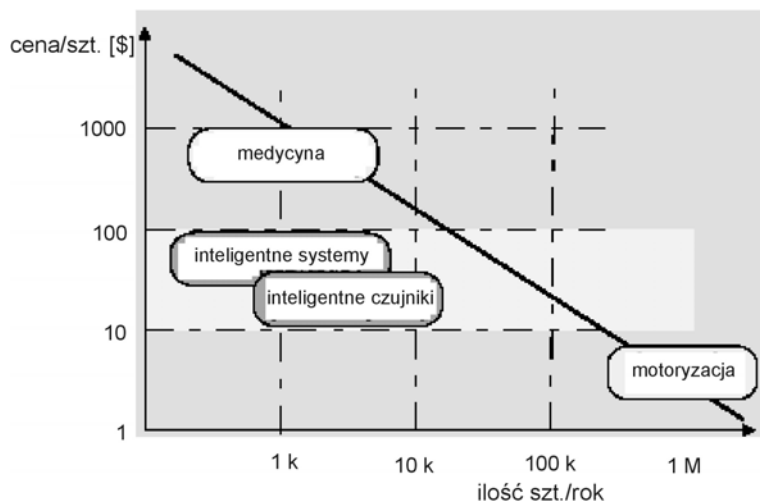
Obudowy układów MEMS powinny spełniać następujące zadania:

- zabezpieczać mechanicznie układ przed uszkodzeniem,
- zapewniać odpowiednią atmosferę gazową wewnątrz obudowy,
- przekazywać z zewnątrz do układu sygnały elektryczne i optyczne,
- umożliwiać dołączenie z zewnątrz obiegu gazu lub cieczy,
- chronić układ MEMS przed wilgocią i zewnętrznymi zanieczyszczeniami.

Obudowy wykonane techniką LTCC spełniają podane wymagania, a ponadto mogą zawierać sieć czujników, grzejników, przetworników itp. oraz zintegrowany układ elek-



troniczny typu MCIC. Cena obudowy powinna być możliwie niska i dostosowana do ceny układu MEMS. Dla średniej i wielkiej skali produkcji powinna być ona mniejsza od 10\$ [172]. Na rys. 5.70 [172] pokazano zależność ceny układu MEMS od wielkości produkcji.



Rys. 5.70. Zależność ceny układu MEMS od wielkości produkcji [172] (© 2000 IEEE)

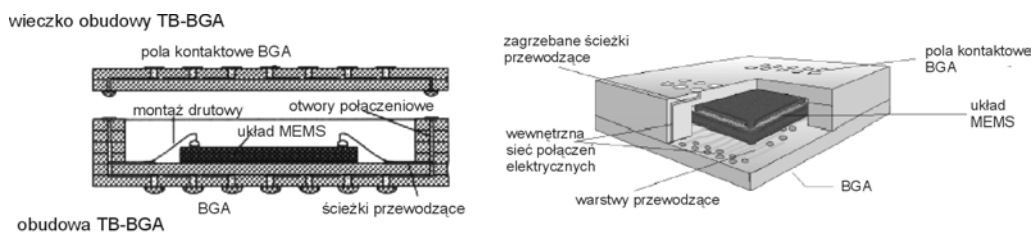
W celu obniżenia ceny obudowy oraz uproszczenia zasad projektowania planuje się wprowadzenie systemu modułów uniwersalnych. Można będzie w ten sposób budować całe urządzenia oparte na elementach składowych wykonanych z różnych materiałów, różnymi technologiami przez różnych producentów [172]. Jeden z takich układów modułowych, składający się ze zintegrowanych czujników, diod laserowych, elementów optycznych, układów scalonych, ogniw słonecznych i baterii opisano w pracy [152]. Na rysunku 5.71 [172] przedstawiono koncepcję obudowy układu MEMS naśladującą typową obudowę TB-BGA (*Top Bottom Ball Grid Array*).

Oprócz przyłączy elektrycznych w obudowach układów MEMS bardzo ważną rolę odgrywają przyłącza optyczne, mechaniczne, termiczne, płynu i gazu. Przykład realizacji takich przyłączy pokazano na rys. 5.72 i 5.73 [172].

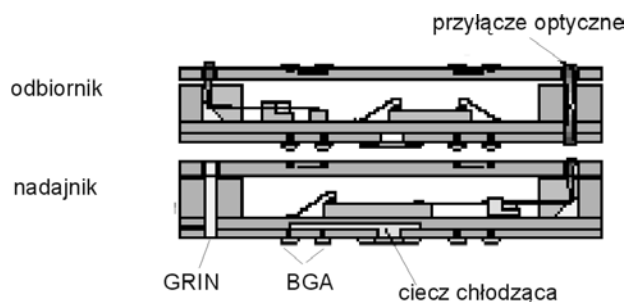
Obudowę typu TB-BGA doskonale można wykonać techniką LTCC. Na rys. 5.74 [172] przedstawiono obudowę wykonaną dla mikrocieczowego układu MEMS.

Na rys. 5.75 [172] pokazano czujnik przepływu oparty na przetworniku ciśnienia różnicowego MEMS.

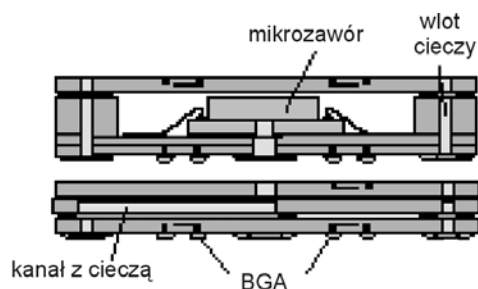
Na rysunkach 5.76–5.78 [182a] przedstawiono obudowę LTCC żyroskopu MEMS [182a]. Obudowę wykonano z 12 folii LTCC (DuPont 951) grubości 125  $\mu\text{m}$  każda. Do góry obudowy przylutowano stopem Au-Sn kowarową pokrywę. Na spodzie obudowy o wymiarach 13  $\times$  13 mm, znajduje się 143 pól kontaktowych typu *ball grid* wy-



Rys. 5.71. Obudowa typu TB-BGA [172] (©2000 IEEE)



Rys. 5.72. Przyłącza optyczne do struktury MEMS [172] (©2000 IEEE)

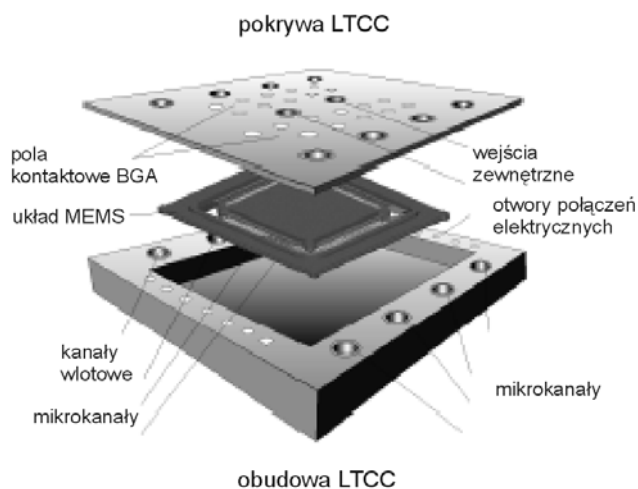


Rys. 5.73. Przyłącze płynu do obudowy układu MEMS [172] (©2000 IEEE)

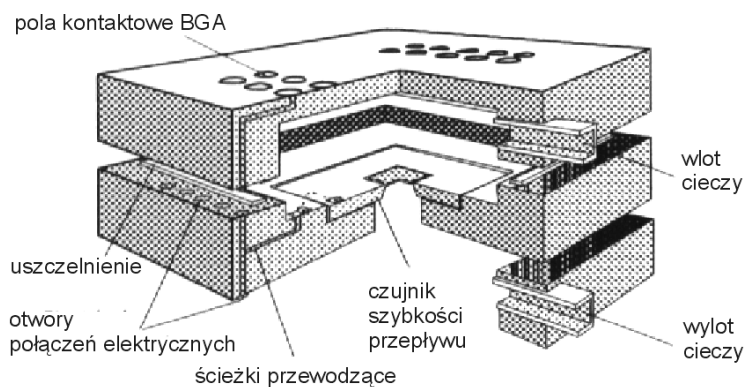
konanych ze skokiem 1 mm i pokrytych kulkami lutowniczymi Sn60Pb40 o średnicy 0,6 mm. Czujnik MEMS jest dołączony do obudowy techniką *flip chip*. Obudowa zamknięta jest na gorąco w próżni. Po zamknięciu wewnątrz obudowy znajduje się próżnia o ciśnieniu  $6 \cdot 10^{-1}$  Pa.

Przedstawiona obudowa żyroskopu, wykonana techniką LTCC, zapewnia możliwość dołączenia dużej ilości wejść i wyjść elektrycznych (I/O). Ponadto, umożliwia wykonanie sieci krótkich połączeń o dużej przewodności elektrycznej między poszczególnymi elementami oraz wytworzenie dobrej izolacji elektrycznej między czujnikami i wyprowadzeniami elektrycznymi.

Wydaje się, że obudowa typu TB-BGA jest najbardziej odpowiednia dla modułowych układów MEMS. Można ją z łatwością wykonać techniką LTCC, wykorzystując



Rys. 5.74. Moduł TB-BGA wykonany techniką LTCC dla mikrocieczowego układu MEMS [172] (©2000 IEEE)

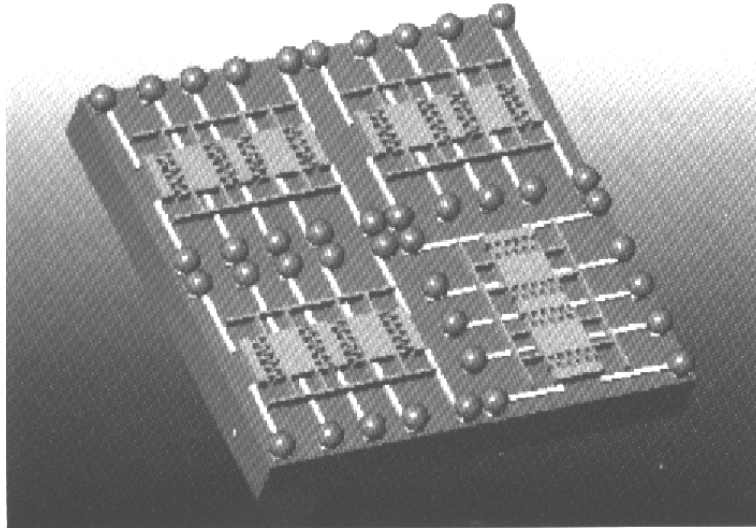


Rys. 5.75. Obudowa LTCC czujnika szybkości przepływu MEMS [172] (©2000 IEEE)

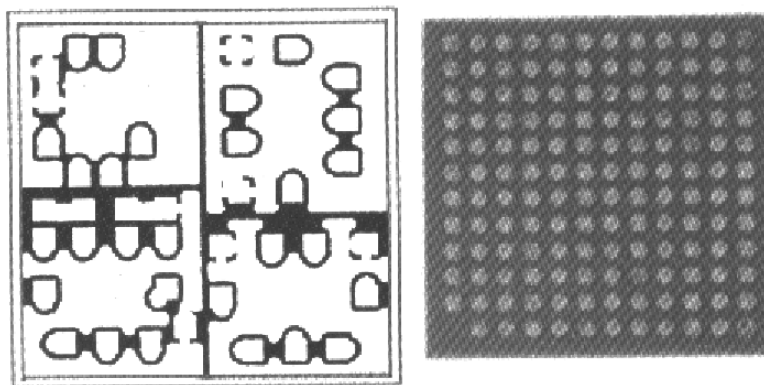
podstawowe zalety tej technologii. Znormalizowanie obudów dla MEMS pozwoli na łatwiejsze i szybsze projektowanie nowych urządzeń. Bardzo ważna jest standaryzacja mechanicznych, optycznych, komunikacyjnych i zasilających elektrycznie wyprowadzeń oraz przyłączy mediów (gaz, płyn). Metodą modułów będzie można wytwarzać tanie i niezawodne obudowy do układów MEMS [172].

## 5.6. Wyświetlacze plazmowe

Firma Sarnoff zastosowała technikę LTCC do wytwarzania tylnego panelu wyświetlacza plazmowego [100a]. Nowo opracowany panel składa się ze specjalnej folii LTCC



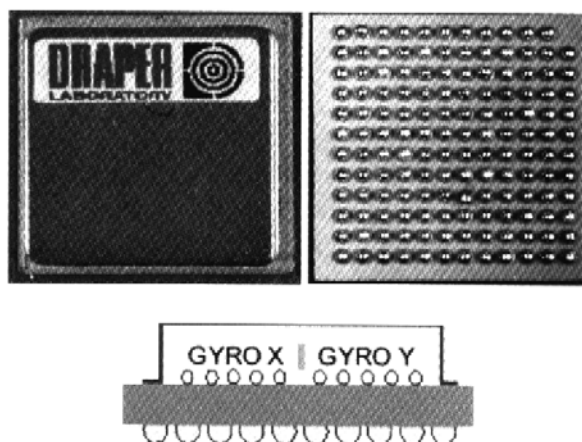
Rys. 5.76. Żyroskop MEMS [182a]



Rys. 5.77. Podłoże LTCC [182a]

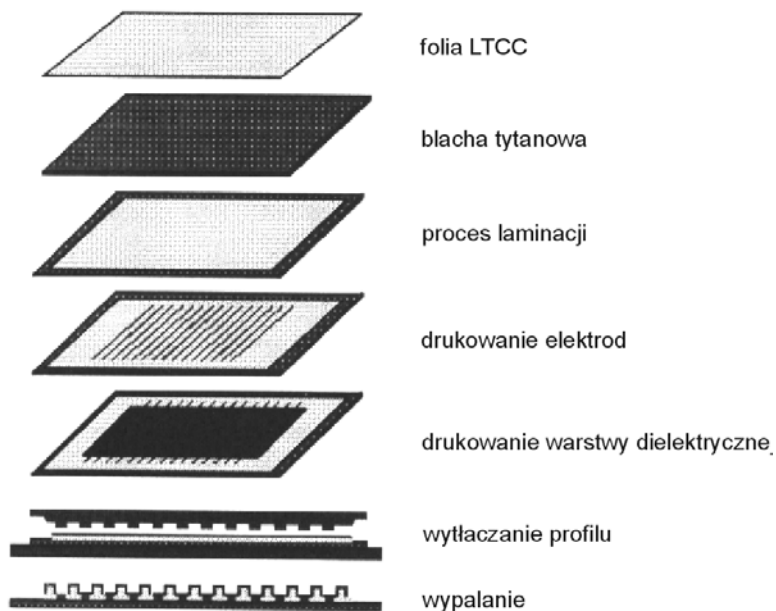
z laminowanej do blachy tytanowej. Na folii LTCC wykonano ścieżki przewodzące oraz bariery dielektryczne między nimi. Nowy panel zastępuje dotychczas stosowane panele wykonywane na podłożach szklanych, w których ścieżki przewodzące i bariery izolacyjne wykonywano techniką sitodruku, fotolitografii, piaskowania itp. Wyświetlacze PDP (*Plasma Display Panel*) są stosowane w dużych, płaskich odbiornikach telewizyjnych wieszanych na ścianach oraz w monitorach komputerów.

Konstrukcję i poszczególne etapy wytwarzania tylnego panelu technologią LTCC-M (*Low Temperature Co-fired Ceramic on Metal*) przedstawiono na rys. 5.79. Zdjęcia panelu, wykonane za pomocą mikroskopu SEM, przedstawiono na rys. 5.80 i 5.81. W pierwszym etapie folia LTCC, składająca się ze specjalnego szkliwa i materiału orga-

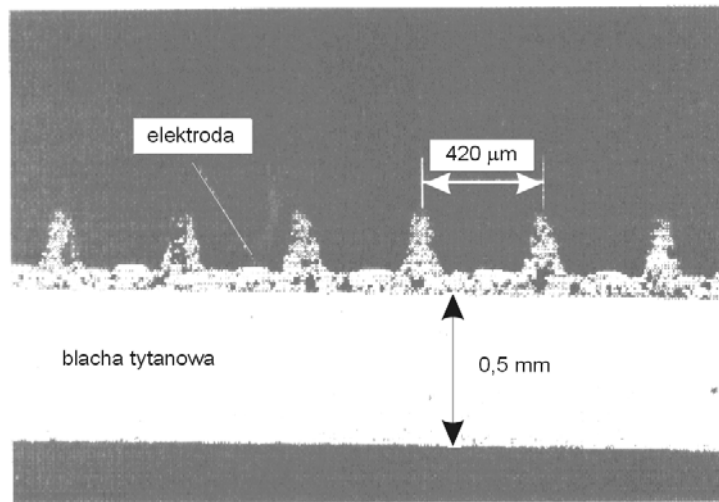


Rys. 5.78. Żyroskop MEMS w obudowie LTCC typu BGA [182a]

nicznego, jest laminowana do metalowej blachy tytanowej grubości 0,5 mm. W drugim etapie techniką sitodruku nanoszone są ścieżki przewodzące, a następnie warstwa dielektryczna pokrywająca całą powierzchnię. W kolejnym etapie, za pomocą specjalnej matrycy, wytłaczany jest ostateczny profil powierzchni elementu – wysokie barierne dielektryczne oddzielające położone niżej elektrody. W ostatnim etapie całość jest

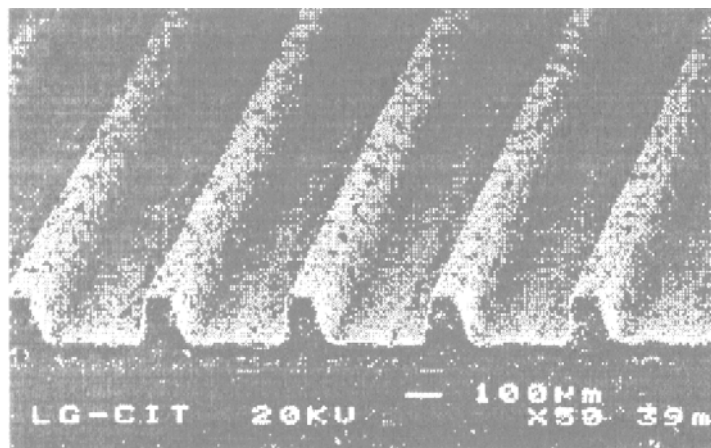


Rys. 5.79. Etapy wytwarzania tylnego panelu PDP techniką LTCC-M [100a] (zgodą Society for Information Display na reprodukcję)



Rys. 5.80. Przekrój przez panel LTCC-M [100a]  
(zgodą Society for Information Display na reprodukcję)

współwypalana. Podstawowym wymaganiem stawianym elementom PDP jest zbliżona wartość współczynników rozszerzalności termicznej panelu tylnego i przedniego szklanego. Oba panele są szczelnie łączone ze sobą. Firma Sarnoff opracowała specjalną folię LTCC (LGC-1) składającą się ze szkła  $\text{MgO-ZnO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ . Współczynnik rozszerzalności termicznej folii LGC-1 wynosi 8,6 ppm/K, stała dielektryczna (mierzona dla częstotliwości 1 MHz)  $\epsilon = 7$ , napięcie przebicia  $> 1500$  [V/mm], współczynnik odbicia (dla światła o długości 550 nm) wynosi 57%. W zależności od wymaganej wysokości i szerokości bariery folia LGC-1 jest wytwarzana o grubościach od 100 do 300 μm.



Rys. 5.81. Zdjęcie panelu wykonane za pomocą mikroskopu SEM [100a]  
(zgodą Society for Information Display na reprodukcję)

Elektrody przewodzące, nanoszone techniką precyzyjnego sitodruku, charakteryzują się bardzo małą rezystancją powierzchniową  $< 3 \text{ m}\Omega/\square$ .

Tyłny panel PDP, wykonany techniką LTCC-M, jest znacznie cieńszy i lżejszy od paneli szklanych. Grubość panelu LTCC-M wynosi 0,8 mm (szklanego 3,0 mm). 40" panel waży tylko 1,6 kg (szklany 4,6 kg).

Nowo opracowany panel doskonale nadaje się do zastosowania w kolorowych wyświetlaczach plazmowych. Panel został nazwany przez producenta jako LTCC-M PDP. Jest to panel najcieńszy i najlżejszy spośród dotychczas produkowanych. Blacha tytanowa, będąca podłożem panelu, zapewnia doskonałe warunki odprowadzania ciepła. Bezpośrednio na panelu techniką LTCC-M można wytworzyć również zintegrowany układ elektroniczny do sterowania panelem.

W celu określenia charakterystyk wyładowania w plazmie wytworzono panel testowy o przekątnej obrazu równej 7,5". Elementarne komórki obrazu, o wymiarach  $1,26 \times 0,42 \text{ mm}$ , rozmieszczono ze skokiem  $420 \mu\text{m}$ . Tyłny panel pokryto warstwą luminoforu R, G i B. Cały panel wypełniono mieszaniną gazów He+Ne+Xe o ciśnieniu  $4 \cdot 10^4 \text{ Pa}$ . Napięcie główne mierzone w tych warunkach wynosiło 158 V, a napięcie robocze 65 V.

## 6. ZAKOŃCZENIE

Układy mikroelektroniczne wykonywane technologią LTCC zaczęto produkować dopiero w latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku, chociaż pierwsze folie ceramiczne *green tape*, stosowane do wytwarzania kondensatorów wielowarstwowych, opatentowano już w 1944 r. Olbrzymi rozwój produkcji mikroelektronicznych modułów LTCC oraz bardzo różnorodnych zastosowań tej techniki, obserwuje się od końca lat dziewięćdziesiątych XX wieku.

Technologią LTCC można wykonywać nie tylko obudowy układów mikroelektronicznych z siecią wewnętrzną ścieżek przewodzących tworzących połączenia elektryczne (pierwsze zastosowania), ale również elementy bierne, układy mikrofalowe, czujniki i mikrosystemy. Możliwość wykonywania kanałów i wnęk wewnątrz modułu LTCC umożliwia zastosowanie tej technologii do wytwarzania mikroreaktorów chemicznych, układów hydraulicznych w skali mikro z systemami zaworów i pomp (chłodzenie, układy typu  $\mu$ TAS, mikroskopy biologiczne itp.), ogniwo paliwowych, płaskich wyświetlaczy plazmowych oraz urządzeń stosowanych w biotechnologii i medycynie.

Ceramika LTCC ma wiele zalet, które umożliwiają wykonywanie tanich układów MCM o bardzo dużej niezawodności. Rozwój nowych systemów folii ceramicznych oraz biernych elementów zagrzebanych obniżył koszt modułów z jednoczesną poprawą ich parametrów.

Technologia LTCC może być rozszerzana na wiele nowych komercyjnych i specjalnych zastosowań. Stało się to możliwe dzięki poprawie właściwości termicznych, małym stratom dielektrycznym oraz pojawieniu się nowych folii ceramicznych o bardzo różnorodnych właściwościach elektrycznych. Główne obszary aktualnych zastosowań LTCC to motoryzacja (ABS, poduszki powietrzne, układ zapłonowy, automatyczne skrzynie biegów), układy scalone (obudowy MCM), telekomunikacja bezprzewodowa (telefony komórkowe, telefony bezprzewodowe), zasilacze urządzeń RF, elektronika satelitarna, stacje radarowe powietrzne i naziemne, pojazdy kosmiczne, sprzęt wojskowy, układy MEMS (obudowy), czujniki (przepływu, światła, gazu, zbliżeniowe, grzejniki do czujników, mikrosystemy), komputery (stacje dysków, laptopy), sprzęt medyczny, sprzęt powszechnego użytku (magnetowidy, kamery, sprzęt DVD). Największe zastosowanie moduły LTCC znajdują w motoryzacji i telekomunikacji. Potęgą w zakresie technologii LTCC była w roku 1999 Japonia, gdzie wyprodukowano 60% wszystkich



układów LTCC. W USA technologię LTCC stosuje się do wytwarzania sprzętu elektronicznego znajdującego się na pokładzie pojazdów kosmicznych.

Oprócz obniżenia kosztów oraz zwiększenia gęstości i stopnia integracji obudów, technologia LTCC oferuje następujące, bardzo korzystne, właściwości wykonywanych modułów:

- mała rezystancja ścieżek przewodzących,
- doskonałe charakterystyki wysokoczęstotliwościowe,
- elastyczność w projektowaniu różnorodnych struktur (np. obudowy MEMS),
- możliwość wykonywania zagrzebanych elementów typu 2D i 3D.

Koszty układów mikroelektronicznych wykonanych techniką LTCC i na obwodzie drukowanym FR-4 mogą być porównywalne, jeżeli weźmie się pod uwagę całkowity koszt urządzenia. W publikacji [140] porównano koszty modułu *Bluetooth* wykonanego obu technologiami. Okazało się, że koszt modułu LTCC jest o 20% niższy, a wymiary o 50% mniejsze, w porównaniu do identycznego modułu wykonanego na płycie FR-4.

Przewidywane kierunki rozwoju (*roadmap*) technologii grubowarstwowej i LTCC zamieszczono w tabeli 6.1.

Monografia jest przeznaczona dla osób, które zamierzają zająć się wytwarzaniem modułów LTCC oraz dla ich potencjalnych odbiorców w bardzo różnych dziedzinach zastosowań (mikroelektronika, biologia, medycyna itp.). Książka informuje o podsta-

Tabela 6.1. Przewidywane kierunki rozwoju (*roadmap*) technologii grubowarstwowej i LTCC [46, 140]

Wielkość (cecha)	Parametr (czas)	2001	2003	2005	2011
Redukcja wymiarów	średnica otworu ( <i>via</i> ) [ $\mu\text{m}$ ]	50	50	40	25
Wzrost gęstości upakowania	raster otworu [ $\mu\text{m}$ ]	200	150	120	75
Redukcja wymiarów	szerokość ścieżek [ $\mu\text{m}$ ]	30	25	20	15
Wzrost gęstości upakowania	raster ścieżek [ $\mu\text{m}$ ]	60	50	40	30
Redukcja kosztów	wymiar panelu [ $\text{cm}^2$ ]	165	250	360	645
Połączenia elektryczne	gęstość ścieżek przewodzących [ $\text{cm}/\text{cm}^2$ ]	40	133	200	267
Czas opracowania komercyjnego prototypu	liczba dni	30	20	15	5
Czas opracowania komercyjnego produktu	liczba dni	15	10	10	5
Czas opracowania specjalnego prototypu	liczba dni	130	100	90	50
Czas opracowania specjalnego prototypu	liczba dni	75	50	40	20
Wzrost częstotliwości pracy	częstotliwość [MHz]	40	94		
Poprawa jakości połączeń elektrycznych i mechanicznych	temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]	+150	+160	+175	+200

wach, procesach wytwarzania i możliwościach technologii LTCC. Bardzo szeroko zaprezentowano różnego typu moduły LTCC. Przedstawiono wiele konkretnych rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych struktur LTCC, mających zastosowania w bardzo różnych dziedzinach.

Monografia składa się z dwóch części. W pierwszej opisano ogólnie technologie MCM (MCM-D, MCM-L, MCM-C), szczegółowo technologię grubowarstwową (będącą podstawową techniką stosowaną do wytwarzania ścieżek przewodzących i elementów elektronicznych w module LTCC) oraz technologię i projektowanie modułów LTCC.

W drugiej części przedstawiono główne kierunki zastosowań technologii LTCC. Oprócz typowych zastosowań, takich jak obudowy układów scalonych VLSI, układy mikrofalowe i wielostrukturalne układy scalone (MCIC) opisano konstrukcję i zasadę działania różnych czujników i mikrosystemów wykonanych techniką LTCC. Zamieszczono również szczegółowy opis układów chłodzących, grzejnych i analizujących rozkład temperatury. Bardzo ciekawym zastosowaniem technologii LTCC jest wykonywanie wyświetlaczy plazmowych.

## Literatura

- [1] ASADA G., DONG M., LIN T.S., NEWBERG F., POTTIE G., KAISER W.J., *Wireless integrated network sensors: Low power system on chip*, 1998.
- [1a] AMEY D.I., KEATING M.Y., SMITH M.A., HOROWITZ S.J., DONAHUE P.C., NEEDES C.R., *Low loss tape materials system for 10 to 40 GHz application*, Proc. Int. Symp. on Microel. IMAPS USA, Boston 2000, 654–658.
- [2] BACHER R.J., WANG Y.L., SKURSKI M.A., CRUMPTON J.C., NAIR K.M., *Next generation ceramic multilayer systems*, Proc. Int. Symp. on Microelectronics IMAPS USA, Boston Sept. 2000, 202–207.
- [3] BACHNER F.J., VARDAMAN E.J., KALE V., *Trends in RF module packaging for wireless applications*, Proc. Int. Conf. on HDI and Systems packaging, Denver 2000, 82–86.
- [4] BANSKY J., BROCKHAUS A., ENGEMANN J., ASMUSSEN J., SLOSARČIK S., *3D-Green Tape planar Langmuir – sensor structures for plasma diagnostics*, Proc. 1993 International Symposium ISHM, Dallas, Nov. 1993, 20–25.
- [5] BANSKY J., BROCKHAUS A., ENGEMANN J., YUAN Y., LIVOVSKY L., SLOSARČIK S., *Integrated 3D-LTCC sensors for “in-situ” plasma diagnostics*, Proc. of ISHM 1995, 119–124.
- [6] BANSKY J., KALITA W., POTENCKI J., SLOSARČIK S., *Integrated converter of pressure / vacuum into frequency*, Proc. 21st Conference of ISHM Poland Chapter, Ustroń, Sept. 1997, 73–76.
- [7] BARNWELL P., REYNOLDS Q., *An investigation of the properties of LTCC materials and compatible conductors for their use in wireless applications*, Proc. 37th IMAPS Nordic Conf., Helsingør 2000, 65–70.
- [8] BARNWELL P., ZHANG W., LEBOWITZ J., JONES K., MACDONALD N., FREE C., TIAN Z., *An investigation of the properties of LTCC materials and compatible conductors for their use in wireless applications*, Proc. Int. Symp. on Microelectronics IMAPS, Boston 2000, 659–664.
- [9] BARNWELL P., REYNOLDS Q., *LTCC systems for low GHz frequencies - a study of the critical properties and their measurement techniques*, Proc. Europ. Conf. on Wireless Technologies, London Jan. 2001, 80–87.
- [10] BAUER R., WOLTER K. J., SAUER W., *Three-Dimensionally Formed Thick Film Devices with Low Temperature Cofiring Ceramic Multilayer Technology*, Proc. of ISHM 1995, 481–486.
- [11] BAUER R., LUNIAK M., KATZUNG A., *Low Temperature Cofiring Ceramic-Multilayer-Technology, some aspects of materials and technology applications*, Proc. 20th Conference of ISHM Poland Chapter, Jurata, Sept. 1996, 9–14.
- [12] BAUER R., LUNIAK M., REBENKLAU L., WOLTER K.-J., SAUER W., *Realization of LTCC-multilayer with special cavity applications*, Proc. of 1997 International Symposium on Microelectronics ISHM-IMAPS, Philadelphia, October 14–16, 1997, 659–664 .
- [13] BAUER R., GOLONKA L.J., KIRCHNER T., NITSCH K., THUST H., *Optimization of thermal distribution in ceramics and LTCC structures applied to sensor elements*, Microelectronics Int., vol. 15/2, 1998, 34–38.

- [14] BAUER R., REBENKLAU L., WOLTER K.J., SAUER W., *Aspects of LTCC utilization for micro-technical application*, Proc. IEMT/IMC, Japan, 1999, 257–262.
- [15] BAUER C.E., *Packaging MEMS, the great challenge of the 21st century*, Proc. IEMT/IMC, Tokyo 2000, 239–243.
- [16] BAUER R., DZIEDZIC A., GOLONKA L.J., WOLTER K.-J., *Investigation for miniaturization of thick film resistors by application of a postpatterning thick film system*, Proc. European Microelectronics Packaging and Interconnection Symposium, Prague (Czech Republic), 2000, 134–139.
- [17] BAUER C.E., *Packaging MEMS, the great challenge of the 21st century*, Proc. 37th IMAPS Nordic Conf., Helsingør 2000, 146–150.
- [18] BAUER R., STRICKERT V., WOLTER K.-J., SAUER W., LEONESCU D., SVASTA P., *Investigation on an integrated liquid cooling system in LTCC multilayer*, Proc. 24th Int. Spring Seminar on Electronics Technology, Calimanesti-Caciulata (Romania), 2001, 178–182.
- [19] BERRY C., PARTLOW D., VASILOW T., GURKOVICH S., BAILEY A., *A design of experiment for a tape casting process*, Proc. Int. Symp. on Microelectronics IMAPS USA, Boston Sept. 2000, 150–155.
- [20] BHATTACHARYA S.K., TUMMALA R.R., ALLEN M.G., KOHL P., BIDSTRUP-ALLEN S.A., STREIFER S.K., SINGH A., KINGON A.I., WHITE G.W., *Next generation filled-polymer dielectrics*, Proc. EMIT'98 Conf., 1998, 308–313.
- [21] BHATTACHARYA S.K., TUMMALA R.R., *Next generation integral passives: materials, processes, and integration of resistors and capacitors on PWB substrates*, J. Mater. Sci.: Mater. in Electronics, vol. 11, 2000, 253–268.
- [22] BHATTACHARYA S.K., PARK J.Y., TUMMALA R.R., *Fabrication of a fully integrated passive module for filter application using MCM-D compatible processes*, J. Mater. Sci.: Mater. in Electronics, vol. 11, 2000, 455–460.
- [23] BHATTACHARYA S.K., TUMMALA R.R., *Integral passives for next generation of electronic packaging: application of epoxy/ceramic nanocomposites as integral capacitors*, Microelectronics Journal 32(2001), 11–19.
- [24] BOCHENEK A., BOBER B., DZIEDZIC A., GOLONKA L.J., *Wire bonding in LTCC circuits – preliminary investigations*, Mat. Konferencyjne VII Konf. Naukowa Technologia Elektronowa ELTE'2000, Polanica 2000, 494–498.
- [25] BOCHENEK A., BOBER B., DZIEDZIC A., GOLONKA L.J., *Investigations of assembly properties of conductive layers in LTCC circuits*, Microelectronics International, vol. 18 (2), 2001, 11–15.
- [26] BROWN D., *Trends in RF/Wireless Integrated Packaging, An overview*, Proc. Europ. Conf. on Wireless Technologies, London Jan. 2001, 118–127.
- [27] CATTANEO A., DELL ACQUA R., FORLANI F., PIROZZI L., *Low cost thick film pressure sensor*, SAE Technical Paper, series No. 800023, SAE Meeting, Detroit, 1980, 49–54.
- [28] CATTANEO A., DELL ACQUA R., DELL ORTO G., PIROZZI L., CANALI C., *A practical utilization of the piezoresistive effect in thick film resistors: a low cost pressure sensor*, Proc. Int. Microelectronics Symp. ISHM USA, 1980, 221–228.
- [29] CHAI L., *New wire bondable gold thick film conductors for LTCC applications*, Proc. Int. Symp. on Microelectronics IMAPS, Boston 2000, 702–705.
- [30] CHAI L., SHAIKH A., STYGAR V., *New generation silver conductor system for LTCC applications*, Wireless Symposium, San Jose, Feb. 14, 2001.
- [31] CHEN L.S., FU S.L., HUANG K.D., *Capacitors embedded in the Low Temperature Co-fired Ceramics*, Proc. IEMT/IMC Symp., April 15–17, 1998, Japan 59–63.

- [32] CHEN L.S., FU S.L., LIN W.K., HUANG K.D., *Dielectric properties of internal capacitors in co-fired ceramic substrates*, Jpn J. Appl. Phys. vol. 39 (2000), 2675–2679.
- [33] CHIANG S-K., *Radio frequency packaging*, Proc. IEMT/IMC, Tokyo 2000, 367–370.
- [34] Chicago Laser Systems Inc., *An introduction to laser trimming*, Informacja firmowa.
- [35] CHO H.M., YOO C.S., LIM W., LEE W.S., KWAK S.B., KANG N.K., PARK J.C., *Characterization of buried resistor for RF MCM-C design*, Proc. Int. Conf. HDI and Systems Packaging, Denver 2000, 192–195.
- [36] CHO Y.S., NEEDES C.R., SONDEERS K.E., HANG K.W., DONDRUE P.C., NIBLETT A.R., AMEY D.I., *LTCC ceramic components on printed wiring boards – the issues and potential solutions*, Proc. Int. Symp. on Microelectronics, Boston 2000, 665–668.
- [37] COTE R.E., HOROWITZ S.J., LAWSON J.W., *Ceramic multichip module and high density thick film interconnect technology*, Electr. Pack., and Production, April 1998, 43–44, 46, 48.
- [38] COTE R.E., *Back to the future – integrated passive devices*, Adv. Microel. Jan/Feb. 1999, 20–21.
- [39] COTE R.E., *Ceramic substrate interconnection technology–2000*, Adv. Microelectronics, Jan/ Feb. 2001, 22–25.
- [40] CRUMPTON J.C., COFIELD V.E., BACHER R.J., *Through-hole plugs and thermal vias*, Proc. Int. Symp. on Microelectronics IMAPS USA , Boston 2000, 325–329.
- [41] CTS Microelectronics – informacja firmowa, <http://www.ctscorp.com/>.
- [42] DELANEY K., BARRETT J., BARTON J., DOYLE R., *Characterization and performance prediction for integrated capacitors in Low Temperature Co-fired Ceramic Technology*, IEEE Trans. on Advanced Packaging, vol. 22, no 1, Feb. 1999, 68–77.
- [43] DELANEY K., BARRETT J., BARTON J., DOYLE R., *Characterisation and performance prediction for integral resistors in Low Temperature Co-fired Ceramic Technology*, IEEE Trans. on Advanced Packaging, vol. 22, no 1, Feb. 1999, 78–85.
- [44] DEVLIN L., PEARSON G., *Low cost RF and microwave components in LTCC*, Proc. European Conference on Wireless Technologies, London Jan. 2001, 59–64.
- [45] DOANE D.A., FRANZON P.D., *Multichip Module technologies and alternatives, the basics*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1993.
- [46] DOUGHERTY J., GALVAGNI J., MARCANTI L., SANDBORN P., CHARBONNEAU R., SHEFFIELD R., *The NEMI roadmap perspective on integrated passives*, Proc. 13th European Microelectronics and Packaging Conf., Strasbourg May 2001, 53–58.
- [47] DRÜE K-H., THUST H., POLZER E., *Wide band characterisation of trimmed and untrimmed buried resistors in LTCC*, Proc. 13th European Microelectronics and Packaging Conf., Strasbourg May 2001, 73–77.
- [48] DUFFY R., SAGE M., *Innovation problems in MCM technology*, Proc. International Conference on Multichip Modules, Denver, April 1997, 1–6.
- [49] Du Pont – informacja firmowa, [www.dupont.com](http://www.dupont.com).
- [50] DZIEDZIC A., GOLONKA L.J., LICZNEKSKI B.W., MORTEN B., PRUDENZIATI M., *Technika grubowarstwowa i jej zastosowania*, skrypt, Politechnika Wrocławska TEMPUS, 1998.
- [51] DZIEDZIC A., GOLONKA L.J., HENKE M., *Temperature properties of Low Temperature Cofiring Ceramics (LTCC) and multilayer capacitors*, Proc. 43rd Int. Sci. Colloquium, Ilmenau (Germany), vol.2, 1998, 198–202.
- [52] DZIEDZIC A., GOLONKA L.J., ROGUSZCZAK H., *Pulse durability of polymer, cermet and LTCC thick-film resistors – preliminary results*, Proc. 22nd Conf. of IMAPS Poland, Zakopane, 1998, 119–122.

- [53] DZIEDZIC A., GOLONKA L.J., BAUER R., REBENKLAU L., *Temperature behaviour of LTCC resistors and capacitors*, Proc. 22nd Conf. of IMAPS Poland, Zakopane, 1998, 123–126.
- [54] DZIEDZIC A., GOLONKA L.J., MIELCAREK W., *New configuration of LTCC passive components*, Proc. 12th European Microel. & Pack. Conf., Harrogate (UK), 1999, 3–9.
- [55] DZIEDZIC A., GOLONKA L.J., HENKE M., KITA J., THUST H., DRUE K-H., BAUER R., REBENKLAU L., WOLTER K-J., *Electrical and structural characterization of thick film resistors at various LTCC systems*, Proc. IMAPS USA'99 32nd Int. Symp. on Microelectronics, Chicago (USA), 1999, 510–515.
- [56] DZIEDZIC A., GOLONKA L.J., KITA J., *Niezawodność wysokotemperaturowa grubowarstwowych grzejników LTCC nacinanych wiązką laserową*, Materiały Konferencyjne VI Konf. Naukowej Czujniki optoelektroniczne i elektroniczne COE'2000, Gliwice, 2000, t. II, 108–113.
- [57] DZIEDZIC A., GOLONKA L.J., KITA J., ROGUSZCZAK H., ŻDANOWICZ T., *Some remarks about "short" pulse behaviour of LTCC microsystems*, Proc. European Microelectronics Packaging and Interconnection Symposium, Prague (Czech Republic), 2000, 194–199.
- [58] DZIEDZIC A., GOLONKA L.J., *Thick-film and LTCC thermistors*, Proc. 24th Conf. of IMAPS Poland, Rytyro, September 25–29, 2000, 77–83.
- [59] DZIEDZIC A., GOLONKA L.J., KITA J., KOZŁOWSKI J.M., *Macro- and microstructure of LTCC tapes and components*, Proc. 24th Conf. of IMAPS Poland, Rytyro, September 25–29, 2000, 163–168.
- [60] DZIEDZIC A., GOLONKA L.J., HAUFFE W., ŁUKASZEWICZ M., *Application of ion etching to microscopic investigation of LTCC structures*, Mat. Konferencyjne VII Konf. Naukowa Technologia Elektronowa ELTE'2000, Polanica 2000, 307–310.
- [61] DZIEDZIC A., GOLONKA L.J., KITA J., THUST H., DRUE K-H., BAUER R., REBENKLAU L., WOLTER K-J., *Electrical and stability properties and ultrasonic microscope characterisation of low temperature co-fired ceramics resistors*, Microelectr. Reliability, vol. 41, 2001, 669–676.
- [62] DZIEDZIC A., GOLONKA L.J., KOLEK A., MACH P., NITSCH K., *DC and AC electrical properties and long-term stability of LTCC resistors*, Proc. 24th Int. Spring Seminar on Electronics Technology, Calimanesti-Caciulata (Romania), 2001, 137–141.
- [63] DZIEDZIC A., GOLONKA L.J., *Passive components and passive integrated circuits-state of the art*, Proc. Conf. MIXDES, Zakopane 2001, 395–400.
- [64] DZIURDZIA B., *Optymalizacja technologii wykonania grubowarstwowych filtrów mikrofalowych w paśmie do 14 GHz*, rozprawa doktorska, Kraków AGH, 1998.
- [65] EHLERT M.R., DRAUDT R., *Performance of LTCC materials systems in 2GHz resonator applications*, Proc. 1999 Int. Conf. on High Density Pack. and MCMs, Denver, 279–283, Adv. Microel. July/August 1999, 24–26.
- [66] EHLERT M.R., BRANCHEVSKY S., *Embedded high K ceramic capacitors in LTCC for wireless communication applications*, Proc. Int. Symp. on Microel., IMAPS USA, Chicago 1999, 653–657.
- [67] EHRHARDT W., THUST H., *Trimming of thick-film resistors by energy of high voltage pulses and its influence on microstructure*, Proc. 13th European Microelectronics and Packaging Conf., Strasbourg May 2001, 403–407.
- [68] ESTES T.A., LONG F.M., *Addition of polymer thick films to the internal layers of FR-4*, Proc. Int. Symp. on Microelectronics (ISHM-USA), Chicago 1990, 338–344.
- [69] Europractice, *Multichip Module design handbook*, 1999.
- [70] FELTEN J.J., WANG C.B., COLLINS J., *High resolution via patterning by aqueous diffusion patterning*, Proc. Int. Symp. on Microelectronics ISHM, Orlando 1991, 545–550.

- [71] Ferro – materiały firmowe – LTCC A6 system for wireless solutions. Materials, specifications and guidelines, 2000.
- [72] Ferro – informacja firmowa, ferro.www.com.
- [73] FIELDEN R.S., *Computer aided design and fabrication of thick film magnetic composite inductors*, Proc. Int. Symp. Microel. IMAPS USA, Boston Sept.2000, 814–819.
- [74] FRYE R.C., *Passive components in electronic applications; requirements and prospects for integration*, The Int. J. of Microcircuits and Electronic Packaging, vol. 19, no 4, 1996, 483–489.
- [75] FRYE R.C., YOON Y.J.M SMITH P.R. LU Y., *Integrated spiral transformers*, 1999 Int. Conf. on High Density Packaging and McMs, Denver April 1999, Proc. 438–443.
- [76] FU S-L., HSI C-S., *Electrical properties of Ru based resistors buried in LTCC substrates*, Proc. IEMT/IMC, Tokyo 2000, 183–187.
- [77] FU S-L., CHEN L-S., HSI C-S., *Ni-Zn-Cu ferrite embedded into Low Temperature Co-fired Ceramic substrates*, Proc. Int. Symp. Microel. IMAPS USA, Boston Sept. 2000, 495–499.
- [78] FUKAYA M., MATSUO T., NISHIGAKI S., HIGUCHI C., *Highly reliable and lead (Pb) free thick film resistor paste system for LTCC application*, Proc. Int. Symp. on Microelectronics IMAPS USA, 1997, 65–71.
- [79] FUKAYA M., HIGUCHI C., *Pb free resistor for Pb free LTCC system*, Proc. Int. Symp.on Microelectronics IMAPS USA, Boston Sept.2000, 636–641.
- [80] GARROU P.E., TURLIK I., *Multichip Module technology handbook*, McGRAW-HILL, New York, 1998.
- [81] GOLONKA L.J., KIRCHNER T., LICZNERSKI B.W., THUST K.H., *Application of green tape technology to production of thick film sensors*, Materiały Konferencyjne IV Konf. Naukowej Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne COE'96, Szczyrk, 1996, 186–189.
- [82] GOLONKA L.J., SROMEK B., TANKIEWICZ S., TETERYCZ H., *Properties of thick film resistors on Low Temperature Cofiring Ceramics (LTCC)*, Proc. of 21st ISHM Poland Chapter Conf., Ustroń, 1997, 137–140.
- [83] GOLONKA L.J., DZIEDZIC A., HENKE M., *Temperature properties of thick film resistors for LTCC applications*, Proc. 43rd Int. Sci. Colloquium, Ilmenau (Germany), vol. 2, 1998, 203–207.
- [84] GOLONKA L.J., LICZNERSKI B.W., NITSCH K., TETERYCZ H., BAUER R., WOLTER K.J., *Examples of gas sensors by application of thick film technology*, Proc. 43rd Int. Sci. Coll., Ilmenau, Sept. 1998, 465–470.
- [85] GOLONKA L.J., *Application of thick films in LTCC technology*, Informacje MIDEM, vol. 29 (4), 1999, 169–175.
- [86] GOLONKA L.J., DZIEDZIC A., KITA J., NITSCH K., KOZŁOWSKI J., FRIEDEL K., ŁUKASZEWICZ M., ROGUSZCZAK H., TANKIEWICZ S., ZAWADA T., *Badanie własności fizykochemicznych i elektrycznych grubowarstwowych elementów wykonanych techniką LTCC*, Sprawozdanie z realizacji grantu KBN Nr 8 T11B 029 13, 2000.
- [87] GOLONKA L.J., WOLTER K.-J., DZIEDZIC A., KITA J., REBENKLAU L., *Embedded passive components for MCM*, Proc. 24th Int. Spring Seminar on Electronics Technology, Calimanesti-Caciulata (Romania), 2001, 73–77.
- [88] GONGORA-RUBIO M., SOLA-LAGUNA L., SMITH M., SANTIAGO-AVILES J.J., *LTCC technology multilayer eddy current proximity sensor for harsh environments*, Proc. Int. Symp. on Microel. IMAPS USA, Chicago, Oct. 1999, 676–680.
- [89] GONGORA-RUBIO M., SOLÁ-LAGUNA L.M., MOFFETT P.J., SANTIAGO-AVILÉS J.J., *The utilization of low temperature co-fired ceramic (LTCC- ML) technology for meso-scale EMS, a simple thermistor based flow sensor*, Sensors and Actuators A, 73, 1999, 215–221.

- [90] GONGORA-RUBIO M., ESPINOZA-VALLEJOS P., SOLA-LAGUNA L., SANTIAGO-AVILES J.J., *Overview of low temperature co-fired ceramics tape technology for meso-system technology (MsST)*, Sensors and Actuators, A89, 2001, 222–241.
- [91] GRAMEGMA E., *The integration of passive components in multilayer ceramic structures; a new fabrication approach for high density, cost effective ceramic MCMs*, Proc. ISHM Nordic, Helsingor, Denmark, September 22–25, 1996.
- [92] GREGORCZYK W., *MCM – nowa generacja układów hybrydowych. Cz. I – Metody wytwarzania*, Elektronizacja, 1992, 7–11.
- [93] GUPTA T.K., *In search of low dielectric constant ceramic materials for electronic packages*, Int. J. of Microcircuits & Electr. Pack., vol. 17 (1), 1994, 80–97.
- [94] HAGBERG J., PUDAS M., LEPPÄVUORI S., ELSEY K., LOGAN A., *Gravure offset printing development for fine line thick film circuits*, Proc. 13th European Microelectronics and Packaging Conf., Strasbourg May 2001, 290–293.
- [95] HARTMAN H.S., BOOTH C.L., *Development of a crystallizable low-K, low-loss low temperature multilayer interconnect system*, Proc. IMC, Tokyo, 1990, 150–154.
- [96] HAYASHI K., *Fine line electrode for RF circuits on the glass ceramic*, Proc. IEMT/IMC, Tokyo 2000, 371–375.
- [97] HENKE M., BAUER R., GOLONKA L.J., REBENKLAU L., DZIEDZIC A., WOLTER K.-J., *Investigations on LTCC – multilayer with high density pattern and cofired resistors*, Proc. 22nd Int. Spring Sem. on Electr. Technology, Dresden (Germany), 1999, 105–110.
- [98] HOROWITZ S.J., DRAUDT R.R., AMEY D.I., SKURSKI M.A., SMITH M.A., *Advanced Ceramic Technology for HDI and Integrated Packaging*, Adv. Pack., March 1999, 40, 42, 44, 45.
- [99] HOROWITZ S.J., AMEY D.I., *Next generation packaging for fiber optics: new opportunities for thick film and LTCC ceramic technology*, Proc. 13th European Microelectronics and Packaging Conf., Strasbourg May 2001, 99–102.
- [100] HUNT B., *LTCC technology free sintered and zero shrink*, Proc. Symp. LTCC Module: Eine neue Integrationstufe in der Elektronik und Sensorik, Dresden, January 2000.
- [100a] JANG W.S., KIM J.S., RYU B.G., AHN D.H., PARK M.H., SREERAM A.N., PALIT K., HOZER L., PRABHU A., *A new low-cost process for fabricating plasma display back panel*, Soc. for Information Display Int. Symp., San Jose, 1999, Digest of Tech. Papers vol. XXX, 1036–1039.
- [101] JOHANNSMANN F., HENDERSON R., SOMMER G., MYERS T., PETRAS M., KORF S., MILLER M., JOHN W., REICHL H., *Parameterized RF models of embedded resistor components using EM simulation in LTCC substrates*, Proc. 13th European Microelectronics and Packaging Conf., Strasbourg May 2001, 78–83.
- [102] JOHNSON R.W., *Multichip Modules – the fundamentals*, ARW IMAPS USA, Denver, April 1999.
- [103] JONES W.K., ZAMPINO M.A., *Embedded miniature heat pipes in ceramic co-fire substrates*, Proc. 12th Europ. Microel. & Pack. Conf., Harrogate, June 1999, 475–481.
- [104] JONES W.K., LIU Y., LARSEN B., WANG P., ZAMPINO M., *Chemical, structural and mechanical properties of the LTCC tapes*, Proc. Int. Symp. on Microelectronics IMAPS, Boston 2000, 669–674.
- [105] JONES W.K., WANG P., LIU Y., *Active thermal management in LTCC*, Proc. 13th European Microelectronics and Packaging Conf., Strasbourg May 2001, 221–224.
- [106] KALITA W., POTENCKI J., SŁOSARCIK S., *Zintegrowany przetwornik ciśnienia na częstotliwość w technologii LTCC*, Materiały Konferencyjne ELTE'97, Krynica, maj 1997, 597–601.



- [107] KALITA W., MALOTA D., SŁOSARČIK S., *Integrated converter of pressure/ vacuum into frequency based on LTCC technology*, Proc. Symp. MTM, Rzeszów, May 1997, 119–124.
- [108] KAND H., et al., *Buried resistors and capacitors for multilayer hybrids*, Adv. Microelectronics, July/August 1996, 19–23.
- [109] KAPADIA H., COLE H., SAIA R., DUROCHER K., *Evaluating the need for integrated passive substrates*, Adv. Microelectronics Jan/Feb. 1999, 12–15.
- [110] KATOPIS G.A., et al. *MCM technology and design for the S/390 G5 system*, IBM J.Res.Develop. vol. 43, No5/6, 1999, 621–650.
- [111] KIRCHNER T., RIECKE H., THUST H., GOLONKA L.J., LICZNEŃSKI B.W., *Thermal vias in LTCC*, Proc. of 20th ISHM Poland Chapter Conf., Jurata, 1996, 169–172.
- [112] KITA J., WOLTER K.-J., BAUER R., LUNIAK M., GOLONKA L.J., NITSCH K., TETERYCZ H., *Investigations on a gas sensor in LTCC technology*, Proc. 20th Int. Spring Seminar on Electronic Technology, Szklarska Poręba, 1997, 39–44.
- [113] KITA J., DZIEDZIC A., GOLONKA L.J., ŻUK G., *Pulse durability of polymer, cermet and LTCC thick-film resistors*, Proc. 12th European Microel. & Pack. Conf., Harrogate (UK), 1999, 313–319.
- [114] KITA J., DZIEDZIC A., GOLONKA L.J., BOCHENEK A., *Properties of laser cut LTCC heaters*, Microelectr. Reliability, vol. 40, 2000, 1005–1010.
- [115] KITA J., DZIEDZIC A., GOLONKA L.J., *Non-conventional application of laser in LTCC and thick-film technology – preliminary results*, Proc. 23rd Int. Spring Seminar on Electronics Technology, Balatonfüred (Hungary), 2000, 219–224.
- [116] KITA J., DZIEDZIC A., GOLONKA L.J., *Three-dimensional structures in LTCC ceramics*, Mat. Konferencyjne VII Konf. Naukowa Technologia Elektronowa ELTE'2000, Polanica 2000, 1271–4.
- [117] KITA J., DZIEDZIC A., FRIEDEL K., GOLONKA L.J., JANUS P., SZELOCH R., *Surface temperature distribution analysis in sensors with buried heater made in LTCC technology*, Proc. 13th European Microelectronics and packaging Conf., Strasbourg May 2001, 123–128.
- [118] Koenen Siebdrucktechnik Application Note, *Precision screens and metal stencils for thick-film and circuit board technology*, 1996.
- [119] KONDA H., MASON R., C., OKABE C., SMITH J.D., VELASQUEZ, *Buried resistors and capacitors for multilayer hybrids*, Proc. ISHM'95 US, 47–52.
- [119a] KOS A., *Modelowanie układów mocy i optymalizacja ich konstrukcji ze względu na rozkład temperatur*, Wydawnictwo AGH, Kraków 1994.
- [119b] KOS A., DE MEY G., *Thermal modelling and optimisation of power microcircuit*, Electrochemical Publication Ltd., Bristol, 1997.
- [120] KRUSING A., LEPPÄVUORI S., UUSIMÄKI A., MOILANEN H., *Piezoelectric drive for agitation and pumping of coolant in LTCC multilayer modules*, Proc. Thermic Workshop, Rome, Oct. 1999, 323–326.
- [121] KULKE A., SIMON W., RITTWEGER M., WOLF I., BAKER S., POWELL R., HARRISON M., *Integration techniques for MMICs and chip devices in LTCC Multichip Modules for radio frequencies*, Proc. Int. Symp. on Microelectronics IMAPS, Boston 2000, 642–647.
- [122] KUBOVY A., HAVLAS I., *The effect of firing temperature on the properties of model thick-film resistors*, Silikáty, 32, 1988, 109–23.
- [123] LADEW R.A., MAKI A.S., *Integrating passive components*, Proc. ISHM'95 USA, 59–65.
- [124] LAHTI M., LEPPÄVUORI S., LANTTO V., KOLIHOLA K., *Inductors on an LTCC substrate realized by the gravure offset printing technique*, Proc. EMC Venice, May 14–16, 1997, 436–443.

- [125] LAHTI M., LANTTO V., LEPPÄVUORI S., *Realization of buried passive components in Low-Temperature Co-fired ceramic materials by thick film techniques*, Advances in Electronic Packaging 1999, EEP vol. 26–2, 1369–1372.
- [126] LAHTI M., LANTTO V., LEPPÄVUORI S., *Planar inductors on an LTCC substrate realized by the gravure-offset-printing technique*, IEEE Trans. on Comp. and Pack. Techn., vol. 23, no 4, Dec.2000, 606–610.
- [127] LASKY R., *Growth continues for passive components*, Electronic Packaging and Production, March 1998, 77–78.
- [128] LEPPÄVUORI S., UUSIMÄKI A., *Use of fine-line gravure offset printing in LTCC technology*, Proc. 43rd Int. Sci. Coll., Ilmenau, Sept. 1998, 17–22.
- [129] LIANG H., SUTONO A., LASKAR JK., SMITH W.R., *Material parameter characterization of multilayer LTCC and implementation of high Q resonators*.
- [130] LUNIAK M., BAUER R., BERTHOLD CH., SCHIRMER E., *Electrochemical gas sensor in thick film technology*, Proc. European Microelectronics Conf. IMAPS, Venice, May 1997, 543–547.
- [131] MASON R.C., BOLTON P.J., *Thick film screen-printable buried resistors*, 1998 US Conf. 467–472.
- [132] MISTLER R.E., TWINAME E.R., *Tape casting*, published by American Ceramic Society, Westerville, 2000.
- [133] MORI T., ITO S., AIZAWA S., OCHI A., YONETAKE N., *High-rated voltage Y5S multilayer ceramic capacitors*, Proc. IEMT/IMC 1997, Japan.
- [134] Murata – informacja firmowa, <http://www.murata.com>.
- [135] MÜLLER J., THUST H., DRUE K.H., *RF-design considerations for passive elements in LTCC*, ISHM 94, Proc. Boston 1994, 357–362.
- [136] MÜLLER J., *High quality RF-inductors in LTCC*, Proc. Int. Symp. on Microelectronics, Minneapolis, October 1996, 60–65.
- [136a] MÜLLER J., BADSTÜBNER O., THUST H., *Line impedance control in MCM-Cs with meshed grand/power planes*, Proc. Int. Conf. on Multichip Modules, Denver 1996, 63–68.
- [137] MÜLLER J., THUST H., SJOLING B., TURVEY S., *Trimming of buried resistors in LTCC-circuits*, Proc. 33rd ISHM Nordic Conf., Helsingør, Denmark, Sept. 22–25, 1996, 166–173.
- [138] NARITA N., TAKAHASHI H., NAKAZAWA M., KAMIYAMA Y., SEKIGUCHI S., FUJIMOTO M., *Minaturization of chip inductors using multilayer technology and its application as chip components for high frequency power modules*, Proc. IEMT/IMC, 1997, 383–388.
- [139] NEEDES C.R.S., AMEY D.I., HOROWITZ S.J., *Cost effective solutions for high density interconnect and RF modules using Low Temperature Cofired Ceramic materials*, Proc. IEMT/IMC, Tokyo 2000, 376–381.
- [140] NEMI 2000 Roadmap-Ceramic, [www.imaps.org](http://www.imaps.org), 2000.
- [141] NOUSIAINEN O., RAUTIAHO R., LEPPÄVUORI S., UUSIMÄKI A., TIAN D., *Acoustic micro imaging of fatigue cracking in solder joints of LTCC modules*, Proc. 13th European Microelectronics and Packaging Conf., Strasbourg May 2001, 172–177.
- [142] OPPERMAN M., *High yield, complex RF-MCMs, target price - a challenge for high volume module production*, Proc. IMAPS 4th Adv. Tech. Workshop on Integr. Passives Technology, Denver, April 1999.
- [143] OPPERMAN M., *Microwave and millimeterwave technology for digital radios and communications – technology strategy and packaging roadmaps*, Proc. 37th IMAPS Nordic Conf., Helsingør 2000, 81–90.

- [144] O'MATHUNA S.C., O'DONNELL T., HUGHES P., HILL M., LANE B., *Developments in microsystems (MST) for electronics in Europe*, Proc. Int. Conf. on HDI and Systems Packaging, Denver 2000, 98–103.
- [145] O'REILLY S., DUFFY M., O'DONNELL T., O'MATHUNA S.C., *New integrated planar magnetic cores for inductors and transformers fabricated in MCM-L technology*, Advancing Microelectronics Jan/Feb. 2000, 25–29.
- [146] O'REILLY S., DUFFY M., MCCLOSKEY P., O'MATHUNA C., FORSTER P., GODWIN A., ROSE N., *Realisation of LC demonstrators in MCM-L technology*, Proc. Symp. IMAPS-Europe Prague 2000, 7–12.
- [147] PEDDER D., *Advanced RF packaging using passive integration*, Proc. Europ. Conf. on Wireless Technologies, London, Jan.2001, 49–58.
- [148] PIETERS P., BEYNE E., *Spiral inductors integrated in MCM-D using design space concept*, Proc. Int. Conf. on Multichip Modules and High Density Packaging, Denver 1998, 478–483.
- [149] PIETRIKOVA A., *Potentiality of LTCC for sensor applications*, Proc. 24th Int. Spring Seminar on Electronics Technology, Calimanesti-Caciulata (Romania), 2001, 112–116.
- [150] PILOTO A.J., PARTLOW D.P., ZAKI K., *Low cost, low temperature cofired ceramic for microwave multichip modules*, Proc. Int. Symp. on Microelectronics ISHM US, Boston, Oct. 1994, 318–323.
- [151] PISARKIEWICZ T., SUTOR A., MAZIARZ W., THUST H., THELEMANN T., *Thin film gas sensors on Low Temperature Cofired Ceramics*, Proc. European Microelectronics Packaging and Interconnection Symp. IMAPS, Prague May 2000, 399–403.
- [152] PISTER K.S.J., KAHN J.M., BOSER B.E., *Smart dust wireless networks of millimeter-scale sensor nodes*, Electronics Research Laboratory Research Summary, University of California at Berkeley, CA (US), 1999, <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/SmartDust>.
- [153] PODDAR R., BROOKE M.A., *Accurate high speed empirically based predictive modelling of deeply embedded gridded parallel plate capacitors fabricated in multilayer LTCC process*, IEEE Trans. Adv. Packaging, vol. 22(1), 1999, 26–31.
- [154] POYET P., KAVASS M., TEISSIER G., *Integrated package MCM-D/L/BGA with embedded passives*, Proc. 13th European Microelectronics and Packaging Conf., Strasbourg May 2001, 70–72.
- [155] PRUDENZIATI M., MORTEN B., *Piezoresistive properties of thick-film resistors – an overview*, hybrid Circuits, 10, 1986, 33–37.
- [156] PRUDENZIATI M., ed., *Handbook of Sensors and Actuators*, vol. 1 – *Thick Film Sensors*, Elsevier Science B.V., 1994.
- [157] REARDON E.J., CARPENTER R.W., *Novel practical materials for embedded capacitors and resistors – an update*, Proc. 2000 Int. Conf. on HDI and Systems Packaging, Denver 2000, 336–340.
- [158] REBENKLAU L., WOLTER K-J., HOWITZ S., *Realization of hybrid microfluidic systems using standard LTCC process*, Proc. of 50th ECTC IEEE, Las Vegas 2000, 1696–1700.
- [159] REBENKLAU L., WOLTER K-J., HOWITZ S., *Realization of microfluidic modules using LTCC*, Proc. 25th Int. Conf. IMAPS Poland, Rytro, Sept. 2000, 93–100.
- [160] RECKE J., *High density interconnect for advanced packaging*, Proc. 38th EIA/IEE Electron. Component Conf., Los Angeles, 1988, 282.
- [161] RELICK J.R., RITTER A.P., *Non-trimmed buried resistors in Green Tape TM circuits*, 1999 Int. Conf. on High Dens. Packaging and MCMs, Denver April 1999, Proc. 420–424.

- [162] RELICK J.R., SMITH J.D., DROZDYK L.P., SKURSKI M.A. (DuPont) *Buried resistors, capacitors, and inductors in Green Tape TM circuits*, IMAPS 4th Adv. Tech. Workshop on Int. Pass. Tech. Denver April 1999 .
- [163] RITTER A., SMITH B., STRAWHORNE M., HEISTAND R., *Miniaturized cofired integrated passive filter networks*, Proc. Int. Symp. on Microel. IMAPS USA, Chicago 1999, 658–662.
- [164] RODRIGUEZ M.A. YANG P., KOTULA P., DIMOS D., *Microstructure and phase development of buried resistors in Low Temperature Co-fired Ceramic*, J. Electroceram. vol. 3, 2000, 217–223.
- [165] ROGUSZCZAK H., TANKIEWICZ S., TERECH D., DZIEDZIC A., GOLONKA L.J., *Nowe rozwiązania technologiczno-konstrukcyjne czujników ciśnienia w technologii LTCC*, Materiały Konferencyjne VI Konf. Naukowej Czujniki optoelektroniczne i elektroniczne COE'2000, Gliwice, 2000, tom I, 124–129.
- [166] RONG Y., ZAKI K.A., GIPPRICH J., HAGEMAN M., STEVENS D., *LTCC wide band ridge-waveguide bandpass filters*, IEEE Trans. Microwave Theory and Technique, vol.47 (9) 1999, 1836–1840.
- [167] RONG Y., ZAKI K.A., HAGEMAN M., STEVENS D., GIPPRICH J., *Low-Temperature Cofired Ceramic (LTCC) ridge waveguide band pass filters*, IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, vol.47(12), 1999, 2317–2324.
- [168] ROOSEN A., *Novel lamination technique of manufacture ceramic multilayer devices*, Proc. Int. Symp. on Microelectronics IMAPS, Boston 2000, 648–653.
- [169] RYU W., KIM J., KIM N., KIM H., ALIN S., KIM S., SONG H., LEE S., KIM J., *A low cost and high density RF multichip module tranceiver for 1.8 GHz personal communication service*, Proc. 50th Electronic Comp. and Technol. Conf., IEEE, Las Vegas, May 2000, 193–197.
- [170] SCHAPER L., LENIHAN T., *Passives go into hiding*, Advanced Packaging, Feb. 1998, 22–26.
- [171] SCHROEDER D.R., REXING C.J., *LTCC MCM technology for military environments*, Proc. Int. Conf. on Multichip Modules, Denver, April 1994, 612–617.
- [172] SCHUENEMANN M., JAM K.A., GROSSER V., LEUTENBAUER R., BAUER G., SCHAFFER W., REICHL H., *MEMS modular packaging and interfaces*, Proc.50th Electronic Com.&Technol.Conf. IEEE Las Vegas, May 2000, 681–688.
- [173] SCRANTOM C.Q., *LTCC technology: where we are and where we are going*, Proc. MCM C/ Mixed Technologies and Thick Film Sensors NATO Workshop, Islamorada, 1995, 77–87.
- [174] SCRANTOM S., GRAVIER G., VALENTINE, *Manufacture of embedded integrated passive components into Low Temperature Co-fired Ceramic system*, US 1998, 459–466.
- [175] SCRANTOM Q.C., GRAVIER G.J., *LTCC technology where we are and where we're going IV*, [www.scrantom.com](http://www.scrantom.com).
- [176] Scrantom – informacja firmowa, <http://www.scrantom.com>.
- [177] SERGENT J.E., HARPER C.E., *Hybrid Microelectronics Handbook*, McGraw-Hill, Inc. New York, 1995.
- [178] SHAPIRO A.A., ELWELL D.F., IMAMURA P., MCCARTNEY M.L., *Structure-property relationships in low-temperature cofired ceramic*, Proc. Int. Symp. on Microelectronics ISHM US, Boston, Oct. 1994, 306–311.
- [179] SHEEN J-W., *LTCC-MLC Duplexer for DCS-1800*, IEEE Trans.on Microwave Theory and Techniques, vol. 47(9),1999, 1883–1888.
- [180] SHIMADA Y., YAMASHITA Y., TAKAMIZAWA H., *The studies on transmission properties for low dielectric constant multilayer ceramic substrate*, Proc. IMC, Tokyo, 1988, 358–365.

- [181] SIMON W., KULKE R., WIEN A., WOLFF I., BAKER S., POWELL R., HARRISON M., *Design of passive components for K-band communication modules in LTCC environment*, Proc. 1999 Int. Symp. on Microel. IMAPS USA, Chicago 1999, 183.
- [182] SJÖLING B., TURVEY S.P., ALEXANDER J.H., *Design and processing considerations for the use of a crystallizing Low Temperature Cofiring Ceramic Tape System with Integratable Passive components*, Hybrid Circuits, 34, 1994, 48.
- [182a] SOUCY J.W., HALEY J.F., MARINIS T.F., *An approach to MEMS sensor array packaging*, *Advancing Microelectronics*, Nov./Dec. 2000, 16–18.
- [183] SUTTERLIN R.C., DAYTON G.O., BIGGERS, *Thick-film resistor /dielectric interaction in a Low Temperature Co-fired Ceramic package*, IEEE Trans. on CPMT-part B, vol. 18 no. 2, May 1995, 346–351.
- [184] SZWAGIERCZAK D., *Ceramika o niskiej stałej dielektrycznej na podłoża dla elektroniki*, Szkło i Ceramika, rocznik 48, 1997, 25–29.
- [185] TERASHI Y., HAMANO S., KAWAI S., *Development of material for multilayer ceramic substrate with copper wiring in millimetre wave applications*, Proc. IEMT/IMC, Tokyo 2000, 382–385.
- [186] TETERYCZ H., KITA J., BAUER R., GOLONKA L.J., LICZNEKSKI B.W., NITSCH K., WIŚNIEWSKI K., *New design of SnO<sub>2</sub> gas sensor on Low Temperature Cofiring Ceramics*, Proc. 11th European Conference on Solid State Transducers, Warsaw, September 1997, 1385–1388 .
- [187] THELEMANN T., THUST H., BISCHOFF G., KIRCHNER T., *Liquid cooled LTCC substrates for high power applications*, Proc. Int. Symp. on Microel. IMAPS USA, Chicago, Oct. 1999, 636–641.
- [188] THELEMANN T., THUST H., ZÖPPIG V., *Mechanical components in LTCC*, Proc. Int. Symp. on Microelectronics IMAPS, Boston 2000, 842–845.
- [189] THUST H., MÜLLER J., *New possibilities for complex electronic moduls using LTCC-technology*, ISHM PI, Jurata 96, 69–76.
- [190] THUST H., DRUE K-H., THELEMANN T., POLZER E., MÜLLER J., *Performance of buried resistors in green tape™ 951*, Proc. 1997 Int. Symp. Microel. ISMM-IMAPS, Philadelphia Oct.14–16, 1997, 48–53.
- [190a] THUST H., DRUE K-H., MÜLLER J., THELEMANN T., TUSCHICH T., CHILO J., GOLOVANOV F., *Coupling behaviour between transmission lines with meshed ground planes in LTCC-MCMs*, Proc. Eur. Micr. Conf., Venice 1997, 92–99.
- [191] THUST H., *New possibilities for 3D-integration using multilayer LTCC technology*, Proc. EMIT'98, India, 52–58.
- [192] THUST H., DRUE K-H., KIRCHNER T., POLZER E.K., *The influence of technology on the performance of burried resistors in green tape*, Proc. 22nd Conf. of IMAPS Poland, Zakopane October 1998, 67–72.
- [193] THUST H., DRUE K-H., KIRCHNER T., THELEMANN T., *Behaviour and performances of buried resistors in green tape*, Proc. 12th Europ. Microel. & Packag. Conf. Harrogate June 1999, 10–14.
- [194] TIAN Z., FREE C., *Micro technology measurement techniques for the evaluation of thick film materials used in wireless applications*, Proc. Europ. Conf. on Wireless Technologies, London Jan. 2001, 65–73.
- [195] TRIGG A.D., *Design and fabrication of silicon hybrid multichip modules*, GEC Journal of Research, vol. 7 (1), 1989.

- [196] TUMMALA R.R., *Ceramic and glass-ceramic packaging in the 1990s*, J. Amer. Ceram. Soc., vol. 74 (5), 1991, 895.
- [197] TUMMALA R.R., *Multichip Packaging in IBM – past, present and future*, Proc. Int. Conf. on Multichip Modules, Denver, April 1993, 1–11.
- [198] TUMMALA R., GARROU P., KNICKERBOCKER J., KUMAR A., *MCM-C materials, processes and applications in Multichip Module technology handbook*, ed. Garrou P.E., Turlik I. McGraw-Hill, New York, 1998.
- [199] TUMMALA R., CHACHAL P., BHATTACHARYA S., Proc. 35th IMAPS Nordic Conf. Stockholm 1998, M2–1-M2–15.
- [200] TUMMALA R., *SOP: microelectronic system packaging technology for the 21st century*, Adv. Microelectronics May/June 1999, 29–37.
- [201] TUMMALA R.R., WHITE G.E., SUNDARAM V., BHATTACHARAYA S.K., *SOP: the microelectronics for the 21st century with integral passive integration*, Adv. Microelectronics Jan/Feb 2000, 13–19.
- [202] TUMMALA R., *System-on a-Package (SOP) research and education at the Georgia Institute of Technology Packaging Research Center*, Proc. IEMT/IMC, Tokyo 2000, 218–223.
- [203] TURLIK J. in *Physical Architecture of VLSI systems*, ed. Hannemann R.J., Kraus A.D., Pecht M., John Wiley & Sons, Inc., 1994, 99–188.
- [204] VARDAMAN E.J., *Semiconductor packaging in 1999: emerging trends*, Adv. Microel. March/April 1999, 23–25.
- [205] VOß T., GRÜNDLER P., THELEMANN T., *Hot-layer-electrochemistry sensor realisation using LTCC*, Proc. 43rd Int. Sci. Coll., Ilmenau, Sept. 1998, 29–34.
- [206] VOß T., GRÜNDLER P., THELEMANN T., *Hot-layer-electrochemistry sensor realisation using LTCC*, Proc. Int. Symp. on Microel. IMAPS USA, San Diego, Nov. 1998, 1006–1010.
- [207] VOß T., GRÜNDLER P., KIRBS A., FLECHSIG G-U., *Temperature pulse voltammetry: hot layer electrodes made by LTCC technology*, Electrochem. Comm. 1, 1999, 383–388.
- [208] WAGNER M., ROOSEN A., SCHMAUS C., SCHWANKE D., BECHTOLD F., *Use of optical dilatometer for in-situ shrinkage measurement of LTCC multilayers*, Proc. 13th European Microelectronics and Packaging Conf., Strasbourg May 2001, 397–402.
- [209] WANG Y.L., OLLIVIER P.J., SKURSKI M.A., *Photoformed thick film materials and their application to fine feature circuitry*, Proc. Int. Conf. on High Density Interconnect and Systems Packaging, Denver 2000, 579–584.
- [210] WERSING W., GOHLKE S., MATZ R., ERSKENS W., WANNENMACHER V., *Integrated passive components using Low Temperature Co-fired ceramics*, US 1999, 193–199.
- [211] WESSELMANN L., KUANG K., *Novel method for ensuring printed ink thickness*, Proc. Int. Symp. on Microelectronics IMAPS, Boston 2000, 320–324.
- [212] WILCOX D.L., HUANG R.F., DEAN A., *The multilayer Ceramic Integrated Circuit (MCIC) technology: opportunities and challenges*, Proc. Intern. Symp. Microelectr., Philadelphia, October 14–16, 1997, 17–23.
- [213] WILCOX D.L., HUANG R.F., KOMMRUSCH, *The multilayer Ceramic Integrated Circuit (MCIC) technology; an enabler for the integration of wireless radio functions*, Adv. Microel., July/August 1999, 13–18.
- [214] WILCOX D.L., *Multilayer ceramic microsystems technology – an overview*, Proc. 13th European Microelectronics and Packaging Conf., Strasbourg May 2001, 115–117.

- [215] WILLIAMS K.J. BARRETT P., SCOTT P.J. FERGUSON J., *Narrow bandwidth, high frequency, band pass filter using thin film and thick film technology*, Proc. Europ. Conf. on Wireless Technologies, London Jan.2001, 74–79.
- [216] ZAMPINO M.A., JONES W.K., *Substrate embedded heat pipes compatible with ceramic cofire processing*, Proc. Int. Symp. on Microel, IMAPS USA, Philadelphia, Oct. 1997, 307–313.
- [217] ZAMPINO M.A., JONES W.K., CAO Y., *Substrate embedded heat pipes compatible with ceramic cofired processing*, The Int. J. of Microcircuits and Electronic Packaging, vol. 21, no 1, 1998, 52–58.
- [218] ZAWADA T., DZIEDZIC A., GOLONKA L.J., *Identification of the temperature distribution in LTCC multilayer structures by RBF net*, Proc. 23rd Int. Spring Seminar on Electronics Technology, Balatonfüred (Hungary), 2000, 247–252.
- [219] ZAWADA T., DZIEDZIC A., GOLONKA L.J., HANREICH G., NICOLICS J., *Temperature field analysis in a Low Temperature Cofired Ceramics microsystem*, Proc. European Microelectronics Packaging and Interconnection Symposium, Prague, 2000, 388–393.
- [220] ZAWADA T., Praca magisterska, Politechnika Wrocławska 2000.
- [221] ZAWADA T., DZIEDZIC A., GOLONKA L.J., TYLMAN W., KULESZA Z., NAPIERALSKI A., *Thermovision and neural net methods for temperature field determination in LTCC module*, Proc. 13th European Microel. & Pack. Conf., Strasbourg (France), May 2001, 457–462.