

Politechnika Wrocławska  
Wydział Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki

Rozprawa doktorska

Wysokotemperaturowe właściwości  
elementów, struktur i układów LTCC

**Damian Nowak**

Promotor:  
prof. dr hab. inż. Andrzej Dzedzic

Wrocław 2013

Praca była realizowana w ramach projektu promotorskiego Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr N N515 607839 pt. „Wysokotemperaturowe właściwości struktur, elementów i układów LTCC”.

Zdjęcia SEM i mapy EDX wykonano dzięki wsparciu projektu „Międzyuczelniane Centrum Dydaktyczno-Technologiczne ‘TECHNOPOLIS’ we Wrocławiu” współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Infrastruktura i Środowisko nr UDA-POIS.13.01-021/09-00.

Chciałbym serdecznie podziękować:

Mojemu promotorowi **prof. dr. hab. inż. Andrzejowi Dzedzicowi** za opiekę naukową oraz wszelką pomoc udzieloną w trakcie realizacji niniejszej pracy,

Pani **prof. dr. hab. inż. Reginie Paszkiewicz** za współpracę w zakresie wytwarzania obudowy wysokotemperaturowej czujnika wodoru,

Pani **prof. dr. hab. inż. Małgorzacie Jakubowskiej** z Instytutu Technologii Materiałów Elektronicznych za udostępnienie past światłoczułych,

Panu **dr. inż. Tomaszowi Piaseckiemu** z Wydziałowego Zakładu Metrologii Mikro- i Nanostruktur za pomoc w zakresie pomiarów metodą spektroskopii impedancyjnej,

Panu **dr. inż. Adamowi Stadlerowi** z Katedry Podstaw Elektroniki Politechniki Rzeszowskiej za pomiary właściwości szumowych rezystorów grubowarstwowych,

Panu **mgr. inż. Andrzejowi Stafniakowi** z Wydziałowego Zakładu Mikroelektroniki i Nanotechnologii za pomiary mikroskopowe,

**Pracownikom, doktorantom i studentom** Laboratorium Mikrosystemów Grubowarstwowych za przyjazną atmosferę pracy oraz pomoc w prowadzeniu badań.

# Spis treści

Spis treści	i
Spis rysunków	iii
Spis tabel	vii
Spis akronimów	ix
Spis wybranych symboli	x
<b>Rozdział 1. Wprowadzenie — cel i zakres pracy</b>	<b>1</b>
<b>Rozdział 2. Technologia grubowarstwowa i LTCC</b>	<b>4</b>
<b>Rozdział 3. Elektronika wysokotemperaturowa</b>	<b>9</b>
3.1. Definicje i obszary zastosowań . . . . .	9
3.2. Elementy czynne i bierne na potrzeby elektroniki wysokotemperaturowej . .	11
3.3. Technologie montażu . . . . .	15
<b>Rozdział 4. Rezystory grubowarstwowe i LTCC</b>	<b>17</b>
4.1. Wytwarzanie struktur testowych . . . . .	17
4.2. Właściwości geometryczne . . . . .	19
4.3. Parametry elektryczne . . . . .	22
4.4. Stabilność długoterminowa . . . . .	29
4.5. Odporność impulsowa . . . . .	35
4.6. Szumy . . . . .	39
4.7. Podsumowanie . . . . .	43
<b>Rozdział 5. Elementy indukcyjne i pojemnościowe</b>	<b>44</b>
5.1. Analiza numeryczna właściwości elektrycznych cewek i kondensatorów . . . .	45
5.2. Wytwarzanie struktur testowych . . . . .	64
5.3. Właściwości geometryczne . . . . .	65

---

5.4. Parametry elektryczne . . . . .	67
5.5. Właściwości mikrostrukturalne . . . . .	71
5.6. Elektryczne modele zastępcze . . . . .	76
5.7. Podsumowanie . . . . .	78
<b>Rozdział 6. Obudowa LTCC czujnika wodoru</b>	<b>80</b>
6.1. Projekt obudowy i analiza numeryczna właściwości elektrycznych i termicznych	81
6.2. Wytwarzanie struktur testowych . . . . .	89
6.3. Parametry elektryczne i ich stabilność przy narażeniach termicznych . . . . .	90
6.4. Właściwości termiczne . . . . .	93
6.5. Montaż struktur czujnikowych do obudowy . . . . .	94
6.6. Podsumowanie . . . . .	99
<b>Rozdział 7. Podsumowanie i wnioski końcowe</b>	<b>100</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>102</b>

# Spis rysunków

2.1	Przebieg procesu sitodruku [15] . . . . .	5
2.2	Główne etapy wytwarzania układów LTCC [43] . . . . .	7
2.3	Porównanie profili wypalania układów grubowarstwowych i LTCC [44, 45] . . . . .	8
3.1	Porównanie tranzystorów polowych w technologii objętościowych podłoży krzemowych i podłoży typu SOI [49] . . . . .	12
4.1	Sposób wyznaczania wymiarów geometrycznych rezystorów - a) długość i b) szerokość . . . . .	19
4.2	Profile grubości rezystorów miniaturowych otrzymanych z wykorzystaniem wariantu technologicznego nr 3 . . . . .	20
4.3	Profile grubości rezystorów miniaturowych otrzymanych z wykorzystaniem wariantu technologicznego nr 1 . . . . .	21
4.4	Rezystancja powierzchniowa w funkcji długości rezystorów – pasta światłoczułe przewodzące + sitodruk past rezystywnych . . . . .	24
4.5	Rezystancja powierzchniowa w funkcji długości rezystorów – pasta CF011 . . . . .	24
4.6	Rezystancja powierzchniowa w funkcji długości rezystorów – pasta CF021 . . . . .	25
4.7	Rezystancja powierzchniowa w funkcji długości rezystorów – pasta DP2021 . . . . .	25
4.8	Charakterystyki temperaturowe rezystorów CF011/ESL8844G/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	27
4.9	Charakterystyki temperaturowe rezystorów CF011/DP6146/LTCC . . . . .	27
4.10	Charakterystyki temperaturowe rezystorów CF021/DP6146/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	28
4.11	Charakterystyki temperaturowe rezystorów CF021/ESL8844G/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	28
4.12	Charakterystyki temperaturowe rezystorów CF021/ESL8844G/LTCC . . . . .	28
4.13	Pomiary rezystancji podczas starzenia termicznego metodą <i>ex-situ</i> . . . . .	29
4.14	Stabilność długoczasowa rezystorów CF011/DP6146/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	30
4.15	Stabilność długoczasowa rezystorów CF021/DP6146/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	30
4.16	Stabilność długoczasowa rezystorów CF011/ESL8844G/LTCC . . . . .	31
4.17	Stabilność długoczasowa rezystorów CF021/ESL8844G/LTCC . . . . .	31
4.18	Stabilność długoczasowa rezystorów CF011/ESL8844G/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	32
4.19	Stabilność długoczasowa rezystorów CF021/ESL8844G/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	32
4.20	Stabilność długoczasowa rezystorów R490A/Ag65/LTCC . . . . .	33
4.21	Stabilność długoczasowa rezystorów DP2021/Ag65/LTCC . . . . .	33
4.22	Stabilność długoczasowa rezystorów RF12/Ag65/LTCC . . . . .	34

4.23	Zmiany rezystancji w funkcji natężenia pola elektrycznego (a) oraz gęstości mocy w impulsie (b) - struktury CF011/DP6146/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $l = 90 \mu\text{m}$ . . . . .	36
4.24	Zmiany rezystancji w funkcji natężenia pola elektrycznego (a) oraz gęstości mocy w impulsie (b) - struktury CF011/ESL8844G/LTCC, $l = 90 \mu\text{m}$ . . . . .	37
4.25	Zmiany rezystancji w funkcji natężenia pola elektrycznego (a) oraz gęstości mocy w impulsie (b) - struktury CF021/DP6146/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $l = 300 \mu\text{m}$ . . . . .	37
4.26	Zmiany rezystancji w funkcji natężenia pola elektrycznego (a) oraz gęstości mocy w impulsie (b) - struktury DP2021/Ag65/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $l = 300 \mu\text{m}$ . . . . .	37
4.27	Widma szumu dla różnych napięć polaryzacji i temperatury – rezystor CF041/DP6146/LTCC, $l = 30 \mu\text{m}$ . . . . .	41
4.28	Widma szumu dla różnych napięć polaryzacji i temperatury – rezystor RF12/Ag65/LTCC, $l = 300 \mu\text{m}$ . . . . .	41
4.29	Zależność widmowej gęstości mocy szumów od napięcia polaryzacji (a) i charakterystyka napięciowo-prądowa (b) – rezystor CF041/DP6146/LTCC, $l = 30 \mu\text{m}$ , $T = 22^\circ\text{C}$ . . . . .	42
4.30	Zależność widmowej gęstości mocy szumów od napięcia polaryzacji (a) i charakterystyka napięciowo-prądowa (b) – rezystor RF12/Ag65/LTCC, $l = 300 \mu\text{m}$ , $T = 22^\circ\text{C}$ . . . . .	42
5.1	Schemat cewki planarnej (a), wielowarstwowej (a+b) . . . . .	44
5.2	Schemat a) kondensatora kanapkowego (przekrój), b) wielowarstwowego (przekrój), c) grzebieniowego (widok z góry) . . . . .	45
5.3	Schemat elektryczny cewki idealnej (a), rzeczywistej (b) . . . . .	46
5.4	Schemat elektryczny kondensatora idealnego (a), rzeczywistego (b) . . . . .	47
5.5	Indukcyjność i dobroć cewki dla różnej szerokości ścieżki oraz odległości między zwojami (1) . . . . .	51
5.6	Indukcyjność i dobroć cewki dla różnej szerokości ścieżki oraz odległości między zwojami (2) . . . . .	52
5.7	Indukcyjność i dobroć cewki dla różnej szerokości ścieżki oraz odległości między zwojami (3) . . . . .	54
5.8	Indukcyjność i dobroć cewki dla różnej szerokości ścieżki oraz odległości między zwojami (4) . . . . .	55
5.9	Indukcyjność i dobroć cewki przy różnej liczbie zwojów (1) . . . . .	57
5.10	Indukcyjność i dobroć cewki przy różnej liczbie zwojów (2) . . . . .	58
5.11	Indukcyjność i dobroć cewki dla różnych wymiarów struktury . . . . .	60
5.12	Wymiary kondensatora palczastego . . . . .	61
5.13	Pojemność i dobroć kondensatora dla różnych szerokości i odstępów między palcami . . . . .	62
5.14	Pojemność i dobroć kondensatora dla różnych wymiarów zewnętrznych . . . . .	63
5.15	Struktury testowe cewek i kondensatorów grubowarstwowych i LTCC . . . . .	65
5.16	Profile 2D kondensatorów palczastych Ag65/LTCC 50/50 $\mu\text{m}$ . . . . .	65
5.17	Profile poprzeczne kondensatorów palczastych Ag65/LTCC 50/50 $\mu\text{m}$ . . . . .	66
5.18	Profile kondensatorów palczastych ESL8844G/LTCC – obróbka laserowa . . . . .	67
5.19	Profile kondensatorów palczastych ESL8844G/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ – obróbka laserowa . . . . .	67

5.20	Indukcyjność i rezystancja cewki wycinanej laserem 30/30 $\mu\text{m}$ , DP6145, LTCC	68
5.21	Indukcyjność i rezystancja cewki wycinanej laserem 30/30 $\mu\text{m}$ , ESL8844G, LTCC	69
5.22	Indukcyjność i rezystancja cewek w funkcji temperatury ( $f = 40 \text{ kHz}$ )	69
5.23	Pojemność i rezystancja skrośna kondensatora wycinanego laserem 30/30 $\mu\text{m}$ , DP6145, LTCC	70
5.24	Pojemność i rezystancja skrośna kondensatora wycinanego laserem 30/30 $\mu\text{m}$ , ESL8844G, LTCC	71
5.25	Struktury testowe elektrod ESL8844G/LTCC – powiększenie 60 $\times$	72
5.26	Wypalone warstwy przewodzące – powiększenie 1000x	72
5.27	Warstwa DP6145 na podłożu $\text{Al}_2\text{O}_3$ – powiększenie 250x	73
5.28	Analiza składu warstw przewodzących	73
5.29	Schemat układu pomiarowego	74
5.30	Zmiany prądu w obwodzie podczas procesu starzenia	74
5.31	Obszary zwarcia elektrod – obraz SEM	75
5.32	Obszary zwarcia elektrod – mapy rozmieszczenia pierwiastków	75
5.33	Model zastępczy cewki (a), kondensatora palczastego(b i c)	76
5.34	Parametry elektryczne modelu zastępczego cewek w funkcji temperatury	78
5.35	Porównanie parametrów kondensatora 30/30 $\mu\text{m}$ /DP6145/LTCC z modelem zastępczym	78
6.1	Projekt obudowy a) widok z góry, b) przekrój	81
6.2	Wymiary obudowy a) elementy zagrzebane, b) grzejnik	82
6.3	Przekroje do określenia rozkładu temperatury	85
6.4	Rozkład temperatury na: a) powierzchni struktury, b) w przekroju A-A, c) w przekroju B-B, d) w przekroju C-C	87
6.5	Rozkład temperatury na: a) powierzchni struktury, b) w przekroju A-A, c) w przekroju B-B	88
6.6	Gotowa obudowa czujnika z zamontowaną strukturą próbną na podłożu szafirowym	90
6.7	Rezystancja grzejników w strukturach testowych	90
6.8	Zmiany rezystancji grzejnika po cyklicznych zmianach temperatury	91
6.9	Zmiany rezystancji grzejnika po wygrzewaniu biernym	92
6.10	Zmiany rezystancji grzejnika po wygrzewaniu aktywnym	92
6.11	Struktura do pomiarów termowizyjnych	93
6.12	Rozkład temperatury na obudowie	94
6.13	Rozkład temperatury na powierzchni struktury szafirowej	94
6.14	Schemat zrywarki z zamocowaną strukturą testową	95
6.15	Struktury testowe: a) na podłożu alundowym, b) na podłożu LTCC	95
6.16	Wytrzymałość na zrywanie próbek na wspólnym podłożu	96
6.17	Pojedyncze struktury testowe na podłożu LTCC i alundowym	96
6.18	Wytrzymałość na ścinanie, $T_w = 350^\circ\text{C}$ , a) struktury niestarzone, b) starzenie 168 h, $200^\circ\text{C}$ , c) starzenie 168 h, $200^\circ\text{C}$ i 168 h, $300^\circ\text{C}$	97



---

6.19	Wytrzymałość na ścinanie, $T_w = 400^\circ\text{C}$ , a) struktury niestarzone, b) starzenie 168 h, $200^\circ\text{C}$ , c) starzenie 168 h, $200^\circ\text{C}$ i 168 h, $300^\circ\text{C}$ . . . . .	97
6.20	Wytrzymałość na ścinanie, $T_w = 450^\circ\text{C}$ , a) struktury niestarzone, b) starzenie 168 h, $200^\circ\text{C}$ , c) starzenie 168 h, $200^\circ\text{C}$ i 168 h, $300^\circ\text{C}$ . . . . .	98
6.21	Średnie wartości wytrzymałości na ścinanie . . . . .	98

# Spis tabel

3.1	Średnie wartości temperatury w podzespołach samochodu [46] . . . . .	11
3.2	Porównanie właściwości materiałów półprzewodnikowych [52, 53] . . . . .	13
3.3	Porównanie właściwości rezystorów wykonywanych w różnych technologiach [58]	14
3.4	Porównanie właściwości komercyjnych materiałów łączących [62] . . . . .	16
3.5	Właściwości połączeń drutowych [58, 68] . . . . .	16
4.1	Warianty wykonania rezystorów testowych . . . . .	19
4.2	Projektowane i rzeczywiste wymiary rezystorów – mikroobróbka laserowa . .	21
4.3	Projektowane i rzeczywiste wymiary rezystorów – technologia past światłoczułych . . . . .	22
4.4	Parametry elektryczne miniaturowych rezystorów grubowarstwowych . . . . .	26
4.5	Stabilność długoterminowa miniaturowych rezystorów grubowarstwowych . .	34
4.6	Odporność impulsowa miniaturowych rezystorów grubowarstwowych . . . . .	38
4.7	Parametry szumowe miniaturowych rezystorów grubowarstwowych . . . . .	40
4.8	Parametry szumowe miniaturowych rezystorów grubowarstwowych w temperaturze pokojowej . . . . .	40
5.1	Parametry warstw dielektrycznych [44, 109] . . . . .	49
5.2	Parametry warstwy metalicznej [80] . . . . .	49
5.3	Wpływ szerokości ścieżki i odległości między zwojami na parametry elektryczne cewki (1) . . . . .	50
5.4	Wpływ szerokości ścieżki i odległości między zwojami na parametry elektryczne cewki (2) . . . . .	50
5.5	Wpływ szerokości ścieżki i odległości między zwojami na parametry elektryczne cewki (3) . . . . .	53
5.6	Wpływ szerokości ścieżki i odległości między zwojami na parametry elektryczne cewki (4) . . . . .	53
5.7	Wpływ liczby zwojów na parametry elektryczne cewki (1) . . . . .	56
5.8	Wpływ liczby zwojów na parametry elektryczne cewki (2) . . . . .	56
5.9	Wpływ powierzchni na indukcyjność i dobroć cewki . . . . .	59
5.10	Wpływ szerokości palców oraz odstępów między nimi na parametry elektryczne kondensatora . . . . .	61
5.11	Wpływ wymiarów zewnętrznych na parametry elektryczne kondensatora . . .	63

---

5.12	Parametry elektryczne cewek wycinanych laserem . . . . .	68
5.13	Parametry elektryczne cewek z pasty światłoczułej Ag65 . . . . .	69
5.14	Parametry elektryczne kondensatorów wycinanych laserem . . . . .	70
5.15	Parametry elektryczne kondensatora z pasty światłoczułej Ag65 . . . . .	71
5.16	Starzenie termiczne struktur testowych . . . . .	74
5.17	Parametry elektryczne modelu zastępczego cewek wycinanych laserem . . . . .	76
5.18	Parametry elektryczne modelu zastępczego kondensatorów . . . . .	77
6.1	Zestawienie parametrów materiałowych stosowanych w symulacji [44, 109, 126, 127] . . . . .	83
6.2	Wartości liczby Nusselta w zależności od rodzaju przepływu [16] . . . . .	84
6.3	Wartości współczynnika konwekcji dla poszczególnych powierzchni . . . . .	85
6.4	Nierównomierności rozkładu temperatury na powierzchni chipu . . . . .	86
6.5	Rodzaje past użytych do badań adhezji . . . . .	95

# Spis akronimów

---

Akronim	Nazwa
LTCC	Low Temperature Co-fired Ceramics
VLSI	Very Large Scale of Integration
MCM	Multi Chip Module
LOC	Lab-On-Chip
MEMS	Micro Electro Mechanical System
SOI	Silicon On Insulator
MESFET	Metal Semiconductor Field Effect Transistor
JFET	Junction Field Effect Transistor
TWR	Temperaturowy współczynnik rezystancji
SMD	Surface Mounted Device
DBC	Direct Bonded Copper
GTWR	Gorący temperaturowy współczynnik rezystancji
TWR <sub>diff</sub>	Różniczkowy temperaturowy współczynnik rezystancji
ESR	Equivalent Series Resistance
EDS	Energy-dispersive X-ray spectroscopy
SEM	Scanning Electron Microscopy
CPE	Constant Phase Element
CAD	Computer Aided Design

---

# Spis wybranych symboli

---

Symbol	Nazwa
$\rho_0$	rezystywność
$\alpha_T$	temperaturowy współczynnik rezystancji
$R_{sq}$	rezystancja powierzchniowa
$l$	długość rezystora
$w$	szerokość ścieżki przewodzącej/rezystora
$n$	współczynnik kształtu, liczba zwojów cewki, parametr elementu stałofazowego
$d$	grubość warstwy rezystywnej, grubość dielektryka
$S_R$	odchylenie średnie kwadratowe
$V_R$	współczynnik zmienności
$E$	natężenie pola elektrycznego, energia impulsu laserowego
$p$	powierzchniowa gęstość mocy
$f_{rez}$	częstotliwość rezonansowa
$S_U$	widmowa gęstość mocy szumu
$U$	napięcie polaryzacji
$C$	intensywność szumu
$\Omega$	objętość rezystora
$\alpha$	wykładnik napięciowy widmowej gęstości mocy szumu
$\gamma$	wykładnik częstotliwościowy widmowej gęstości mocy szumu

---

---

Symbol	Nazwa
$\Phi$	strumień magnetyczny
$\varepsilon_r$	względna przenikalność elektryczna
$\lambda$	długość fali promieniowania, współczynnik przewodności cieplnej
$v$	szybkość skanowania głowicy lasera, współczynnik lepkości kinematycznej
$P$	moc lasera
$\Phi(T)$	natężenie promieniowania
$\epsilon$	zdolność emisyjna
$q$	natężenie strumienia cieplnego
$\alpha_K$	współczynnik konwekcji
$Nu$	liczba Nusselta
$Gr$	liczba Grashofa
$\beta$	współczynnik rozszerzalności objętościowej
$g$	przyspieszenie ziemskie
$\mu$	współczynnik lepkości dynamicznej
$c_p$	ciepło właściwe
$Pr$	liczba Prandtla

---

# Rozdział 1

## Wprowadzenie — cel i zakres pracy

Elektronika diametralnie zmieniła nasze życie w ostatnich dziesięcioleciach. Jednak urządzenia elektroniczne pracują niezawodnie w ograniczonym zakresie temperatury. Aktualnie zdecydowanie największy segment przemysłu elektronicznego, tzw. elektronika konsumencka, charakteryzuje się standardowym temperaturowym zakresem pracy między  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $85^{\circ}\text{C}$ , wymogi temperaturowe elektroniki militarnej (zakres temperatury pracy od  $-65^{\circ}\text{C}$  do  $150^{\circ}\text{C}$ ) spełnia jedynie kilka procent układów/systemów elektronicznych [1, 2]. Z drugiej strony coraz większe zainteresowanie budzą układy/systemy elektroniczne pracujące w ekstremalnie niskiej lub wysokiej temperaturze. Jest to m.in. związane z potrzebami przemysłu lotniczego i kosmicznego, wiertniczego, motoryzacji, czy też oprzyrządowania elektrowni jądrowych. Elektronika ekstremalnych temperatur wymaga opracowania aktywnych struktur półprzewodnikowych, odpowiednich elementów biernych (rezystorów, kondensatorów, cewek, filtrów biernych, rezystorów nieliniowych, transformatorów, bezpieczników) i ich montażu oraz integracji na odpowiednim podłożu.

Jeżeli idzie o elektronikę wysokotemperaturową, to zdaniem autora stosunkowo najmniej rozpoznane jest wytwarzanie na jej potrzeby powierzchniowych i zagrzebanych (wbudowanych) miniaturowych elementów RLC i miniaturowych biernych układów funkcjonalnych. Z drugiej strony elementy bierne są niezbędne w każdym układzie elektronicznym, a w wielu rozwiązaniach stanowią znaczną jego część. Są one nie do uniknięcia np. w filtrach RF, ale także mogą stanowić do 70% elementów w systemach cyfrowych jako np. rezystory polaryzacji lub obciążenia i kondensatory separujące.

Na Wydziale Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki Politechniki Wrocławskiej od kilku lat prowadzone są systematyczne badania związane z wytwarzaniem zminiaturyzowanych elementów biernych [3–5]. Uwzględniając dotychczasowe osiągnięcia w tej dziedzinie, postawiano następujące cele niniejszej rozprawy:

- 
- 1. Miniaturyzacja elementów biernych realizowanych techniką grubowarstwową lub LTCC, w szczególności z wykorzystaniem kompozycji światłoczułych lub metody kształtowania laserowego.**
  - 2. Charakteryzacja właściwości materiałów i elementów grubowarstwowych oraz LTCC pod kątem pracy w podwyższonej temperaturze.**
- 

Wyniki badań wstępnych nad wysokotemperaturowymi właściwościami elementów grubowarstwowych i LTCC pozwoliły autorowi na postawienie następującej tezy:

---

**Połączenie nowych kompozycji grubowarstwowych i alternatywnych do sitodruku metod wytwarzania pozwala na kompleksową realizację miniaturowych elementów biernych na potrzeby elektroniki wysokotemperaturowej.**

---

Praca składa się z 7 rozdziałów. W rozdziale 1 opisano cel i zakres badań. Rozdział 2 przedstawia podstawowe informacje dotyczące technologii grubowarstwowej i LTCC. Opisano standardowe metody wytwarzania elementów biernych oraz ich możliwości i ograniczenia przy wytwarzaniu mikroelementów. Omówiono modyfikacje powyższych metod oraz nowe techniki wytwarzania elementów miniaturowych. Przybliżone zostały także problemy technologiczne pojawiające się przy redukcji wymiarów komponentów grubowarstwowych.

Rozdział 3 opisuje zagadnienia związane z elektroniką wysokotemperaturową. Przedstawiono obszary jej zastosowań, aktualny stan oraz kierunki rozwoju elektroniki wysokotemperaturowej.

Rozdział 4 omawia miniaturowe planarne rezystory dwukontaktowe wytwarzane za pomocą sitodruku, techniki past światłoczułych oraz wycinania wiązką laserową. Przedstawiono sposób formowania elementów, badania geometrii oraz podstawowych parametrów elektrycznych i stabilności mikrorezystorów w zakresie podwyższonej temperatury. Oprócz podstawowych parametrów elektrycznych zaprezentowano odporność impulsową oraz analizę właściwości szumowych w szerokim zakresie temperatury. Tego typu badania przeprowadzono po raz pierwszy w świecie lub też są one realizowane niezmiernie rzadko.

W rozdziale 5 przedstawiono prace nad cewkami oraz kondensatorami grubowarstwowymi i LTCC. Przedstawiono w nim analizę numeryczną parametrów elektrycznych cewek planarnych bezrdzeniowych i kondensatorów grzebieniowych w szerokim zakresie częstotliwości (do 2000 MHz) w zależności od geometrii struktury, jej powierzchni i rodzaju podłoża. Następnie pokazano, jak stosując metodę kształtowania laserowego lub technologię past światłoczułych można miniaturyzować cewki i kondensatory oraz



określono właściwości geometryczne tych elementów. Stosując metodę spektroskopii impedancyjnej określono właściwości wytworzonych struktur w szerokim zakresie częstotliwości (1 kHz – 110 MHz) i temperatury (25 – 450°C). Zaproponowano elektryczne modele równoważne takich elementów i wyznaczono wartości elementów tego modelu w zależności od metalurgii elektrod, materiału podłoża i metody wytwarzania. Porównano wyniki uzyskane metodą modelowania elektromagnetycznego (program Sonnet), otrzymane eksperymentalnie i uzyskane dzięki analizie modeli zastępczych za pomocą oprogramowania ZView2.

Rozdział ten zawiera także wyniki uzupełniających badań strukturalnych (obserwacje za pomocą skaningowej mikroskopii elektronowej i analiza rozkładu pierwiastków metodą mikrosondy rentgenowskiej) oraz analizę możliwych uszkodzeń mikrostruktur w wysokiej temperaturze w wyniki zjawiska elektromigracji.

Rozdział 6 dotyczy projektu, wytwarzania i właściwości wysokotemperaturowej obudowy do czujnika wodoru. Przedstawiono analizę numeryczną właściwości termicznych, omówiono etapy wytwarzania struktur oraz wyniki badań stabilności parametrów elektrycznych w podwyższonej temperaturze. Zaprezentowana badania nad możliwością zastosowania kompozycji grubowarstwowych do montażu struktur czujnikowych w obudowie.

Podsumowanie zasadniczych rezultatów badań wraz z najważniejszymi wnioskami znajduje się w rozdziale 7. Całość kończy się spisem literatury cytowanej w niniejszej rozprawie.

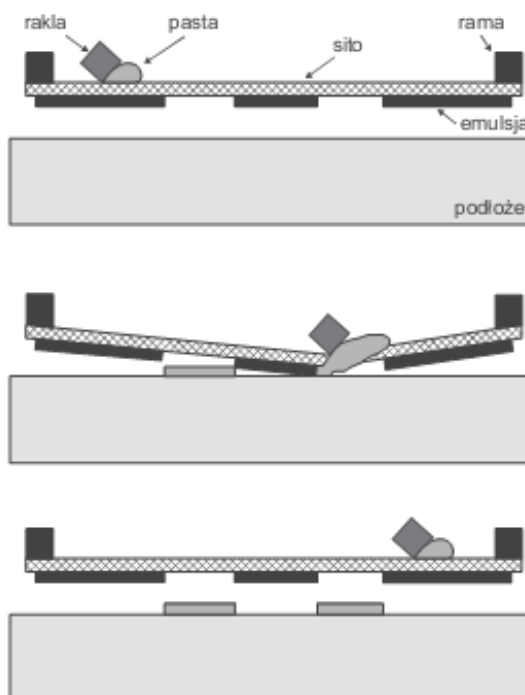
## Rozdział 2

# Technologia grubowarstwowa i LTCC

Na przestrzeni kilkudziesięciu lat rozwoju elektroniki powstało wiele metod wytwarzania elementów i układów elektronicznych. Znaczącą pozycję zajęła wśród nich technologia grubowarstwowa. Pierwsze zastosowanie materiałów grubowarstwowych w produkcji masowej pojawiło się w okresie II wojny światowej przy wytwarzaniu zapalników pocisków raketowych [6,7]. Niespełna dwadzieścia lat później rozpoczął się okres intensywnego rozwoju tej technologii na potrzeby elektroniki użytkowej. Najważniejszymi czynnikami, które spowodowały upowszechnienie technologii grubowarstwowej w przemyśle elektronicznym, były relatywnie niskie koszty produkcji (niedrogie materiały oraz aparatura), możliwość wytwarzania różnych elementów (ścieżek przewodzących, rezystorów, kondensatorów, cewek indukcyjnych, warystorów [8–11], termistorów [12,13]), opłacalność produkcji krótkich serii, możliwość automatyzacji procesu, możliwość dołączania półprzewodnikowych struktur lub elementów czynnych, dobre właściwości termiczne i elektryczne wytwarzanych elementów lub układów oraz ich duża niezawodność przy różnych narażeniach środowiskowych.

Technologia grubowarstwowa polega na nanoszeniu odpowiednich materiałów (w postaci past) na podłoża izolacyjne, a następnie nadaniu im odpowiednich właściwości przez obróbkę termiczną w temperaturze od 450°C do 950°C dla warstw cermetowych oraz od około 100°C do 300°C dla warstw polimerowych [14].

Podstawową techniką nakładania warstw w technologii grubowarstwowej jest sitodruk. Polega on na nakładaniu warstwy przez specjalne sita stalowe lub polimerowe z wzorem, który ma być odtworzony na podłożu. Do przeciskania nanoszonego materiału najczęściej służy gumowa rakla, która przesuwa pastę po powierzchni sita jednocześnie dociskając je do podłoża (rys. 2.1). Jakość odwzorowania oraz parametry geometryczne otrzymanych warstw zależą od wielu czynników. Są to m.in. właściwości reologiczne pasty, gęstość siatki (wyrażona najczęściej liczbą oczek na cal długości – typowo od 200 do 400), średnica włókien sita, kąt między kierunkiem drukowania



Rys. 2.1. Przebieg procesu sitodruku [15]

a kierunkiem ułożenia włókien sita, szybkość przesuwu oraz siła docisku rakli. Stąd rozdzielczość standardowego sitodruku wynosi około 100  $\mu\text{m}$ . W celu zwiększenia rozdzielczości opracowano techniki sitodruku precyzyjnego, wprowadzając zmiany w składzie past oraz stosując gęstsze sita. Pozwoliło to uzyskać rozdzielczość 50  $\mu\text{m}$  dla wzorów zakrzywionych i około 30–40  $\mu\text{m}$  dla linii prostych.

Równocześnie rozwijano niestandardowe techniki nakładania oraz formowania warstw – druk strumieniowy [16–18], druk offsetowy [19–21], metodę bezpośredniego pisania (mikropióra) [22–24], technologię past światłoczułych [25–29], kształtowanie laserowe [4, 30–35]. Dwie ostatnie metody zastosowano w pracach własnych autora i omówiono szerzej w dalszych rozdziałach niniejszej rozprawy.

Jako podłoża w technologii grubowarstwowej stosuje się najczęściej różnego rodzaju materiały ceramiczne. Najpopularniejsze materiały to: ceramika alundowa (o zawartości  $\text{Al}_2\text{O}_3$  od 90% do 99,8% wag.), azotkowa ( $\text{AlN}$ ), berylowa ( $\text{BeO}$ ) i cyrkonowa ( $\text{ZrO}_2$ ). W specjalnych aplikacjach stosuje się emaliowane podłoża metalowe, a w wypadku warstw polimerowych również podłoża z materiałów organicznych (papier powlekany, elastyczne podłoża polimerowe, laminaty epoksydowe itp.).

Jak wspomniano, materiały nakładane na podłoża technikami grubowarstwowymi są przygotowywane w postaci specjalnych past. Standardowe pasty są dyspersyjną mieszaniną składającą się z trzech głównych faz – funkcjonalnej, wiążącej oraz nośnej. Rodzaj fazy funkcjonalnej decyduje w głównej mierze o właściwościach elektrycznych warstwy. W pastach przewodzących są to proszki metali (złoto, srebro, platyna, pallad oraz ich stopy). Z kolei w kompozycjach rezystywnych najczęściej stosowane są tlenki

przewodzące proste (np.  $\text{RuO}_2$ ,  $\text{IrO}_2$ ) lub złożone (np.  $\text{Bi}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$  oraz ich mieszaniny<sup>1</sup>. Fazę wiążącą stanowią szkliwa, np. borokrzemowe i glinokrzemowe. Zadaniem fazy wiążącej jest ułatwienie spiekania fazy funkcjonalnej poniżej jej temperatury topnienia oraz zapewnienie adhezji warstwy do podłoża. Faza nośna składa się z żywicy i rozpuszczalników. Żywice zapewniają wiązanie niewypalanej warstwy z podłożem, natomiast rozpuszczalniki redukują lepkość umożliwiając drukowanie kompozycji. Większość past charakteryzuje się reologią pseudoplastyczną lub tiksotropową. Ze wzrostem szybkości ścinania podczas drukowania ich lepkość maleje, ułatwiając w ten sposób przeciskanie przez sito. W procesie wypalania składniki fazy nośnej są usuwane z warstwy.

Proces wypalania przeprowadza się w piecach komorowych lub tunelowych z odpowiednio dobranymi profilami czasowo-temperaturowymi. Podczas wypalania struktury są przetrzymywane przez 10–15 minut w maksymalnej temperaturze około  $850^\circ\text{C}$ , a cały cykl trwa 30–60 minut. Po wypaleniu warstwy osiągają grubość kilku do kilkadziesiąt  $\mu\text{m}$ , a rezystory dodatkowo mogą być poddane korekcji.

Szczególną odmianą technologii grubowarstwowej stała się technologia niskotemperaturowej ceramiki współwypalanej LTCC (ang. *Low Temperature Co-fired Ceramics*). Jej dynamiczny rozwój został zapoczątkowany w latach osiemdziesiątych ubiegłego stulecia. Podstawową cechą technologii LTCC jest stosowanie jako materiału podłożowego niewypalanej, elastycznej folii ceramicznej. Folia ceramiczna o grubości od około  $50\ \mu\text{m}$  do  $250\ \mu\text{m}$  jest mieszaniną ceramiki, szkła i nośnika organicznego. LTCC jest zaawansowaną technologią wytwarzania złożonych układów mikroelektronicznych, charakteryzujących się bardzo dużym stopniem upakowania oraz dużą niezawodnością. Do najważniejszych jej zalet można zaliczyć [15]:

- możliwość wykonywania struktur trójwymiarowych,
- możliwość stosowania typowych materiałów grubowarstwowych wewnątrz i na powierzchni układów,
- możliwość integrowania różnych elementów elektronicznych,
- hermetyczność wykonywanych układów,
- dużą wytrzymałość mechaniczną (zbliżoną do ceramiki alundowej),
- elastyczność przy projektowaniu struktur przestrzennych,
- niskie koszty (w tym możliwość stosowania infrastruktury technicznej dla klasycznych układów grubowarstwowych).

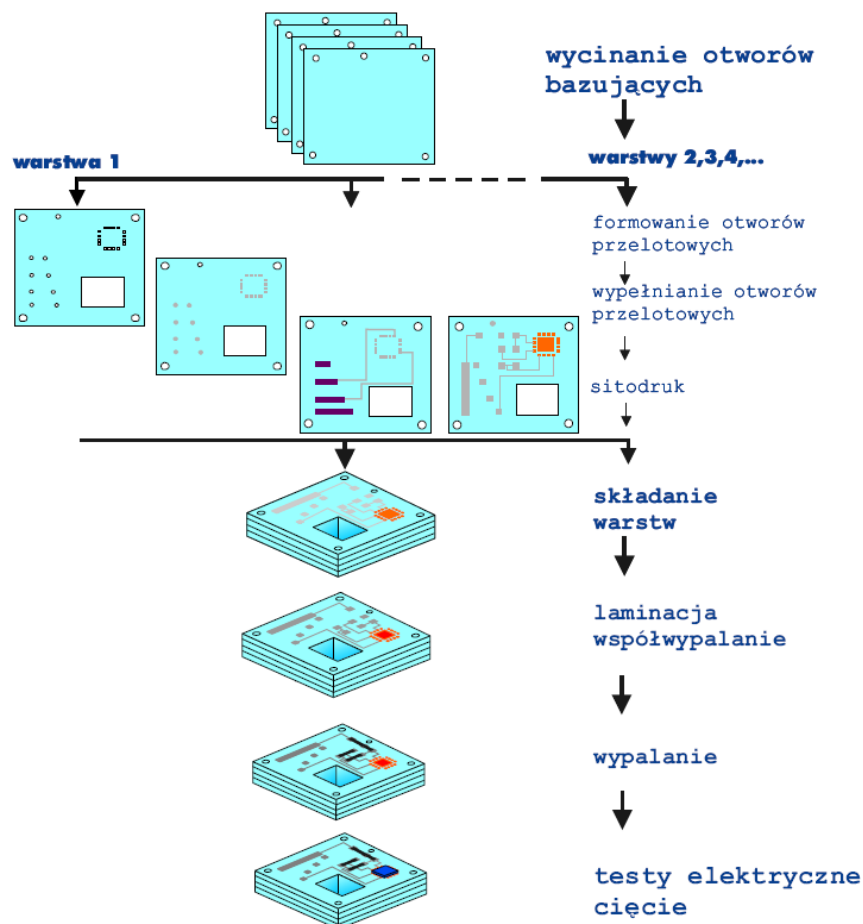
Technologia LTCC znalazła zastosowanie w wielu dziedzinach nauki i techniki. W dotychczasowym jej rozwoju wyróżnia się trzy generacje [15]. Pierwsza pozwala na realizację wielowarstwowych układów typu MCM (ang. *Multi Chip Module*) zawierających

---

<sup>1</sup> Wprowadzone w ostatnich latach dyrektywy dotyczące zakazu stosowania m.in. ołowiu w układach elektronicznych wymuszają eliminację materiałów zawierających w swoim składzie ten pierwiastek [36].

tylko zagrzebane ścieżki przewodzące o dużej gęstości upakowania oraz cienko- i grubowarstwowe powierzchniowe elementy bierny. Druga generacja umożliwia dodatkowo wykonanie elementów biernych (rezystorów, kondensatorów, cewek) zagrzebanych wewnątrz struktury LTCC. Trzecia generacja to wielowarstwowe sieci ścieżek przewodzących, powierzchniowych i zagrzebanych elementów biernych, jak również kanałów, komór, mikrozworów i mikropomp. Są to np. układy czujników (wielkości fizycznych i chemicznych), obudowy struktur MEMS (ang. *Micro Electro Mechanical System*), czy też układy typu LOC (ang. *Lab-On-Chip*) [37–42].

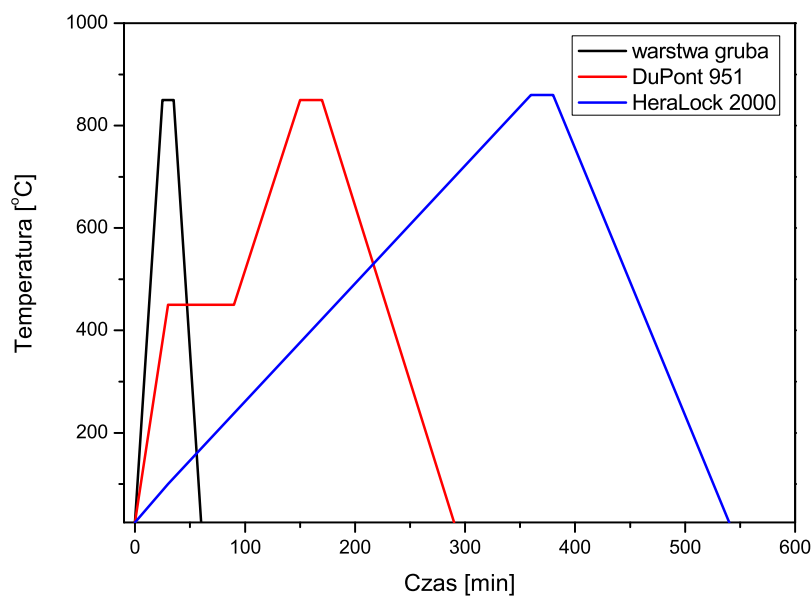
Na rys. 2.2 przedstawiono schematycznie główne etapy wytwarzania typowych wielowarstwowych układów LTCC.



Rys. 2.2. Główne etapy wytwarzania układów LTCC [43]

Proces technologiczny rozpoczyna wykonanie otworów bazujących, umożliwiających dokładne spasowanie poszczególnych warstw układu oraz otworów przelotowych (przelotek, ang. *vias*), które po wypełnieniu materiałem przewodzącym pełnią rolę połączeń międzywarstwowych. Otwory mogą być m.in. wybijane wykrojnikami mechanicznymi lub wycinane laserem. W następnym etapie metodą sitodruku na poszczególne warstwy nanosi się mozaikę ścieżek przewodzących oraz elementów biernych z odpowied-

nich past. Po wysuszeniu nałożonych materiałów folie składane są w stos i laminowane. W warunkach podwyższonego ciśnienia i temperatury zachodzi trwałe połączenie poszczególnych warstw układu. Następnie przeprowadza się współwypalanie folii ceramicznych z nadrukowanymi warstwami. Profil wypalania układów LTCC różni się od stosowanego dla standardowych warstw grubych (rys. 2.3). Charakterystyczne jest dłuższe przetrzymanie układu w temperaturze 300 – 500°C w celu usunięcia znacznej ilości składnika organicznego zawartego w dużej objętości podłoża. Po obróbce termicznej przeprowadza się montaż zewnętrznych układów oraz testowanie poprawności funkcjonowania układu.



Rys. 2.3. Porównanie profili wypalania układów grubowarstwowych i LTCC [44, 45]

## Rozdział 3

# Elektronika wysokotemperaturowa

### 3.1. Definicje i obszary zastosowań

Elektronika jest dziedziną techniki i nauki, która od czasu powstania pierwszych układów elektronicznych podlega nieustannemu i intensywnemu rozwojowi, znajdując zastosowanie w najróżniejszych dziedzinach ludzkiego życia. Upowszechnienie elektroniki spowodowało znaczące zmiany w przemyśle, transporcie, handlu, edukacji, komunikacji, medycynie, dostępie do informacji itd. Wszystkie te działania stawiają coraz to nowe wyzwania dla projektantów i producentów urządzeń elektronicznych. Jednym z ważniejszych obecnie zadań jest rozszerzenie zakresu temperatury, w którym układy i urządzenia elektroniczne mogą pracować w sposób niezawodny i w pełni funkcjonalny.

Aktualnie największy udział w rynku urządzeń elektronicznych stanowią produkty, których nominalny zakres temperatury pracy zawiera się między  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $85^{\circ}\text{C}$ . Dla wąskiej grupy układów wyspecjalizowanych, m.in. w zastosowaniach militarnych, obejmuje on szerszy przedział od  $-65^{\circ}\text{C}$  do  $150^{\circ}\text{C}$ . Niemniej jednak obecne zapotrzebowanie na elementy elektroniczne obejmuje zakres temperatury zarówno poniżej jak i powyżej podanych wartości. Zaliczają się one do tzw. elektroniki ekstremalnej temperatury ETE (ang. *Extreme-Temperature Electronics*). Elektronika wysokotemperaturowa obejmuje szereg potencjalnych zastosowań, w których temperatura może wynosić zarówno około  $200^{\circ}\text{C}$ , ale również  $600^{\circ}\text{C}$ . Trudno więc zdefiniować zamknięty przedział temperatury, którym można by odnosić się jednoznacznie do zagadnienia elektroniki wysokotemperaturowej. Stąd też autor, za literaturą przedmiotu, definiuje elektronikę wysokotemperaturową, jako **elektronikę pracującą powyżej typowego zakresu temperatury konwencjonalnych, krzemowych przyrządów półprzewodnikowych oraz elementów pomocniczych.**

Naturalnym motorem rozwoju elektroniki wysokotemperaturowej jest wprowadzanie systemów elektronicznych w środowisko, w którym podwyższona temperatura jest stanem normalnym. Stąd też wymienia się szereg aplikacji tego typu systemów, np.:

- przemysł lotniczy i motoryzacyjny – systemy sterowania silników odrzutowych i spalinowych oraz nowoczesnych napędów hybrydowych,
- przemysł paliwowo-energetyczny – systemy sterowania i monitoringu przy pozyskiwaniu surowców naturalnych metodą odwiertów, pozyskiwanie energii ze źródeł geotermalnych, oprzyrządowanie elektrowni konwencjonalnych oraz atomowych,
- kontrola procesów przemysłowych przez zastosowanie sterowników i czujników elektronicznych montowanych bezpośrednio na rurociągach i zbiornikach zawierających produkty o wysokiej temperaturze,
- elektroniczne układy sterujące dużych mocy ( tranzystory, wzmacniacze),
- systemy bezpieczeństwa pożarowego w budynkach i środkach transportu pracujące niezawodnie w momencie pojawienia się wysokiej temperatury związanej z pożarem,
- przemysł kosmiczny – oprzyrządowanie na potrzeby misji eksploracyjnych planet i księżyców.

Główni odbiorcy elektroniki wysokotemperaturowej to przemysł wydobywczy i motoryzacyjny [46]. Rosnące światowe zapotrzebowanie na energię powoduje poszukiwanie zarówno rozwiązań alternatywnych (źródła energii odnawialnych) jak i nowych złóż paliw kopalnych. Odwierty są prowadzone na głębokość kilku kilometrów, a temperatura w głowicach drążących osiąga 200 – 300°C. Sygnały z czujników muszą być przesyłane na powierzchnię za pomocą długich przewodów. Stąd też pożądane jest umiejscowienie układów przetwarzających dane pomiarowe bezpośrednio w sondach głębinowych w celu uniknięcia zniekształcenia sygnału podczas transmisji oraz umożliwienia multipleksacji informacji z wielu czujników w jednym torze telemetrycznym.

W roku 2003 średni koszt układów elektronicznych w samochodzie wynosił około 1500 dolarów. Natomiast w roku 2013 przewiduje się wzrost do około 2300 dolarów [46]. Pojazdy są wyposażane w szereg rozwiązań poprawiających bezpieczeństwo i komfort jazdy oraz zmniejszających zużycie paliwa. Standardowe mechaniczne układy sterujące są zastępowane przez aktuatory elektromechaniczne (tzw. technologia *drive-by-wire*). Wiele z tych systemów jest umiejscawianych w obszarach o podwyższonej temperaturze (tabela 3.1). W pojazdach wyposażonych w hybrydowe silniki elektryczne lub ogniwa paliwowe podwyższenie temperatury jest efektem zwiększonego rozpraszania energii w przyrządach mocy. Najbardziej narażone temperaturowo są czujniki gazów w układach wydechowych oraz czujniki ciśnienia i spalania w cylindrach.

Aby sprostać zapotrzebowaniu na układy pracujące w wysokiej temperaturze proponowane są dwa kierunki rozwoju. Pierwszym z nich jest użycie elementów dostępnych



Tabela 3.1. Średnie wartości temperatury w podzespołach samochodu [46]

Komora silnika	100 – 125°C
Obudowa silnika	150 – 200°C
Systemy transmisji	150 – 175°C
Układ hamulcowy	150 – 250°C
Cylinder silnika	200 – 300°C
Układ wydechowy	~ 850°C

dla standardowego zakresu temperatury pracy, uzbierając je w odpowiednią izolację termiczną oraz wprowadzając systemy chłodzenia. Na przykład przy prowadzeniu odwiertów możliwe jest umieszczenie układów elektronicznych w specjalnych dewarach oraz dołączenie pasywnych absorberów ciepła o dużej pojemności cieplnej. W wielu aplikacjach metody te mogą być jednak niepożądane i niepraktyczne. Izolacja i chłodzenie pasywne mogą charakteryzować się ograniczonym czasem życia w konkretnych warunkach. Z kolei chłodzenie aktywne (np. chłodziarki termoelektryczne) wymaga dostarczenia dodatkowej mocy oraz kolejnych podsystemów elektronicznych do sterowania samym chłodzeniem.

Drugim kierunkiem jest zaprojektowanie układów, które mogą być bezpośrednio stosowane w warunkach podwyższonej temperatury. Podejście to wymaga kompleksowego opracowania obejmującego aktywne przyrządy półprzewodnikowe, elementy bierne oraz technologie montażu i obudowywania układów. Projekt systemu musi uwzględniać szereg czynników: materiałowe (odporność na naprężenia termiczne, stabilność fizyczną i chemiczną, zmiany parametrów z temperaturą), użytkowe (zdalna komunikacja z systemem, zasilanie bateryjne), niezawodność i precyzję działania, oczekiwany długi czas życia.

## 3.2. Elementy czynne i bierne na potrzeby elektroniki wysokotemperaturowej

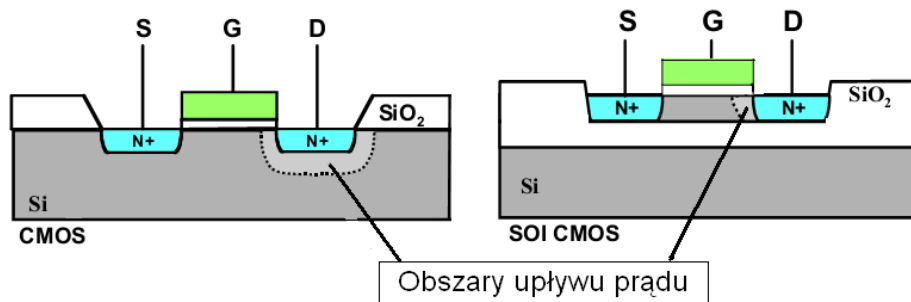
### Elementy czynne

Wynalezienie pierwszego tranzystora było przełomem w elektronice, dającym początek coraz większej miniaturyzacji przyrządów i urządzeń elektronicznych. Dzięki obniżonemu poborowi mocy można było zmniejszyć też współpracujące z tranzystorami elementy bierne. W układach scalonych o bardzo wielkiej skali integracji (na przykład w mikroprocesorach) liczba tranzystorów w jednym chipie przekracza miliard. Projektowanie i wytwarzanie urządzeń przeznaczonych do pracy w ekstremalnych warunkach otoczenia wymaga wdrożenia specjalnych procesów produkcyjnych. W wysokiej temperaturze pojawiają się bowiem ograniczenia związane z właściwościami materiałów

wykorzystywanych do wytwarzania układów scalonych oraz ze zjawiskami, które przy zwiększeniu temperatury nasilają się, takimi jak [47]:

- ograniczenie ruchliwości nośników w wyniku zwiększonej amplitudy drgań atomów sieci krystalicznej,
- zmniejszenie wzmocnienia prądowego w tranzystorach bipolarnych,
- generacja dodatkowych par elektron-dziura – jest to zjawisko niekorzystne, ponieważ w większości przyrządów istotna jest kontrola gęstości nośników prądu uzyskiwana za pomocą odpowiedniego poziomu domieszkowania półprzewodnika a nie termicznej generacji nośników,
- zmiana wartości napięcia progowego w tranzystorach unipolarnych,
- obniżenie napięcia przebicia złącza  $p-n$  oraz napięcia przebicia bramki tranzystorów polowych.

W grupie przyrządów aktywnych dominują półprzewodnikowe układy scalone wytwarzane w technologii krzemowej. Konwencjonalne przyrządy krzemowe nie mogą jednak pracować w temperaturze powyżej  $200^{\circ}\text{C}$ , z powodu problemów ze zwiększonym prądem upływu w strukturze. Wprowadzenie technologii krzemu na izolatorze SOI (ang. *Silicon On Insulator*) umożliwiło zwiększenie temperatury pracy przyrządów krzemowych do około  $250^{\circ}\text{C}$  dzięki ograniczeniu upływu prądu w strukturze (rys. 3.1). W ofercie producentów układów scalonych można w tej chwili znaleźć produkty wytwarzane w technologii SOI, dedykowane do pracy w temperaturze do około  $225^{\circ}\text{C}$  [48].



Rys. 3.1. Porównanie tranzystorów polowych w technologii objętościowych podłoży krzemowych i podłoży typu SOI [49]

W związku z ograniczeniami technologii krzemowej badania na potrzeby elektroniki wysokotemperaturowej ukierunkowano na półprzewodniki z szeroką przerwą wzbronioną. Główne prace skupiają się wokół SiC i GaN [50, 51]. W materiałach tych większość zjawisk, niekorzystnych z punktu widzenia właściwości użytkowych przyrządu, zachodzi w znacznie wyższej temperaturze niż w krzemie. W tabeli 3.2 zestawiono właściwości omawianych materiałów półprzewodnikowych oraz porównano możliwości ich wykorzystania w technologii elementów i układów przeznaczonych do pracy przy dużych gęstościach mocy i wysokiej temperaturze. Ograniczenia rzeczywiste są wywo-

Tabela 3.2. Porównanie właściwości materiałów półprzewodnikowych [52, 53]

Material	Przerwa energetyczna [eV]	Ruchliwość nośników [cm <sup>2</sup> /V·s]	Teoretyczna temp. pracy [°C]	Rzeczywista temp. pracy [°C]	Rozwój technologii
Si	1,11	1400 (el), 450 (dz)	400	225	b. wysoki
GaAs	1,43	8500 (el), 450 (dz)	700	350	wysoki
SiC	2,39	300-900 (el), 10-30 (dz)	900	600	średni
GaN	3,44	900 (el), 10 (dz)	900	600	średni
Diamant	5,48	2200 (el), 1800 (dz)	1100	b.d.	niski

el = elektrony, dz = dziury

ływane degradacją kontaktów metalicznych oraz warstw dielektrycznych, zjawiskiem elektromigracji w ścieżkach przewodzących i defektami w materiale półprzewodnikowym. Aktualnie komercyjnie są oferowane elementy dyskretne na bazie SiC - diody oraz tranzystory polowe typu MESFET (ang. *Metal Semiconductor Field Effect Transistor*). Tranzystory bipolarne oraz polowe złączowe JFET (ang. *Junction Field Effect Transistor*) są nadal rozwijane. Zaprezentowane również pierwsze tyrystory SiC [54] oraz tranzystory mikrofalowe GaN/SiC [55].

### Elementy bierne

W układach elektronicznych obok przyrządów aktywnych stosuje się też różne elementy bierne (rezystory, kondensatory, cewki indukcyjne, warystory itd.). Ich liczba w pojedynczym układzie jest najczęściej od kilku do kilkunastu razy większa niż liczba elementów czynnych. Przy wyborze elementów należy rozważyć, podobnie jak dla elementów aktywnych, wpływ temperatury na parametry użytkowe oraz procesy starzeniowe trwale degradujące ich właściwości [56, 57].

Rezystory są najprostszymi i zarazem powszechnie stosowanymi elementami biernymi. Wytwarzane są w wielu technologiach. Wpływ temperatury na rezystywność w najprostszym wypadku można opisać zależnością:

$$\rho(T) = \rho_0(1 + \alpha_T(T - T_0)) \quad (3.1)$$

W bardziej skomplikowanych wypadkach zależność ta jest nieliniowa i może być opisana np.:

$$\rho(T) = \rho_0 e^{\alpha_T(T - T_0)} \quad (3.2)$$

gdzie  $\alpha_T$  jest temperaturowym współczynnikiem rezystancji (TWR),  $T_0$  jest temperaturą odniesienia, najczęściej ustaloną na 25°C,  $\rho_0$  jest rezystywnością w temperaturze odniesienia. W tabeli 3.3 zestawiono wartości TWR oraz maksymalnej temperatury pracy kilku wybranych grup rezystorów. W zależności od technologii mogą w nich występować różne niekorzystne zjawiska związane z podwyższeniem temperatury, takie

jak: wzrost gęstości szumów, naprężenia termiczne, utlenianie, dyfuzja. Dla rezystorów drutowych ograniczeniem jest termiczne uszkodzenie izolacji, które prowadzi do wnikania wilgoci i korozji elementu. Wadą tego typu rezystorów są ich duże rozmiary, ograniczające możliwości integracji i miniaturyzacji układów. Rezystory cienkowarstwowe oferują małe wymiary, dobre właściwości wysokoczęstotliwościowe i małe wartości TWR. Utlenianie powierzchni rezystora zabezpiecza je samoistnie przed korozją. Technologia grubowarstwowa umożliwia wytwarzanie tanich rezystorów w dużych seriach i szerokim przedziale wartości rezystancji. Większość współczesnych elementów dyskretnych do montażu powierzchniowego SMD (ang. *Surface Mounted Device*) jest produkowana z wykorzystaniem techniki warstw grubych. Zagadnienia dotyczące technologii i właściwości rezystorów grubowarstwowych były omawiane w wielu pracach, jak również są przedmiotem badań opisywanych w niniejszej rozprawie (rozdział 4).

Tabela 3.3. Porównanie właściwości rezystorów wykonywanych w różnych technologiach [58]

Typ rezystora	Maksymalna temp. pracy [°C]	TWR [ppm/°C]
Drutowe		
– precyzyjne	145	10
– mocy	275	260
Cienkowarstwowe		
– tantalowe	>200	± 100
– tantalowo-azotkowe	>200	- 85
– tytanowe	>200	± 1000
– SnO <sub>2</sub>	>200	-1500 do 0
– Ni-Cr	>200	± 100
Grubowarstwowe		
– PdAg - PdO	>200	- 500 do 150
– RuO <sub>2</sub>	500	± 300

W układach elektronicznych stosuje się również dużą liczbę różnego rodzaju kondensatorów. Wykorzystywane są one jako elementy filtrujące, sprzęgające, blokujące, przeciwwzakłóceniami itd. Do zastosowań w standardowym zakresie temperatury oferowanych jest wiele elementów wykonywanych w różnych technologiach. Jednak kondensatory wysokotemperaturowe są zagadnieniem trudnym i stawiają przed producentami wiele wyzwań. Wysoka temperatura powoduje m.in. zwiększenie prądu upływu w dielektrykach uniemożliwiając utrzymanie ładunku zgromadzonego w kondensatorze i zwiększając tym samym wartość współczynnika strat. Obniżeniu ulega też napięcie przebicia dielektryka. Przy realizacji dużych pojemności istotna jest charakterystyka temperaturowa dielektryka ferroelektrycznego, która jest często określona w wąskim zakresie temperatury. Kondensatory z dielektrykiem polimerowym mogą pracować do około 200°C, konstrukcje eksperymentalne umożliwiają pracę nawet do 300°C [59]. Kondensatory elektrolityczne, mimo dużych pojemności, praktycznie nie mogą być sto-

sowane powyżej 100°C z uwagi na niestabilność chemiczną elektrolitu w podwyższonej temperaturze. Najlepsze właściwości wysokotemperaturowe wykazują wielowarstwowe kondensatory ceramiczne. Elementy z dielektrykiem klasy NP0 (*Negative-Positive zero*, o najmniejszej pojemności i słabej zależności temperaturowej) wykazują stabilność pojemności do 500°C, przy czym powyżej 300°C wzrasta ich stratność.

Cewki indukcyjne, podobnie jak kondensatory, znajdują szereg zastosowań w układach elektronicznych. Elementy te, wykonywane bez wykorzystania materiałów o właściwościach magnetycznych (bezdzeniowe), wykazują słabą zależność indukcyjności od temperatury. Natomiast w wypadku cewek z rdzeniami ferrytowymi ich właściwości są uzależnione od charakterystyki temperaturowej ferrytu. Powyżej temperatury Curie ich indukcyjność ulega znaczącemu zmniejszeniu. Aktualnie oferowane są komercyjne elementy indukcyjne do pracy w temperaturze do około 225°C. Przedstawiono również eksperymentalne zastosowanie cewek indukcyjnych z układami SiC w temperaturze 450°C [60]. Właściwości elementów pojemnościowych i indukcyjnych wytwarzanych w technologii grubowarstwowej i LTCC omówiono w rozdziale 5.

### 3.3. Technologie montażu

Opracowywanie układów wysokotemperaturowych wymaga uwzględnienia również zagadnień związanych z technikami ich montażu i obudowywania. W pełni funkcjonalny układ składa się z logicznego połączenia wielu elementów aktywnych i pasywnych. W wypadku oddziaływania podwyższonej temperatury należy uwzględnić kilka ważnych czynników: dekompozycję i topnienie zastosowanych materiałów, niedopasowanie współczynników rozszerzalności liniowej, dyfuzję materiałów na połączeniach, elektromigrację. Montaż elektroniczny można rozważać na kilku poziomach. Pierwszym z nich jest montaż struktury półprzewodnikowej do pojedynczej obudowy. Do współpracy z chipami SiC nadają się obudowy z  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{AlN}$ , LTCC,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  i DBC (*Direct Bonded Copper*) [52, 61, 62]. Połączenie może być wykonane z wielu różnych materiałów, m.in. żywic epoksydowych, polimerów termoplastycznych lub termoutwardzalnych, stopów eutektycznych, miękkich stopów lutowniczych oraz kompozytów szklano-srebrowych. Powinny się one charakteryzować dobrym przewodnictwem cieplnym (niekiedy również elektrycznym), odpornością na naprężenia mechaniczne i korozję oraz możliwością dopasowywania do różnych współczynników rozszerzalności liniowej łączonych materiałów. Materiały organiczne znajdują zastosowanie w zakresie temperatury do 150 – 225°C, natomiast nie nadają się do długotrwałej pracy powyżej 300°C z powodu odgazowywania i dekompozycji. W tabeli 3.4 porównano właściwości kilku komercyjnych materiałów łączących. Oprócz montażu chipu do podłoża wymagane jest również wyprowadzenie połączeń elektrycznych ze struktury. Powszechnie stosowaną techniką jest montaż drutowy (ang. *wire bonding*) metodą termo- lub ultrakompresyjną przy użyciu drutu złotego. Ograniczenie temperatury pracy takich połączeń wynika z trzech

Tabela 3.4. Porównanie właściwości komercyjnych materiałów łączących [62]

Materiał	$T_{topn}$ [°C]	$T_{max}$ [°C]	$\lambda$ [W/m·K]	$\alpha$ [ppm/K]
Au88Ge12	356	320	52	12
Au80Sn20	280	250	58	16
P-1011*	–	350	1,29	37
H20E-HC*	–	300	3,5	26
H20E-HC*	–	200	9,96	53
QMI-3555R**	400	300	80	16
FO-3, FO-13***	450	300	60	25
Tape 3M****	–	250	–	–
Ag nano*****	–	500	240	19

\*Epoxy Technology; \*\* Loctite; \*\*\* ITME, Poland; \*\*\*\* 3M; \*\*\*\*\* AMEPOX, Poland.

głównych czynników: a) dyfuzji materiału powodującej tworzenie wolnych przestrzeni w objętości materiału obniżających wytrzymałość mechaniczną kontaktu i zwiększających jego rezystancję, b) powstawania faz międzymetalicznych zmniejszających wytrzymałość połączenia, c) temperatury topnienia materiału. W tabeli 3.4 przedstawiono stosowane systemy połączeń oraz ich ograniczenia temperaturowe. Podjęto również próby zastosowania montażu typu flip-chip [63].

Drugi poziom montażu obejmuje wykonanie połączeń między obudowanymi chipami oraz pozostałymi elementami na wspólnym podłożu (płytkie obwodu drukowanego). Najczęściej stosowane laminaty epoksydowo-szklane (np. FR4) wykazują chwilową odporność na działanie ciekłego lutownia o temperaturze do około 260°C. Jednak z uwagi na degradację materiału maksymalna temperatura pracy ciągłej nie przekracza 170°C [64]. Dlatego najpopularniejszymi w zastosowaniach wysokotemperaturowych są różnego rodzaju materiały ceramiczne [65, 66]. Połączenia między elementami na tym poziomie montażu wykonuje się najczęściej techniką lutowania [67]. Temperatura topnienia najpopularniejszych kilka lat temu stopów lutowniczych SnPb (aktualnie wycofywane z uwagi na zawartość ołowiu [36]) wynosi 183°C. Dla stopów bezołowiowych typu SAC (Sn-Ag-Cu) jest to około 220°C. Dlatego ich przydatność w montażu wysokotemperaturowym jest ograniczona do zakresu poniżej 200°C.

Tabela 3.5. Właściwości połączeń drutowych [58, 68]

Materiały	Maksymalna temp. pracy [°C]	Uwagi
Al-Au	175	tworzenie faz międzymetalicznych
Al-Ag	175	dyfuzja i powstawanie wolnych przestrzeni
Ni-Au	300	dyfuzja i powstawanie wolnych przestrzeni
Al-Al	660	temp. topnienia aluminium
Au-Au	1064	temp. topnienia złota

## Rozdział 4

# Rezystory grubowarstwowe i LTCC

Rezystory są najczęściej wytwarzanymi grubowarstwowymi elementami biernymi [69, 70]. Współczesne pasty rezystywne bazują na dwutlenku rutenu  $\text{RuO}_2$  lub rutenianach, zwykle  $\text{Bi}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$  bądź  $\text{Pb}_2\text{Ru}_2\text{O}_{6+x}$  [71–77]. Stosuje się także dwutlenek irydu  $\text{IrO}_2$  [78, 79]. Fazą wiążącą jest zwykle szkliwo borokrzemowe. Zawartość objętościowa składnika przewodzącego w wypalanej warstwie waha się od kilku do ponad 40%. Pokrywają one zakres wartości rezystancji powierzchniowej od 1 do  $10^7 \Omega/\square$ . Standardowy rezystor grubowarstwowy wykonany jest w postaci planarnego elementu dwuelektrodowego. Szerokość i grubość rezystora są określone przez wymiary warstwy rezystywnej, natomiast o długości decyduje odstęp między elektrodami. Wytwarzanie miniaturowych rezystorów grubowarstwowch z wykorzystaniem techniki sitodruku jest kłopotliwe z uwagi na niewystarczającą precyzję, która przekłada się na gorszą jakość uzyskiwanych warstw. Dlatego w celu miniaturyzacji elementów należy zastosować alternatywne metody wytwarzania elementów. Najbardziej obiecujące wydają się technika past światłoczułych (fotoformowania) oraz technika mikroobróbki laserowej. W poniższym rozdziale przedstawiono proces wytwarzania, jak również charakterystykę geometryczną, elektryczną i stabilnościową miniaturowych rezystorów grubowarstwowch pod kątem pracy w podwyższonej temperaturze.

### 4.1. Wytwarzanie struktur testowych

Na potrzeby badań przygotowano serię rezystorów grubowarstwowch o różnej geometrii. Jako podłoża zastosowano standardową ceramikę alundową (96%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) oraz wypaloną ceramikę LTCC DP951. Podłoża LTCC składano z dwóch warstw folii o grubości 165  $\mu\text{m}$ . Następnie przeprowadzano laminację pod ciśnieniem 20 MPa przez 10 minut w temperaturze 70°C. Podłoża LTCC wypalono w strefowym piecu BTU w cyklu temperaturowym  $T_{max} = 875^\circ\text{C}$ .

Rezystory przygotowano w trzech wariantach technologicznych:

1. technika past światłoczułych
2. technika past światłoczułych + sitodruk
3. mikroobróbka laserowa + sitodruk

W pierwszym wariacie obszar rezystywny oraz elektrody uformowano w procesie fotolitografii. Zastosowano światłoczułą srebrną pastę przewodzącą Ag65 [80] oraz eksperymentalną światłoczułą pastę rezystywną RF12 ( $R_{sq} = 150 \Omega/\square$ ). Obie pasty wytworzono w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych (ITME) w Warszawie. Zastosowano tutaj zalecaną przez producenta, przy czym rzadko spotykaną, kolejność realizacji poszczególnych warstw. Najpierw naniesiono i wypalono warstwę rezystywną, a w następnym etapie wytworzono na niej elektrody (warstwa rezystywna była tu wypalana dwukrotnie). Wytworzono rezystory o długości 90, 120 i 300  $\mu\text{m}$  oraz o szerokości 60  $\mu\text{m}$ .

W drugim wariacie elektrody formowano w procesie fotolitografii ponownie stosując światłoczułą pastę Ag65. Natomiast warstwę rezystywną nanoszono standardową metodą sitodruku. Zastosowano trzy rodzaje past rezystywnych: DP2021 (DuPont,  $R_{sq} = 100\Omega/\square$ ), R400A-10 (Heraeus,  $R_{sq} = 10 \Omega/\square$ ), R490A (Heraeus,  $R_{sq} = 1 \Omega/\square$ ). Wytworzono rezystory również o długości 90, 120 i 300  $\mu\text{m}$  oraz o szerokości 200  $\mu\text{m}$ .

W ostatnim wariacie rezystory przygotowano wykorzystując metodę obróbki laserowej. Na podłoża nanoszono warstwę przewodzącą, którą po wysuszeniu usuwano z określonego obszaru za pomocą wiązki laserowej. Szerokość nacięcia definiowała długość rezystora. Do obróbki laserowej zastosowano system laserowy LPKF ProtoLaser U. Źródłem promieniowania jest w nim impulsowy laser na ciele stałym Nd:YAG o długości fali  $\lambda = 355 \text{ nm}$  (trzecia harmoniczna). Średnica plamki lasera wynosiła około 25  $\mu\text{m}$ , moc lasera była równa  $P = 1,1 \text{ W}$ , częstotliwość impulsów  $f = 200 \text{ kHz}$ , szybkość skanowania głowicy 1000 mm/s. Powyższe parametry obróbki laserowej wybrano na podstawie wielu prac przygotowawczych związanych z optymalizacją jakości nacięć. Po wypaleniu elektrod w przygotowane nacięcia nałożono warstwę rezystywną metodą sitodruku. Zastosowano dwa rodzaje past przewodzących – na bazie PdAg - DP6146 (DuPont) oraz na bazie złota - ESL8844G (ElectroScience Lab.). Jako warstwy rezystywne zastosowano pasty firmy DuPont - CF011 ( $R_{sq} = 10 \Omega/\square$ ), CF021 ( $R_{sq} = 100 \Omega/\square$ ), CF041 ( $R_{sq} = 10 \text{ k}\Omega/\square$ ) lub DP2021 ( $R_{sq} = 100 \Omega/\square$ ). Zaprojektowano rezystory o długości 30, 60, 90, 120, 150 i 300  $\mu\text{m}$  oraz ustalonej szerokości 200  $\mu\text{m}$ . W tabeli 4.1 zebrano poszczególne etapy wytwarzania rezystorów testowych dla każdego wariantu technologicznego.

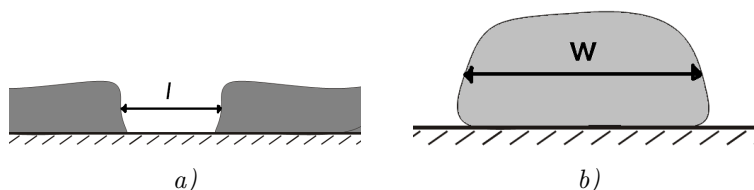


Tabela 4.1. Warianty wykonania rezystorów testowych

Wariant 1	Wariant 2	Wariant 3
nadruk warstwy rezystywnej	nadruk warstwy przewodzącej	nadruk elektrod
suszenie	suszenie	suszenie
naświetlanie	naświetlanie	obróbka laserowa
wywoływanie	wywoływanie	wypalanie
wypalanie	wypalanie	nadruk rezystorów
nadruk warstwy przewodzącej	nadruk rezystorów	suszenie
suszenie	suszenie	wypalanie
naświetlanie	wypalanie	
wywoływanie		
wypalanie		

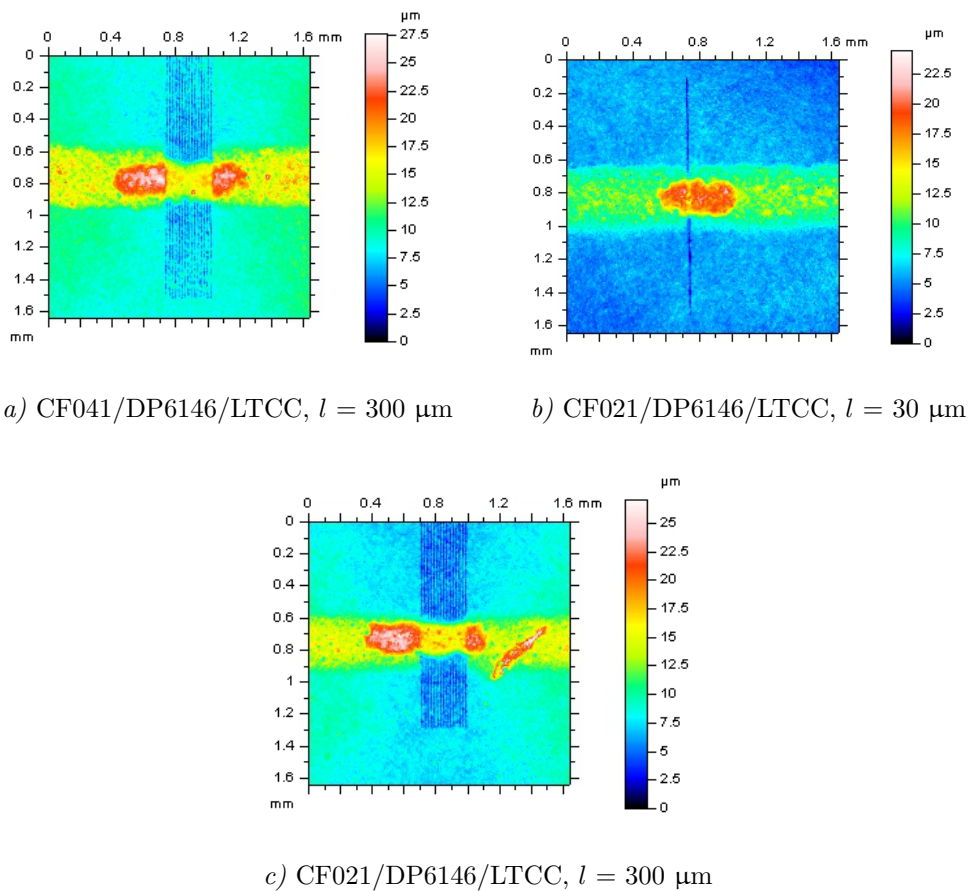
## 4.2. Właściwości geometryczne

Właściwości geometryczne struktur zbadano za pomocą profilometru optycznego TalySurf CCI firmy Taylor Hobson. Zmierzono rozkłady grubości elementów oraz ich wymiary planarne. Długość ( $l$ ) i szerokość ( $w$ ) rezystora odczytywano w połowie wysokości odpowiednio warstwy przewodzącej i rezystywnej (rys. 4.1). Na rys. 4.2 i 4.3 przedstawiono profile grubości wybranych struktur.



Rys. 4.1. Sposób wyznaczania wymiarów geometrycznych rezystorów - a) długość i b) szerokość

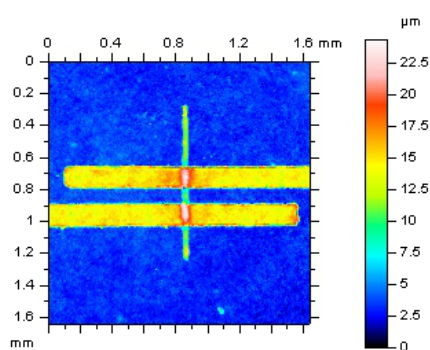
Właściwości geometryczne rezystorów silnie zależą od techniki wytwarzania. Technologia past światłoczułych umożliwia realizację miniaturowych struktur o bardzo dobrze zdefiniowanych krawędziach (rys. 4.3b, 4.3d). Przekrój poprzeczny warstwy fotoformowanej jest znacznie bliższy idealnego kształtu prostokątnego w porównaniu z typowym trapezowym profilem warstwy sitodrukowanej. Boczne ściany są gładkie i nachylone do podłoża pod kątem zbliżonym do kąta prostego. Warstwy nanoszone metodą sitodruku charakteryzują się nieregularnymi krawędziami. Bardziej też widoczna jest niejednorodność grubości warstwy. Ważną cechą, wpływającą na geometrię struktury, jest skurcz past podczas procesu wypalania związany z usuwaniem fazy organicznej. Efekt ten był szczególnie widoczny dla past światłoczułych (dalsze informacje na temat światłoczułych past przewodzących zamieszczono w rozdziale 5.3). W rezultacie wytworzone struktury mają wymiary mniejsze niż wzór na masce użytej do naświetlania warstwy. Węższe elektrody przekładają się na większy odstęp między nimi i tym samym większą długość rezystora. Element z elektrodami fotoformowanymi będzie zatem miał



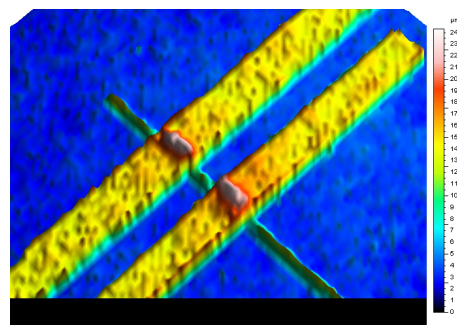
Rys. 4.2. Profile grubości rezystorów miniaturowych otrzymanych z wykorzystaniem wariantu technologicznego nr 3

większy współczynnik kształtu ( $n = l/w$ ) od projektowanego. Skurcz pasty rezystywnej zmniejsza z kolei szerokość rezystora, zwiększając tym samym liczbę jednostkowych kwadratów, co w efekcie również powoduje zwiększenie rezystancji.

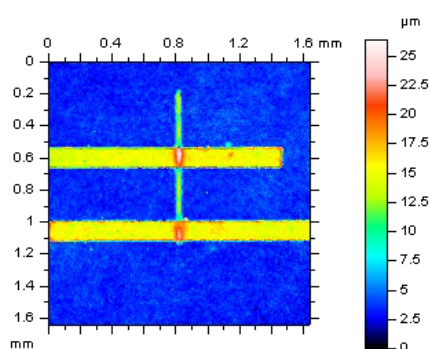
Mikroobróbka laserowa umożliwia dokładne zdefiniowanie długości rezystora. Charakterystyczną cechą procesu sitodruku jest rozpywanie nałożonej na podłoże pasty. Obróbce laserowej poddawano warstwy wysuszone, które nie miały możliwości dalszego płynięcia. Stąd krawędź nacięcia jest prosta i wyraźnie zdefiniowana. W tabelach 4.2 i 4.3 zebrano projektowane i rzeczywiste wymiary geometryczne rezystorów miniaturowych wyznaczone z serii 12 rezystorów w partii. Długości rezystorów wycinanych laserem są bliskie projektowanym, również rozrzut długości jest stosunkowo niewielki. Dla rezystorów wykonywanych w technologii past światłoczułych zaobserwowano większe odstępstwa od projektu. Jednak powtarzalność uzyskiwanych wymiarów jest podobna jak dla mikroobróbki laserowej.



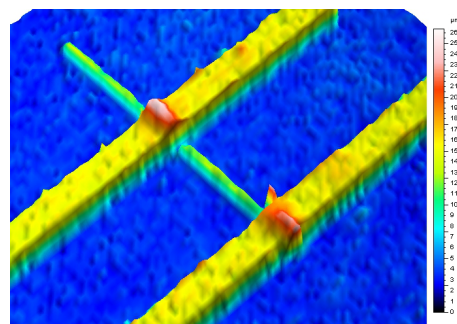
a) RF12/Ag65/LTCC,  $l = 120$   
 $\mu\text{m}$  (widok 2D)



b) RF12/Ag65/LTCC,  $l = 120$   
 $\mu\text{m}$  (widok 3D)



c) RF12/Ag65/LTCC,  $l = 300$   
 $\mu\text{m}$  (widok 2D)



d) RF12/Ag65/LTCC,  $l = 300$   
 $\mu\text{m}$  (widok 3D)

Rys. 4.3. Profile grubości rezystorów miniaturowych otrzymanych z wykorzystaniem wariantu technologicznego nr 1

Tabela 4.2. Projektowane i rzeczywiste wymiary rezystorów – mikroobróbka laserowa

Podłoże	Pasta przewodząca	Pasta rezystywna	Długość projektowana [μm]	Długość rzeczywista [μm]	Szerokość projektowana [μm]	Szerokość rzeczywista [μm]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ESL8844	CF011	30	33 ± 2	200	213 ± 22
			90	93 ± 8	200	215 ± 16
			150	150 ± 6	200	223 ± 11
			300	304 ± 4	200	205 ± 12
DP951	ESL8844	CF011	30	32 ± 3	200	217 ± 12
			90	90 ± 4	200	221 ± 10
			150	152 ± 4	200	228 ± 10
			300	303 ± 6	200	220 ± 11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	DP6146	CF021	30	30 ± 2	200	259 ± 10
			90	88 ± 5	200	277 ± 14
			150	153 ± 6	200	280 ± 13
			300	301 ± 2	200	285 ± 14
DP951	DP6146	CF021	30	27 ± 3	200	236 ± 14
			90	82 ± 3	200	232 ± 12
			150	148 ± 5	200	241 ± 17
			300	294 ± 8	200	228 ± 9

Tabela 4.3. Projektowane i rzeczywiste wymiary rezystorów – technologia past światłoczułych

Podłoże	Pasta przewodząca	Pasta rezystywna	Długość projektowana [μm]	Długość rzeczywista [μm]	Szerokość projektowana [μm]	Szerokość rzeczywista [μm]
DP951	Ag65	RF12	90	84 ± 9	60	47 ± 3
			120	127 ± 4	60	47 ± 3
			300	310 ± 9	60	47 ± 3
DP951	Ag65	DP2021	90	91 ± 5	200	197 ± 18
			120	115 ± 6	200	192 ± 24
			300	310 ± 9	200	203 ± 11
DP951	Ag65	R490A	90	91 ± 5	200	200 ± 13
			120	115 ± 6	200	205 ± 9
			300	310 ± 9	200	219 ± 16
DP951	Ag65	R400A	90	91 ± 5	200	203 ± 11
			120	115 ± 6	200	205 ± 15
			300	310 ± 9	200	208 ± 7

### 4.3. Parametry elektryczne

Podstawowym parametrem rezystora jest wartość jego rezystancji  $R$ . Dla idealnego, prostopadłościennego rezystora wykonanego z materiału o rezystywności  $\rho$  wartość rezystancji można określić równaniem [69]:

$$R = \rho \frac{l}{w \cdot d} \quad (4.1)$$

gdzie:  $R$  – wartość rezystancji,  $\rho$  - rezystywność,  $l$  – długość,  $w$  – szerokość,  $d$  - grubość warstwy rezystywnej

Dla rezystorów grubowarstwowych o równomiernej grubości, w których nie występuje efekt wpływu elektrod, rezystancję  $R$  można określić wzorem:

$$R = R_{sq} \cdot n \quad (4.2)$$

gdzie:  $R$  – wartość rezystancji,  $R_{sq}$  – rezystancja powierzchniowa,  $n$  – liczba kwadratów (współczynnik kształtu) wynikająca z geometrii ( $n = \frac{l}{w}$ ). Porównując (4.1) i (4.2) otrzymujemy:

$$R_{sq} = \frac{R}{n} = \frac{\rho}{d} \quad (4.3)$$

Rezystancja powierzchniowa zależy od grubości rezystora. Grubość warstwy zależy głównie od gęstości sita, przez które drukowana jest warstwa. Ze wzrostem grubości rezystancja powierzchniowa maleje.

Parametrem charakteryzującym właściwości rezystora w funkcji temperatury jest  $TWR$  – temperaturowy współczynnik rezystancji. Określa się go zależnością

$$TWR = \frac{R_{T2} - R_{T1}}{R_{T2} (T_2 - T_1)} \cdot 10^6 \quad [ppm/^\circ C] \quad (4.4)$$

gdzie:  $T_1, T_2$  – temperatura w  $^\circ C$ ,  $R_{T1}, R_{T2}$  – rezystancje odpowiednio w temperaturze  $T_1, T_2$ .

TWR jest określany jako „część na milion na stopień Celsjusza”, inaczej ppm/°C [69]. Jako temperaturę odniesienia przyjmuje się 25°C. Współczynnik ten ze względów praktycznych oblicza się w dwóch zakresach:

- -55°C ÷ 25°C – tzw. „zimny” TWR (ZTWR)
- 25°C ÷ 125°C – tzw. „gorący” TWR (GTWR)

Typowe wartości dla rezystorów grubowarstwowych zawierają się w przedziale ±(50 ÷ 100) ppm/°C .

Dokładniejszą informację o  $TWR$  danej warstwy w szerokim zakresie temperatury daje jego wartość różniczkowa, definiowana poniższym wzorem [69]:

$$TWR_{dif} = \frac{dR}{R \cdot dT} \quad (4.5)$$

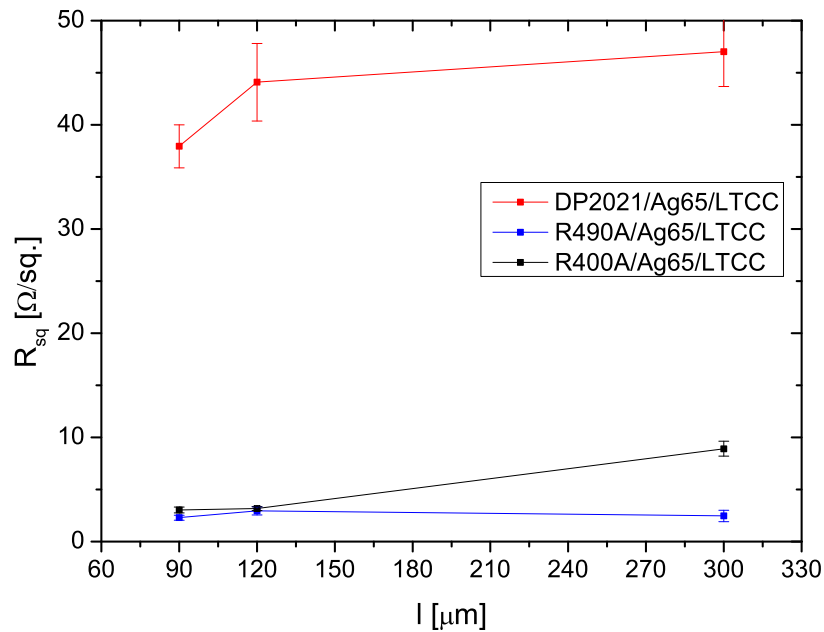
Zamiast operacji różniczkowania można się posłużyć zależnością:

$$TWR(T) = \frac{R(T_2) - R(T_1)}{R(T) \cdot (T_2 - T_1)} \cdot 10^6 \quad [ppm/°C] \quad (4.6)$$

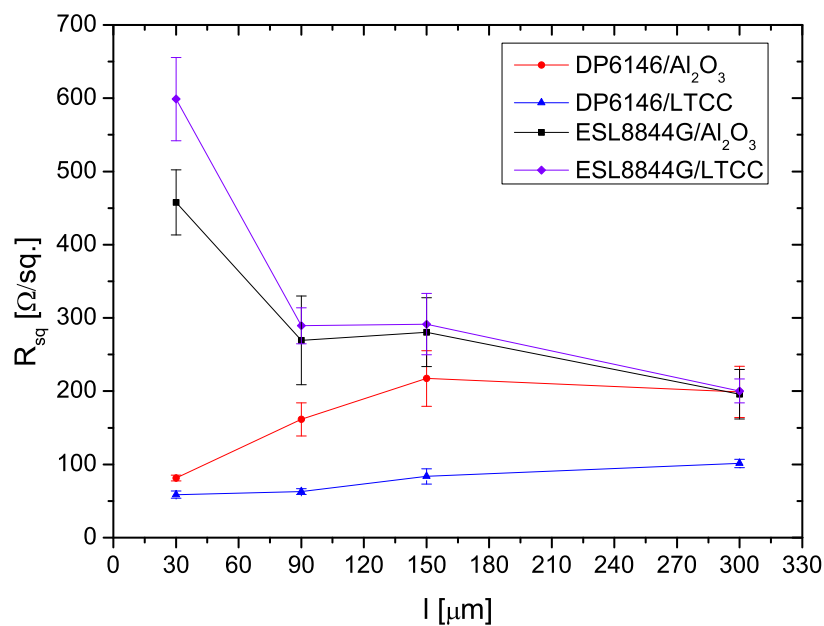
gdzie:  $R(T) = \frac{R(T_2) + R(T_1)}{2}$ ,  $T = \frac{T_2 + T_1}{2}$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  – temperatura w °C,  $R(T_2)$ ,  $R(T_1)$  – rezystancje odpowiednio w temperaturze  $T_1$ ,  $T_2$  (różnica między  $T_2$  i  $T_1$  nie powinna być większa niż 10°C).

Dla każdego z wariantów technologicznych zmierzono podstawowe parametry elektryczne rezystorów testowych. Wyznaczono wartości średnie rezystancji  $\bar{R}$  elementów oraz ich rozrzuty statystyczne – odchylenie średnie kwadratowe  $S_R$  oraz współczynnik zmienności  $V_R = \frac{S_R}{\bar{R}}$ . Na podstawie wymiarów geometrycznych (tab. 4.2, 4.3) obliczone zostały rezystancje powierzchniowe  $R_{sq}$  (zal. 4.3). Na rys. 4.4 – 4.7 przedstawiono zależność rezystancji powierzchniowej w funkcji długości rezystorów dla różnych konfiguracji materiałów (zaznaczono wartości średnie i odchylenie średnie kwadratowe).

Zebrane wyniki pokazują bardzo silny wpływ konfiguracji materiałów na podstawowe parametry elektryczne rezystorów. Dla większości wypadków zaobserwowano silny efekt rozmiarowy, czyli zależność parametrów od wymiarów planarnych. Rezystancja powierzchniowa zmniejszała się wraz ze zmniejszaniem długości rezystorów. Istnieją dwie główne przyczyny tego zjawiska. Pierwszą z nich jest zwiększanie grubości nanoszonej warstwy wynikające z właściwości procesu sitodruku. Przy małej odległości między elektrodami nakładana pasta nie ma możliwości rozplynięcia i utworzenia warstwy o równomiernej grubości. Drugą przyczyną jest migracja cząstek metalicznych na styku warstwy przewodzącej i rezystywnej. Podczas procesu wypalania materiał przewodzący dyfunduje w głąb warstwy rezystywnej obniżając jej rezystywność, co bezpośrednio przekłada się na obniżanie wartości rezystancji powierzchniowej. Dla struktur miniaturowych stosunek objętości niskorezystywnego obszaru przykontaktowego do pozostałej objętości rezystora jest duży, stąd efekt ten jest silniejszy niż w rezystorach dłuższych. Wyjątkiem od powyższych zależności były struktury z kontaktami na bazie

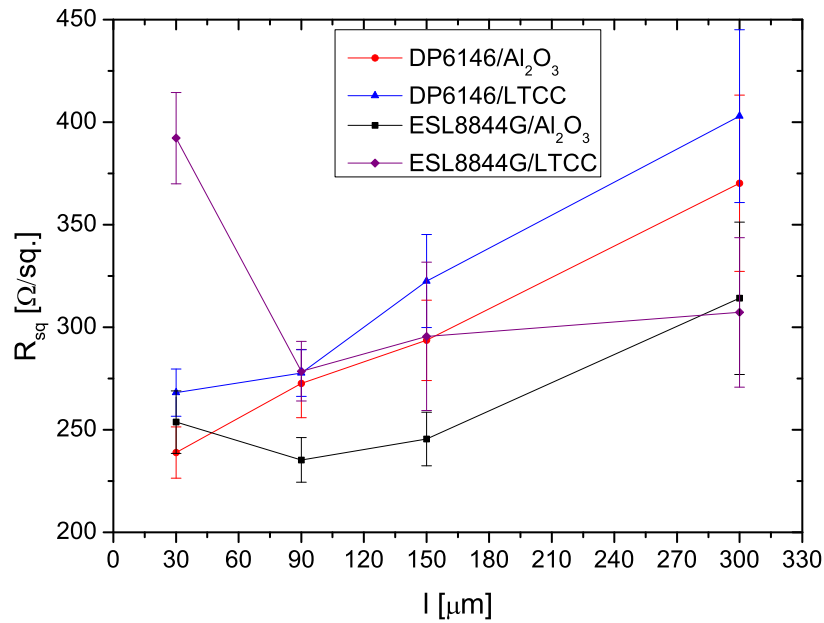


Rys. 4.4. Rezystancja powierzchniowa w funkcji długości rezystorów – pasty światłoczułe przewodzące + sitodruk past rezystywnych

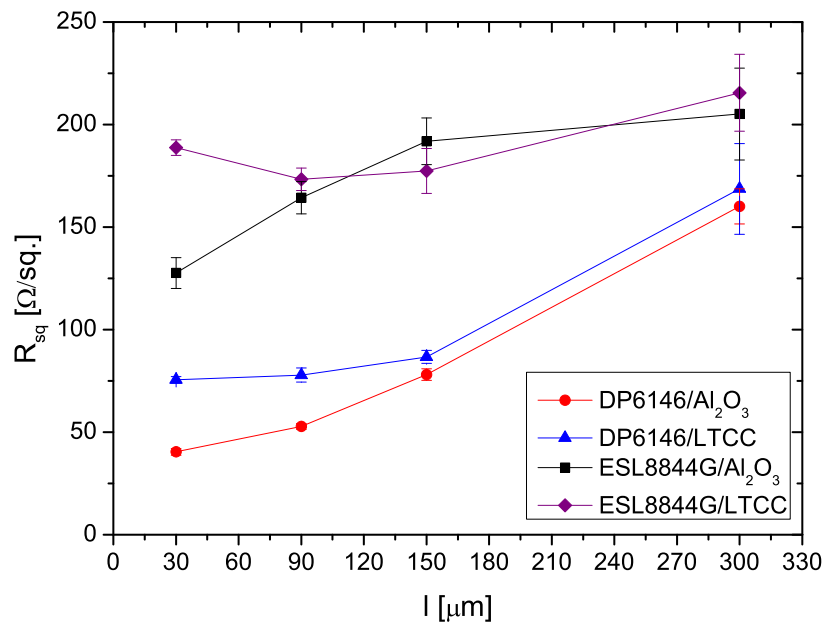


Rys. 4.5. Rezystancja powierzchniowa w funkcji długości rezystorów – pasta CF011

złota ESL8844G w połączeniu z rezystorami z past serii CF0XX. W tym wypadku zaobserwowano zwiększenie rezystancji powierzchniowej dla najkrótszych elementów. Przypuszczalnie źródłem tego zjawiska jest niekompatybilność past różnych producentów. Podczas wypalania, w wyniku reakcji między składnikami obu past, mogą powstawać związki wysokorezystywne, które ograniczają przepływ ładunków elektrycznych między ziarnami. W tabeli 4.4 zestawiono parametry elektryczne wytworzonych struktur testowych. Rozrzut statystyczny rezystancji elementów mieścił się w zakresie 2%÷23%.



Rys. 4.6. Rezystancja powierzchniowa w funkcji długości rezystorów – pasta CF021



Rys. 4.7. Rezystancja powierzchniowa w funkcji długości rezystorów – pasta DP2021

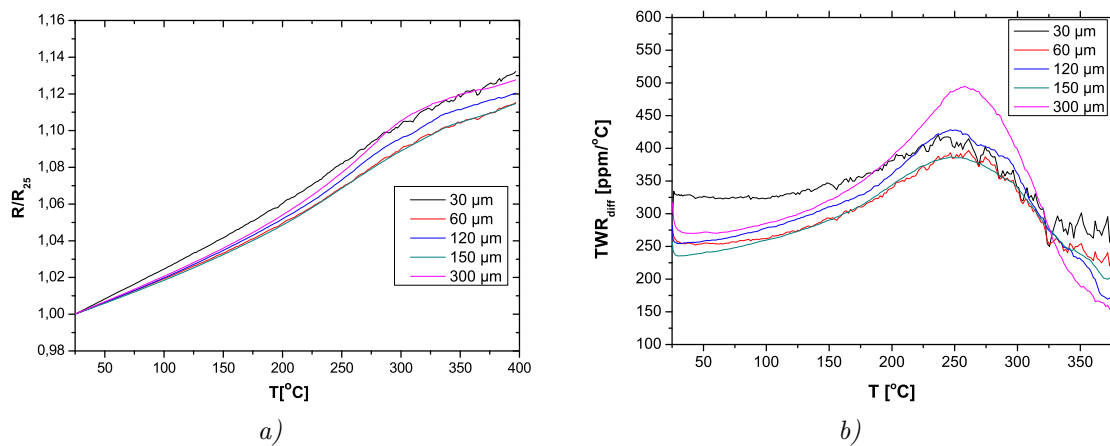
Największe odchylenie wykazywały rezystory najdłuższe, nie zaobserwowano wyraźnej korelacji między konfiguracją materiałów a rozrzutem rezystancji elementów, aczkolwiek najmniejsze wartości współczynnika zmienności wykazywały rezystory z pasty DP2021.

Tabela 4.4. Parametry elektryczne miniaturowych rezystorów grubowarstwowych

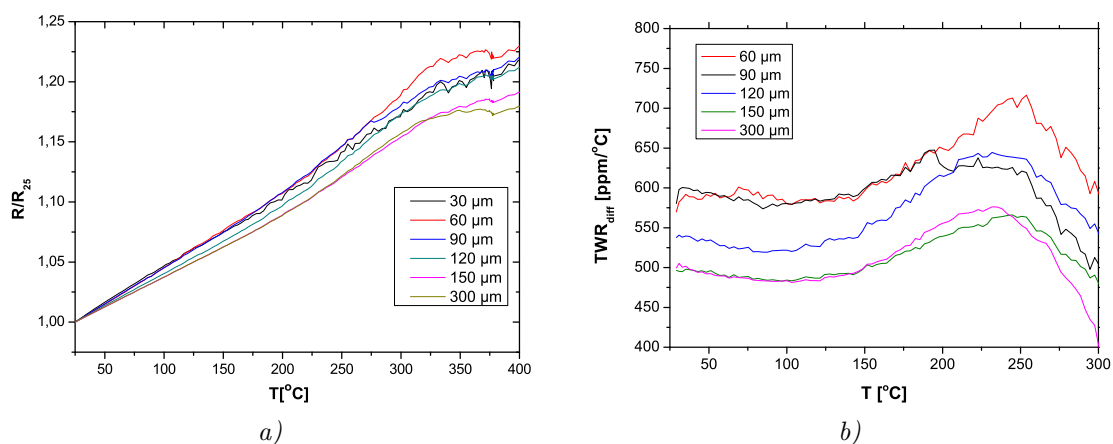
Podłoże	Pasta przewodząca	Pasta rezystywna	Długość rezystora [μm]	$\bar{R}$ [Ω]	$S_R$	$V_R$ [%]	$R_{sq}$ [Ω/□]	GTWR [ppm/°C]
DP951	Ag65	DP2021	90	17,1	0,9	5,4	37,9	–
			120	24,7	2,1	8,4	44,1	–
			300	62,0	4,4	7,1	47,0	–
DP951	Ag65	R490A	90	1,0	0,1	10,4	2,3	–
			120	1,7	0,2	13,3	3,0	–
			300	3,2	0,7	22,1	2,5	–
DP951	Ag65	R400A	90	1,4	0,1	9,1	3,0	–
			120	1,8	0,1	5,8	3,2	–
			300	11,8	0,9	8,1	8,9	–
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	DP6146	CF011	30	11,6	0,6	4,9	81,5	500
			90	66,3	9,3	14,1	161,5	465
			150	149,3	26,0	17,4	217,3	445
			300	292,1	51,2	17,5	199,0	408
DP951	DP6146	CF011	30	8,2	0,7	8,4	58,6	615
			90	25,1	1,5	6,0	62,9	602
			150	56,2	7,1	12,6	83,6	499
			300	138,6	7,7	5,6	101,3	500
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ESL8844	CF011	30	70,9	6,9	9,7	457,8	333
			90	116,5	26,2	22,5	269,3	263
			150	188,7	31,6	16,8	280,5	253
			300	290,5	49,9	17,2	195,9	281
DP951	ESL8844	CF011	30	88,3	8,4	9,5	598,8	334
			90	117,8	10,0	8,5	289,3	512
			150	194,4	27,9	14,3	291,6	500
			300	275,9	22,6	8,2	200,3	423
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	DP6146	CF021	30	27,8	1,5	5,3	238,9	420
			90	86,8	5,3	6,1	272,6	416
			150	160,4	10,7	6,7	293,6	393
			300	390,3	45,3	11,6	370,2	396
DP951	DP6146	CF021	30	34,3	1,5	4,3	268,1	–
			90	105,6	4,3	4,1	277,7	–
			150	204,8	14,4	7,0	322,5	–
			300	530,9	55,5	10,5	402,9	–
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ESL8844	CF021	30	32,3	1,9	6,0	253,7	-27
			90	79,0	3,7	4,6	235,3	19
			150	131,3	7,0	5,3	245,5	13
			300	334,6	39,6	11,8	314,1	26
DP951	ESL8844	CF021	30	53,2	3,0	5,7	392,3	455
			90	108,1	5,7	5,2	278,5	556
			150	186,1	22,8	12,3	295,6	479
			300	407,6	48,4	11,9	307,3	457
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	DP6146	DP2021	30	5,7	0,2	4,0	40,4	–
			90	21,7	0,6	2,6	52,9	–
			150	53,7	1,9	3,6	78,1	–
			300	235,1	12,6	5,4	160,1	–
DP951	DP6146	DP2021	30	10,5	0,2	2,1	75,5	–
			90	31,1	1,4	4,3	77,9	–
			150	58,3	2,1	3,6	86,7	–
			300	230,7	30,2	13,1	168,6	–
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ESL8844	DP2021	30	19,8	1,2	5,9	127,7	–
			90	71,1	3,4	4,8	164,4	–
			150	129,0	7,6	5,9	191,8	–
			300	304,2	33,2	10,9	205,1	–
DP951	ESL8844	DP2021	30	27,8	0,6	2,0	188,8	–
			90	70,6	2,2	3,2	173,3	–
			150	118,3	7,3	6,2	177,4	–
			300	296,8	25,9	8,7	215,5	–



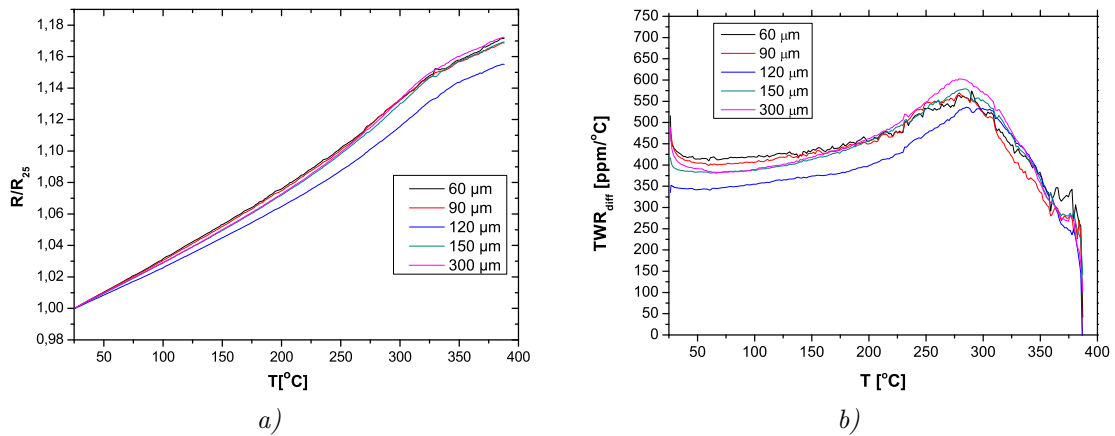
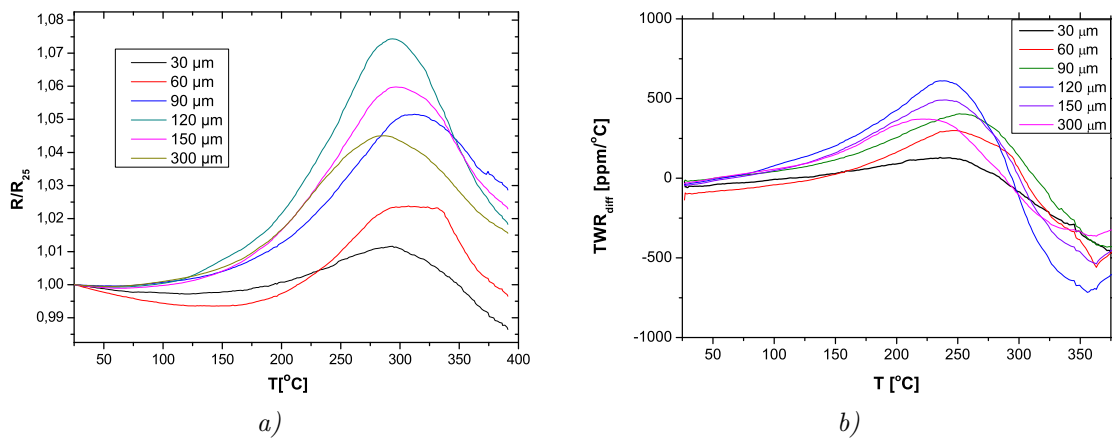
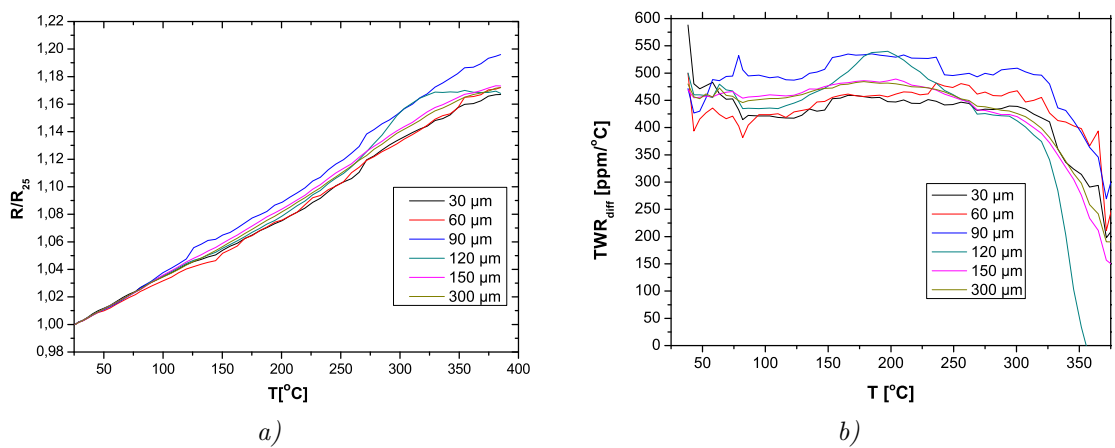
Wyznaczono charakterystyki temperaturowe rezystorów (rys. 4.8 – 4.12). Rezystancję mierzono w zakresie 25 – 400°C co 5°C. Szybkość narostu temperatury wynosiła 5°C/min. Dla większości badanych struktur wykonywanych techniką mikroobróbki laserowej, niezależnie od długości rezystora, obserwowano występowanie ekstremum charakterystyki powyżej temperatury 300°C. Najbardziej widoczne jest ono dla struktur z past CF021/ESL8844G na podłożu alundowym. Jednocześnie wykazywały one najmniejsze wartości GTWR. Generalnie stwierdzono szeroki zakres wartości gorącego TWR – od -30 do 600 ppm/°C. Dla większości struktur wartość GTWR zmniejszała się wraz ze wzrostem długości rezystorów. Największe zmiany różniczkowego TWR obserwowano w zakresie temperatury 250 – 400°C. Dla struktur z pasty CF021 obserwowano przejście charakterystyki  $TWR_{diff}(T)$  przez zero do wartości ujemnych.



Rys. 4.8. Charakterystyki temperaturowe rezystorów CF011/ESL8844G/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



Rys. 4.9. Charakterystyki temperaturowe rezystorów CF011/DP6146/LTCC

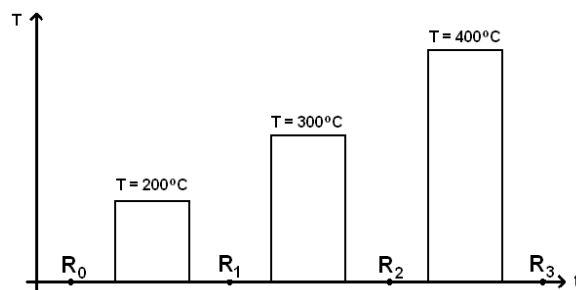
Rys. 4.10. Charakterystyki temperaturowe rezystorów CF021/DP6146/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>Rys. 4.11. Charakterystyki temperaturowe rezystorów CF021/ESL8844G/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Rys. 4.12. Charakterystyki temperaturowe rezystorów CF021/ESL8844G/LTCC

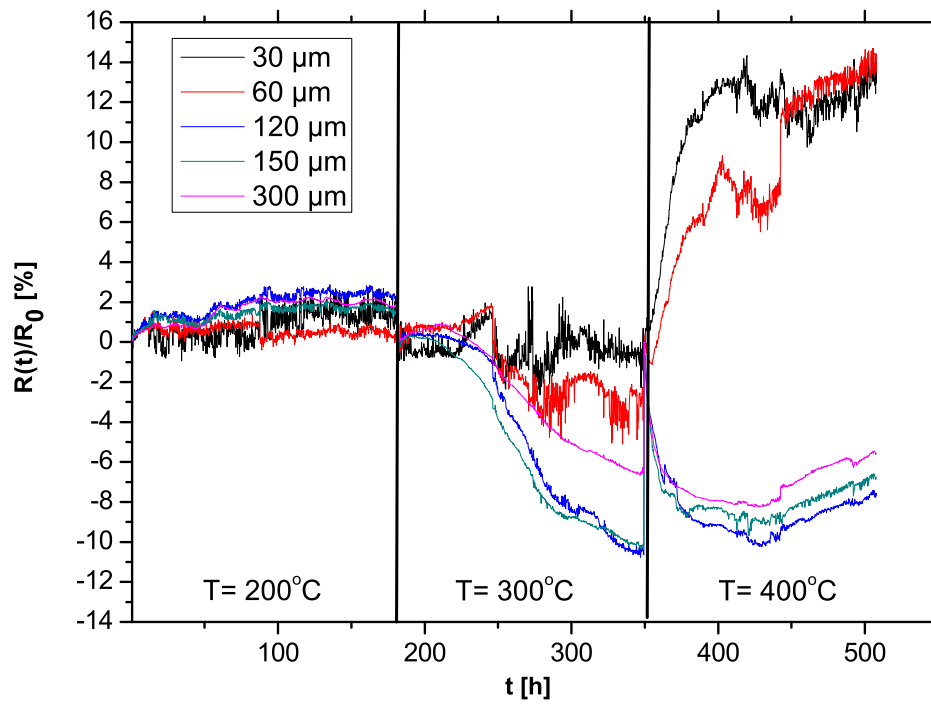
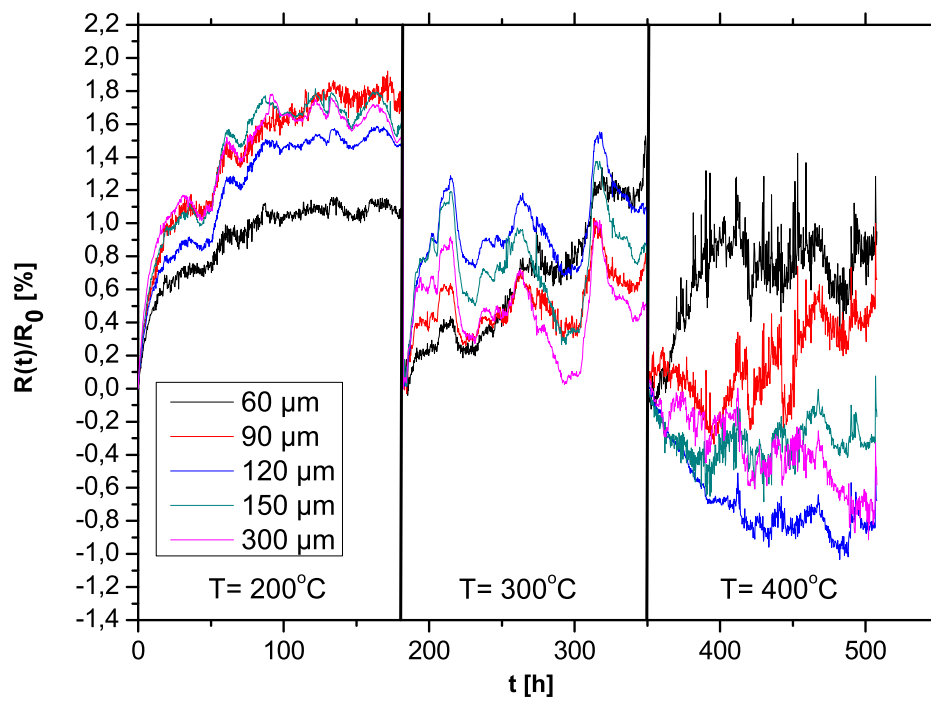
## 4.4. Stabilność długoterminowa

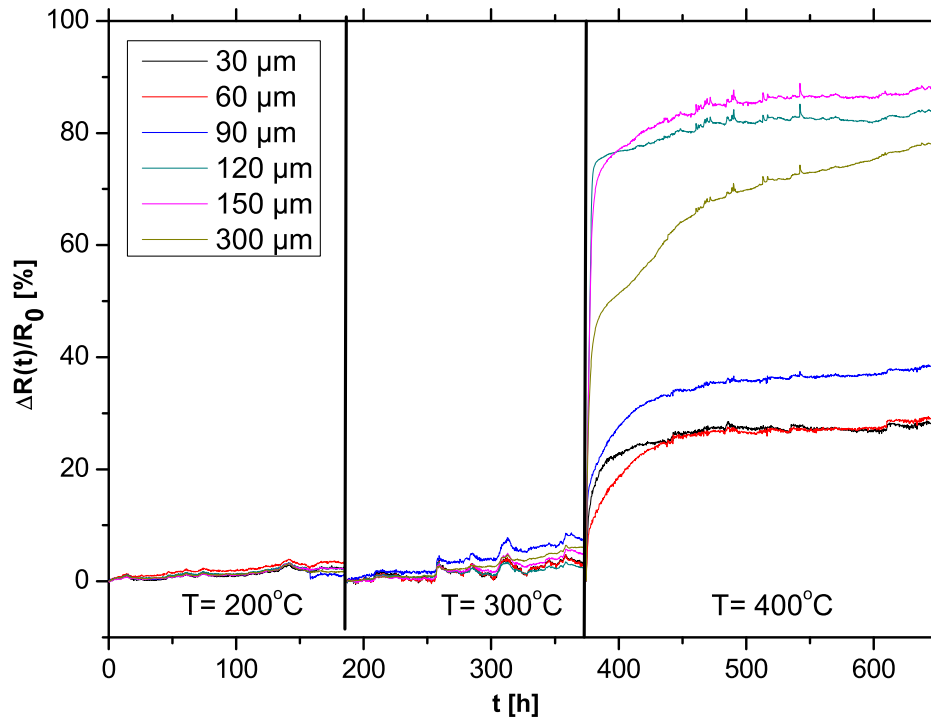
Niezawodność i stabilność są ważnymi parametrami użytkowymi rezystorów. Rezystor stabilny to taki, który w czasie eksploatacji układu elektronicznego nie zmieni swej wartości na tyle, aby spowodował niepoprawne działanie tego układu. Badanie stabilności w trakcie ich normalnego użytkowania jest zbyt czasochłonne. Dlatego stosuje się tzw. testy przyspieszone. Ułatwiają one prognozowanie stabilności i niezawodności układu w czasie długotrwałej eksploatacji. Jedną z najpowszechniejszych metod badania stabilności rezystorów jest starzenie termiczne. Zastosowanie tej metody opisano m.in. w [27, 81]. Polega ona na przetrzymywaniu elementów w podwyższonej temperaturze przez określony czas i okresowych pomiarach rezystancji. W podwyższonych temperaturach rośnie szybkość tworzenia związków międzymetalicznych oraz szybkość procesu korozji, które normalnie zachodzą znacznie wolniej. Z uwagi na cel niniejszej pracy, którym jest określenie wysokotemperaturowych właściwości struktur grubowarstwowych i LTCC, testy przyspieszone posłużą również do charakteryzacji stabilności struktur w warunkach podwyższonej temperatury. Na potrzeby pracy przeprowadzono starzenie termiczne wybranych struktur. Rezystory starzono w temperaturze: 200, 300, 400 i/lub 500 °C. Każdy etap trwał od kilkudziesięciu do kilkuset godzin. Pomiary prowadzono tzw. metodą *in-situ*, tj. bezpośrednio w warunkach narażenia [82]. Do pomiarów zastosowano wielokanałowy multimetr Agilent HP34907, pomiar rezystancji prowadzono co 15 minut. Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczono zmiany rezystancji w funkcji czasu  $\Delta R(t)/R_0$ , gdzie  $\Delta R(t) = R(t) - R_0$ ,  $R_0$  - wartość rezystancji na początku każdego etapu starzenia po ustabilizowaniu się temperatury. Na rys. 4.14 – 4.22 przedstawiono zmiany rezystancji wybranych grup rezystorów.

Dodatkowo wyznaczono względne zmiany rezystancji po kolejnych etapach starzenia (tab. 4.5) na podstawie pomiarów rezystancji w temperaturze pokojowej (rys. 4.13), czyli stosując tzw. metodę *ex-situ*. Poszczególne wartości wyznaczano według zależności:  $\delta_{R(T_1)} = (R_1 - R_0)/R_0$ ,  $\delta_{R(T_2)} = (R_2 - R_1)/R_0$ ,  $\delta_{R(T_1+T_2)} = (R_2 - R_0)/R_0$ ,  $\delta_{R(T_3)} = (R_3 - R_2)/R_0$ ,  $\delta_{R(T_1+T_2+T_3)} = (R_3 - R_0)/R_0$

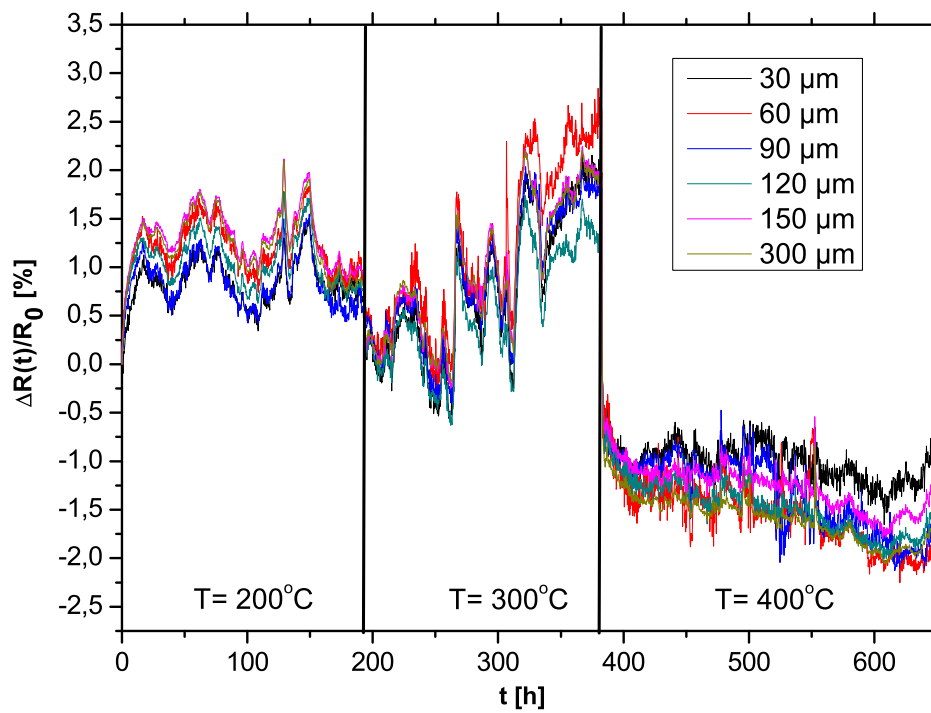


Rys. 4.13. Pomiary rezystancji podczas starzenia termicznego metodą *ex-situ*

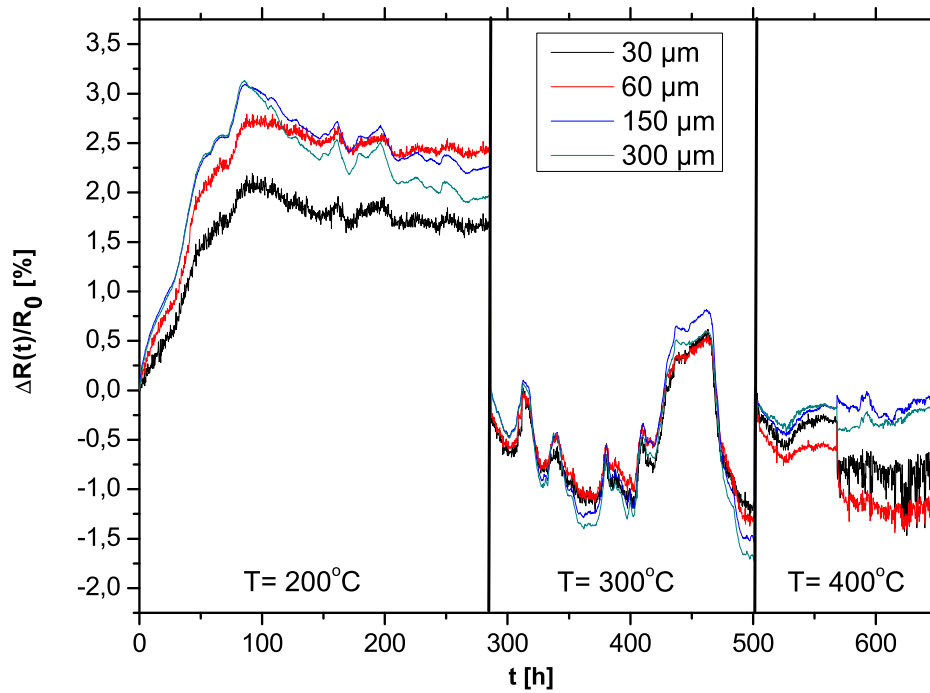
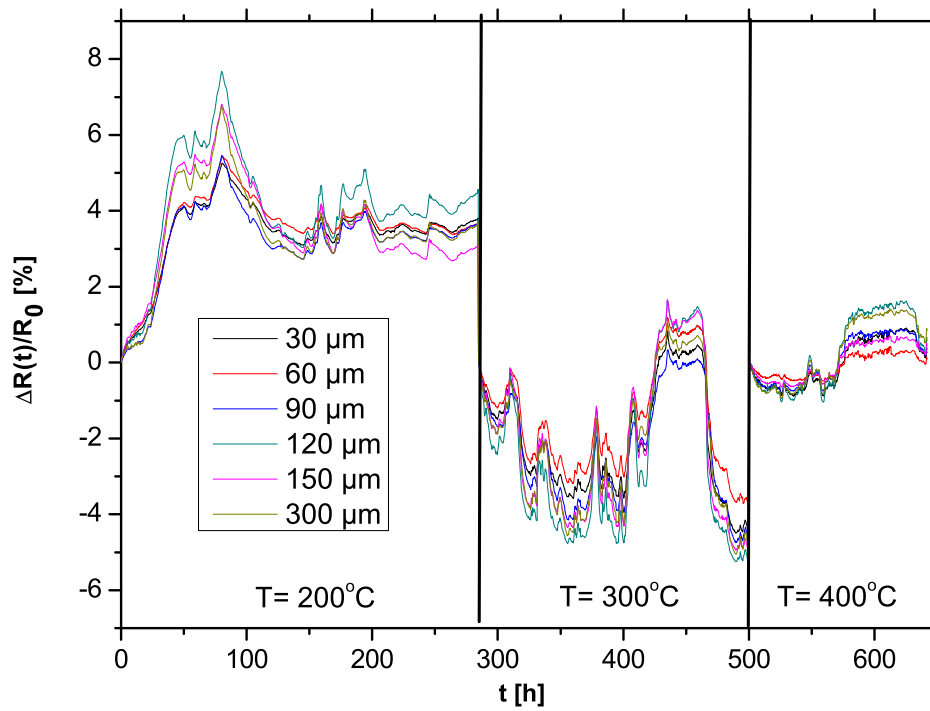
Rys. 4.14. Stabilność długoczasowa rezystorów CF011/DP6146/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ Rys. 4.15. Stabilność długoczasowa rezystorów CF021/DP6146/ $\text{Al}_2\text{O}_3$

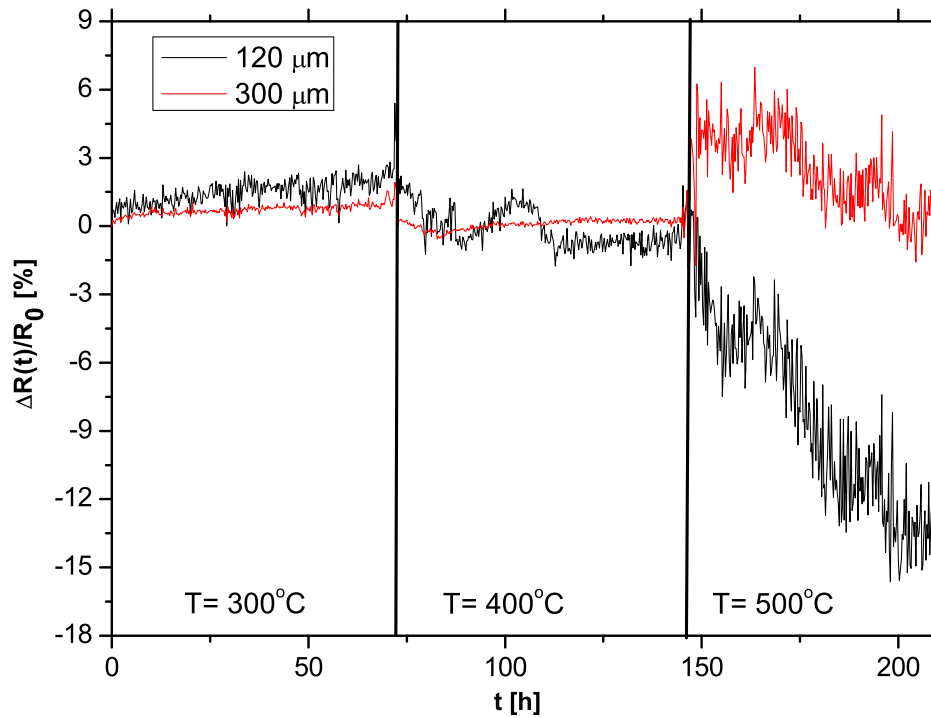


Rys. 4.16. Stabilność długoczasowa rezystorów CF011/ESL8844G/LTCC

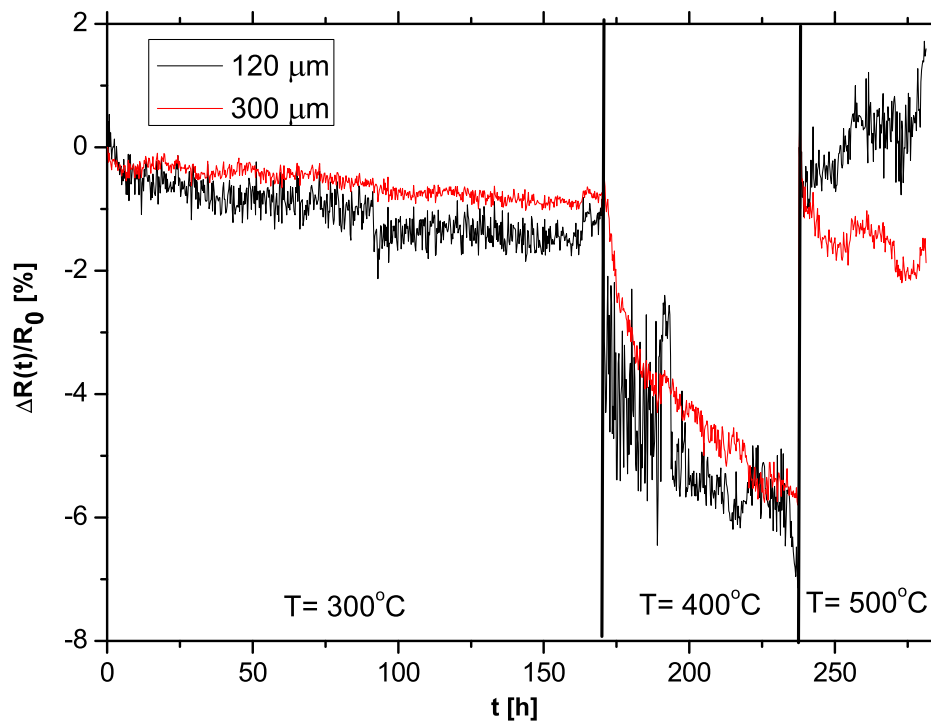


Rys. 4.17. Stabilność długoczasowa rezystorów CF021/ESL8844G/LTCC

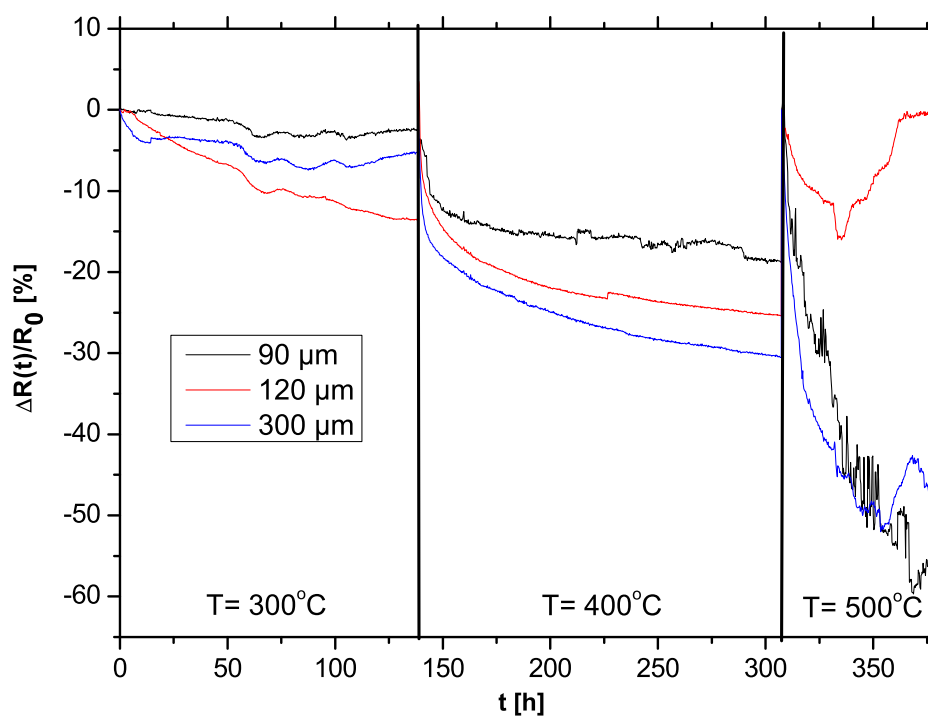
Rys. 4.18. Stabilność długoczasowa rezystorów CF011/ESL8844G/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ Rys. 4.19. Stabilność długoczasowa rezystorów CF021/ESL8844G/ $\text{Al}_2\text{O}_3$



Rys. 4.20. Stabilność długoczasowa rezystorów R490A/Ag65/LTCC



Rys. 4.21. Stabilność długoczasowa rezystorów DP2021/Ag65/LTCC



Rys. 4.22. Stabilność długoczasowa rezystorów RF12/Ag65/LTCC

Tabela 4.5. Stabilność długoterminowa miniaturowych rezystorów grubowarstwowych

Podłoże	Warstwa przewodząca	Warstwa rezystywna	Długość rezystora [μm]	$\delta_{R(T_1)}$ [%]	$\delta_{R(T_2)}$ [%]	$\delta_{R(T_1+T_2)}$ [%]	$\delta_{R(T_3)}$ [%]	$\delta_{R(T_1+T_2+T_3)}$ [%]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	DP6146	CF011	30	-2,0	-1,8	-3,8	2,7	-1,1
			150	-2,7	-9,5	-12,2	-13,4	-25,6
			300	-3,7	-5,8	-9,5	-12,7	-22,2
DP951	DP6146	CF011	30	11,0	-5,5	5,5	28,5	34,0
			90	15,9	-10,4	5,4	-1,5	3,9
			150	8,6	-6,0	2,6	-0,3	2,3
			300	14,0	-11,1	2,9	-0,1	2,8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ESL8844	CF011	30	2,4	-2,5	-0,1	-0,8	-0,9
			150	3,2	-2,8	0,4	-0,04	0,4
			300	3,1	-2,7	0,4	-0,3	0,1
DP951	ESL8844	CF011	30	-1,8	1,6	-0,2	39,4	39,2
			90	0,3	4,2	4,5	97,4	101,9
			150	1,5	1,9	3,4	143,3	146,7
			300	1,1	3,7	4,8	138,6	143,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	DP6146	CF021	90	0,9	0,9	1,8	-2,5	-0,7
			150	1,7	1,3	3,0	-3,4	-0,4
			300	1,6	0,9	2,5	-3,3	-0,8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ESL8844	CF021	30	4,8	-6,9	-2,1	0,5	-1,6
			90	6,8	-7,1	-0,3	0,5	0,2
			150	6,7	-8,8	-2,1	1,9	-0,2
			300	6,8	-7,6	-0,8	1,6	0,8
DP951	ESL8844	CF021	30	0,9	2,4	3,3	-3,1	0,2
			90	1,2	2,2	3,4	-3,8	-0,4
			150	1,3	1,8	3,1	-3,9	-0,8
			300	1,4	1,8	3,2	-3,8	-0,6



Stwierdzono dużą zależność stabilności długoczasowej rezystorów od konfiguracji materiałów. Najmniej stabilnie w każdym etapie starzenia zachowywały się rezystory z pasty światłoczułej RF12 oraz pasty CF011 w połączeniu z pastą DP6146 zarówno na podłożu LTCC jak i  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Zmiany rezystancji sięgały nawet 34%. Połączenie tej samej pasty rezystywnej z pastą na bazie złota charakteryzowało się małymi zmianami rezystancji podczas starzenia w temperaturze 200 i 300°C. Jednak w temperaturze 400°C w wypadku podłoża LTCC zaobserwowano największe zmiany rezystancji, wynoszące ponad 140%. Najbardziej stabilne na każdym etapie starzenia okazały się rezystory w konfiguracjach CF021/DP6146/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  i CF021/ESL8844G/LTCC. W większości wypadków zmiany rezystancji nie przekraczały  $\pm 1\%$ . Nie stwierdzono wyraźnej korelacji stabilności długoczasowej rezystorów z ich wymiarami geometrycznymi.

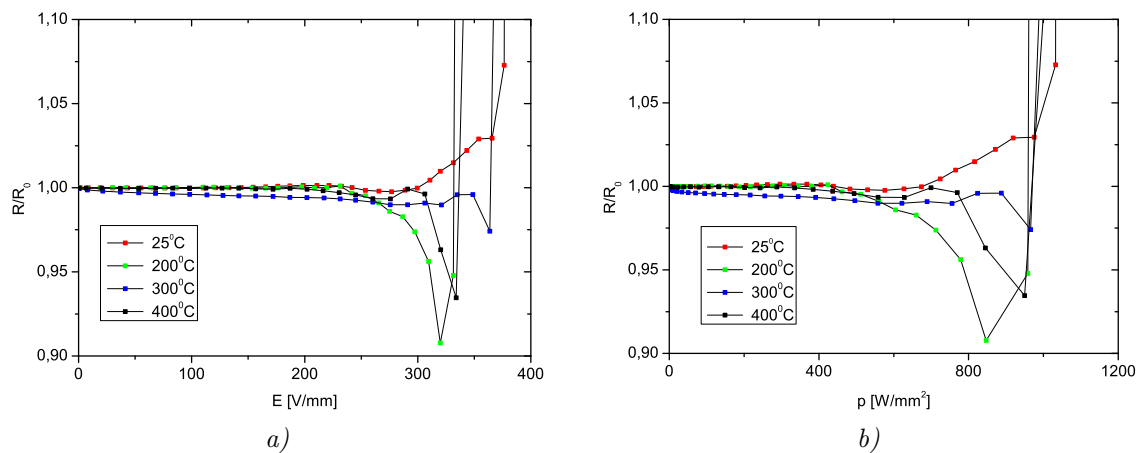
## 4.5. Odporność impulsowa

Ważną cechą rezystorów z punktu widzenia właściwości użytkowych jest odporność impulsowa. Impulsy, czyli krótkie i znaczące zmiany napięcia, mogą się pojawić w układzie m.in. w wyniku zakłóceń w układach zasilania, wyładowań atmosferycznych przenikających do sieci energetycznej, itp. Zbyt duża wartość napięcia na rezystorze może spowodować zmianę wartości jego rezystancji na skutek zmian zachodzących w strukturze materiału rezystywnego lub doprowadzić do katastroficznego uszkodzenia termicznego przez odparowanie warstwy rezystywnej. Należy jednak zaznaczyć, że oddziaływanie impulsami napięciowymi na rezystory jest jedną z metod korekcji elementów. Staje się ona szczególnie użyteczna w wypadku struktur miniaturowych, których wymiary planarne są zbliżone do średnicy wiązki lasera standardowych systemów do korekcji laserowej. W poniższym rozdziale przedstawiono badania odporności impulsowej wybranych struktur rezystorów w szerokim zakresie temperatury. Do pomiarów wykorzystano generator impulsów prostokątnych z regulowaną amplitudą impulsu w zakresie 0 – 2000 V, czasem trwania impulsu od 10  $\mu\text{s}$  do 10 ms, oraz liczbą impulsów w serii od 1 do 1000.

We wszystkich przypadkach pomiary przeprowadzano podając pojedyncze impulsy o czasie trwania 20  $\mu\text{s}$  i amplitudzie  $U$  zmienianej z krokiem  $\Delta U = 1$  V. Na podstawie wyników dla wybranych struktur rezystorów wyznaczono zmiany rezystancji w funkcji natężenia pola elektrycznego  $\frac{R}{R_0} = f(E)$ , gdzie  $R_0$  – rezystancja początkowa,  $E = \frac{U}{l}$ , [ $\frac{\text{V}}{\text{mm}}$ ] oraz powierzchniowej gęstości mocy  $\frac{R}{R_0} = f(p)$ , gdzie  $p = \frac{U^2}{R(l \cdot w)}$ , [ $\frac{\text{W}}{\text{mm}^2}$ ]. Przyjęto, że rezystor jest odporny na narażenia impulsowe, jeśli po impulsie zmiana jego rezystancji mieści się w zakresie  $\pm 10\%$  wartości początkowej [83, 84].

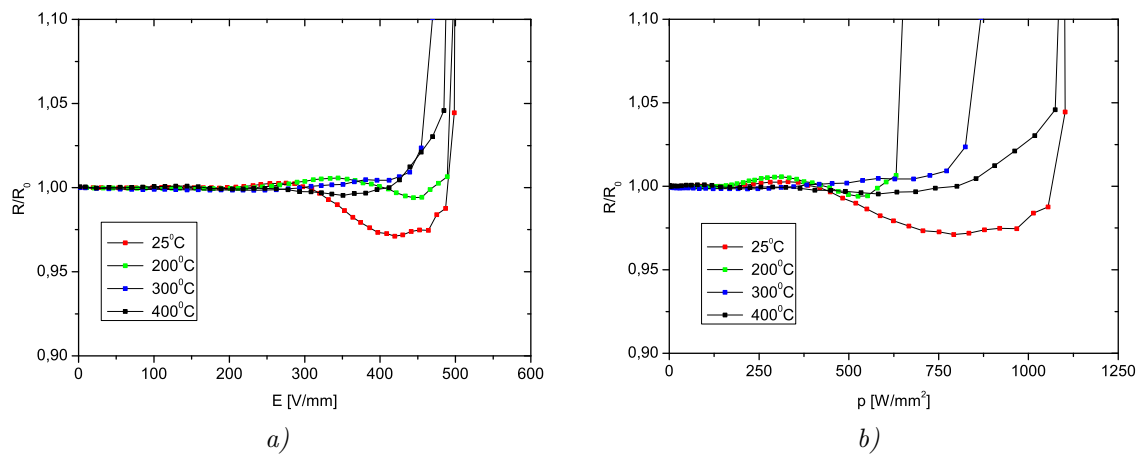
Na rys. 4.23 – 4.26 przedstawiono zmiany rezystancji wybranych struktur testowych. W tab. 4.6 zestawiono maksymalne wartości natężenia pola i gęstości mocy, powyżej których dochodziło do przekroczenia przyjętego kryterium zmiany rezystancji badanego elementu.

W większości badanych struktur dochodziło do katastroficznego uszkodzenia rezystorów. Nie stwierdzono jednoznacznego wpływu temperatury na odporność impulsową badanych elementów. W wielu wypadkach krytyczne wartości natężenia pola i gęstości mocy były zbliżone dla różnej wartości temperatury. Większe dopuszczalne powierzchniowe gęstości mocy zaobserwowano dla past o mniejszej rezystancji powierzchniowej (CF011 i DP2021). Natomiast nie zaobserwowano jednoznacznej korelacji między rodzajem materiału przewodzącego i podłoża, a odpornością impulsową elementów. Elementy krótsze wykazywały większe dopuszczalne gęstości mocy. Przypuszcza się, że jest to spowodowane lepszym odprowadzaniem wydzielonego ciepła przez kontakty metaliczne z uwagi na geometrię struktury. Dla rezystorów o długości  $90\ \mu\text{m}$  granica warstwy przewodzącej i rezystywnej stanowi prawie 70% obwodu rezystora, podczas gdy dla rezystorów  $300\ \mu\text{m}$  jest to tylko 40%. Pod względem przebiegu zmian rezystancji zaobserwowano dwa typy uzyskanych krzywych. Dla rezystorów CF011 stwierdzono stopniowe zmniejszanie wartości rezystancji, po którym w niewielkim zakresie zmiany amplitudy impulsu następowało gwałtowne zwiększenie rezystancji. Dla rezystorów CF021 i DP2021 ich rezystancja ulegała niewielkiemu zwiększaniu w trakcie testu, po czym również dochodziło do skokowej zmiany rezystancji.

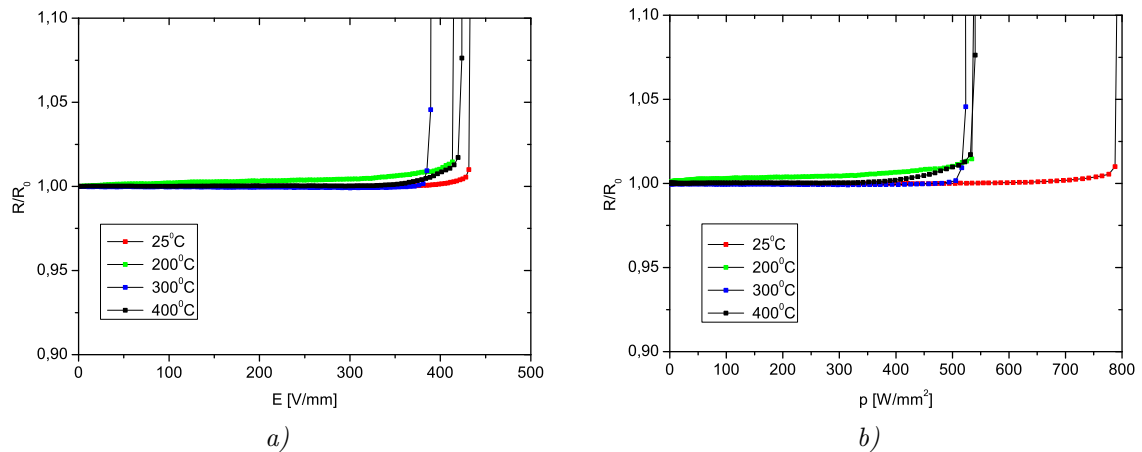


Rys. 4.23. Zmiany rezystancji w funkcji natężenia pola elektrycznego (a) oraz gęstości mocy w impulsie (b) - struktury CF011/DP6146/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $l = 90\ \mu\text{m}$

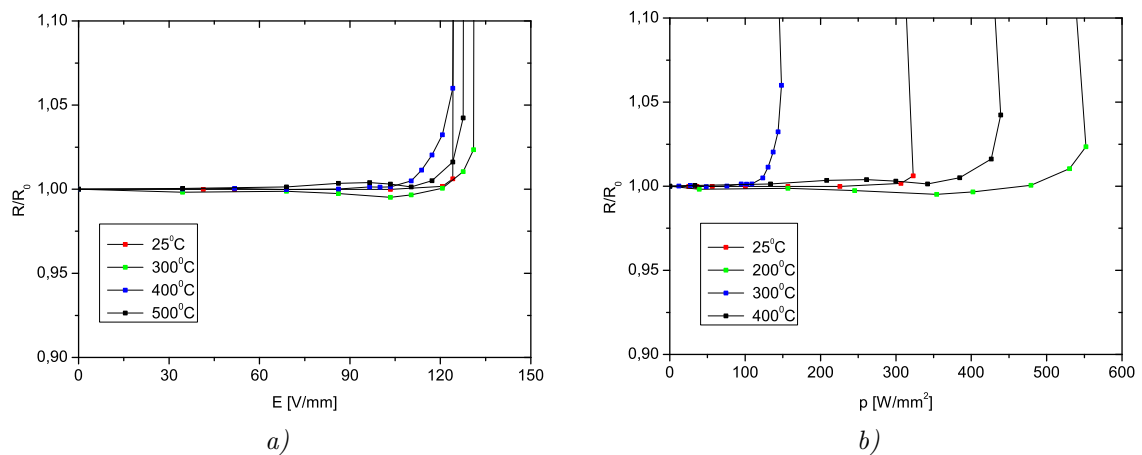
Obserwowane zmiany rezystancji elementów poddanych działaniu impulsów wysokonapięciowych można tłumaczyć zmianami w ich mikrostrukturze, w szczególności w cieniwej warstwie szkliva na granicach ziaren przewodzących [85]. Wzrost rezystancji można przypisać tworzeniu się i propagacji mikropęknięć warstwy rezystywnej, powodujących przerwanie łańcuchów ziaren przewodzących. Efekt ten występuje w szczególności przy znacznym obciążeniu mocą elektryczną i jest obecny zwłaszcza w pastach o niskiej i średniej rezystywności. Zmniejszanie się rezystancji elementu podczas narażeń można natomiast wyjaśnić obniżeniem bariery energetycznej na granicach ziaren przewodzących bądź też przebiciami izolacyjnej warstwy szkliva otaczającej ziarna.



Rys. 4.24. Zmiany rezystancji w funkcji natężenia pola elektrycznego (a) oraz gęstości mocy w impulsie (b) - struktury CF011/ESL8844G/LTCC,  $l = 90 \mu\text{m}$



Rys. 4.25. Zmiany rezystancji w funkcji natężenia pola elektrycznego (a) oraz gęstości mocy w impulsie (b) - struktury CF021/DP6146/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $l = 300 \mu\text{m}$



Rys. 4.26. Zmiany rezystancji w funkcji natężenia pola elektrycznego (a) oraz gęstości mocy w impulsie (b) - struktury DP2021/Ag65/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $l = 300 \mu\text{m}$

Tabela 4.6. Odporność impulsowa miniaturowych rezystorów grubowarstwowych

Podłoże	Pasta przewodząca	Pasta rezystywna	$l$ [ $\mu\text{m}$ ]	$E_{max}$ [V/mm] 25°C	$p_{max}$ [W/mm <sup>2</sup> ] 25°C	$E_{max}$ [V/mm] 200°C	$p_{max}$ [W/mm <sup>2</sup> ] 200°C	$E_{max}$ [V/mm] 300°C	$p_{max}$ [W/mm <sup>2</sup> ] 300°C	$E_{max}$ [V/mm] 400°C	$p_{max}$ [W/mm <sup>2</sup> ] 400°C
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	DP6146	CF011	90	387	1050	343	983	378	1070	348	1066
			150	297	579	317	641	317	466	227	236
			300	269	505	245	348	246	367	214	291
DP951	DP6146	CF011	90	284	1024	373	2473	350	1550	320	1484
			150	273	1202	243	858	272	1071	275	1110
			300	263	671	218	516	207	395	246	592
DP951	ESL8844	CF011	90	508	1084	499	656	469	867	500	1129
			150	417	845	369	629	353	546	363	754
			300	314	473	305	469	295	481	298	586
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	DP6146	CF021	90	428	807	492	869	487	843	497	818
			150	497	937	417	621	465	631	450	653
			300	434	794	416	541	429	529	427	520
DP951	DP6146	CF021	90	490	705	519	655	459	787	457	595
			150	328	334	411	442	310	356	424	466
			300	378	316	382	438	393	517	354	281
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ESL8844	CF021	90	418	875	474	955	393	557	465	873
			150	350	649	370	538	390	618	379	534
			300	398	569	388	505	374	479	340	390
DP951	ESL8844	CF021	90	331	404	463	682	512	736	408	450
			150	391	572	403	697	432	520	423	557
			300	395	536	315	280	273	192	373	359
DP951	Ag65	DP2021	90	261	2148	–	–	233	1700	223	694
			120	192	922	–	–	191	1062	191	574
			300	127	341	–	–	134	581	125	156

## 4.6. Szумы

Właściwości szumowe rezystorów określają możliwość stosowania tych elementów w wybranych aplikacjach. Badania szumów w rezystorach grubowarstwowych były prowadzone w wielu pracach [14, 86–89]. Jednak według wiedzy autora, właściwości szumowe rezystorów grubowarstwowych w zakresie podwyższonej temperatury (powyżej temperatury pokojowej) były przedmiotem niewielu prac [90]. Badania właściwości szumowych w tym zakresie autor przeprowadził w Katedrze Podstaw Elektroniki Politechniki Rzeszowskiej.

Na szum rezystora zasadniczo składa się szum o stałej gęstości widmowej szumu (szum termiczny) oraz szum typu  $1/f$  (migotania). Szum termiczny związany jest z drganiami jonów sieci krystalicznej materiału przewodzącego, wywołującymi bezwładny ruch nośników ładunku elektrycznego. Jego wartość oblicza się z zależności

$$\langle e_T^2 \rangle = 4kTR(\Delta f) \quad (4.7)$$

gdzie:  $\langle e_T^2 \rangle$  - średniokwadratowa siła elektromotoryczna szumu cieplnego,  $k$  - stała Boltzmana,  $T$  - temperatura,  $R$  - rezystancja elementu,  $\Delta f$  - szerokość pasma częstotliwości. Po spolaryzowaniu elementu na jego zaciskach pojawia się dodatkowa składowa zmienna o wartości siły elektromotorycznej

$$\langle e_f^2 \rangle = C_{1/f} f^{-\gamma} U^\alpha (\Delta f) \quad (4.8)$$

gdzie:  $U$  - napięcie polaryzacji próbki,  $C_{1/f}$  - stała,  $\gamma, \alpha$  - stałe o wartościach bliskich odpowiednio 1 i 2. Wówczas gęstość widmowa mocy szumu  $1/f$ ,  $S_U$  wynosi

$$S_U = \langle e_f^2 \rangle / \Delta f = C_{1/f} f^{-1} U^2 = \frac{C}{\Omega} f^{-1} U^2 \quad (4.9)$$

gdzie:  $\Omega$  - objętość elementu. Wielkością charakteryzującą poziom szumu materiału, z którego wykonano element, jest intensywność szumu  $C$

$$C[m^3] = f\Omega \frac{S_U}{U^2} \quad (4.10)$$

Właściwości szumowe w podwyższonej temperaturze zbadano dla rezystorów wykonanych w technologii past światłoczułych (RF12/Ag65/LTCC) oraz metodą obróbki laserowej (CF041/DP6146/LTCC). Metodą stałoprądową mierzono widmową gęstość mocy napięcia szumu  $S_U$  w zakresie 0,5 Hz – 25 kHz [88]. Widma szumu wyznaczono przy różnych wartościach napięcia polaryzującego (rys. 4.27 i 4.28). Na ich podstawie można stwierdzić, że w rezystorach dominuje szum prądowy  $1/f$ . Wskazuje na to

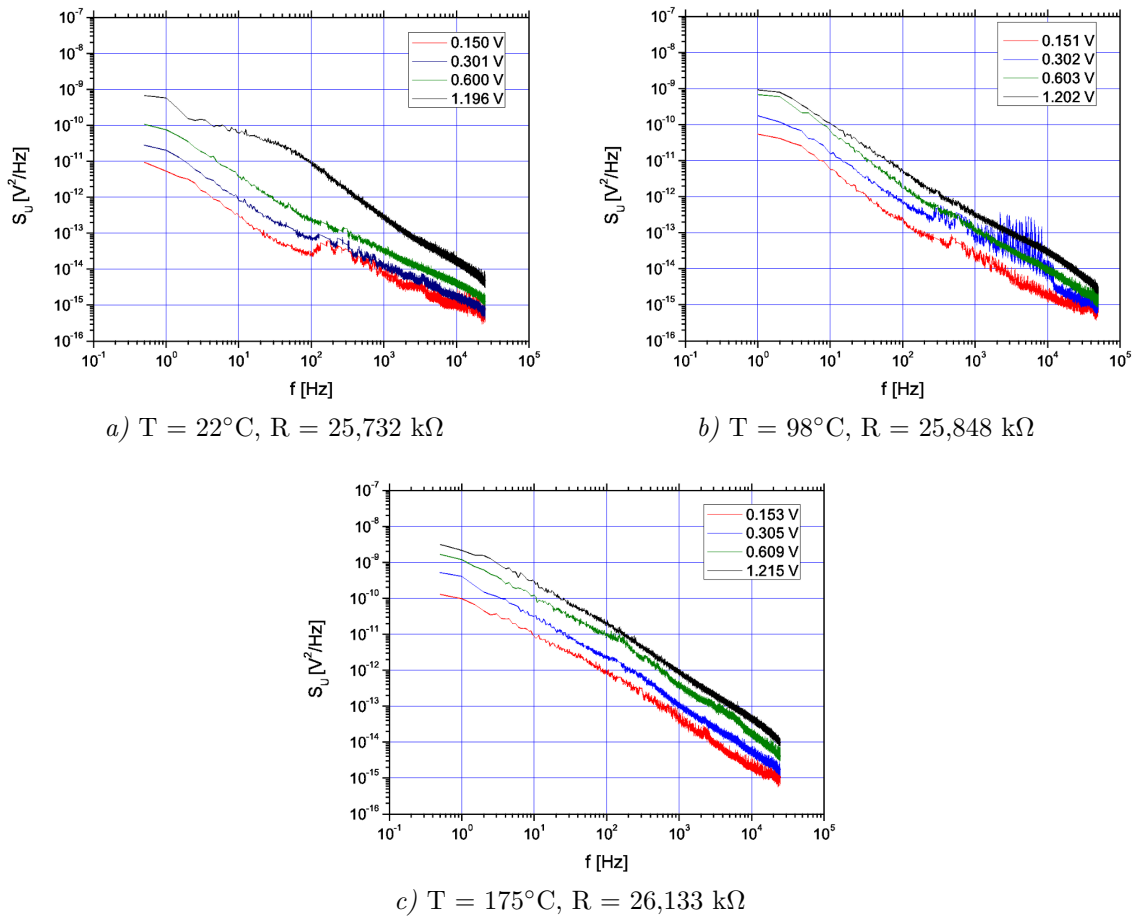
nachylenie charakterystyk  $S_U(f)$  wykreślonych w układzie podwójnie logarytmicznym zbliżone do wartości równej -1. Podobnie test szumu rezystancyjnego, tj. zależność uśrednionego iloczynu  $\langle fS_U \rangle$  od napięcia polaryzującego  $U$  (rys. 4.29a i 4.30a) jest aproksymowany prostą o nachyleniu równym 2. Stąd zależność widmowej gęstości mocy  $S_U$  od częstotliwości i napięcia polaryzującego przybliżano wzorem (4.8). Wartość wykładnika spektralnego  $\gamma$  zawierała się w przedziale 0,8 – 1,4. Jednocześnie stwierdzono wpływ temperatury na właściwości szumowe elementów. Wartość intensywności szumu  $C$ , wyznaczonej z zal. (4.10), wzrastała znacząco z temperaturą w wypadku rezystora CF041/DP6146/LTCC (tab. 4.7). Dodatkowo zmierzono właściwości szumowe wybranych struktur rezystorów w temperaturze pokojowej (tab. 4.8). Zastosowano miernik szumów QuanTech 315B. Stwierdzono bardzo korzystną, w porównaniu z innymi kompozycjami grubowarstwowymi [89], wartość intensywności szumu  $C$  odniesioną do rezystywności warstwy (parametr  $K = C/\rho$ ). W opinii autora niewielka liczba przebadanych rezystorów uniemożliwia w tym momencie formułowanie ogólnych wniosków. Niemniej jednak wstępne wyniki wskazują na zasadność dalszych systematycznych badań związanych z charakteryzacją właściwości szumowych rezystorów grubowarstwowych w zakresie podwyższonej temperatury.

Tabela 4.7. Parametry szumowe miniaturowych rezystorów grubowarstwowych

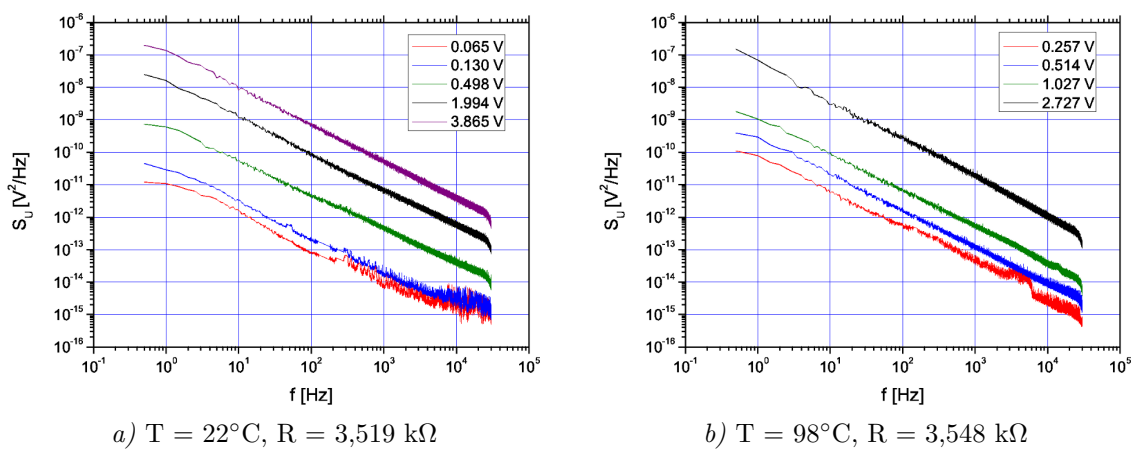
Próbka	T [°C]	R [kΩ]	$\rho$ [Ωcm]	C [m <sup>3</sup> ]	K [μm <sup>2</sup> /Ω]
CF041/DP6146/LTCC $\Omega = 30 \times 200 \times 15 \mu\text{m}^3$	22	25,732	283,1	$1,0 \cdot 10^{-23}$	$3,6 \cdot 10^{-12}$
	98	25,848	284,3	$3,4 \cdot 10^{-23}$	$1,2 \cdot 10^{-11}$
	175	26,133	287,5	$2,3 \cdot 10^{-22}$	$8,2 \cdot 10^{-11}$
RF12/Ag65/LTCC	22	3,519	12,9	$7,9 \cdot 10^{-22}$	$6,1 \cdot 10^{-9}$
	115	3,548	13,0	$3,5 \cdot 10^{-22}$	$2,7 \cdot 10^{-9}$

Tabela 4.8. Parametry szumowe miniaturowych rezystorów grubowarstwowych w temperaturze pokojowej

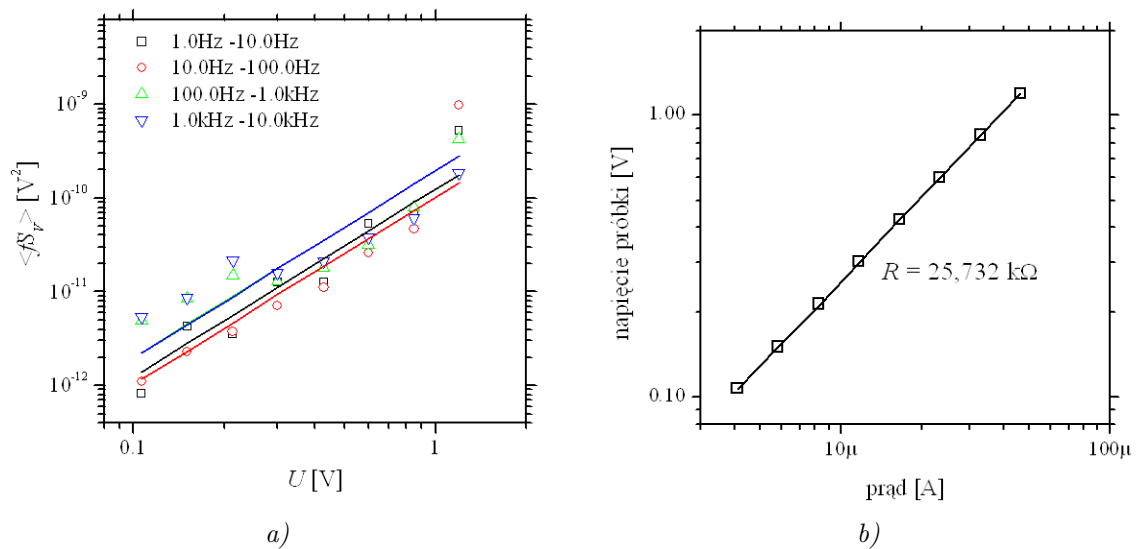
Próbka	$l$ [μm]	R [kΩ]	$\rho$ [Ωcm]	C [m <sup>3</sup> ]	K [μm <sup>2</sup> /Ω]
CF021/ESL8844G/LTCC	90	49,9	0,183	$4,5 \cdot 10^{-27}$	$2,4 \cdot 10^{-12}$
	150	88,8	0,130	$2,0 \cdot 10^{-27}$	$1,5 \cdot 10^{-12}$
	300	153,7	0,113	$3,1 \cdot 10^{-27}$	$2,8 \cdot 10^{-12}$
CF011/ESL8844G/LTCC	90	56,3	0,103	$2,5 \cdot 10^{-26}$	$2,4 \cdot 10^{-11}$
	150	68,3	0,100	$3,1 \cdot 10^{-26}$	$3,1 \cdot 10^{-11}$
	300	89,9	0,066	$4,7 \cdot 10^{-26}$	$7,1 \cdot 10^{-11}$
CF011/DP6146/LTCC	90	62,9	0,115	$2,3 \cdot 10^{-26}$	$2,0 \cdot 10^{-11}$
	150	92,4	0,136	$1,7 \cdot 10^{-26}$	$1,3 \cdot 10^{-11}$
	300	123,3	0,090	$2,3 \cdot 10^{-26}$	$2,5 \cdot 10^{-11}$



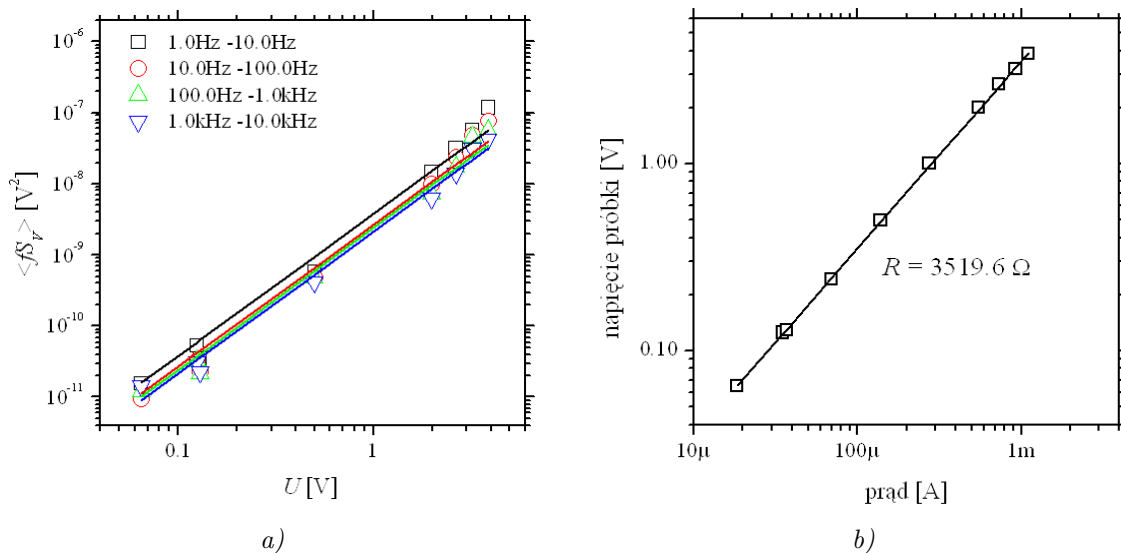
Rys. 4.27. Widma szumu dla różnych napięć polaryzacji i temperatury – rezystor CF041/DP6146/LTCC,  $l = 30 \mu\text{m}$



Rys. 4.28. Widma szumu dla różnych napięć polaryzacji i temperatury – rezystor RF12/Ag65/LTCC,  $l = 300 \mu\text{m}$



Rys. 4.29. Zależność widmowej gęstości mocy szumów od napięcia polaryzacji (a) i charakterystyka napięciowo-prądowa (b) – rezystor CF041/DP6146/LTCC,  $l = 30 \mu\text{m}$ ,  $T = 22^\circ\text{C}$



Rys. 4.30. Zależność widmowej gęstości mocy szumów od napięcia polaryzacji (a) i charakterystyka napięciowo-prądowa (b) – rezystor RF12/Ag65/LTCC,  $l = 300 \mu\text{m}$ ,  $T = 22^\circ\text{C}$



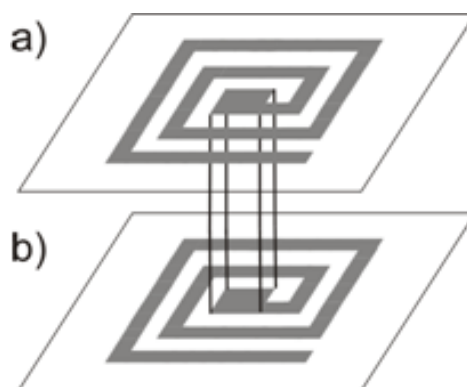
## 4.7. Podsumowanie

W powyższym rozdziale omówiono wytwarzanie i właściwości miniaturowych rezystorów grubowarstwowych i LTCC. Zaprojektowano i wykonano mikrorezystory o wymiarach od  $30 \times 200 \mu\text{m}^2$  do  $300 \times 200 \mu\text{m}^2$ . Wykorzystano trzy techniki wytwarzania elementów – pełną technologię past światłoczułych lub w połączeniu ze standardowym sitodrukiem oraz metodę mikroobróbki laserowej. Podczas kompleksowej charakterystyki mikrorezystorów zbadano właściwości geometryczne wytworzonych elementów, podstawowe parametry elektryczne, stabilność długoczasową, odporność impulsową oraz właściwości szumowe. Podstawowym celem badań była odpowiedź na pytanie, czy możliwe jest wykonanie przy pomocy wymienionych wyżej metod miniaturowych rezystorów o zadowalających parametrach geometrycznych, elektrycznych i stabilności. Widoczna była różnica we właściwościach geometrycznych struktur. Technika fotoforumowania i obróbki laserowej pozwalają uzyskać znacznie lepszą precyzję wykonania elementów miniaturowych. Rozumieć należy przez to lepszą definicję warstwy oraz dużo większą zgodność rzeczywistej geometrii struktury z projektem. Problemem w tym przypadku są jednak wciąż niezadowalające parametry elektryczne rezystorów z past światłoczułych. Jeśli chodzi o badaną tu eksperymentalną kompozycję światłoczułą, to wykazywała ona niezadowalającą stabilność długoczasową w wysokiej temperaturze. Niezależnie od metody wytwarzania mikrorezystora obecne są jednak pewne czynniki związane z niewielkim rozmiarem elementu. Charakterystyczną cechą techniki grubowarstwowej jest wypalanie, a często współwypalanie warstw w wysokiej temperaturze około  $850^\circ\text{C}$ . Wynikiem tego są silne interakcje poszczególnych komponentów tworzących rezystor. Skutkują one np. pojawianiem się obszarów przejściowych o pośrednich właściwościach między warstwą rezystywną i przewodzącą. Ich wpływ na parametry całego rezystora rośnie wraz ze zwiększaniem się udziału obszarów przejściowych w całej objętości elementu. W grę wchodzi także oddziaływanie rezystor-podłoże, którego wpływ zmienia się wskutek zmian grubości warstwy w funkcji wymiarów rezystora. Efekty te były bardzo silne. Obserwowano dużą zależność rezystancji powierzchniowej mikrorezystora czy też GTWR od konfiguracji materiałów. Jednocześnie mikrorezystory wykazują bardzo dobrą odporność impulsową w szerokim zakresie temperatury. Autor pokazał jednak, że wybrane zestawy materiałowe, jak np. CF011/ESL8844G/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ , CF021/DP6146/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  czy też R490A/Ag65/LTCC są dobrymi kandydatami do wytwarzania mikrorezystorów do długotrwałej pracy w zakresie temperatury do  $350 - 400^\circ\text{C}$ . Zaś układy CF011/ESL8844G/LTCC i DP2021/Ag65/LTCC mogą pracować do temperatury  $300^\circ\text{C}$ .

## Rozdział 5

# Elementy indukcyjne i pojemnościowe

Cewki indukcyjne i kondensatory są podstawowymi biernymi elementami elektrycznymi, w których energia jest gromadzona odpowiednio w postaci energii pola magnetycznego cewki oraz pola elektrycznego w kondensatorze, którego źródłem jest zgromadzony ładunek elektryczny. Cewka indukcyjna składa się z pewnej liczby zwojów nawiniętych np. na powierzchni pierścienia (cewka toroidalna), na powierzchni walca lub ułożonych na płaszczyźnie. Kondensator składa się z układu dwóch elektrod rozdzielonych dielektrykiem. W najprostszym rozwiązaniu jest to powietrze, w złożonych konstrukcjach stosuje się materiały dielektryczne o dużej wartości współczynnika przenikalności elektrycznej. Za pomocą techniki grubowarstwowej wytwarza się m.in. cewki planarne powierzchniowe i zagrzebane lub cewki wielowarstwowe (rys. 5.1) [91, 92].

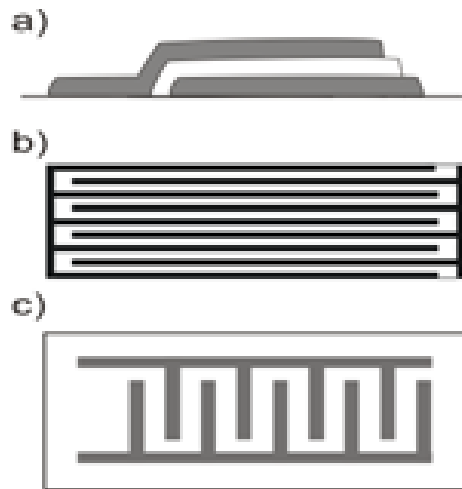


Rys. 5.1. Schemat cewki planarnej (a), wielowarstwowej (a+b)

Cewki planarne mogą mieć różne kształty geometryczne – np. typu meander, spiralne okrągłe, prostokątne lub wielokątne. W celu zwiększenia indukcyjności stosuje się dodatkowo rdzenie wykonane z materiałów o właściwościach magnetycznych. W

cewkach grubowarstwowych mogą one być wykonane w postaci dodatkowej warstwy lub możliwe jest zastosowanie podłoża o właściwościach magnetycznych [93, 94].

Kondensatory grubowarstwowe wytwarza się m.in. jako struktury kanapkowe, palczaste (grzebieniowe) lub kondensatory wielowarstwowe (rys. 5.2) [95–98]. Kondensator kanapkowy to struktura zbudowana z dwóch warstw przewodzących umieszczonych jedna nad drugą po tej samej stronie podłoża i przedzielonych warstwą dielektryczną. Prostsza konstrukcję posiadają kondensatory palczaste, w których elektrody są wykonane w formie grzebienia o naprzemiennie ułożonych palcach. Warstwę dielektryczną może stanowić samo podłoże jak również dodatkowa warstwa nanoszona na elektrody.



Rys. 5.2. Schemat a) kondensatora kanapkowego (przekrój), b) wielowarstwowego (przekrój), c) grzebieniowego (widok z góry)

## 5.1. Analiza numeryczna właściwości elektrycznych cewek i kondensatorów

Głównym parametrem cewki indukcyjnej jest indukcyjność  $L$ . Z definicji indukcyjności własnej  $L$  obwodu to stosunek strumienia magnetycznego  $\Phi$  wytworzonego w obwodzie i skojarzonego z obwodem do prądu  $I$  płynącego w tym obwodzie (5.1).

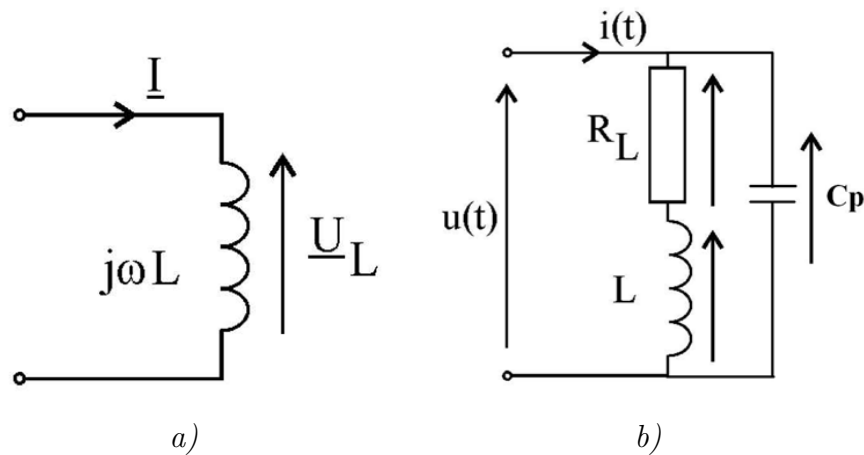
$$L = \frac{\Phi}{I} \quad (5.1)$$

W wypadku układu co najmniej dwóch obwodów można mówić o indukcyjności sprzężonej (wzajemnej)  $M$ . Indukcyjność sprzężona  $M$  jest to stosunek strumienia magnetycznego  $\Phi_{12}$  wytworzonego w obwodzie 1 i przenikającego przez obwód 2 do prądu  $I_1$  płynącego w obwodzie 1 (5.2).

$$M = \frac{\Phi_{12}}{I_1} \quad (5.2)$$

Jednostką indukcyjności własnej i wzajemnej jest henr,  $1 \text{ H} = 1 \text{ } \Omega \cdot \text{s} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$

Kolejnym parametrem elektrycznym cewek jest impedancja  $Z$  czyli opór elektryczny w obwodzie prądu zmiennego. Wartość impedancji jest ściśle powiązana z wartością indukcyjności, jak też z częstotliwością zmian przebiegu prądowego (napięciowego). Analiza impedancji cewki indukcyjnej może być rozpatrywana w dwóch przypadkach. Pierwszym z nich jest matematyczny model cewki idealnej (rys. 5.3a), nie występują-



Rys. 5.3. Schemat elektryczny cewki idealnej (a), rzeczywistej (b)

cy w układach rzeczywistych. Wartości impedancji i admitancji w postaci zespolonej opisane są zależnościami:

$$Z_L = \frac{U_L}{I} = jX_L = j\omega L \quad (5.3)$$

$$Y_L = \frac{I}{U_L} = -jB_L = -j\frac{1}{\omega L} \quad (5.4)$$

gdzie:  $\omega = 2\pi \cdot f$ ,  $f$  - częstotliwość przebiegu zmiennego. Wyrażenie  $X_L$  jest nazywane reaktancją indukcyjną,  $B_L$  - susceptancją indukcyjną.

Drugim przypadkiem jest model cewki rzeczywistej składający się z idealnej cewki  $L$ , rezystancji  $R_L$  opisującej opór materiału z jakiego wykonano cewkę oraz pojemności między zwojami  $C_p$  (rys. 5.3b). Wówczas wartość impedancji zespolonej wyraża się zależnością:

$$Z_L = \frac{1 - j\omega R_L C_p + \omega^2 L C_p}{R_L + j\omega L} \quad (5.5)$$

Ważnym parametrem opisującym cewkę jest dobroć  $Q$ . Jest to stosunek energii zgromadzonej w cewce do energii w niej rozpraszonej. Inaczej jest to stosunek reaktancji cewki do jej rezystancji szeregowej (5.6). Z zależności tej wynika, że im mniejsza rezystancja szeregową i im większa indukcyjność tym większa dobroć. Dobroć jest wielkością bezwymiarową. Parametrem odwrotnym do dobroci jest współczynnik strat (tangens  $\delta$ ) (5.7).

$$Q = \frac{\omega L}{R_L} \quad (5.6)$$

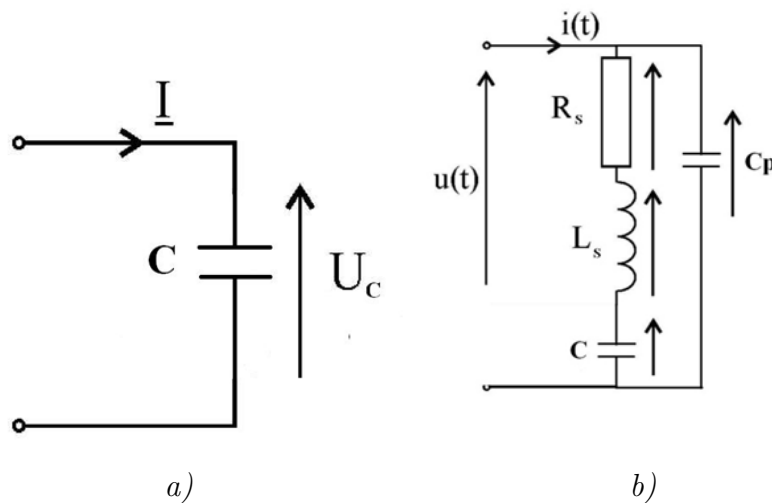
$$\text{tg}\delta = \frac{1}{Q} \quad (5.7)$$

Podstawowym parametrem kondensatora jest pojemność  $C$ . Z definicji pojemnością nazywamy stosunek ładunku zgromadzonego na okładkach kondensatora do różnicy potencjałów między okładkami (5.8).

$$C = \frac{Q}{U} \quad (5.8)$$

Jednostką pojemności jest farad,  $1 \text{ F} = 1 \text{ A} \cdot \text{s}/\text{V} = 1 \text{ A}^2 \cdot \text{s}^4 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$

Impedancja kondensatora, podobnie jak cewki indukcyjnej, może być rozpatrywana dla modelu idealnego oraz rzeczywistego. Dla struktury idealnej otrzymujemy:



Rys. 5.4. Schemat elektryczny kondensatora idealnego (a), rzeczywistego (b)

$$Z_C = \frac{U_C}{I} = jX_C = \frac{1}{j\omega C} = -j\frac{1}{\omega C} \quad (5.9)$$

$$Y_C = \frac{I}{U_C} = jB_C = -j\omega C \quad (5.10)$$

gdzie:  $\omega = 2\pi \cdot f$ ,  $f$  - częstotliwość przebiegu zmiennego. Wyrażenie  $X_C$  nazywane jest reaktancją pojemnościową,  $B_C$  - susceptancją pojemnościową.

Cewki indukcyjne i kondensatory są elementami, których parametry elektryczne są bardzo silnie skorelowane z ich geometrią. Dla rezystorów zmiana długości i szerokości elementu przy zachowaniu ich wzajemnego stosunku (liczby kwadratów) teoretycznie nie powoduje zmiany rezystancji. Natomiast w wypadku kondensatora miniaturyzacja wymiarów planarnych prowadzi do zmniejszenia powierzchni okładek i spadku pojemności, proporcjonalnego do kwadratu względnych zmian wymiarów. Pojemność kondensatora typu kanapkowego można opisać zależnością:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d} \quad (5.11)$$

gdzie:  $\varepsilon_0, \varepsilon_r$  - przenikalność elektryczna próżni i względna przenikalność elektryczna,  $S, d$  - pole powierzchni okładki i grubość dielektryka.

Dla struktur palczastych obie elektrody wytwarza się w formie grzebieni o naprzemiennie ułożonych palcach. Dodatkową warstwę dielektryczną można nanosić na elektrody. Pole elektryczne w takich strukturach nie jest skupione w przestrzeni między elektrodami. Znaczna część linii pola zamyka się przez obszar dielektryka ponad elektrodami, a część przez podłoże, które także może być materiałem o wysokiej przenikalności. Powoduje to, że obliczenia pojemności są bardziej skomplikowane. Stosuje się w tym celu metody przybliżone (zal. 5.12).

$$C = \varepsilon_0 \frac{(n-1)l}{2} \left[ \varepsilon_r \frac{K'(k_2)}{K(k_2)} + \frac{K'(k_1)}{K(k_1)} \right] \quad (5.12)$$

$$k_1 = \frac{w_2}{2w_1 + w_2} \quad (5.13)$$

$$k_2 = \frac{\operatorname{th}\left(\frac{\pi w_2}{4d}\right)}{\operatorname{th}\left(\frac{\pi(2w_1 + w_2)}{4d}\right)} \quad (5.14)$$

gdzie:  $\varepsilon_0, \varepsilon_r$  - przenikalność elektryczna próżni i względna przenikalność elektryczna,  $d$  - grubość dielektryka,  $w_1, l$  - szerokość i długość elektrod palczastych,  $w_2$  - odstęp między elektrodami,  $n$  - liczba palców,  $\operatorname{th}()$  - tangens hiperboliczny,  $K(k), K'(k)$  - całka eliptyczna zupełna pierwszego rodzaju i jej dopełnienie [99]. Warto zauważyć, że grubszy dielektryk, w przeciwieństwie do struktury kanapkowej oznacza większą pojemność. Wartości pojemności uzyskiwane w strukturach palczastych są jednak kilkakrotnie mniejsze niż w kondensatorze kanapkowym przy zachowaniu tej samej powierzchni [100]. Mogą one znajdować zastosowanie w zakresie wielkich częstotliwości i mikrofal, gdzie wystarczająco małe, rzędu kilku - kilkudziesięciu pF.

Podobnie korzystając z metod przybliżonych można wyznaczać indukcyjność cewek planarnych. Dla cewek z uzwojeniem spiralnym indukcyjność wyraża się następującą zależnością:

$$L[nH] = \frac{\mu_0 n^2 D c_1}{2} \left[ \ln \frac{c_2}{k} + c_3 k + c_4 k^2 \right] \quad (5.15)$$

$$k = \frac{D_z - D_w}{D_z + D_w} \quad (5.16)$$

$$D = \frac{D_z - D_w}{2} \quad (5.17)$$

gdzie:  $n$  - liczba zwojów,  $D_z, D_w$  - wymiar zewnętrzny i wewnętrzny cewki [w  $\mu\text{m}$ ],  $c_i$  - współczynniki geometryczne (dla cewki kwadratowej  $c_1 = 1,27, c_2 = 2,07, c_3 = 0,18, c_4 = 0,13$ ) [101].

Oprócz stosowania metod przybliżonych możliwe jest zastosowanie obliczeń numerycznych [102–106], które pozwalają na przeprowadzenie analizy właściwości elementu z wykorzystaniem modelu komputerowego badanego elementu.

W dalszej części rozdziału przedstawiono wyniki symulacji komputerowych właściwości miniaturowych cewek i kondensatorów grubowarstwowych. Ich celem było określenie wpływu miniaturyzacji elementów na podstawowe właściwości elektryczne tych elementów.

Analizę numeryczną przeprowadzono przy użyciu oprogramowania Sonnet Suite 12.56 w wersji edukacyjnej. Program ten umożliwia analizę elektromagnetyczną wielowarstwowych układów elektronicznych oraz anten. Wykorzystuje on do obliczeń metodę momentów (ang. *Method of Moments* [107,108]). Aplikacja posiada narzędzia, które w łatwy sposób pozwalają stworzyć element o zadanych parametrach geometrycznych. Są to m.in. liczba zwojów, szerokość ścieżki przewodzącej, odstęp między ścieżkami oraz wymiary zewnętrzne. Oprócz parametrów geometrycznych istotne są również parametry materiałowe, które przedstawiono w tabelach 5.1 i 5.2.

Tabela 5.1. Parametry warstw dielektrycznych [44,109]

Podłoże	Grubość	Względna przenikalność dielektryczna (1MHz)	Stratność
Ceramika alundowa $Al_2O_3$	635 $\mu m$	9,4	0,0038
Folia DP951	300 $\mu m$	7,8	0,0046

Tabela 5.2. Parametry warstwy metalicznej [80]

Materiał	Grubość	Przewodność właściwa
Pasta srebrowa	10 $\mu m$	$3,3 \cdot 10^7$ S/m

## Cewki indukcyjne

Na potrzeby niniejszej pracy zasymulowano cewki kwadratowe o następujących parametrach geometrycznych:

1. liczba zwojów: 2, 2,5 lub 3,
2. szerokość ścieżki/odległość między uzwojeniem ( $w_1/w_2$ ): 20/20; 30/30; 40/40; 50/50  $\mu m$ ,
3. wymiary zewnętrzne:  $3 \times 3$ ;  $5 \times 5$  mm<sup>2</sup>.

### • Wpływ szerokości ścieżki i odstęp między zwojami na indukcyjność i dobroć cewki

Poniżej przedstawiono zależność parametrów elektrycznych cewki od szerokości ścieżki oraz odstęp między zwojami przy stałej liczbie zwojów oraz stałym polu powierzchni symulowanej struktury. Symulację przeprowadzono w zakresie częstotliwości od 1 do 2001 MHz z krokiem 20 MHz. Następnie zagęszczano liczbę punktów do 1 MHz w pobliżu częstotliwości rezonansowej ( $f_{rez}$ ) oraz maksymalnej dobroci cewki ( $f(Q_{max})$ ). Maksymalną dobroć wyznaczano w zakresie do pierwszej częstotliwości rezonansowej. Indukcyjność podawano dla 41 MHz, ponieważ w tym zakresie częstotliwości rezonans nie ma wpływu na indukcyjność cewki. W tab. 5.3 – 5.6 i na rys. 5.5 – 5.8 przedstawiono wyniki symulacji.

Tabela 5.3. Wpływ szerokości ścieżki i odległości między zwojami na parametry elektryczne cewki (1)

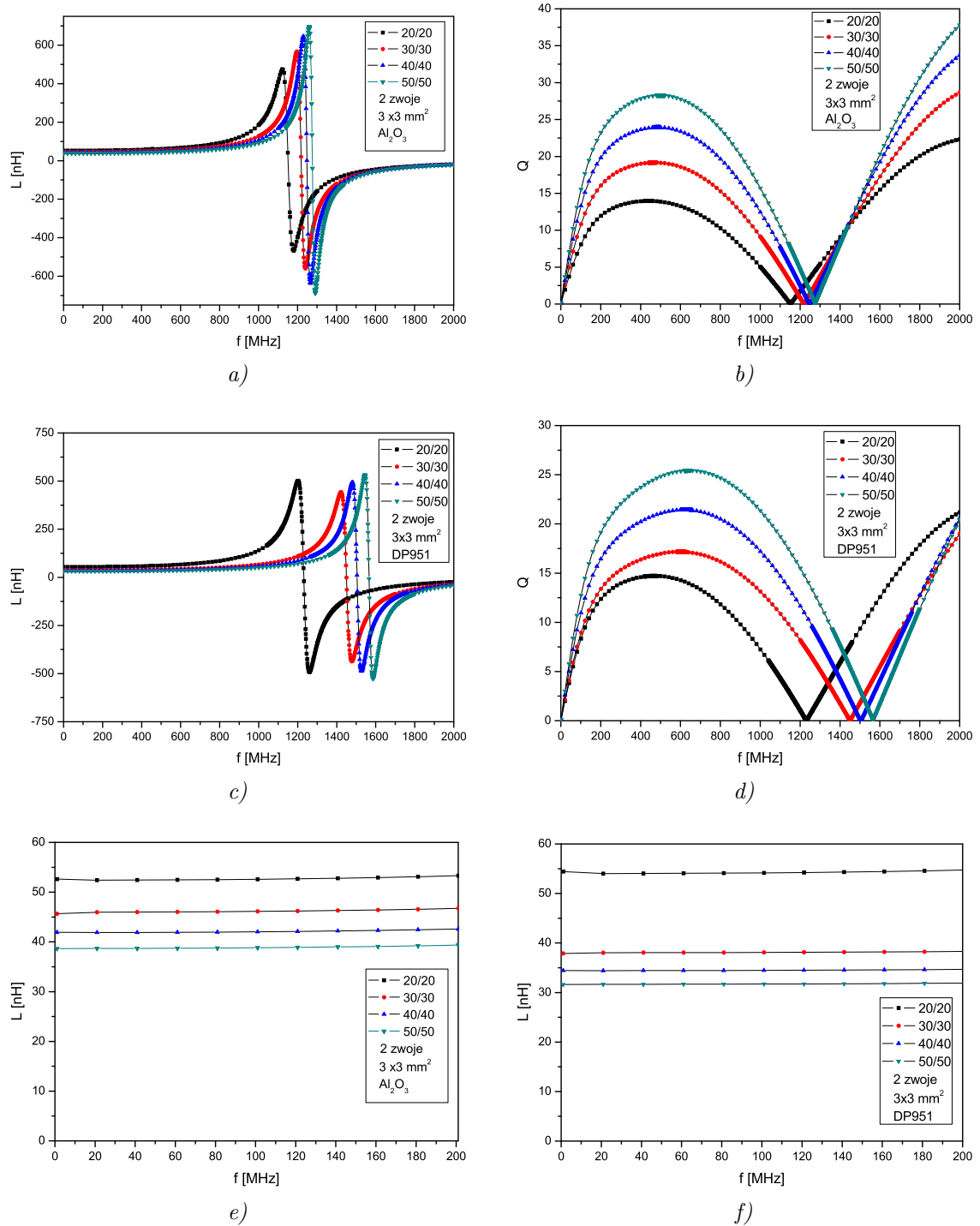
Liczba zwojów					2
Wymiary zewnętrzne					3×3 mm <sup>2</sup>
$w_1/w_2$	Podłoże	L [nH] dla 41 MHz	$f_{rez}$ [MHz]	$Q_{max}$	$f(Q_{max})$ [MHz]
20/20 $\mu\text{m}$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	52,63	1145	13,96	439
30/30 $\mu\text{m}$		45,93	1217	19,16	470
40/40 $\mu\text{m}$		41,86	1249	23,92	487
50/50 $\mu\text{m}$		38,71	1273	28,28	498
20/20 $\mu\text{m}$	DP951	54,02	1231	14,71	470
30/30 $\mu\text{m}$		37,98	1450	17,17	594
40/40 $\mu\text{m}$		34,43	1505	21,43	619
50/50 $\mu\text{m}$		31,63	1567	25,43	646

Tabela 5.4. Wpływ szerokości ścieżki i odległości między zwojami na parametry elektryczne cewki (2)

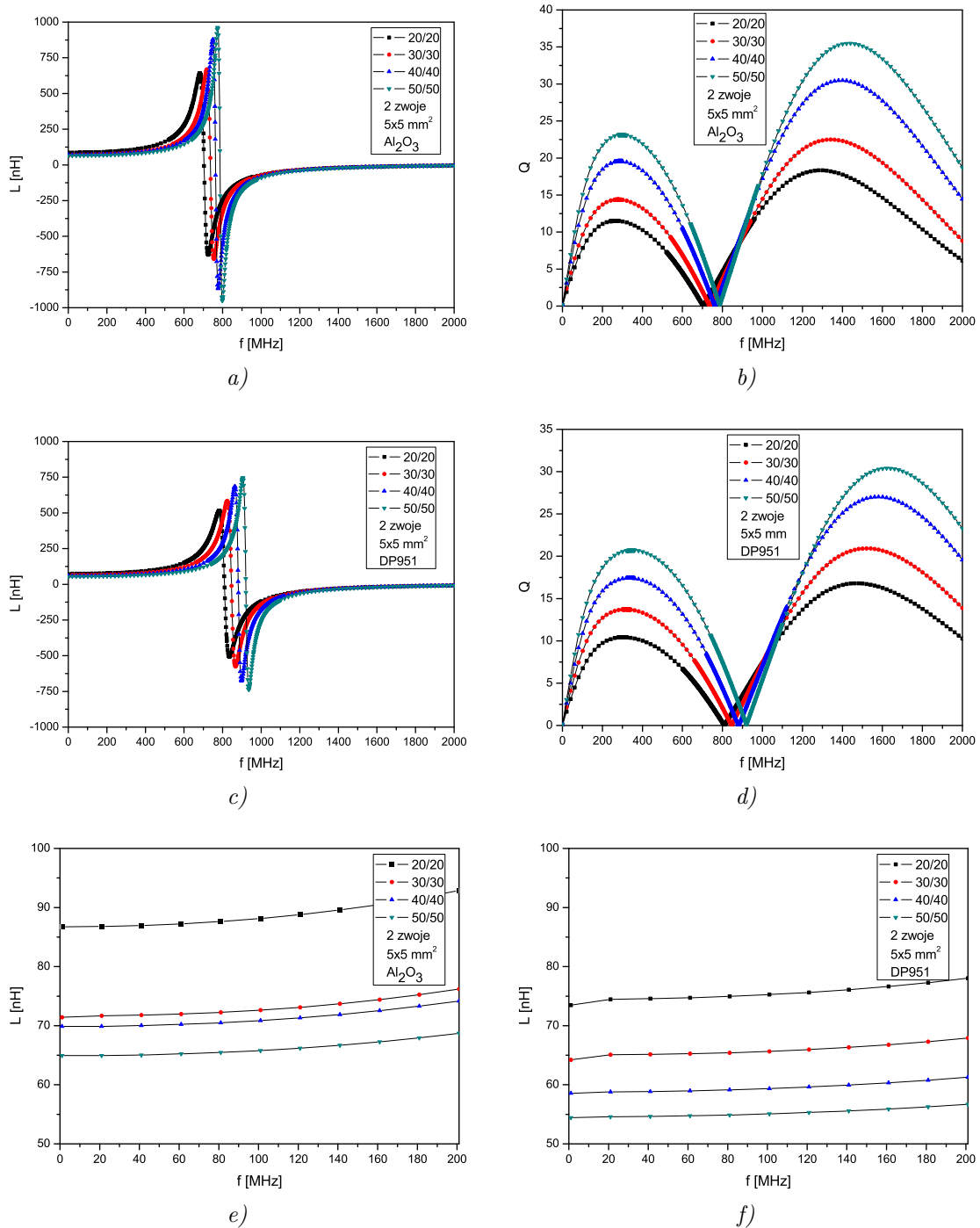
Liczba zwojów					2
Wymiary zewnętrzne					5×5 mm <sup>2</sup>
$w_1/w_2$	Podłoże	L [nH] dla 41 MHz	$f_{rez}$ [MHz]	$Q_{max}$	$f(Q_{max})$ [MHz]
20/20 $\mu\text{m}$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	86,81	705	11,52	267
30/30 $\mu\text{m}$		76,80	729	14,38	278
40/40 $\mu\text{m}$		69,94	765	19,54	288
50/50 $\mu\text{m}$		64,87	789	23,15	296
20/20 $\mu\text{m}$	DP951	74,58	809	10,43	305
30/30 $\mu\text{m}$		65,15	847	13,72	315
40/40 $\mu\text{m}$		58,87	880	17,42	335
50/50 $\mu\text{m}$		54,64	920	20,72	349

Zmniejszenie szerokości ścieżki przewodzącej i odstępów między ścieżkami przy zachowaniu jednakowych wymiarów planarnych całej struktury powoduje zwiększenie wartości indukcyjności. Jednocześnie węższe ścieżki oznaczają większą liczbę jednostkowych kwadratów dla wszystkich zwojów. Stąd większa rezystancja szeregową cewki, która powoduje zmniejszenie dobroci oraz obniżenie częstotliwości rezonansowej.





Rys. 5.5. Indukcyjność i dobroć cewki dla różnej szerokości ścieżki oraz odległości między zwojami (1)



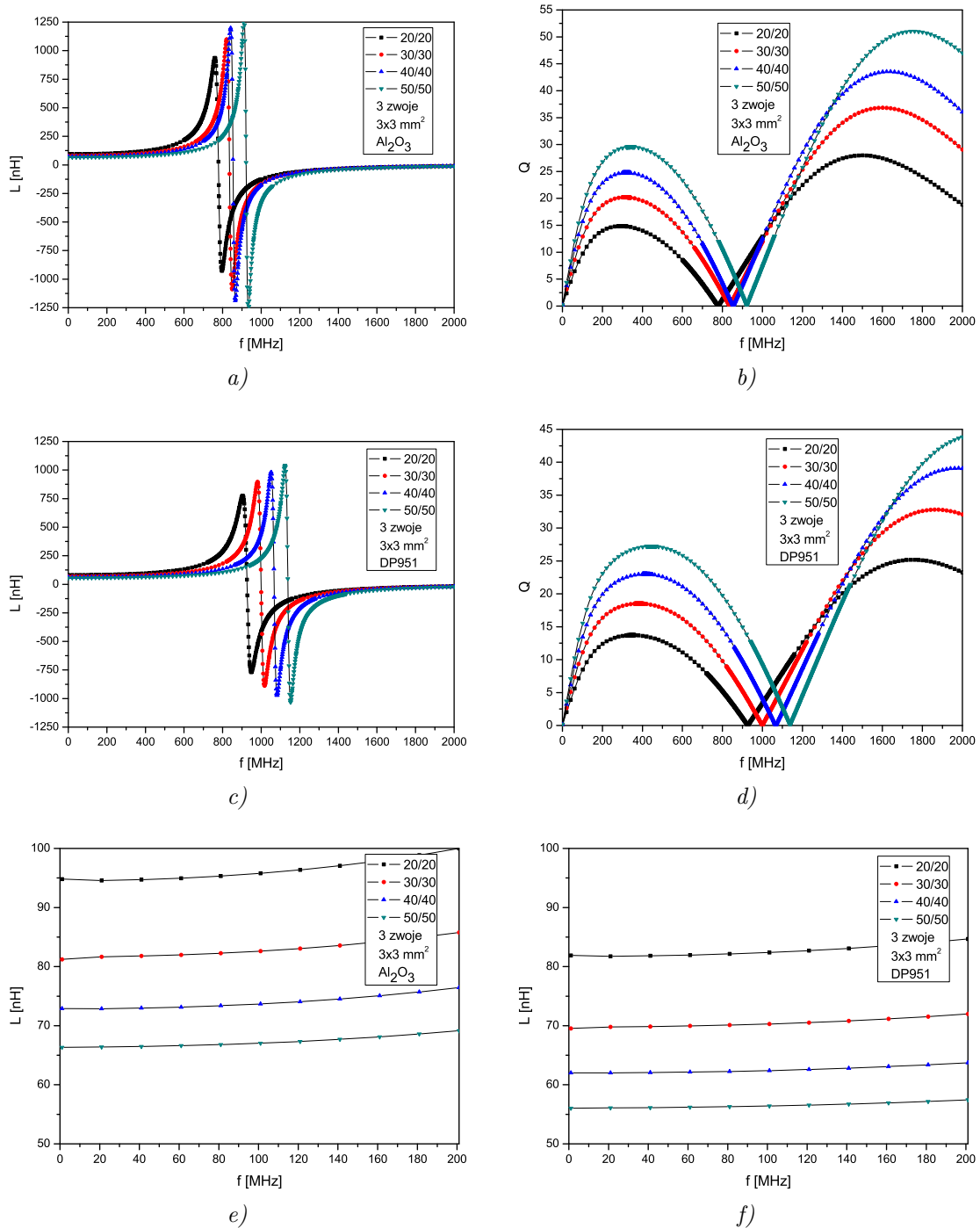
Rys. 5.6. Indukcyjność i dobroć cewki dla różnej szerokości ścieżki oraz odległości między zwojami (2)

Tabela 5.5. Wpływ szerokości ścieżki i odległości między zwojami na parametry elektryczne cewki (3)

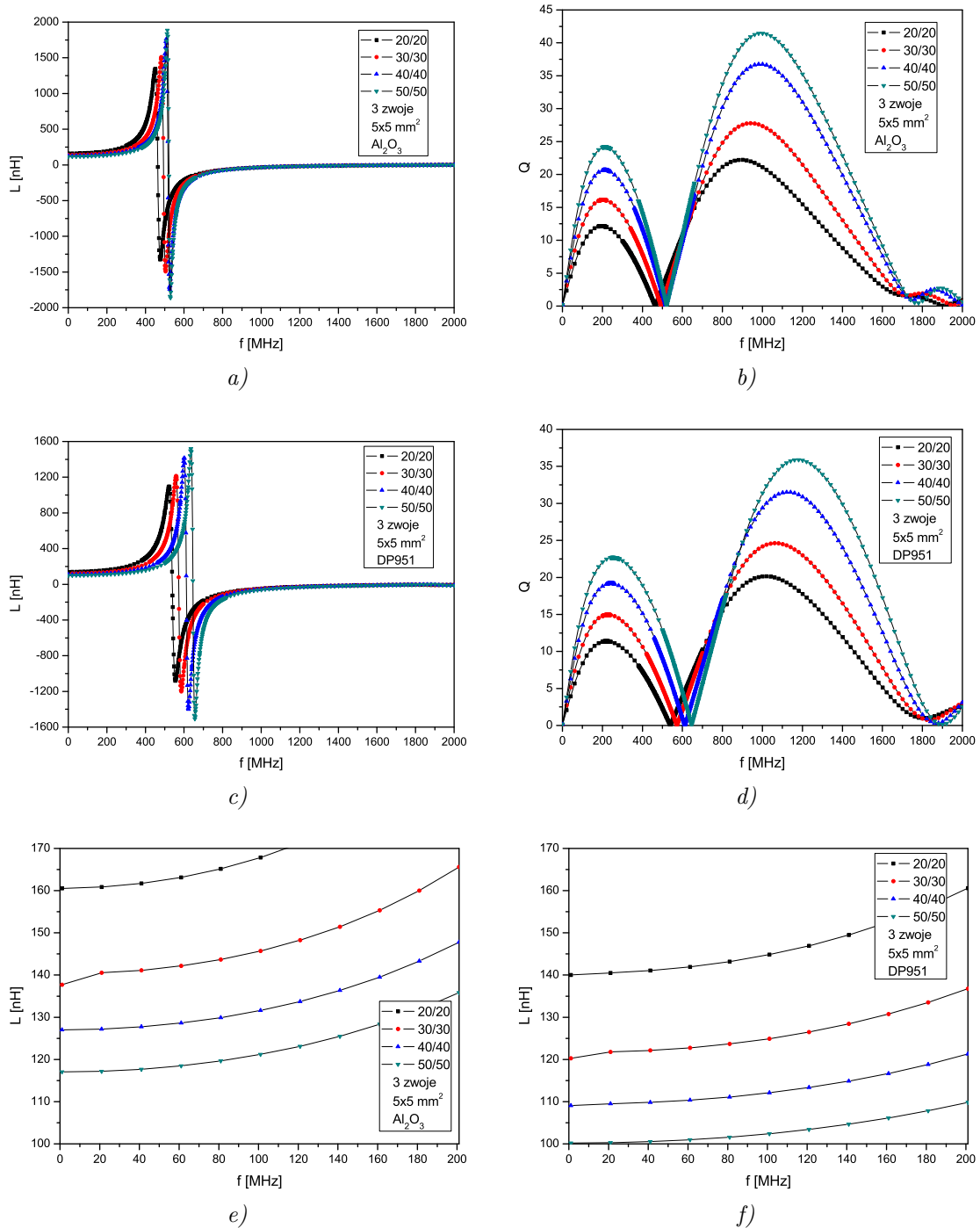
Liczba zwojów					<b>3</b>
Wymiary zewnętrzne					<b>3×3 mm<sup>2</sup></b>
$w_1/w_2$	Podłoże	L [nH] dla 41 MHz	$f_{rez}$ [MHz]	$Q_{max}$	$f(Q_{max})$ [MHz]
20/20 $\mu\text{m}$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	94,71	778	14,85	292
30/30 $\mu\text{m}$		81,80	835	20,20	313
40/40 $\mu\text{m}$		72,97	854	24,78	320
50/50 $\mu\text{m}$		66,49	922	29,57	343
20/20 $\mu\text{m}$	DP951	81,82	926	13,72	350
30/30 $\mu\text{m}$		69,86	999	18,52	382
40/40 $\mu\text{m}$		62,06	1067	23,00	412
50/50 $\mu\text{m}$		56,13	1138	27,24	443

Tabela 5.6. Wpływ szerokości ścieżki i odległości między zwojami na parametry elektryczne cewki (4)

Liczba zwojów					<b>3</b>
Wymiary zewnętrzne					<b>5×5 mm<sup>2</sup></b>
$w_1/w_2$	Podłoże	L [nH] dla 41 MHz	$f_{rez}$ [MHz]	$Q_{max}$	$f(Q_{max})$ [MHz]
20/20 $\mu\text{m}$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	161,71	464	12,15	196
30/30 $\mu\text{m}$		141,13	493	16,14	203
40/40 $\mu\text{m}$		127,73	517	20,66	212
50/50 $\mu\text{m}$		117,68	522	24,19	213
20/20 $\mu\text{m}$	DP951	141,06	539	11,38	219
30/30 $\mu\text{m}$		122,13	573	14,95	228
40/40 $\mu\text{m}$		109,81	613	19,18	242
50/50 $\mu\text{m}$		100,54	646	22,70	253



Rys. 5.7. Indukcyjność i dobroć cewki dla różnej szerokości ścieżki oraz odległości między zwojami (3)



Rys. 5.8. Indukcyjność i dobroć cewki dla różnej szerokości ścieżki oraz odległości między zwojami (4)

- **Wpływ liczby zwojów na indukcyjność i dobroć cewki**

W tym podrozdziale przedstawiono wpływ liczby zwojów na indukcyjność i dobroć cewki. Symulację przeprowadzono dla dwóch, dwóch i pół oraz trzech uzwojeń. Parametry symulacji ustawiano jak w poprzednim punkcie. W tabelach 5.7 i 5.8 i na rys. 5.9 i 5.10 przedstawiono wyniki symulacji.

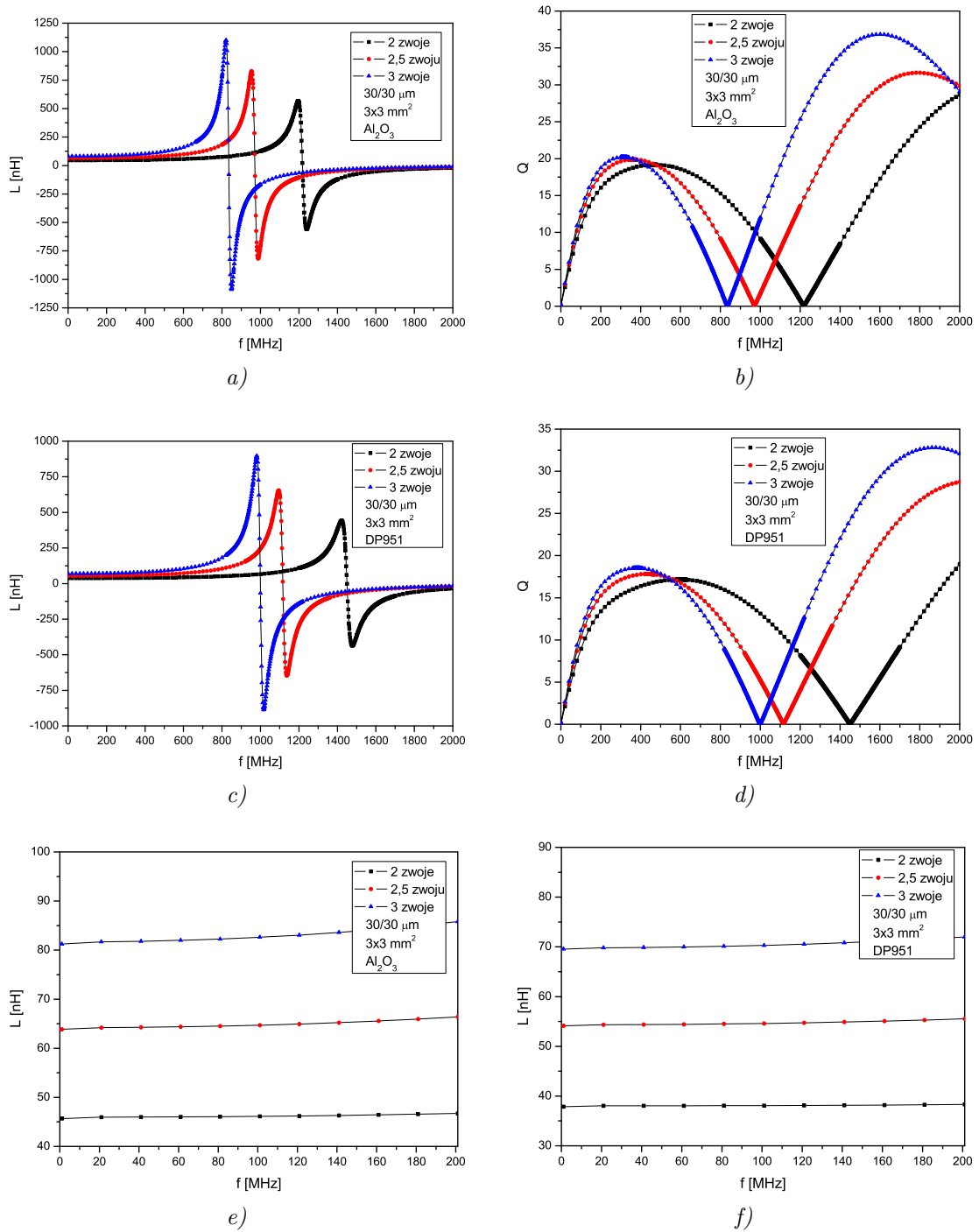
Tabela 5.7. Wpływ liczby zwojów na parametry elektryczne cewki (1)

Szerokość ścieżki/odstęp między zwojami					30/30 $\mu\text{m}$
Wymiary zewnętrzne					3×3 $\text{mm}^2$
Liczba zwojów	Podłoże	L [nH] dla 41 MHz	$f_{rez}$ [MHz]	$Q_{max}$	$f(Q_{max})$ [MHz]
2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	45,93	1217	19,16	470
2,5		64,28	970	19,87	362
3		81,80	835	20,20	313
2	DP951	37,98	1450	17,17	594
2,5		54,37	1116	17,82	433
3		69,86	999	18,52	382

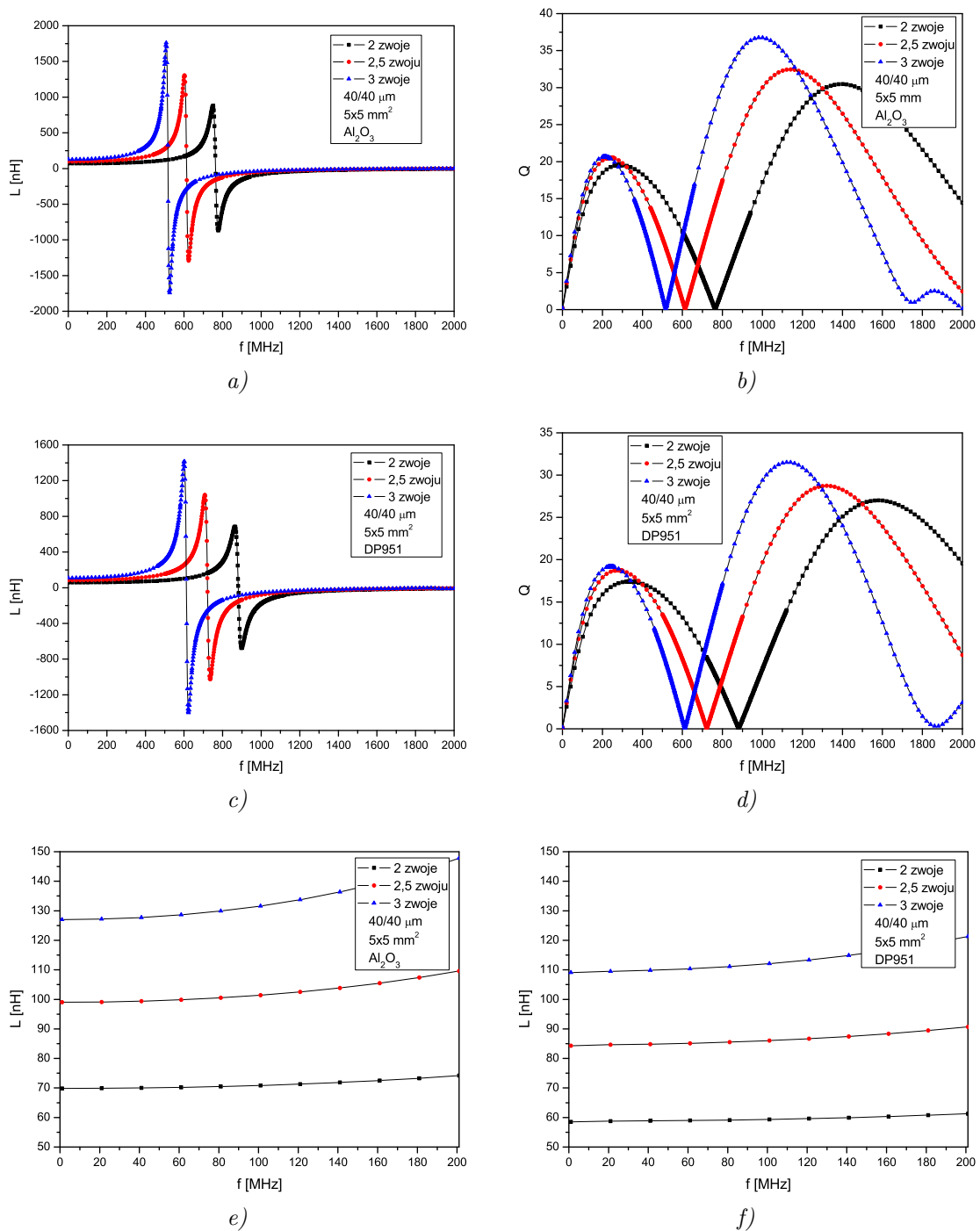
Tabela 5.8. Wpływ liczby zwojów na parametry elektryczne cewki (2)

Szerokość ścieżki/odstęp między zwojami					40/40 $\mu\text{m}$
Wymiary zewnętrzne					5×5 $\text{mm}^2$
Liczba zwojów	Podłoże	L [nH] dla 41 MHz	$f_{rez}$ [MHz]	$Q_{max}$	$f(Q_{max})$ [MHz]
2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	69,94	762	19,54	288
2,5		99,4	613	20,52	240
3		127,73	517	20,66	212
2	DP951	58,87	881	17,42	335
2,5		84,82	722	18,75	276
3		109,81	613	19,18	242

Większa liczba zwojów w cewce powoduje zwiększenie jej indukcyjności oraz minimalny wzrost dobroci. Indukcyjność cewki wzrasta na skutek zwiększenia strumienia pola magnetycznego pochodzącego od kolejnych zwojów. Z drugiej strony większa liczba zwojów przekłada się na większą rezystancję szeregową, stąd częstotliwość rezonansowa oraz częstotliwość, przy której występuje maksymalna dobroć, zmniejszają się. Zatem układy elektroniczne pracujące w wysokich częstotliwościach wymagają cewek o jak najmniejszej liczbie zwojów.



Rys. 5.9. Indukcyjność i dobroć cewki przy różnej liczbie zwojów (1)



Rys. 5.10. Indukcyjność i dobroć cewki przy różnej liczbie zwojów (2)



- **Wpływ powierzchni struktury na indukcyjność i dobroć cewki**

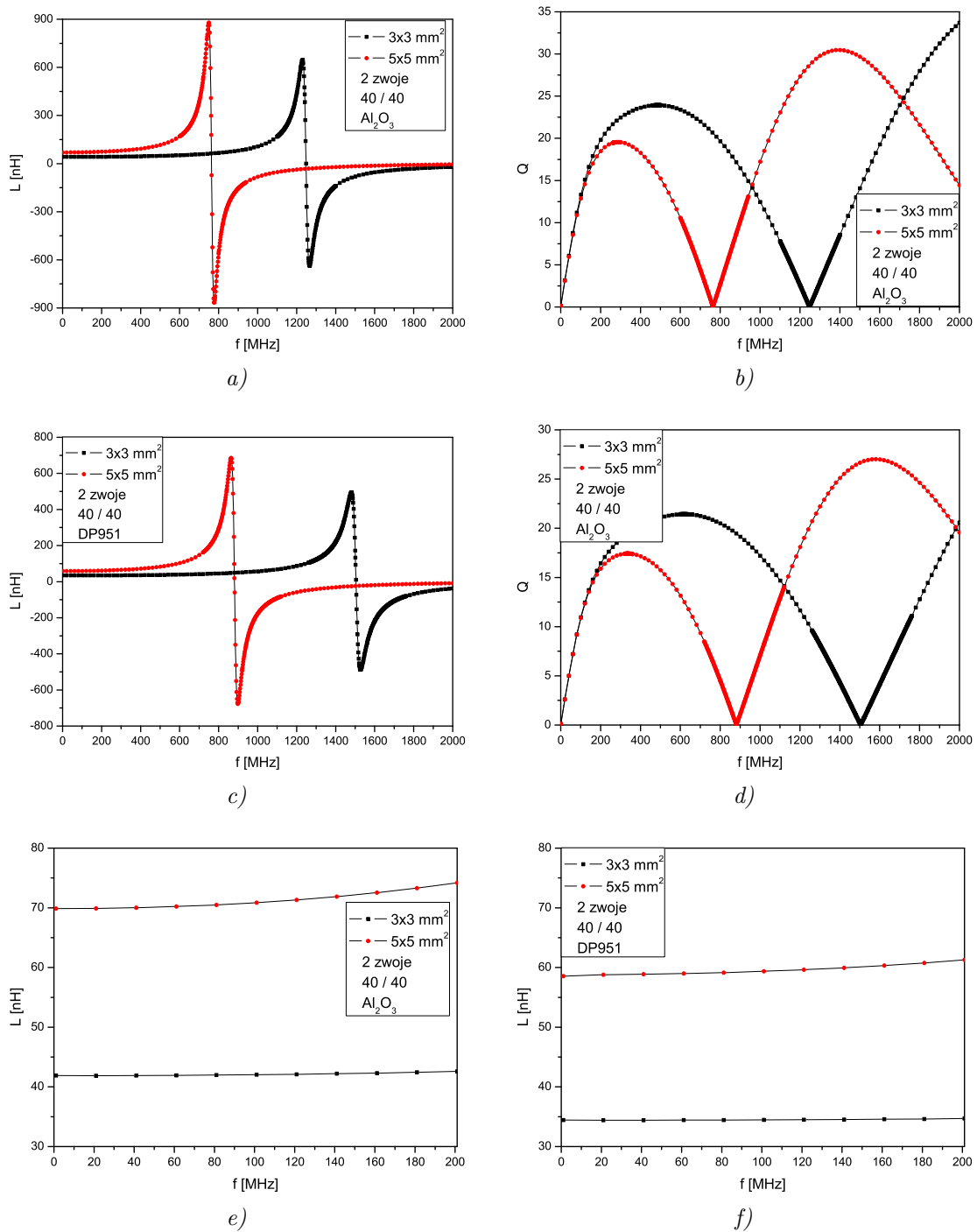
W tym punkcie przedstawiono wpływ wymiaru zewnętrznego cewki na indukcyjność oraz dobroć. Symulowano cewki o wymiarach  $3 \times 3 \text{ mm}^2$  oraz  $5 \times 5 \text{ mm}^2$ . W tabeli 5.9 i na rys. 5.11 przedstawiono wyniki symulacji.

Tabela 5.9. Wpływ powierzchni na indukcyjność i dobroć cewki

Szerokość ścieżki/odstęp między zwojami					40/40 $\mu\text{m}$
Liczba zwojów					2
Wymiary zewnętrzne	Podłoże	L [nH] dla 41 MHz	$f_{rez}$ [MHz]	$Q_{max}$	$f(Q_{max})$ [MHz]
$3 \times 3 \text{ mm}^2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	41,86	1248	23,92	487
$5 \times 5 \text{ mm}^2$		69,94	762	19,54	288
$3 \times 3 \text{ mm}^2$	DP951	34,43	1504	21,43	619
$5 \times 5 \text{ mm}^2$		58,87	881	17,42	335

Zwiększenie wymiarów struktury powoduje zwiększenie całkowitego strumienia w polu cewki. Zgodnie z zal. (5.1) przekłada się to na większą wartość indukcyjności. Jednocześnie większa struktura oznacza dłuższe zwoje, a więc i większą rezystancję szeregową. Stąd ponownie mniejsza dobroć i częstotliwość rezonansowa elementu.

Z analizy wyników symulacji jest również widoczne, że przy takiej samej geometrii struktury większą indukcyjność mają cewki na podłożach  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Jednocześnie z uwagi na mniejszą pojemność pasożytniczą częstotliwość rezonansowa jest wyższa dla struktur na podłożach LTCC.



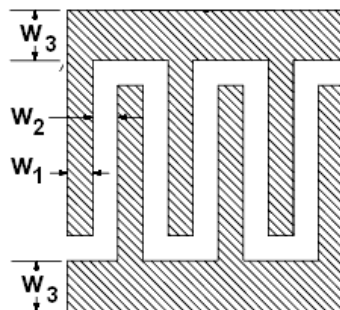
Rys. 5.11. Indukcyjność i dobroć cewki dla różnych wymiarów struktury

### Kondensatory palczaste

Symulacje numeryczne kondensatorów palczastych przeprowadzono dla struktur o następujących parametrach geometrycznych (rys. 5.12):

- Szerokość palców/odległość między palcami ( $w_1/w_2$ ): 20/20, 30/30, 40/40 oraz 50/50  $\mu\text{m}$

- Szerokość wspólnej bocznej elektrody:  $w_3 = 150 \mu\text{m}$
- Wymiary zewnętrzne:  $3 \times 3$  oraz  $5 \times 5 \text{ mm}^2$



Rys. 5.12. Wymiary kondensatora palczastego

Parametry podłoża oraz warstwy dielektrycznej i warunki symulacji zastosowano takie same jak dla cewek indukcyjnych.

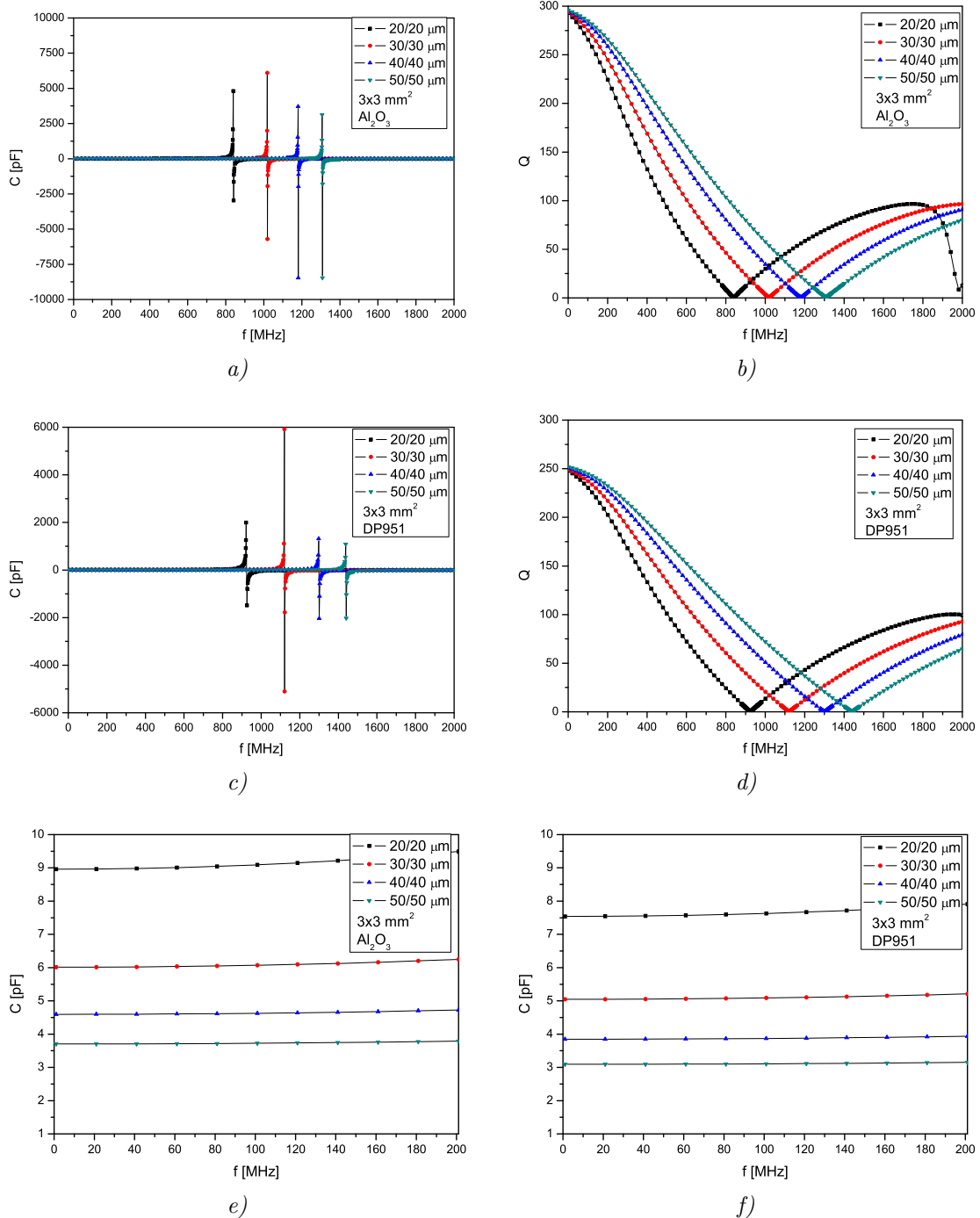
- **Wpływ szerokości ścieżki i odstępów między palcami na pojemność i dobroć kondensatora**

W tym punkcie przedstawiono zależność parametrów elektrycznych kondensatora od szerokości elektrod palczastych oraz odstępów między nimi. Symulację przeprowadzono w takim zakresie częstotliwości, aby pokazać pierwszą częstotliwość rezonansową. Dobroć wyznaczano dla  $1/10 f_{rez}$ . W tabeli 5.10 i na rys. 5.13 przedstawiono wyniki symulacji.

Tabela 5.10. Wpływ szerokości palców oraz odstępów między nimi na parametry elektryczne kondensatora

Wymiary zewnętrzne				$3 \times 3 \text{ mm}^2$
Szerokość/odstęp palców	Podłoże	C dla 41 MHz [pF]	$f_{rez}$ [MHz]	Q( $1/10 f_{rez}$ )
20/20 $\mu\text{m}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	8,98	839	271,19
30/30 $\mu\text{m}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	6,02	1017	274,77
40/40 $\mu\text{m}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	4,60	1180	278,05
50/50 $\mu\text{m}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	3,70	1307	280,10
20/20 $\mu\text{m}$	DP951	7,55	923	232,31
30/30 $\mu\text{m}$	DP951	5,05	1120	235,30
40/40 $\mu\text{m}$	DP951	3,85	1299	238,16
50/50 $\mu\text{m}$	DP951	3,09	1439	240,22

Zmniejszenie szerokości palców i odstępów między nimi powoduje wyraźne zwiększenie pojemności kondensatora przy tej samej powierzchni struktury. Większa liczba palców umożliwia m.in. zgromadzenie większego ładunku w przełożeniu na jednostkową



Rys. 5.13. Pojemność i dobroć kondensatora dla różnych szerokości i odstępów między palcami

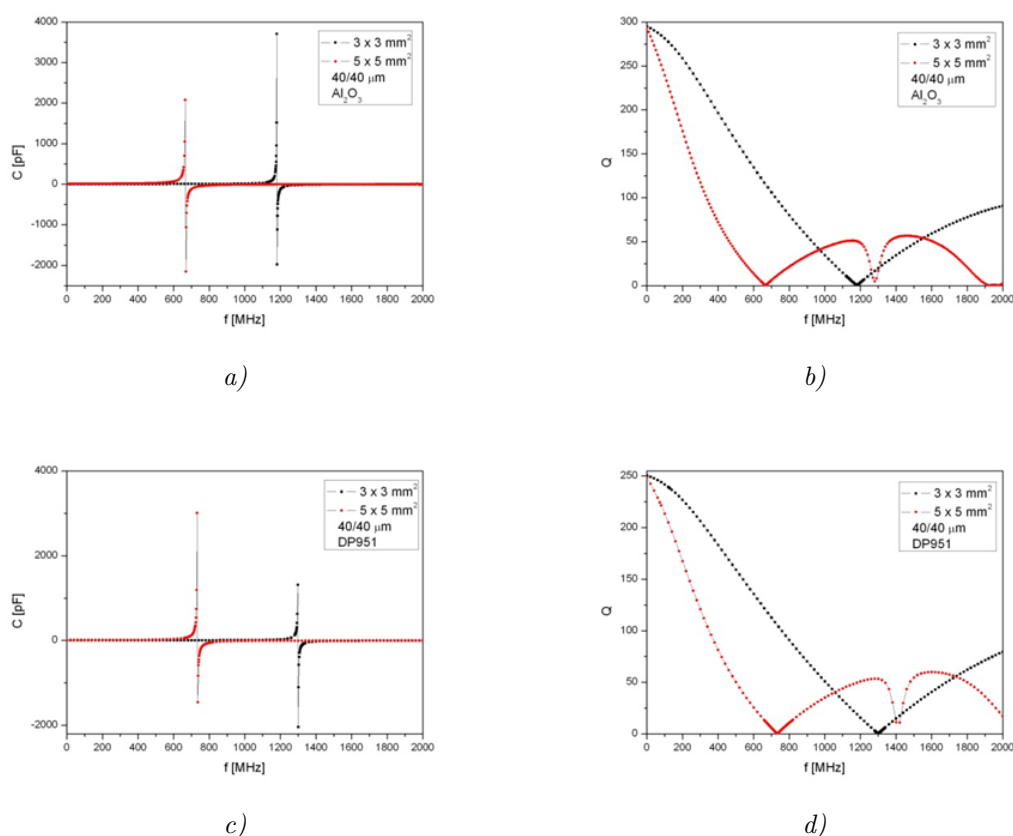
powierzchnię. Z drugiej strony zmniejsza się częstotliwość rezonansowa elementu. Związane jest to ze zwiększeniem równoważnej rezystancji szeregowej kondensatora (ESR, ang. *Equivalent Series Resistance*). Rezystancja ta wynika ze skończonej przewodności właściwej materiału elektrod kondensatora.

• **Wpływ powierzchni kondensatora na pojemność i dobroć**

Poniżej przedstawiono wpływ wymiarów zewnętrznych kondensatora palczastego na pojemność i dobroć. Symulację przeprowadzono dla dwóch wymiarów,  $3 \times 3 \text{ mm}^2$  oraz  $5 \times 5 \text{ mm}^2$ , przy stałej szerokości palców i odstępnie między nimi. Wyniki przedstawiono w tabeli 5.11 i na rys. 5.14.

Tabela 5.11. Wpływ wymiarów zewnętrznych na parametry elektryczne kondensatora

Wymiary	Szerokość/odstęp palców	Podłoże	C dla 41 MHz [pF]	$f_{rez}$ [MHz]	$Q(1/10 f_{rez})$
$3 \times 3 \text{ mm}^2$	40/40 $\mu\text{m}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	4,60	1180	278,05
$5 \times 5 \text{ mm}^2$	40/40 $\mu\text{m}$		13,23	668	259,25
$3 \times 3 \text{ mm}^2$	40/40 $\mu\text{m}$	DP951	3,85	1299	238,16
$5 \times 5 \text{ mm}^2$	40/40 $\mu\text{m}$		11,12	733	224,35



Rys. 5.14. Pojemność i dobroć kondensatora dla różnych wymiarów zewnętrznych

Zwiększenie powierzchni kondensatora przy zachowaniu szerokości palców i odstępów między nimi powoduje, jak w poprzednim przypadku, możliwość zgromadzenia większego ładunku. Analogicznie więc uzyskuje się większą pojemność kondensatora kosztem zmniejszenia jego dobroci i częstotliwości rezonansowej.

Widoczny jest wpływ rodzaju podłoża na pojemność struktur. Większą pojemność przy takiej samej geometrii mają kondensatory na podłożach  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Spowodowane jest to większą względną przenikalnością elektryczną podłoża i w tym wypadku większą jego grubością.

## 5.2. Wytwarzanie struktur testowych

Struktury testowe cewek i kondensatorów wykonano, podobnie jak rezystory, z wykorzystaniem techniki fotoformowania oraz mikroobróbki laserowej. Zaplanowano realizację struktur, których geometria będzie zbieżna z geometrią wybranych modeli numerycznych przedstawionych w rozdziale 5.1. Do wytworzenia techniką fotoformowania zaprojektowano cewki i kondensatory o następujących parametrach geometrycznych:

- Szerokość ścieżki/odstęp między ścieżkami: 30/30, 40/40, 50/50  $\mu\text{m}$
- Wymiar zewnętrzny:  $3 \times 3 \text{ mm}^2$
- Liczba zwojów cewki: 2, 3

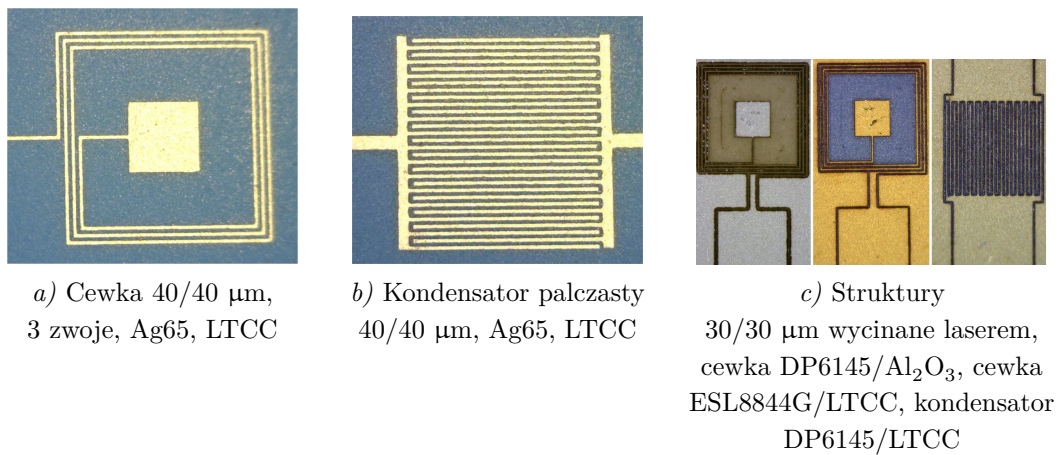
Jako podłoża zastosowano standardową ceramikę alundową o grubości 635  $\mu\text{m}$  oraz folię LTCC DP951 firmy DuPont. Podłoża LTCC składano z 2 warstw surowej folii o grubości 165  $\mu\text{m}$ . Po laminacji podłoża wypalono w piecu strefowym z profilem  $T_{max} = 875^\circ\text{C}$ .

Na tak przygotowane podłoża nanoszono sitodrukiem światłoczułą srebrową pastę przewodzącą Ag65 (ITME) i poddawano ją suszeniu. Następnie naświetlano struktury przez odpowiednie maski i wywołymano. Struktury wypalano w piecu z profilem  $T_{max} = 850^\circ\text{C}$ , 60 min.

Struktury wytwarzane metodą obróbki laserowej wykonano na takich samych podłożach jak wyżej. Zaplanowano struktury:

- Szerokość ścieżki/odstęp między ścieżkami: 30/30, 50/50  $\mu\text{m}$
- Wymiar zewnętrzny:  $3 \times 3 \text{ mm}^2$
- Liczba zwojów cewki: 3

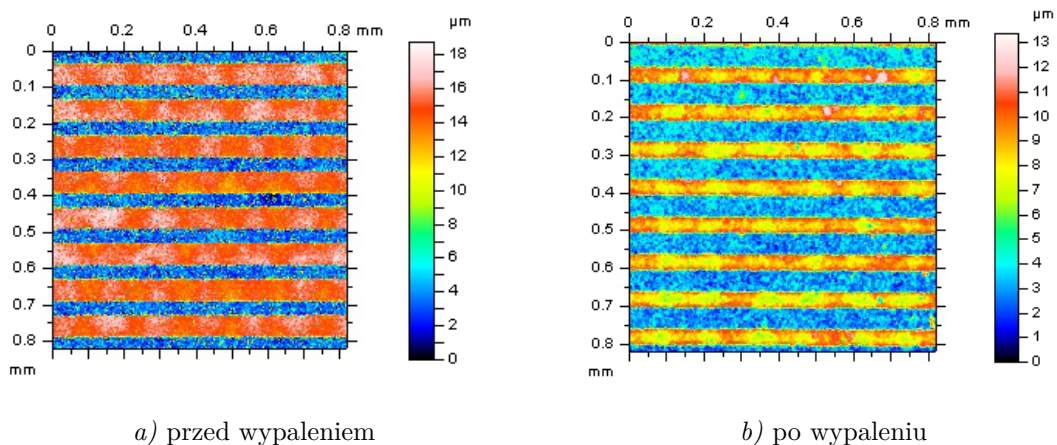
Jako materiały przewodzące zastosowano pastę na bazie srebra DP6145 (DuPont) i na bazie złota ESL8844G (ElectroScience Lab.). Pasty te nanoszono na podłoża sitodrukiem w postaci pola o wymiarach  $5 \times 10 \text{ mm}^2$ , suszono i wypalano stosując profil  $T_{max} = 850^\circ\text{C}$ , 60 min. Wycinanie laserem przeprowadzono w Instytucie Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej. Zastosowano pikosekundowy ( $\tau_{imp} = 10 \text{ ps}$ ) system laserowy Duetto firmy Time-Bandwith. Źródłem promieniowania jest laser na ciele stałym Nd:YAG o długości fali  $\lambda = 1064 \text{ nm}$ . Średnica plamki lasera wynosiła 30  $\mu\text{m}$ , energia impulsu wynosiła  $E = 8 \mu\text{J}$ , częstotliwość impulsów  $f = 200 \text{ kHz}$ , szybkość skanowania głowicy  $v = 100 \text{ mm/s}$ . Na rys. 5.15 przedstawiono wybrane struktury testowe cewek i kondensatorów.



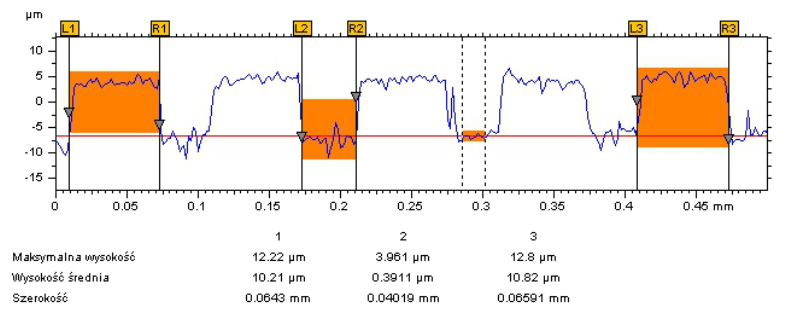
Rys. 5.15. Struktury testowe cewek i kondensatorów grubowarstwowych i LTCC

### 5.3. Właściwości geometryczne

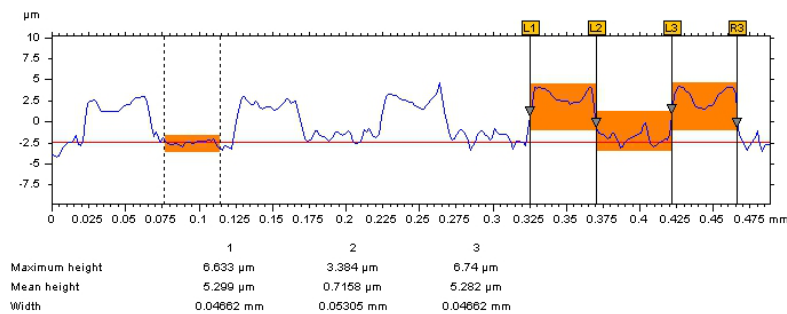
Pomiary właściwości geometrycznych struktur prowadzono za pomocą profilometru optycznego TalySurf CCI firmy Taylor Hobson oraz mikroskopu konfokalnego firmy Olympus. Zmierzono rozkłady grubości elementów oraz ich wymiary planarne. Jak wspomniano w rozdziale dotyczącym wytwarzania rezystorów metodą fotoformowania, charakterystyczną cechą past światłoczułych jest ich znaczący skurcz podczas procesu wypalania. Na rys. 5.16 i 5.17 przedstawiono profile 2D oraz przekroje poprzeczne dla struktur wykonanych z pasty Ag65 na podłożu DP951, przed i po procesie wypalania. Widoczne są znaczące różnice w szerokościach ścieżek i odstępów między nimi. Obliczony skurcz szerokości ścieżek wyniósł 30%. Z kolei na szerokość ścieżki po wy-

Rys. 5.16. Profile 2D kondensatorów palczastych Ag65/LTCC 50/50  $\mu\text{m}$ 

wołaniu oprócz wartości projektowanej wpływa jeszcze kilka ważnych czynników. Są to: a) dokładność wykonania maski do naświetlania, b) błąd wynikający z podświetlania wzoru pod maską przy zbyt długiej ekspozycji lub przez słaby kontakt maski z nanie-



a) przed wypaleniem



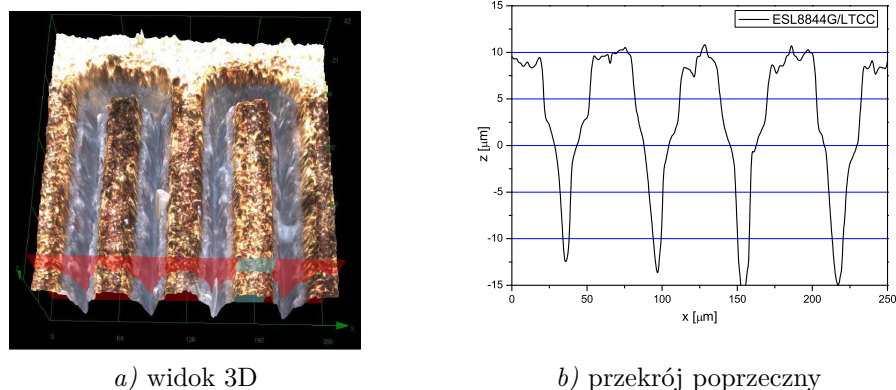
b) po wypaleniu

Rys. 5.17. Profile poprzeczne kondensatorów palczastych Ag65/LTCC 50/50 μm

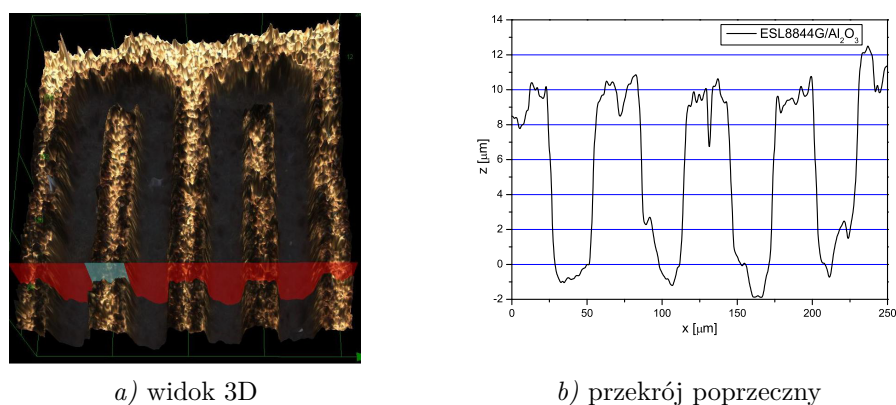
sioną warstwą, c) rozmywanie wzoru podczas wypłukiwania z powodu niewystarczającego wysuszenia warstwy, krótkiego czasu naświetlania wzoru lub zbyt długiego czasu płukania. Zaletą tej techniki jest jednak bardzo dobra jakość krawędzi. Kąt między płaszczyzną podłoża a powierzchnią boczną jest zbliżony do 90°.

Zaletą mikroobróbki laserowej jest duża precyzja i powtarzalność wykonywanych wzorów. Na rysunkach 5.18 i 5.19 przedstawiono profile 3D i przekroje poprzeczne struktur kondensatorów palczastych wykonanych tą metodą. Widoczne jest zwięzanie się nacięcia wraz z jego głębokością. Jest to spowodowane m.in. trudniejszym odprowadzaniem usuwanego materiału z większej głębokości. Widoczne jest również zróżnicowanie w głębokości nacięcia podłoża przy takich samych parametrach wiązki laserowej; podłoże alundowe zostało wybrane do głębokości około 2 μm, natomiast podłoże LTCC do ponad 10 μm.





Rys. 5.18. Profile kondensatorów palczastych ESL8844G/LTCC – obróbka laserowa



Rys. 5.19. Profile kondensatorów palczastych ESL8844G/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – obróbka laserowa

## 5.4. Parametry elektryczne

Charakterystyki elektryczne cewek indukcyjnych i kondensatorów mierzono metodą spektroskopii impedancyjnej [110–113] w Wydziałowym Zakładzie Metrologii Mikro- i Nanostruktur. Wykorzystano analizator impedancji Agilent 4294A. Pomiarów prowadzono w zakresie temperatury od 25°C do 450°C.

### Cewki indukcyjne

Cewki indukcyjne mierzono w następujących warunkach:

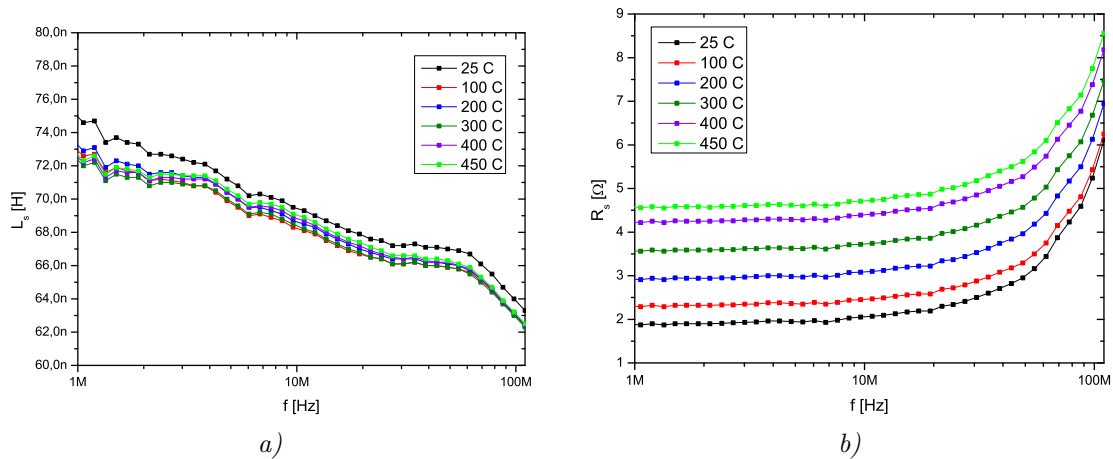
- zakres częstotliwości sygnału pobudzenia 1 kHz ÷ 110 MHz,
- rozdzielczość pomiaru – 10 punktów pomiarowych na dekadę,
- temperatura: 25, 100, 200, 250, 300, 350, 400, 450°C

Analizy danych pomiarowych dokonano za pomocą oprogramowania ZView2 firmy Scribner Associates [114]. Program umożliwia m.in. graficzną prezentację parametrów

w funkcji częstotliwości. Na podstawie zmierzonych widm wyznaczono indukcyjność, rezystancję szeregową i dobroć elementów testowych (dla szeregowego modelu zastępczego)(tab. 5.12 i 5.13).

Tabela 5.12. Parametry elektryczne cewek wycinanych laserem

T [°C]	30/30 $\mu\text{m}$ , DP6145, LTCC			30/30 $\mu\text{m}$ , ESL8844G, LTCC		
	$L_s$ [nH] f = 41 MHz	$R_s$ [ $\Omega$ ]	$Q = \omega L/R$ f = 110 MHz	$L_s$ [nH] f = 40 MHz	$R_s$ [ $\Omega$ ]	$Q = \omega L/R$ f = 110 MHz
25	69,2	2,0	7,1	71,2	6,9	4,2
100	68,0	2,4	6,9	71,2	8,9	3,5
200	68,5	3,1	6,2	71,6	11,4	2,9
300	68,2	3,7	5,7	72,1	13,9	2,5
400	68,6	4,2	5,2	71,7	16,6	2,2
450	68,8	4,7	5,0	71,4	18,0	2,0

Rys. 5.20. Indukcyjność i rezystancja cewki wycinanej laserem 30/30  $\mu\text{m}$ , DP6145, LTCC

Dla badanych struktur niezależnie od techniki wykonania stwierdzono słabą zależność indukcyjności od temperatury, z kolei rezystancja cewki silnie zależy od temperatury (rys. 5.20 – 5.22). Jest to spowodowane typowym dla metali wzrostem rezystancji szeregowej cewki wraz ze wzrostem temperatury. Wyznaczone wartości temperaturowego współczynnika rezystancji wynosiły odpowiednio 3720 ppm/°C dla pasty ESL8844G i 3170 ppm/°C dla pasty DP6145.

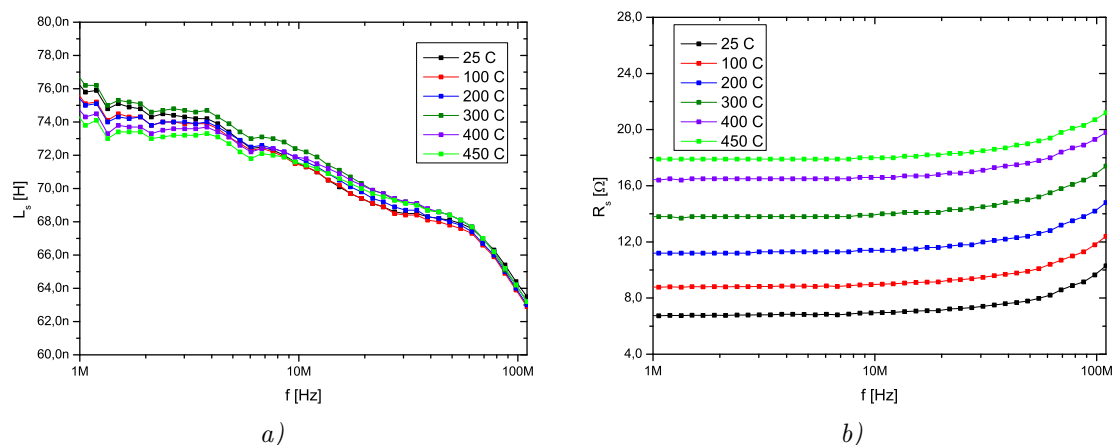
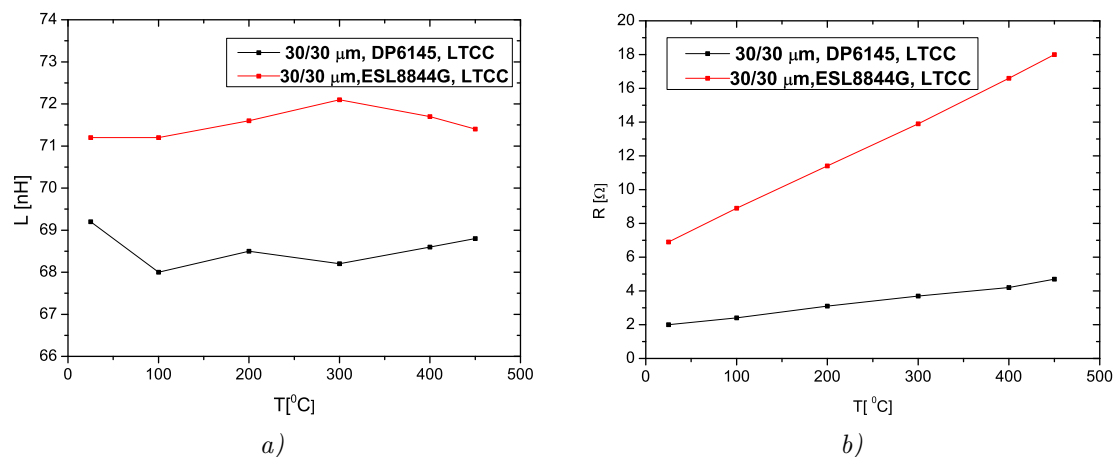
Rys. 5.21. Indukcyjność i rezystancja cewki wycinanej laserem 30/30  $\mu\text{m}$ , ESL8844G, LTCCRys. 5.22. Indukcyjność i rezystancja cewek w funkcji temperatury ( $f = 40 \text{ kHz}$ )

Tabela 5.13. Parametry elektryczne cewek z pasty światłoczułej Ag65

T [°C]	40/40 $\mu\text{m}$ , Ag65, LTCC, 2 zwoje			50/50 $\mu\text{m}$ , Ag65, $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 3 zwoje		
	$L_s$ [nH] f = 41 MHz	$R_s$ [ $\Omega$ ]	$Q = \omega L/R$ f = 110 MHz	$L_s$ [nH] f = 40 MHz	$R_s$ [ $\Omega$ ]	$Q = \omega L/R$ f = 110 MHz
25	33,6	2,9	14,8	60,2	2,9	18,3
100	33,6	3,6	12,8	60,1	3,5	16,3
200	33,5	4,5	10,8	59,6	4,3	13,8
250	33,8	5,0	9,9	59,7	4,8	12,8
300	34,4	5,5	9,0	59,8	5,3	11,8
350	34,6	6,0	8,5	59,9	5,8	11,0
400	33,8	6,5	8,0	60,0	6,3	10,2
450	33,9	7,0	7,5	59,4	6,8	9,6

## Kondensatory

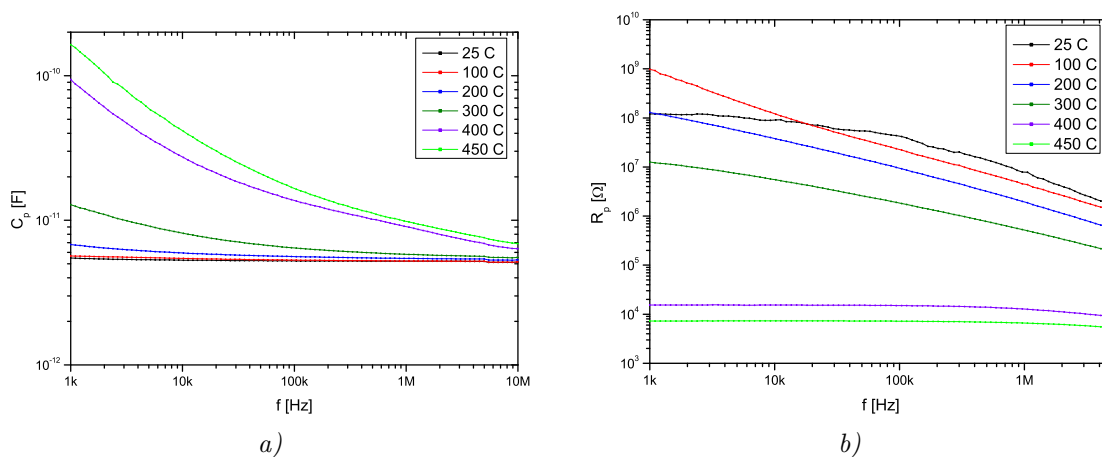
Kondensatory mierzone w następujących warunkach:

- zakres częstotliwości sygnału pobudzenia 1 kHz ÷ 110 MHz,
- rozdzielczość pomiaru – 20 punktów pomiarowych na dekadę,
- temperatura: 25, 100, 200, 250, 300, 350, 400, 450 °C

Na podstawie zmierzonych widm wyznaczono pojemność i rezystancję skrośną (dla równoległego modelu zastępczego) – (tab. 5.14 i 5.15).

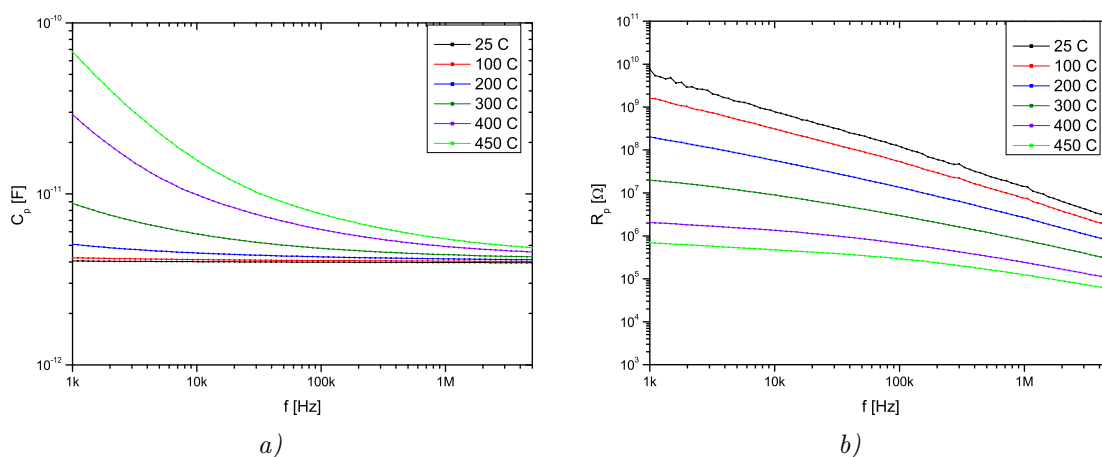
Tabela 5.14. Parametry elektryczne kondensatorów wycinanych laserem

T [°C]	30/30 μm, DP6145, LTCC		30/30 μm, ESL8844G, LTCC		30/30 μm, DP6145, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
	C <sub>p</sub> [pF] f = 10 kHz	R <sub>p</sub> [Ω]	C <sub>p</sub> [pF] f = 10 kHz	R <sub>p</sub> [Ω]	C <sub>p</sub> [pF] f = 10 kHz	R <sub>p</sub> [Ω]
25	5,3	9,1·10 <sup>8</sup>	4,0	7,6·10 <sup>8</sup>	6,0	1,6·10 <sup>8</sup>
100	5,4	2,4·10 <sup>8</sup>	4,1	3,0·10 <sup>8</sup>	6,1	1,9·10 <sup>8</sup>
200	5,9	3,7·10 <sup>7</sup>	4,5	5,6·10 <sup>7</sup>	6,5	2,5·10 <sup>7</sup>
300	8,1	5,4·10 <sup>6</sup>	5,8	8,8·10 <sup>6</sup>	8,0	3,6·10 <sup>5</sup>
400	27,2	15,3·10 <sup>3</sup>	9,8	1,3·10 <sup>6</sup>	25,1	7,6·10 <sup>3</sup>
450	41,2	7,3·10 <sup>3</sup>	15,6	4,7·10 <sup>5</sup>	31,5	3,8·10 <sup>3</sup>



Rys. 5.23. Pojemność i rezystancja skrośna kondensatora wycinanego laserem 30/30 μm, DP6145, LTCC

Kondensatory palczaste wykazywały bardzo silną zależność pojemności od temperatury, w szczególności w niższym zakresie częstotliwości (rys. 5.23 i 5.24). Jeszcze silniejszy był wpływ temperatury na rezystancję skrośną kondensatora, która w mierzonym zakresie temperatury zmieniała się o kilka rzędów wielkości.



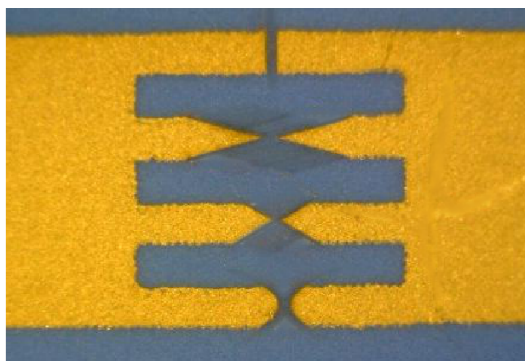
Rys. 5.24. Pojemność i rezystancja skrośna kondensatora wycinanego laserem 30/30  $\mu\text{m}$ , ESL8844G, LTCC

Tabela 5.15. Parametry elektryczne kondensatora z pasty światłoczułej Ag65

	40/40 $\mu\text{m}$ , Ag65, LTCC	
T [°C]	$C_p$ [pF] ( $f=10$ kHz)	$R_p$ [Ω]
25	2,8	$76 \cdot 10^6$
100	2,9	$69 \cdot 10^6$
200	3,0	$17 \cdot 10^6$
300	3,5	$3,1 \cdot 10^6$
350	4,2	$1,3 \cdot 10^6$
400	4,3	$6 \cdot 10^5$
450	8,8	$8 \cdot 10^4$

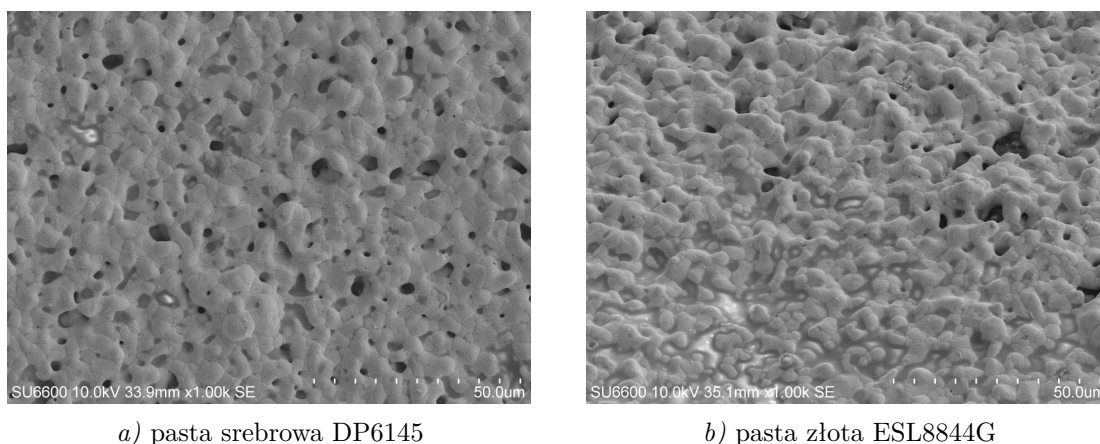
## 5.5. Właściwości mikrostrukturalne

W celu wyjaśnienia wpływu temperatury na parametry elektryczne struktur, w szczególności na upływność kondensatorów, zbadano ich właściwości mikrostrukturalne. Badania przeprowadzono dla struktur testowych ukształtowanych wiązką laserową. Przygotowano zestaw elektrod połączonych w układzie równoległym (rys. 5.25). Elektrody uformowano przez nacinanie wysuszonych warstw przewodzących z past DP6145 i ESL8844G na podłożach  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i LTCC. Zastosowano takie same parametry obróbki laserowej jak przy wytwarzaniu rezystorów grubowarstwowych (system laserowy LPKF ProtoLaser U, długość fali  $\lambda = 355$  nm, średnica plamki lasera około 25  $\mu\text{m}$ , moc lasera  $P = 1,1$  W, częstotliwość impulsów  $f = 200$  kHz, szybkość skanowania głowicy 1000 mm/s). Końcom naprzeciwległych elektrod nadano różną geometrię: prostokątną, ostrzową (kąt ostry 30° i 60°) oraz półokrągłą. Planowana odległość między elektrodami wynosiła 100  $\mu\text{m}$ .



Rys. 5.25. Struktury testowe elektrod ESL8844G/LTCC – powiększenie 60×

Analizę przeprowadzono za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) Hitachi SU6600 wyposażonego w mikrosondę rentgenowską do analizy EDS (ang. *Energy-dispersive X-ray spectroscopy*). Na rys. 5.26 przedstawiono obrazy SEM powierzchni wypalonych warstw. Widoczna jest ziarnista struktura warstw z licznymi mikroporami, wielkość ziaren w obu wypadkach jest rzędu pojedynczych mikrometrów. Ponadto



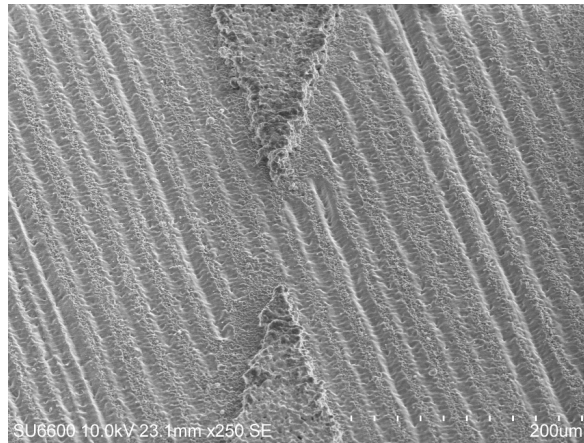
a) pasta srebrowa DP6145

b) pasta złota ESL8844G

Rys. 5.26. Wypalone warstwy przewodzące – powiększenie 1000x

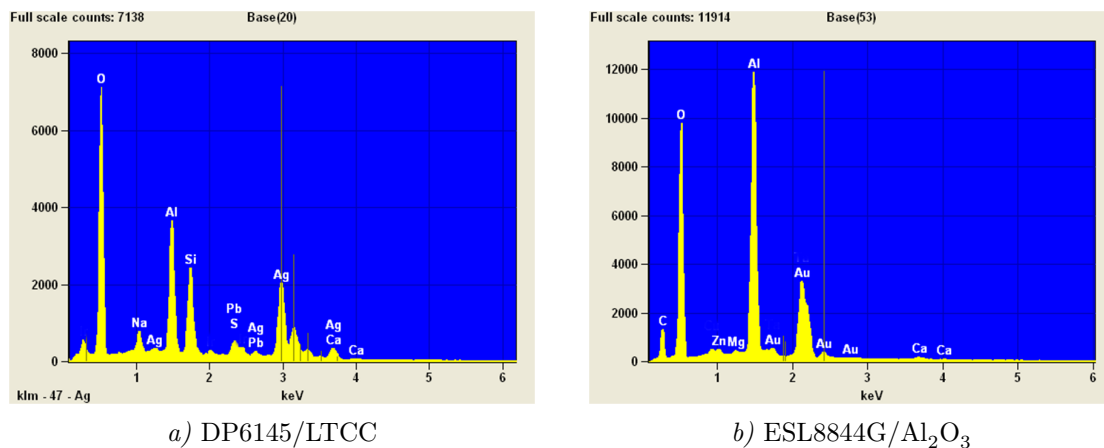
widoczne jest omawiane wcześniej dobre zdefiniowanie krawędzi warstwy przewodzącej oraz nacinanie podłoża podczas obróbki wiązką laserową (rys. 5.27).

Analizę rentgenowską przeprowadzono w obszarze obejmującym krawędź nacięcia z fragmentem warstwy przewodzącej. Analiza wykazała obecność pierwiastków chemicznych, których związki są powszechnie stosowane w kompozycjach grubowarstwowych (rys. 5.28). Oprócz metali fazy przewodzącej widoczne są pierwiastki wchodzące w skład szkliwa (fazy wiążącej) oraz podłoża. Są to glin i tlen dla podłoży alundowych oraz m.in. krzem i ołów występujące w ceramice LTCC [15, 115]. Mapy rozmieszczenia pierwiastków pokazują obecność srebra lub złota w obszarze poddawanych obróbce laserowej. Są to zarówno miejsca, które zostały pominięte podczas przemiatania powierzchni struktury wiązką laserową (z uwagi na pewien skończony czas włączania wiązki w wykorzystanym systemie laserowym), jak również obszary, które w obrazie SEM wydają się być dobrze oczyszczone z materiału przewodzącego. Mechanizm oddziały-



Rys. 5.27. Warstwa DP6145 na podłożu  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – powiększenie 250x

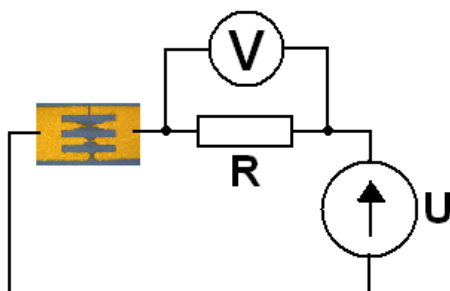
wania wiązki laserowej z przewodzącą warstwą grubą polega na lokalnym podgrzaniu i odparowaniu warstwy. Autor przypuszcza, że część materiału po odparowaniu ponownie osiadała na powierzchni podłoża (zaobserwowano równomierne rozłożenie pozostałości materiału na obrabianej powierzchni). Takie pozostałości materiałów metalicznych mogą niekorzystnie wpływać na właściwości elementów wykonywanych metodą obróbki laserowej. W wypadku rezystorów może to być obniżenie rezystywności warstwy nałożonej w obszar nacięcia, natomiast dla kondensatorów palczastych możliwe jest zwiększenie ich upływności, przez co zmniejszona zostaje dobroć elementu.



Rys. 5.28. Analiza składu warstw przewodzących

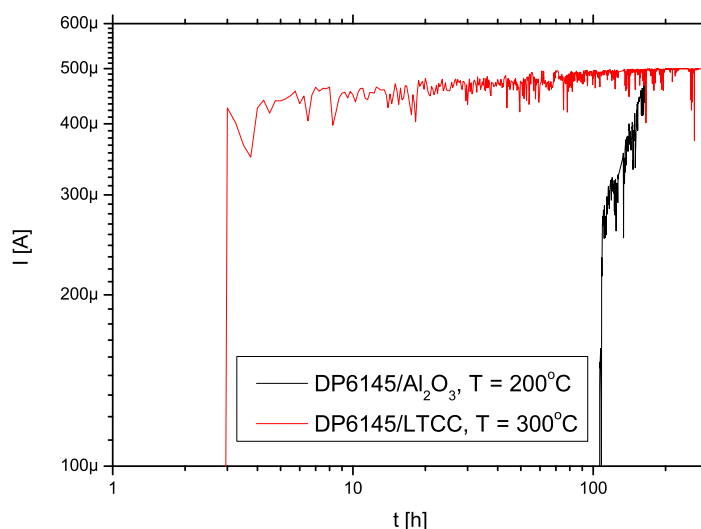
W następnym etapie przygotowane struktury poddano oddziaływaniu podwyższonej temperatury, kolejno  $200^\circ\text{C}$  i  $300^\circ\text{C}$  odpowiednio przez 160 i 250 godzin. Ponadto połowę struktur spolaryzowano napięciem stałym  $U = 50\text{ V}$ , podawanym z zasilacza stabilizowanego. W celu zabezpieczenia struktur przed ewentualnym zwarciem każdą z nich połączono szeregowo z rezystorem zabezpieczającym  $100\text{ k}\Omega$ ; rezystor ten służył ponadto do pomiaru napięcia tj. do określenia prądu w obwodzie (rys. 5.29).

Po 106 h pracy w temperaturze  $200^\circ\text{C}$  zaobserwowano istotne zwiększanie prądu w obwodzie ze strukturą z pasty srebrowej DP6145 na podłożu  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Początkowa



Rys. 5.29. Schemat układu pomiarowego

wartość natężenia prądu wyniosła  $140 \mu\text{A}$  i narastała stopniowo do wartości  $430 \mu\text{A}$ . Z kolei podczas starzenia w temperaturze  $300^\circ\text{C}$  już po upływie 3 h zaobserwowano silny wzrost prądu w obwodzie ze strukturą DP6145/LTCC. Jego natężenie wynosiło  $420 \mu\text{A}$  i po upływie kolejnych 4 godzin osiągnęło wartość  $470 \mu\text{A}$  (rys. 5.30). W tym samym czasie nie zaobserwowano zwiększenia prądu upływu w strukturach z pastą na bazie złota.



Rys. 5.30. Zmiany prądu w obwodzie podczas procesu starzenia

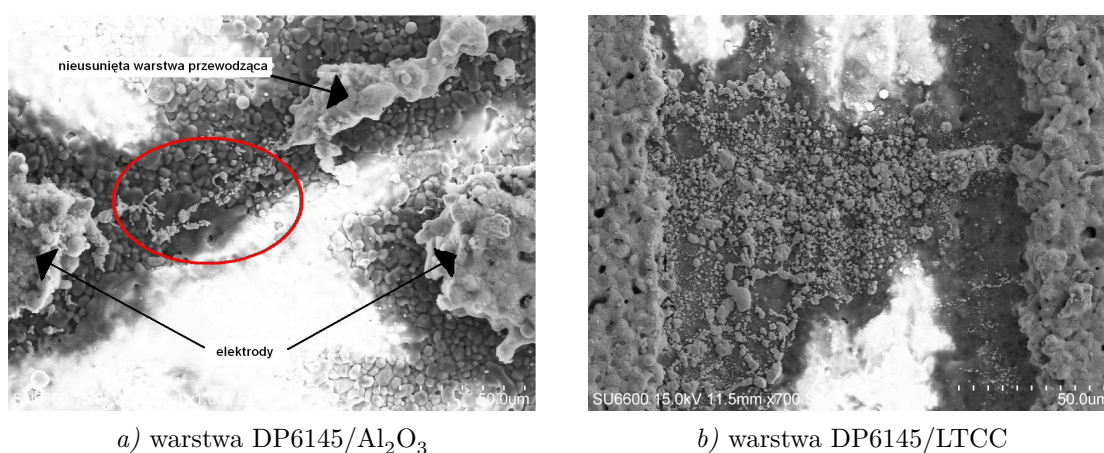
Tabela 5.16. Starzenie termiczne struktur testowych

Struktura testowa	Warunki starzenia	Wartość prądu w obwodzie
DP6145/ $\text{Al}_2\text{O}_3$	$U = 50 \text{ V}$ , $T = 200^\circ\text{C}$ , $t = 160 \text{ h}$	$I_{(t=106\text{h})} = 140 \mu\text{A} \nearrow I_{(t=110\text{h})} = 430 \mu\text{A}$
DP6145/LTCC	$U = 50 \text{ V}$ , $T = 200^\circ\text{C}$ , $t = 160 \text{ h}$	$I < 1 \mu\text{A}$
DP6145/LTCC	$U = 50 \text{ V}$ , $T = 200^\circ\text{C}$ , $t = 160 \text{ h}$ + $U = 50 \text{ V}$ , $T = 300^\circ\text{C}$ , $t = 250 \text{ h}$	$I_{(t=3\text{h})} = 420 \mu\text{A} \nearrow I_{(t=7\text{h})} = 470 \mu\text{A}$
ESL8844G/ $\text{Al}_2\text{O}_3$	$U = 50 \text{ V}$ , $T = 200^\circ\text{C}$ , $t = 160 \text{ h}$ + $U = 50 \text{ V}$ , $T = 300^\circ\text{C}$ , $t = 250 \text{ h}$	$I < 1 \mu\text{A}$
ESL8844G/LTCC	$U = 50 \text{ V}$ , $T = 200^\circ\text{C}$ , $t = 160 \text{ h}$ + $U = 50 \text{ V}$ , $T = 300^\circ\text{C}$ , $t = 250 \text{ h}$	$I < 1 \mu\text{A}$

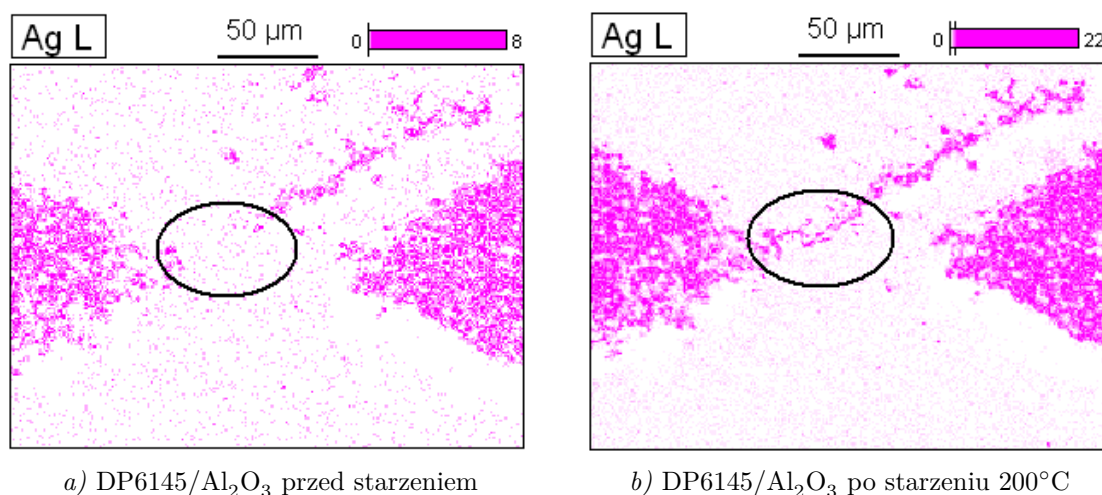
Po każdym etapie starzenia struktury testowe ponownie obserwowano za pomocą mikroskopu elektronowego. W strukturach niespolaryzowanych nie zaobserwowano wi-



docznych zmian w mikrostrukturze. Dla pozostałych struktur zlokalizowano obszary, w których wystąpiło zwarcie elektrod. W wypadku struktury na podłożu alundowym ścieżka przewodząca utworzyła się między jedną z elektrod a nieusuniętym fragmentem warstwy przewodzącej (rys. 5.31). Odległość między nimi wynosiła 50  $\mu\text{m}$ , co przekłada się na natężenie pola elektrycznego rzędu 1 kV/mm. Utworzenie ścieżki przewodzącej nastąpiło w wyniku elektromigracji [116, 117], tj. zjawiska transportu masy metalu w wyniku wymiany momentu pędu między termicznie wzbudzonymi jonami metalu i elektronami przewodnictwa w czasie przepływu prądu stałego. Analiza EDS potwierdziła obecność srebra w utworzonych ścieżkach (rys. 5.32).



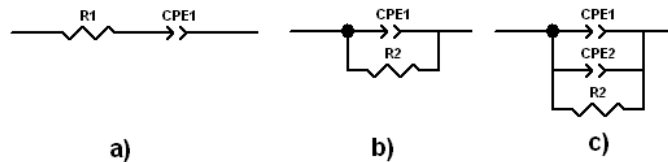
Rys. 5.31. Obszary zwarcia elektrod – obraz SEM



Rys. 5.32. Obszary zwarcia elektrod – mapy rozmieszczenia pierwiastków

## 5.6. Elektryczne modele zastępcze

Na podstawie analizy charakterystyk częstotliwościowych cewek i kondensatorów zaproponowano modele zastępcze (elektryczne obwody równoważne) badanych struktur pokazane na rys. 5.33.



Rys. 5.33. Model zastępczy cewki (a), kondensatora palczastego (b i c)

W skład modelu wchodzi:

- R1 – rezystancja szeregową warstwy przewodzącej
- R2 – rezystancja upływu kondensatora
- CPE – element stałofazowy o admitancji  $Y$  opisanej zależnością  $Y = Q(j\omega)^n$ , gdzie:  $Q, n$  – parametry modelu,  $j$  – jednostka urojona,  $\omega = 2\pi f$ . Dla  $n = 1$  element CPE jest kondensatorem bezstratnym o pojemności  $Q$ , dla  $n = 0$  jest rezystorem o rezystancji  $1/Q$ , natomiast dla  $n = -1$  CPE symbolizuje idealny element indukcyjny [114].

W tab. 5.17 przedstawiono parametry modelu zastępczego wybranych struktur cewek grubowarstwowych. Do ich wyznaczenia wykorzystano oprogramowanie ZView2.

Tabela 5.17. Parametry elektryczne modelu zastępczego cewek wycinanych laserem

T [°C]	30/30 $\mu\text{m}$ , DP6145, LTCC			30/30 $\mu\text{m}$ , ESL8844G, LTCC		
	R1 [ $\Omega$ ]	Q [ $s^n/\Omega$ ]	n	R1 [ $\Omega$ ]	Q [ $s^n/\Omega$ ]	n
25	1,9	$8,49 \cdot 10^6$	-0,971	6,7	$7,94 \cdot 10^6$	-0,968
100	2,3	$9,01 \cdot 10^6$	-0,973	8,8	$7,66 \cdot 10^6$	-0,966
200	2,9	$8,71 \cdot 10^6$	-0,971	11,2	$7,41 \cdot 10^6$	-0,965
300	3,6	$8,92 \cdot 10^6$	-0,973	13,8	$7,14 \cdot 10^6$	-0,963
400	4,2	$8,61 \cdot 10^6$	-0,971	16,5	$7,53 \cdot 10^6$	-0,966
450	4,6	$8,70 \cdot 10^6$	-0,972	17,9	$7,78 \cdot 10^6$	-0,968

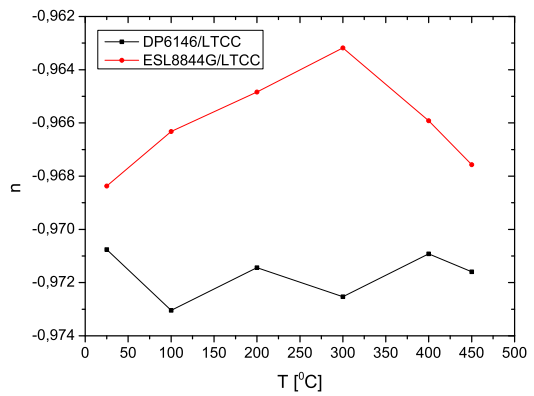
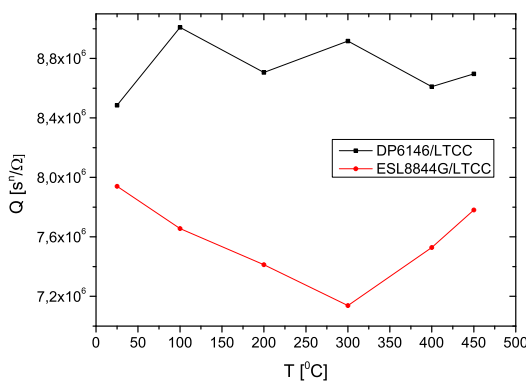
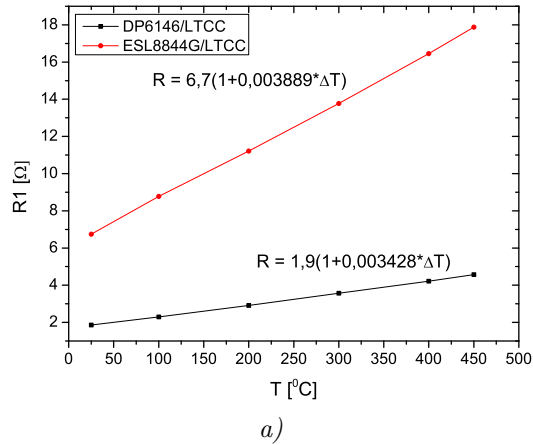
Rezystancje szeregową w modelu cewek są podobne do odczytanych bezpośrednio z danych pomiarowych (tab. 5.12). Występują pewne różnice w wartościach, przy czym należy pamiętać, że parametry te mają opisywać zachowanie modelu w całym zakresie częstotliwości. Wartości bezwzględne współczynnika  $n$  są mniejsze od 1, co oznacza, że cewki te nie są strukturami idealnymi. Dokonano również analizy wpływu temperatury na parametry modelu struktury (rys. 5.34). Potwierdzają one wcześniejsze obserwacje.

Tabela 5.18. Parametry elektryczne modelu zastępczego kondensatorów

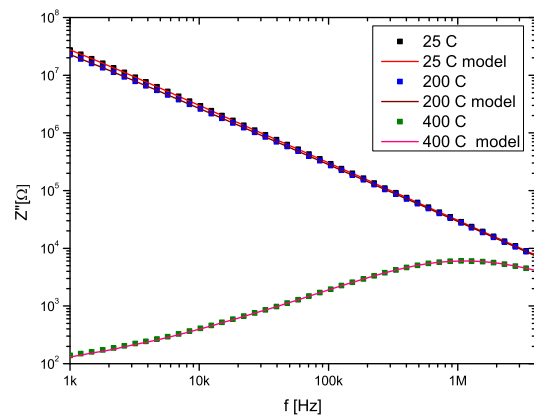
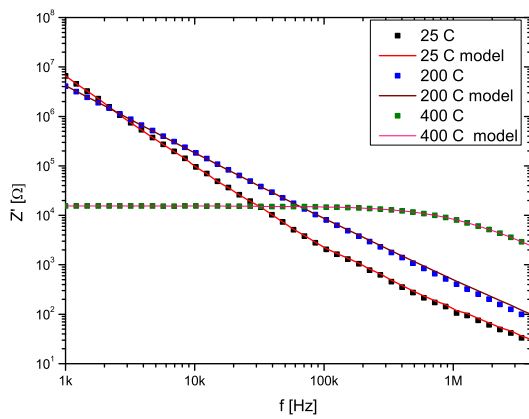
Struktura	T [°C]	$Q_1 [s^n/\Omega]$	$n_1$	$Q_2 [s^n/\Omega]$	$n_2$	R2 [ $\Omega$ ]
30 $\mu\text{m}/30 \mu\text{m}$ DP6145/LTCC	25	$5,56 \cdot 10^{-12}$	0,996	–	–	$1,23 \cdot 10^9$
	100	$5,69 \cdot 10^{-12}$	0,995	–	–	$1,24 \cdot 10^9$
	200	$7,28 \cdot 10^{-12}$	0,982	–	–	$1,09 \cdot 10^8$
	300	$6,45 \cdot 10^{-12}$	0,991	$8,09 \cdot 10^{-10}$	0,5	$3,10 \cdot 10^7$
	400	$1,51 \cdot 10^{-11}$	0,947	$7,17 \cdot 10^{-9}$	0,5	$1,58 \cdot 10^4$
	450	$1,73 \cdot 10^{-11}$	0,943	$8,21 \cdot 10^{-9}$	0,5	$7,44 \cdot 10^3$
30 $\mu\text{m}/30 \mu\text{m}$ ESL8844G/ $\text{Al}_2\text{O}_3$	25	$5,51 \cdot 10^{-12}$	0,998	–	–	$2,76 \cdot 10^9$
	100	$5,71 \cdot 10^{-12}$	0,997	–	–	$9,03 \cdot 10^8$
	200	$5,63 \cdot 10^{-12}$	0,998	–	–	$1,93 \cdot 10^8$
	300	$5,59 \cdot 10^{-12}$	0,999	$2,61 \cdot 10^{-11}$	0,5	$7,02 \cdot 10^7$
	400	$5,76 \cdot 10^{-12}$	0,998	$7,19 \cdot 10^{-11}$	0,5	$3,25 \cdot 10^7$
	450	$5,65 \cdot 10^{-12}$	0,999	$1,61 \cdot 10^{-10}$	0,5	$8,12 \cdot 10^6$

Widoczny jest liniowy przyrost rezystancji szeregowej wraz ze wzrostem temperatury oraz nieznaczny wpływ temperatury na parametry elementu stałofazowego CPE.

Kondensatory palczaste opisano za pomocą dwóch modeli równoważnych. W zakresie temperatury do 200°C struktury modelowano pojedynczym elementem stałofazowym CPE1. Dla wyższej temperatury model rozbudowano o dodatkowy element stałofazowy CPE2, który umożliwiał dokładniejsze dopasowanie modelu do zmierzonej charakterystyki. Wartość wykładnika  $n_2$  elementu CPE2 ustalono na równy 0,5 (taki element nazywany jest impedancją Warburga). Element CPE2 powiązано ze zjawiskiem dyfuzji nośników ładunku elektrycznego (jonów) w materiale podłoża, ujawniającym się szczególnie w zakresie niższych częstotliwości (sygnały zmienne o niższej częstotliwości penetrują materiał głębiej). Jeśli idzie o element CPE1, to wykładnik  $n_1$  nieznacznie różni się od 1. Jego mniejszą wartość zaobserwowano dla kondensatorów z pasty srebrowej na podłożu LTCC, stąd struktury te są bardziej stratne. Wynik ten można powiązać z większą migracją srebra oraz znaczącą degradacją podłoża w wyniku obróbki laserowej w porównaniu z podłożem  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Na rys. 5.35 porównano zmierzone charakterystyki impedancyjne kondensatora 30/30  $\mu\text{m}/\text{DP6145}/\text{LTCC}$  z wyznaczonymi modelami zastępczymi. Widoczne jest bardzo dobre dopasowanie modelu do parametrów elektrycznych struktury rzeczywistej.



Rys. 5.34. Parametry elektryczne modelu zastępczego cewek w funkcji temperatury



Rys. 5.35. Porównanie parametrów kondensatora 30/30  $\mu\text{m}$ /DP6145/LTCC z modelem zastępczym

## 5.7. Podsumowanie

W powyższym rozdziale przedstawiono wytwarzanie i właściwości miniaturowych kondensatorów i cewek grubowarstwowych i LTCC. Zaprojektowano i wykonano struk-

tury testowe przy wykorzystaniu metody past światłoczułych oraz metody obróbki laserowej. Przeprowadzono analizę numeryczną wpływu geometrii i właściwości materiałowych na parametry elementów. Zbadano wpływ rodzaju podłoża, materiału elektrod oraz geometrii na właściwości elementów w zakresie częstotliwości 1 kHz - 110 MHz oraz w szerokim zakresie temperatury 25 - 450°C. Przebadano właściwości mikrostrukturalne elementów oraz stabilność długoczasową struktur pojemnościowych w podwyższonej temperaturze i przy obciążeniu napięciowym. Zaproponowano elektryczne modele równoważne.

Zasadniczym celem prac było określenie możliwości wytworzenia i praktycznego zastosowania miniaturowych kondensatorów i cewek grubowarstwowych i LTCC. Wykonane kondensatory charakteryzowały się pojemnościami do kilku pF, natomiast uzyskane indukcyjności osiągały wartość kilkudziesięciu nH. Zastosowanie niestandardowych metod wytwarzania, podobnie jak w wypadku omawianych wcześniej rezystorów, umożliwia wytworzenie miniaturowych elementów o powtarzalnych i dobrze zdefiniowanych kształtach. Cewki grubowarstwowe wykazywały niewielką zależność indukcyjności od temperatury, przy jednoczesnej dużych zmianach rezystancji szeregowej elementu. Wadą kondensatorów palczastych była silna zależność parametrów od temperatury, w tym bardzo duża zmiana upływności. Przekłada się to na bardzo małą dobroć elementu w wysokiej temperaturze. Zaobserwowano dużą zbieżność wyników modelowania numerycznego i pomiarów rzeczywistych struktur – np. tabele 5.5 i 5.12, 5.10 i 5.14. Ewentualne różnice w wartościach indukcyjności i pojemności mogą wynikać z dokładności wykonania elementu. W modelu numerycznym ścieżki przewodzące posiadają idealny przekrój prostokątny. W rzeczywistych strukturach przekrój ścieżki jest trapezowy. Indukcyjność i pojemność badanych struktur zmienia się z częstotliwością. Związane jest to ze stratnością tych elementów (wartość wykładnika  $n$  elementu CPE w modelu zastępczym jest nieznacznie różna od 1).

## Rozdział 6

# Obudowa LTCC czujnika wodoru

Współczesne technologie mikroelektroniczne umożliwiają wytwarzanie różnych elementów i układów czynnych, w tym układów o wielkiej skali integracji. Układy te wymagają zazwyczaj odpowiedniej obudowy w celu stworzenia w pełni funkcjonalnego przyrządu. Krótki przegląd technik montażu przedstawiono w rozdziale 3.3. W poniższym rozdziale przedstawiono koncepcję i prototypową konstrukcję obudowy ceramicznej do czujnika wodoru na bazie SiC [118, 119]. Struktura czujnikowa została wytworzona w Wydziałowym Zakładzie Mikroelektroniki i Nanotechnologii Politechniki Wrocławskiej [120]. Konstrukcja obudowy winna spełniać następujące założenia:

- możliwość montażu struktur czujnikowych o rozmiarach 3 mm x 3 mm,
- maksymalna temperatura pracy 400°C,
- możliwość wykonania połączenia drutowego do kontaktów umieszczonych na powierzchni czujnika (kontakt omowy, wielowarstwy metaliczne kończące się warstwą złota),
- grzejnik umieszczony pod strukturą (potrzeba odizolowania obudowy od nadmiernego nagrzewania się),
- prowadzenie pomiarów przy ciśnieniu atmosferycznym z możliwością małych zmian w stronę wyższych jak i niższych ciśnień,

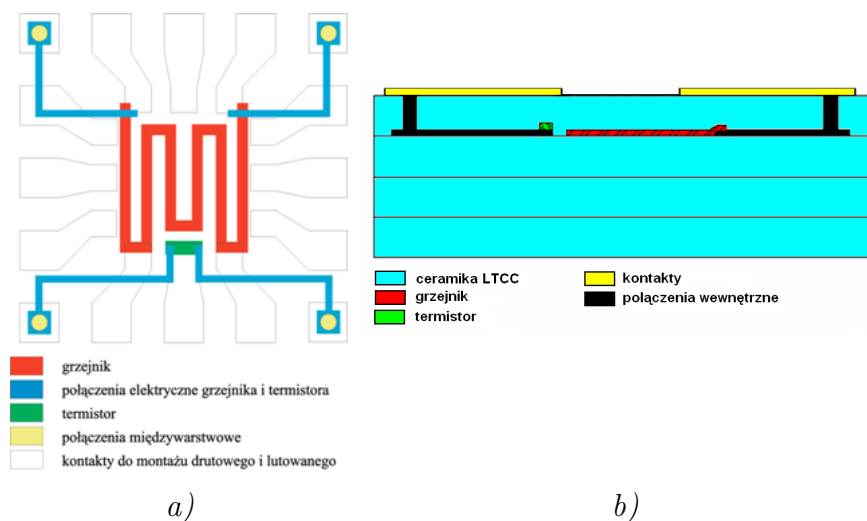
Zadaniem obudowy jest zapewnienie mechanicznej platformy zabezpieczającej czujnik przed uszkodzeniem mechanicznym, wyprowadzenie sygnałów elektrycznych oraz zapewnienie odpowiednich warunków termicznych do prawidłowej pracy. Obudowę zaprojektowano jako wielowarstwowy układ LTCC ze zintegrowanym grzejnikiem, czujnikiem temperatury i mozaiką ścieżek przewodzących. Konstrukcje tego typu są określane często jako tzw. obudowy inteligentne.

## 6.1. Projekt obudowy i analiza numeryczna właściwości elektrycznych i termicznych

Wykonanie struktury, która będzie spełniała zakładaną funkcjonalność, wymaga doboru odpowiednich parametrów geometrycznych, elektrycznych oraz przebiegu procesu wytwarzania. Następnie optymalizacja prototypu wymaga wielu testów i wprowadzania odpowiednich zmian w projekcie. Współcześnie, wykorzystując narzędzia projektowania wspomaganego komputerowo (*CAD - Computer Aided Design*), optymalizacja projektu może być przeprowadzona na jego modelu numerycznym bez potrzeby realizacji rzeczywistej struktury. Podczas symulacji numeryczny model produktu można poddać wielu testom komputerowym, których wykonanie w sposób eksperymentalny mogłoby wymagać znacznych nakładów finansowych lub czasowych. Oprócz bezpośrednich korzyści ekonomicznych, wynikających z projektowania numerycznego, przynosi ono korzyści wtórne, np. przez zmniejszenie liczby eksperymentów przyczynia się do ograniczenia emisji substancji szkodliwych dla środowiska naturalnego. W niniejszym podrozdziale przedstawiono koncepcję obudowy do czujnika wodoru oraz wyniki symulacji komputerowej prowadzonej przy użyciu pakietu narzędzi ANSYS v.11 [121].

### Projekt obudowy

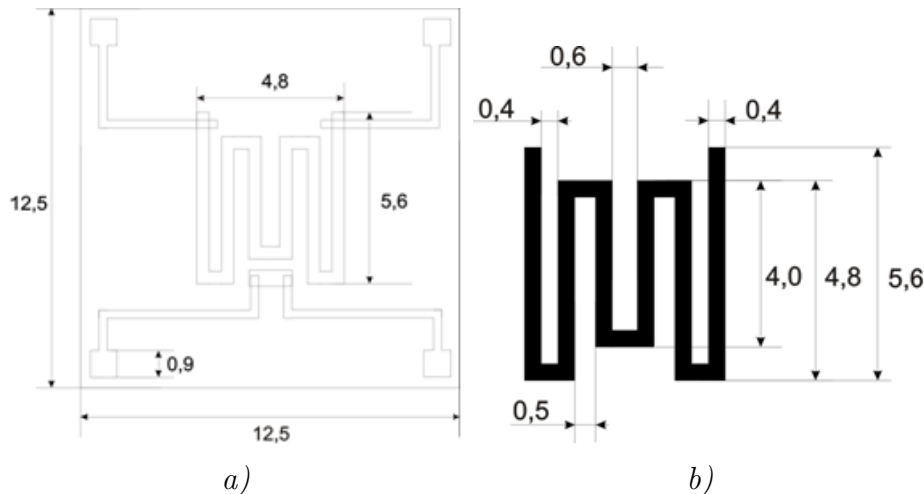
Obudowę zaprojektowano jako strukturę składającą się z czterech warstw ceramiki LTCC (rys. 6.1).



Rys. 6.1. Projekt obudowy a) widok z góry, b) przekrój

Dwie dolne warstwy wprowadzono w celu zwiększenia wytrzymałości mechanicznej obudowy. Na warstwie drugiej od góry zaplanowano wytworzenie grzejnika wraz z kontaktami oraz przewidziano miejsce na wykonanie zintegrowanego czujnika temperatury, np. termistora lub rezystora platynowego. W górnej warstwie zostaną wykonane połączenia międzywarstwowe, a na jej powierzchni będą naniesione kontakty do montażu

drutowego i lutowanego. Wymiary najważniejszych elementów (w mm) przedstawiono na rys. 6.2. Geometrię grzejnika wybrano na podstawie wyników przedstawionych w pracy [122]. Dodatkowo zaprojektowano osłonę wykonaną z ceramiki LTCC, której zadaniem jest zabezpieczenie przed zerwaniem delikatnych połączeń drutowych.



Rys. 6.2. Wymiary obudowy a) elementy zagrzebane, b) grzejnik

### Analiza numeryczna

Badanie rozkładu temperatury miało na celu określenie możliwości uzyskania odpowiednich warunków termicznych pracy czujnika, w tym jednorodnego rozkładu temperatury na jego powierzchni. Ponadto symulacje miały pokazać, jaki wpływ na rozkład temperatury ma dodanie osłony.

Do budowy modelu obudowy wykorzystano predefiniowany w środowisku ANSYS typ elementu SOLID98. Elementy te pozwalają na modelowanie struktur trójwymiarowych, w których objętość jest dzielona na tetragonalne elementy skończone. Po wprowadzeniu do programu geometrii testowanych struktur poszczególnym objętościom przypisano odpowiednie parametry materiałowe, zestawione w tabeli 6.1. Należy zwrócić uwagę, że określenie parametrów cieplnych struktur grubowarstwowych nie jest zadaniem trywialnym lecz wymaga specjalizowanych pomiarów i interpretacji, które m.in. od wielu lat są prowadzone w Zakładzie Systemów Elektronicznych i Telekomunikacyjnych Politechniki Rzeszowskiej [123, 124].

Źródłem ciepła jest zagrzebany grzejnik wykonany z pasty palladowo-srebrowej. Przyjęto grubość grzejnika równą  $15\ \mu\text{m}$ . Do połączenia czujnika z obudową użyto pasty grubowarstwowej bazującej na mikro- i nanometrowych ziarnach srebra (rozdz. 6.5) o grubości  $15\ \mu\text{m}$ . Dodatkowo przeprowadzono symulacje rozkładu temperatury na obudowie z zamontowaną strukturą szafirową. Dzięki temu można było porównać wyniki symulacji z pomiarami kamerą termowizyjną (rozdz. 6.4). Parametry szafiru przyjęto na podstawie noty katalogowej podłoża monokrystalicznego  $\text{Al}_2\text{O}_3$  firmy Ky-



ocera [109]. W symulacji uwzględniono zmianę rezystancji grzejnika pod wpływem temperatury (TWR = 460 ppm/K) [125].

Tabela 6.1. Zestawienie parametrów materiałowych stosowanych w symulacji [44, 109, 126, 127]

	LTCC	PdAg	nanoAg	SiC	szafir	miedź
Moduł Younga [GPa]	120	74	9	600	470	9
Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	3100	11000	10500	3200	3970	8920
$\alpha$ [ppm/K]	5,8	19,7	19	4,2	7,7	16,5
$\lambda$ [W/m·K]	3,3	74	240	490	42	401
$c_p$ [J/(kg·K)]	825	244	234	690	750	380
Emisyjność	0,92	-	-	0,5	0,5	0,07

Krokiem poprzedzającym wykonanie obliczeń było zadanie warunków brzegowych, określających w jaki sposób będzie odprowadzane ciepło. Założono, że odprowadzanie ciepła ze struktury będzie się odbywało na drodze konwekcji niewymuszonej i radiacji. Dodatkowo uwzględniono przewodnictwo cieplne połączeń z drutu miedzianego, lutowanych do pól kontaktowych na krawędzi struktury. Na potrzeby modelowania przyjęto atmosferę suchego powietrza o temperaturze 293 K.

Mechanizm wymiany ciepła przez radiację opisuje prawo Stefana-Boltzmann (6.1). Wynika z niego, że natężenie promieniowania cieplnego emitowanego przez powierzchnię jest proporcjonalne do czwartej potęgi temperatury [128].

$$\Phi(T) = \epsilon\sigma T^4 \quad (6.1)$$

gdzie:  $\Phi(T)$  - natężenie promieniowania,  $\epsilon$  - zdolność emisyjna,  $\sigma$  - stała Stefana-Boltzmann (5,7 x 10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>).

Oddawanie przez ciała energii drogą promieniowania cieplnego zależy także od emisyjności ciała, określającej zdolność powierzchni do emitowania energii w odniesieniu do ciała doskonale czarnego. Wartość emisyjności dla LTCC przyjęto jako 0,92 [127]. Dla SiC trudno jednoznacznie wyznaczyć wartość tego parametru, ponieważ zależy on między innymi od poziomu domieszkowania, chropowatości czy temperatury. Przyjęto, kierując się badaniami przedstawionymi w pracy [129], współczynnik emisyjności dla SiC oraz szafiru równy 0,5.

Konwekcja swobodna występuje wtedy, gdy w nieruchomym płynie lub gazie pojawi się różnica temperatury. Z powodu rozszerzalności cieplnej zmienia się gęstość medium. Jeśli istnieje pole grawitacyjne to pojawia się siła wyporu, która powoduje ruch medium. Płyn lub gaz poruszając się unosi ze sobą ciepło. Ten mechanizm wymiany ciepła opisuje równanie Newtona (6.2). Wynika z niego, że konwekcja jest proporcjonalna do różnicy temperatur opływającej powierzchni granicznej i opływającego ją gazu [128]

$$q = \alpha_K \Delta T \quad (6.2)$$

gdzie:  $q$  - natężenie strumienia cieplnego,  $\alpha_K$  - współczynnik konwekcji. Współczynnik konwekcji zależy od wielu parametrów procesu, w szczególności tych, które wpływają na grubość warstwy granicznej płynu lub gazu. W warstwie granicznej medium, zgodnie z teorią tej warstwy, leży bowiem główny opór wnikania ciepła. Do wyznaczania wartości współczynnika konwekcji wykorzystywana jest bezwymiarowa liczba Nusselta (6.3). Wyraża ona stosunek szybkości ruchu ciepła na drodze wnikania do szybkości ruchu ciepła na drodze przewodzenia [128]

$$Nu = \frac{\alpha_K l}{\lambda} \quad (6.3)$$

gdzie:  $\lambda$  - współczynnik przewodności cieplnej gazu,  $l$  - wymiar charakterystyczny. Dla konwekcyjnej wymiany ciepła z płaskiej płyty można przyjąć liczbę Nusselta w zależności od rodzaju przepływu określonego przez kryterium Grashofa (tabela 6.2).

Tabela 6.2. Wartości liczby Nusselta w zależności od rodzaju przepływu [16]

Rodzaj przepływu	Kryterium Grashofa	Liczba Nusselta
laminarny	$10^{-3} < Gr \cdot Pr < 5 \cdot 10^2$	$1,18(Gr \cdot Pr)^{0,125}$
mieszany	$5 \cdot 10^2 < Gr \cdot Pr < 2 \cdot 10^7$	$0,54(Gr \cdot Pr)^{0,25}$
turbulentny	$2 \cdot 10^7 < Gr \cdot Pr < 10^{13}$	$0,135(Gr \cdot Pr)^{0,33}$

Liczba Grashofa (6.4) wyraża stosunek siły wyporu do sił lepkości gazu. Natomiast liczba Prandtla (6.5) wyraża stosunek momentu dyfuzyjnego do dyfuzji na drodze termicznej.

$$Gr = \frac{\beta g l^3}{v^2} \Delta T \quad (6.4)$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda} \quad (6.5)$$

gdzie:  $\beta$  - współczynnik rozszerzalności objętościowej,  $g$  - przyspieszenie ziemskie,  $l$  - wymiar charakterystyczny,  $v$  - współczynnik lepkości kinematycznej,  $c_p$  - ciepło właściwe gazu,  $\mu$  - współczynnik lepkości dynamicznej.

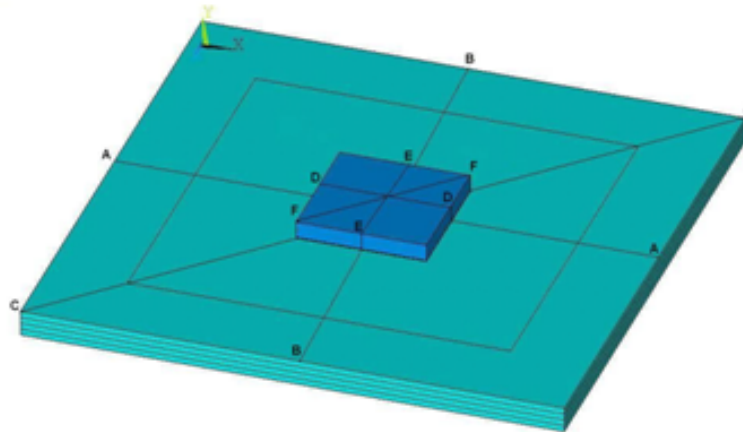
Liczba Prandtla zależy wyłącznie od parametrów gazu. Dlatego do obliczeń przyjęto stałą jej wartość,  $Pr = 0,708$ , będącą wartością charakterystyczną dla suchego powietrza [128]. Na podstawie przytoczonych powyżej wzorów obliczono współczynniki konwekcyjnej wymiany ciepła dla poszczególnych obszarów struktury. Współczynniki te zostały zebrane w tabeli 6.3.

Tabela 6.3. Wartości współczynnika konwekcji dla poszczególnych powierzchni

	Struktura bez osłony	Struktura z osłoną
Czujnik	23,4	23,4
Górna powierzchnia	23,6	23,6
Dolna powierzchnia	15,9	15,9
Osłona	-	16,9

### Analiza wyników

Na potrzeby modelowania przyjęto, że grzejnik zasilono napięciem stałym równym 4 V. Odpowiada to mocy 3,8 W. Rozkład temperatury dla każdej ze struktur przedstawiono w rzucie izometrycznym oraz na przekrojach przechodzących przez środek struktury (rys. 6.3). Poniżej przedstawiono wyniki przeprowadzonych symulacji. Wszystkie temperatury w tym podrozdziale podano w kelwinach.



Rys. 6.3. Przekroje do określenia rozkładu temperatury

Rysunek 6.4 przedstawia rozkład temperatury w stanie ustalonym w strukturze z zamontowanym czujnikiem z SiC. Na rysunku 6.5 przedstawiono rozkład temperatury w strukturze z zamontowanym czujnikiem z SiC i osłoną.

Symulacje pokazały jednorodność rozkładu temperatury na powierzchni czujnika wodoru z SiC. Nierównomierności rozkładu temperatury obliczono według zależności:

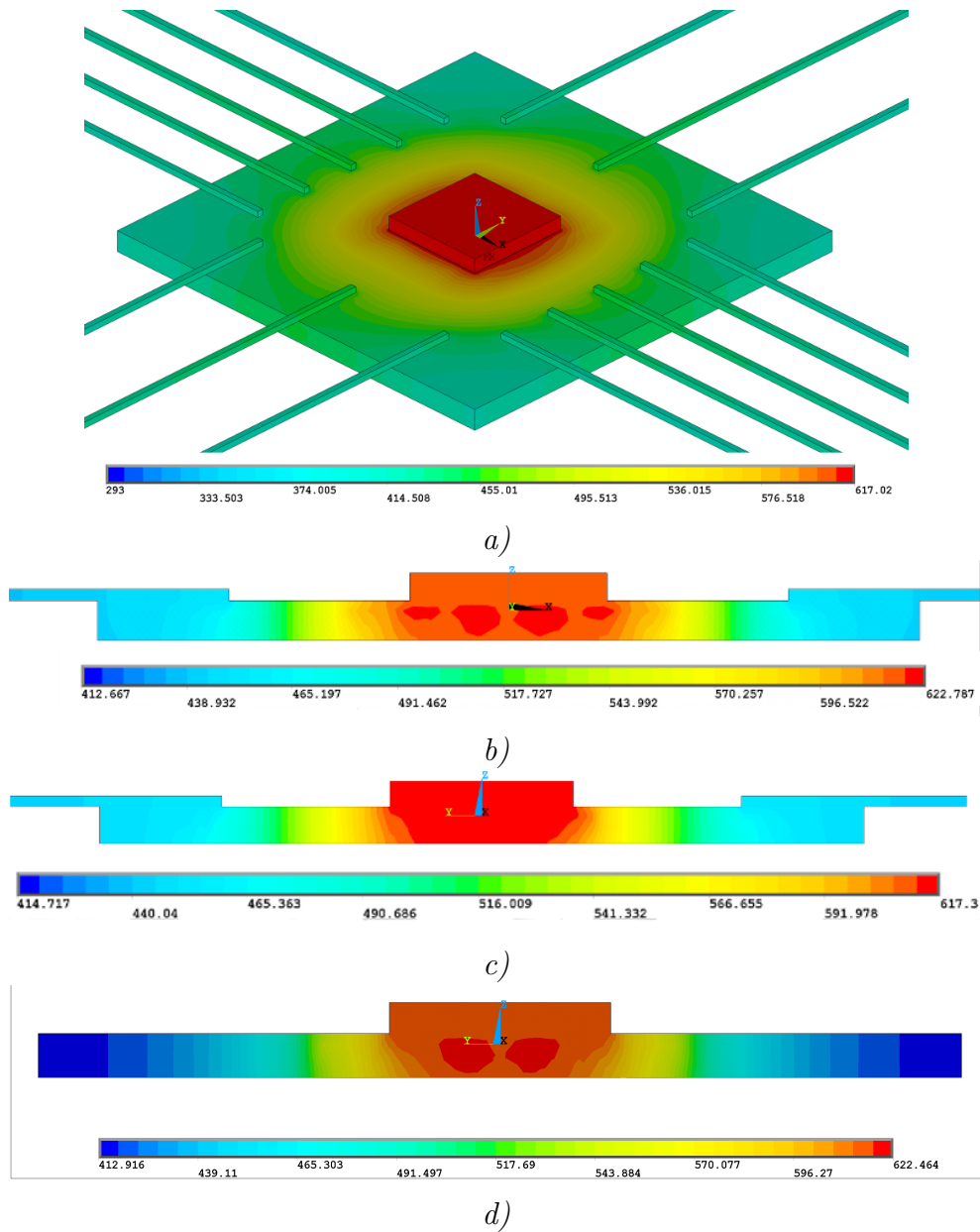
$$\delta T = \frac{\Delta T_{max} - \Delta T_{min}}{\Delta T_{max}} \quad (6.6)$$

gdzie:  $\Delta T_{max} = T_{max} - T_0$ ,  $\Delta T_{min} = T_{min} - T_0$ ,  $T_{max}$  - maksymalna temperatura na powierzchni roboczej struktury,  $T_{min}$  - minimalna temperatura na powierzchni roboczej struktury,  $T_0$  - temperatura odniesienia (wartości w K). W tabeli 6.4 zebrano wyniki dla wszystkich symulowanych struktur na przekrojach D-D, E-E oraz F-F. W środkowej części struktury, na przekroju E-E, grzejnik jest krótszy niż w pozostałych miejscach, co przyczynia się do niedogrzewania jednej z krawędzi. W miejscu tym ma się znajdować

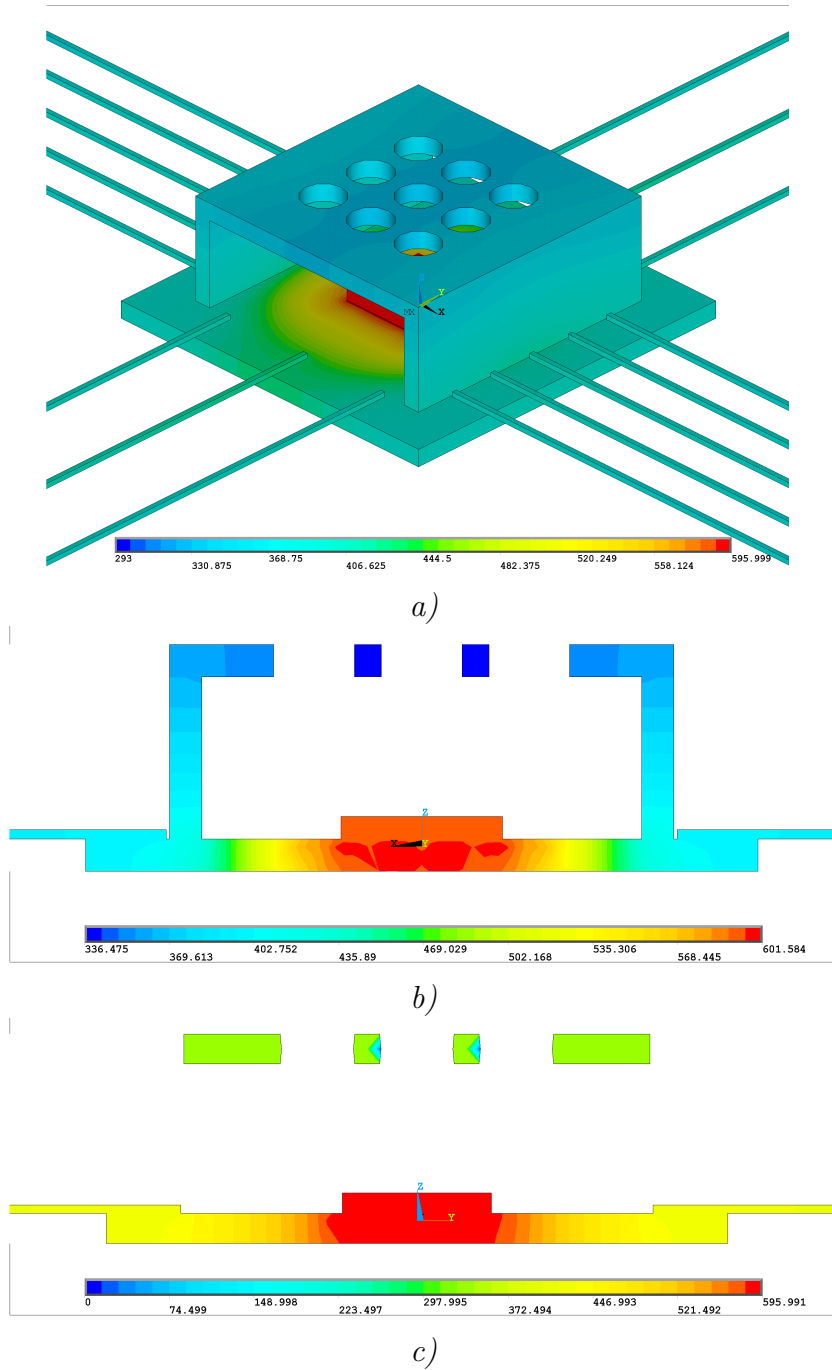
termistor mierzący aktualną temperaturę grzejnika. Różnice temperatury na przekątnej czujnika SiC nie przekraczają w najgorszym wypadku 0,3 K. Można więc uznać, że otrzymany rozkład temperatury jest jednorodny. Dla struktury szafirowej zaobserwowane nierównomierności temperatury są kilkukrotnie większe. Spowodowane jest to o rząd mniejszą przewodnością cieplną szafiru. Przeprowadzone symulacje wykazały, że przy takich samych warunkach zasilania, dodanie osłony wpływa na obniżenie maksymalnej temperatury. Różnice te wynikają ze zwiększonej masy układu, którą należy podgrzać, jak również ze zwiększenia powierzchni oddawania ciepła do otoczenia. Nie wpływa ona jednak w znaczący sposób na równomierność rozkładu temperatury na powierzchni chipu.

Tabela 6.4. Nierównomierności rozkładu temperatury na powierzchni chipu

Struktura	Przekrój	$T_{min}$ [K]	$T_{max}$ [K]	$\Delta T$ [K]	$\delta T$ [%]
SiC	D-D	614,2	614,3	0,1	0,02
	E-E	614,1	614,3	0,2	0,06
	F-F	613,9	614,2	0,3	0,10
szafir	D-D	614,8	615,4	0,6	0,17
	E-E	613,8	615,4	1,6	0,49
	F-F	612,6	615,4	2,8	0,86
SiC + osłona	D-D	592,9	593,0	0,1	0,02
	E-E	592,8	593,0	0,2	0,05
	F-F	592,7	592,9	0,3	0,09
szafir + osłona	D-D	593,6	594,3	0,7	0,24
	E-E	592,9	594,3	1,4	0,45
	F-F	591,7	594,0	2,3	0,76



Rys. 6.4. Rozkład temperatury na: a) powierzchni struktury, b) w przekroju A-A, c) w przekroju B-B, d) w przekroju C-C



Rys. 6.5. Rozkład temperatury na: a) powierzchni struktury, b) w przekroju A-A, c) w przekroju B-B

## 6.2. Wytwarzanie struktur testowych

### Przygotowanie podłoży LTCC

Jako materiał wyjściowy do przygotowania struktur zastosowano folię ceramiczną DP951 (DuPont) o grubości 165  $\mu\text{m}$ . Podłoża przycięto do wymiarów 55×55 mm<sup>2</sup>. Umożliwiło to wykonanie na wspólnym podłożu 9 struktur. Następnie wycięto otwory w miejscu połączeń międzywarstwowych oraz otwory bazujące. Wszystkie te operacje wykonano za pomocą lasera Nd:YAG NAVS 30 (Aurel) o długości fali promieniowania 1064 nm. Zastosowanie lasera pozwoliło na uzyskanie powtarzalnych kształtów oraz równych krawędzi.

### Sitodruk

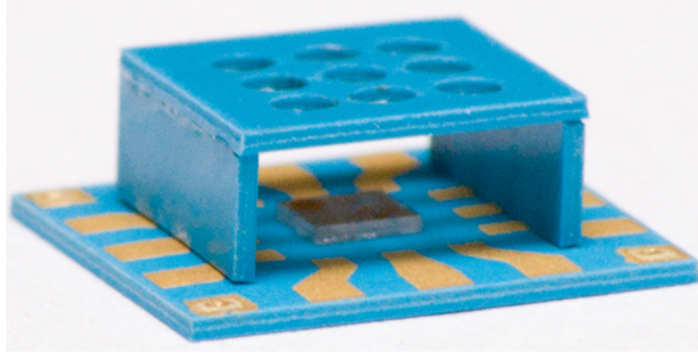
Warstwy przewodzące nanoszono przy użyciu sitodrukarki DEK 1202. Zastosowano sito 325 mesh. Drukowanie rozpoczęto od połączeń wewnętrznych, wykonanych przy użyciu pasty palladowo-srebrzej ESL963. Następnie nadrukowany został element grzejny z pasty przewodzącej na bazie PdAg (DP6146, DuPont). Otwory przelotowe wypełniono pastą ESL963 wykorzystując szablon wycięty w folii nośnej z odpowiednio rozmieszczonymi otworami. Kolejnym krokiem było nadrukowanie połączeń zewnętrznych przy użyciu pasty na bazie złota (ESL8844G). Pasty po każdym nadruku suszono przez 10 min w temperaturze 120°C.

### Laminacja

Laminację podstawek oraz osłon przeprowadzono w wodnej prasie izostatycznej. Struktury umieszczono w zamkniętych próżniowo woreczkach chroniących przed kontaktem z wodą. Proces laminacji trwał 10 min pod ciśnieniem 20 MPa w temperaturze 70°C. Po procesie laminacji na zestawach z laminowanych folii wykonano nacięcia laserem w celu uproszczenia podziału wypalanej struktury na pojedyncze podstawki. Również na tym etapie wycięto otwory w osłonach.

### Współwypalanie

Wypalanie ceramiki LTCC prowadzono w piecu tunelowym BTU QA 46-6-54. Zastosowano dwugodzinny cykl wypalania z maksymalną temperaturą 875°C. Oddzielnie wypalano podstawkę grzejną oraz osłonę. Po wypaleniu struktury zostały połamane na pojedyncze elementy podstawek. Na krawędziach podwyższeń, które miały być łączone z osłoną, naniesiono szkliwo DP9615. Następnie ułożono podwyższenia na krawędzi osłony, a całość wypalono ponownie stosując ten sam profil temperaturowy. Gotową obudowę przedstawiono na rysunku 6.6.

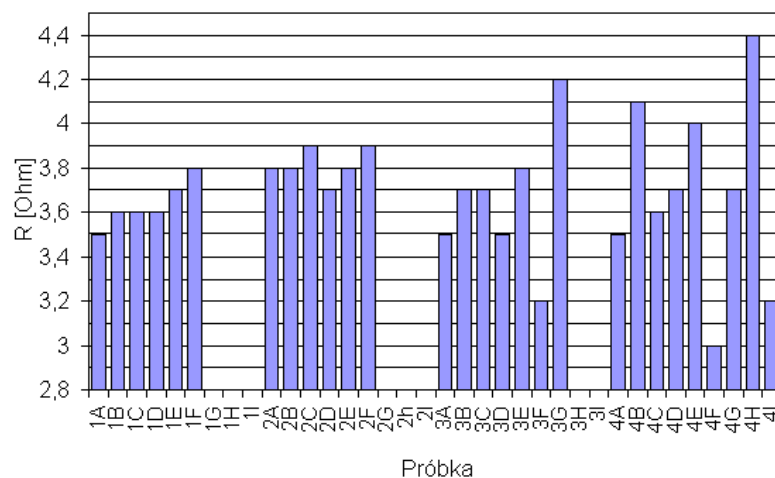


Rys. 6.6. Gotowa obudowa czujnika z zamontowaną strukturą próbną na podłożu szafirowym

### 6.3. Parametry elektryczne i ich stabilność przy narażeniach termicznych

Meander grzejny wytworzony w obudowie LTCC został poddany serii testów. Zbadano rozrzuty rezystancji wytworzonych grzejników w temperaturze pokojowej, zmiany rezystancji pod wpływem obciążeń cyklicznych grzejnika oraz zmiany rezystancji pod wpływem wygrzewania w wysokiej temperaturze.

Rezystancję wytworzonych grzejników zmierzono w temperaturze pokojowej. Wyniki przedstawiono na rysunku 6.7. Kilka struktur wykazywało rozwarcie w obwodzie elementu grzejnego. Prawdopodobnie przyczyną tego defektu było niedokładne wypełnienie otworów pastą przewodzącą. Rezystancja grzejnika wynosiła średnio  $3,7 \Omega$ , a odchylenie standardowe  $29,3\%$ . Producent podaje rezystancję powierzchniową pasty mniejszą od  $60 \text{ m}\Omega/\square$ , czyli teoretyczna rezystancja grzejnika o długości 71 kwadratów nie powinna przekraczać  $4,3 \Omega$ . Wartość rezystancji większości struktur zawiera się w tym przedziale.

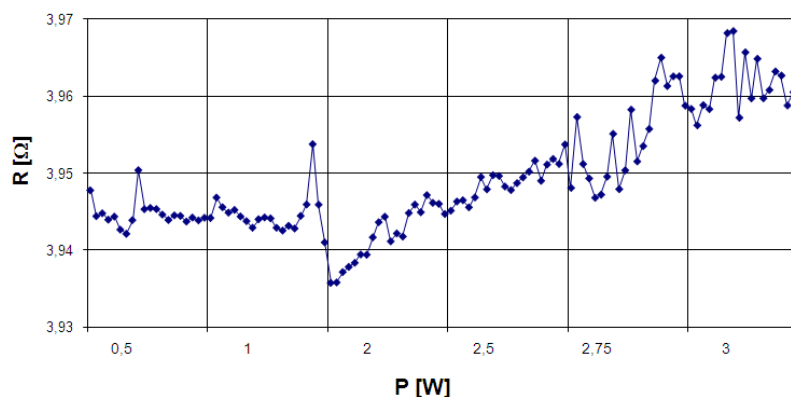


Rys. 6.7. Rezystancja grzejników w strukturach testowych



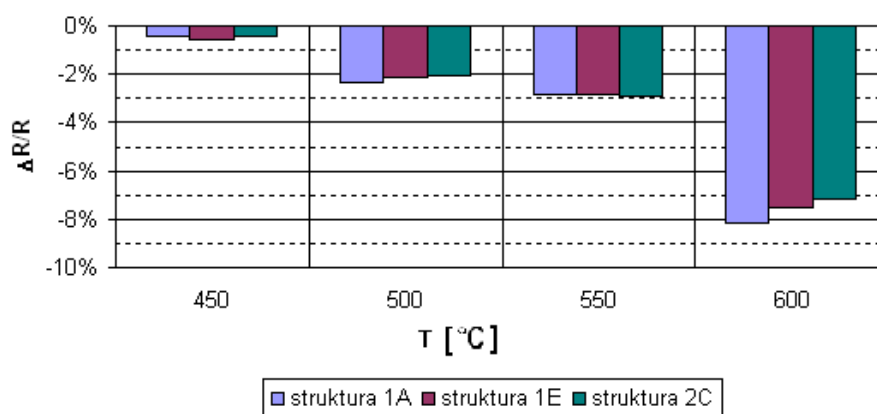
Zbadano zmiany rezystancji grzejnika pod wpływem obciążeń cyklicznych. Taki tryb pracy jest wymagany podczas pracy czujnika wodoru, który po cyklu pomiarowym jest regenerowany w wyższej temperaturze [120]. Pomiary polegały na obserwacji zmian rezystancji grzejnika po cyklach grzania i chłodzenia. Impuls grzejny trwał trzy minuty, następnie odłączano zasilanie. Czas potrzebny na schłodzenie struktury do temperatury pokojowej sprawdzono doświadczalnie i ostatecznie ustalono na kolejne trzy minuty. Po schłodzeniu mierzono rezystancję grzejnika. Na potrzeby pomiarów zastosowano multimetr Keithley 2400 sterowany z komputera klasy PC. Multimetr spełniał jednocześnie rolę źródła napięcia zasilania oraz miernika rezystancji. Wykonano serie 20 cykli temperaturowych dla 6 poziomów mocy – 0,5 W, 1 W, 2 W, 2,5 W, 2,75 W i 3 W.

Na rysunku 6.8 przedstawiono zmiany rezystancji grzejnika w temperaturze pokojowej po kolejnych obciążeniach cyklicznych. Względne zmiany rezystancji po kolejnych cyklach napięciowych przykładanych do grzejnika w większości nie przekraczają 0,5%. Wyniki świadczą o odporności grzejnika palladowo-srebrowego na cykliczne obciążenia dużą mocą. Dla mocy zasilających grzejnik powyżej 1,5 W zaobserwowano nieznaczny wzrost rezystancji.



Rys. 6.8. Zmiany rezystancji grzejnika po cyklicznych zmianach temperatury

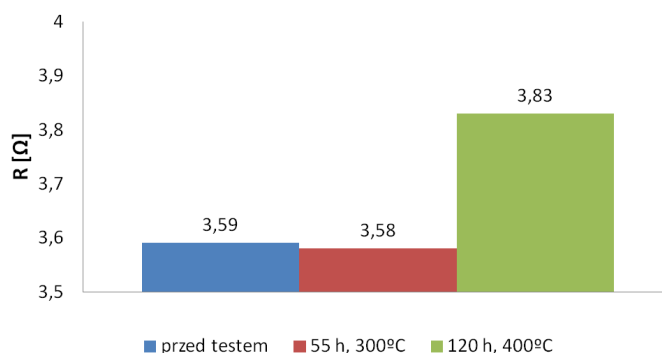
Kolejnym testem, jakiemu poddano struktury grzejnika, było bierne wygrzewanie wybranych struktur w podwyższonej temperaturze. Prowadzono je w piecu BTU QA 46-6-54 w półtoragodzinnych profilach temperaturowych o temperaturze maksymalnej w zakresie od 450°C do 600°C, zmienianej z krokiem 50°C. Rezystancja grzejnika była mierzona przed pierwszym wygrzewaniem oraz po każdym kolejnym cyklu grzania. Wyniki przedstawiono na rysunku 6.9. Względne zmiany rezystancji wzrastały wraz ze wzrostem temperatury wygrzewania struktury. We wszystkich przypadkach rezystancja zmierzona po wygrzewaniu była mniejsza od początkowej. Przyczyną spadku rezystancji jest zapewne lepsze spiekanie ziaren przewodzących w warstwie. Temperatury, w których prowadzono testy, były wyższe niż maksymalna temperatura pracy obudowy.



Rys. 6.9. Zmiany rezystancji grzejnika po wygrzewaniu biernym

Wyniki pomiarów cyklicznych prowadzonych dla mocy, jakie mają być doprowadzane do grzejnika pozwalają oczekiwać, że rezystancja grzejnika pozostanie stabilna.

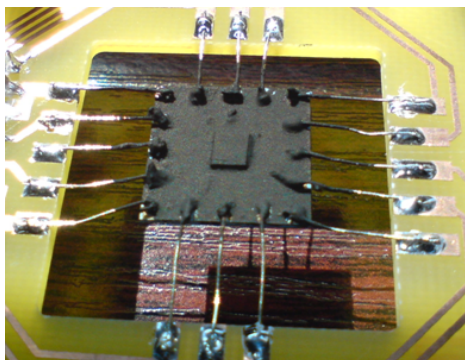
Na zakończenie badań elektrycznych strukturę obudowy poddano długoczasowemu wygrzewaniu aktywnemu w podwyższonej temperaturze. Polegało ono na zasileniu grzejnika napięciem stałym o wartości takiej, aby temperatury struktury wynosiła 300 lub 400°C odpowiednio przez 55 i 120 godzin. Pomiaru temperatury dokonano za pomocą rezystora Pt100 umieszczonego na powierzchni struktury. Na rys. 6.10 przedstawiono zmiany rezystancji po poszczególnych etapach wygrzewania. Wygrzewanie aktywne w temperaturze 400°C spowodowało wzrost rezystancji grzejnika o około 6,5%. Przyczyną zwiększenia rezystancji mogą być lokalne zmiany rezystywności materiału wywołane elektromigracją materiału przewodzącego w warstwie PdAg, z której wykonano grzejnik.



Rys. 6.10. Zmiany rezystancji grzejnika po wygrzewaniu aktywnym

## 6.4. Właściwości termiczne

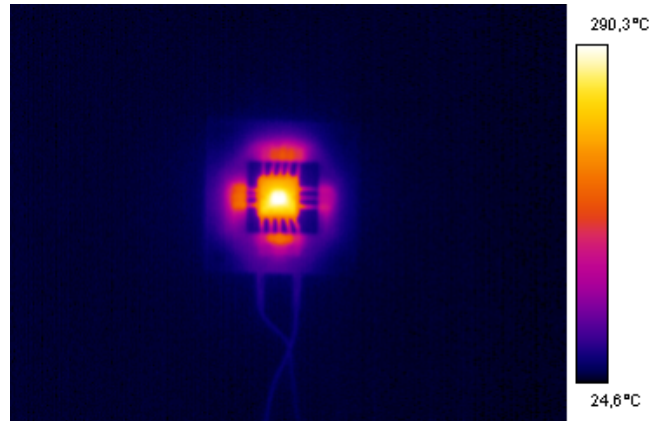
W celu oceny właściwości termicznych rzeczywistej struktury przeprowadzono pomiar rozkładu temperatury na obudowie z zamontowanym chipem szafirowym (rys. 6.11).



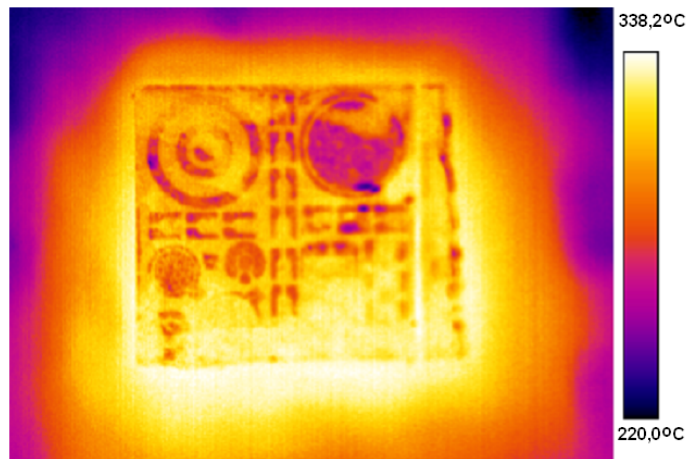
Rys. 6.11. Struktura do pomiarów termowizyjnych

Pomiary prowadzono przy użyciu kamery termowizyjnej ThermoVision A40 M w Wydziałowym Zakładzie Technologii Aparatury Elektronicznej. Dane z kamery były przesyłane do programu ThermaCAM Researcher Professional 2.9, który przetwarzał i wizualizował wyniki. Program umożliwiał określenie jednej wartości emisyjności dla całego mierzonego obszaru. W celu ujednoczenia wartości współczynnika emisyjności całość badanej struktury pokryto matową farbą w kolorze czarnym (emisyjność 0,9). Kamera była wyposażona w dwa obiektywy: zmiennoogniskowy, którego minimalna odległość od badanej próbki wynosiła 30 cm oraz stałoogniskowy, pozwalający na obserwację próbki z wysokości 5 cm. Rozdzielczość przetwornika pomiarowego wynosiła  $320 \times 240$  pikseli. Błąd pomiaru temperatury w stosowanym przetworniku wynosi 2% mierzonego zakresu. Do pomiaru rozkładu temperatury na powierzchni obudowy użyto obiektywu zmiennoogniskowego. Otrzymane wyniki cechowały się małą rozdzielczością, ponieważ struktura zajmowała jedynie około 10% obserwowanej powierzchni. Z kolei obiektyw stałoogniskowy pozwalał obserwować powierzchnię o wymiarach  $6 \times 4,8$  mm<sup>2</sup>. Rozkład temperatury na powierzchni obudowy mierzony przy pomocy obiektywu zmiennoogniskowego przedstawiono na rysunku 6.12.

Adapter pomiarowy z zamontowaną obudową został zasilony napięciem stałym równym 4,2 V, co dla mierzonej struktury oznaczało moc 3,8 W. Widoczne było odprowadzanie ciepła przez połączenia drutowe. Najniższa temperatura wystąpiła w narożach, po przeciwnej stronie niż kontakty zasilające grzejnik. Korzystając z obiektywu stałoogniskowego zmierzono rozkład temperatury na powierzchni struktury szafirowej (rys. 6.13). Maksymalna temperatura była równa 338°C. W symulacji przy takiej samej mocy maksymalna temperatura wynosiła około 342°C. Można zatem przyjąć, że wyniki analizy numerycznej są zbliżone z uzyskanymi dla rzeczywistej struktury.



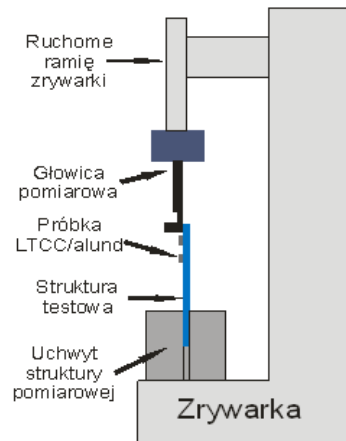
Rys. 6.12. Rozkład temperatury na obudowie



Rys. 6.13. Rozkład temperatury na powierzchni struktury szafirowej

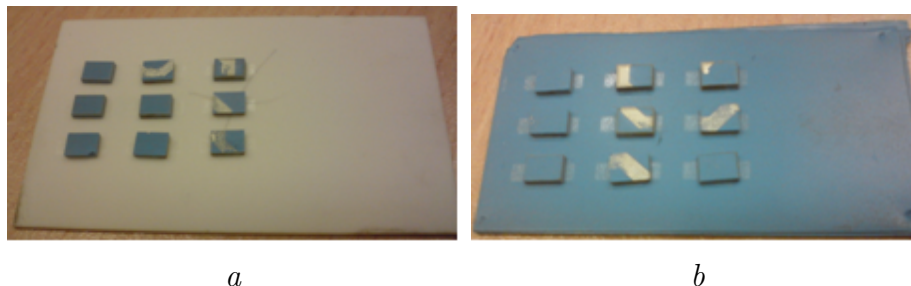
## 6.5. Montaż struktur czujnikowych do obudowy

Ważnym zagadnieniem, związanym z obudowywaniem chipów półprzewodnikowych, jest montaż struktury do obudowy. Metody montażu omówiono w rozdziale 3.3. W niniejszym rozdziale przedstawiono badania właściwości połączenia wytworzonego za pomocą niskotemperaturowej pasty srebrzej ESL599E (ElectroScience). Przygotowano zestaw próbek wykonanych z dwóch rodzajów ceramiki, a następnie zmierzono odporność wytworzonego połączenia na naprężenia ścinające. Pomiary adhezji prowadzono w Wydziałowym Zakładzie Technologii Aparatury Elektronicznej. Do pomiarów wykorzystano zrywarę Lloyd Instruments LRX o maksymalnej sile nacisku 500 N. Schemat urządzenia pomiarowego przedstawiono na rys. 6.14. Aby wykonać pomiar podłoże z próbką należy umieścić w uchwycie. Następnie do próbki należy dosunąć głowicę pomiarową zamontowaną na ruchomym ramieniu. Powolne obniżanie głowicy zwiększa jej nacisk na próbkę. Rejestrowana jest siła nacisku wywieranego przez głowicę pomiarową na próbkę. Pomiar kończy się w momencie oderwania próbki od podłoża lub przekroczenia maksymalnej siły nacisku.



Rys. 6.14. Schemat zrywarki z zamocowaną strukturą testową

Do pomiarów wykonano próbki złożone z sześciu warstw folii LTCC DP951 o wymiarach  $3 \times 4 \times 0,9 \text{ mm}^3$ . Powtarzalność wymiarów próbek uzyskano nacinając laserem struktury przed wypaleniem. Podłoża do testów wykonano z czterech warstw folii LTCC o wymiarach  $30 \times 60 \text{ mm}^2$ . Ponadto stosowano podłoża alundowe o wymiarach  $50 \times 15 \text{ mm}^2$ . Używając past zestawionych w tabeli 6.5 przyklejono po 9 próbek na podłoże (rys. 6.15).



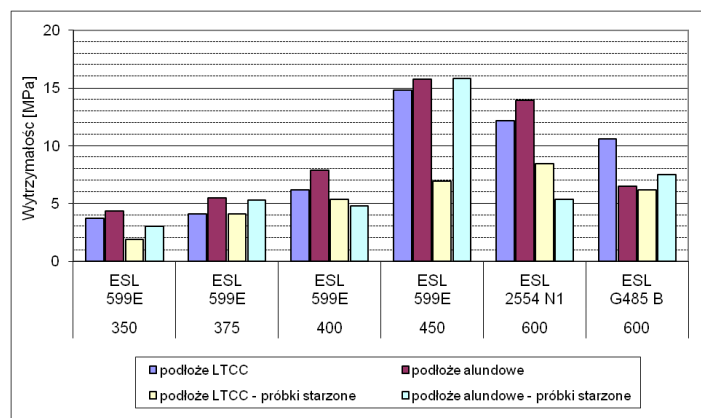
Rys. 6.15. Struktury testowe: a) na podłożu alundowym, b) na podłożu LTCC

Tabela 6.5. Rodzaje past użytych do badań adhezji

Rodzaj pasty	Oznaczenie	Temperatura wypalania
pastą srebrową	ESL599E	350 - 450°C
pastą niklową	ESL2554N1	600°C
szkliwo	ESLG485B	600°C

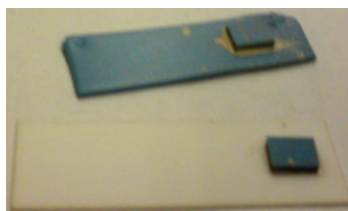
Pomiary adhezji połowy próbek prowadzono bezpośrednio po wypaleniu. Pozostałe próbki poddano starzeniu przez 170 godzin w temperaturze 200°C po czym wykonano pomiary porównawcze. Wartość zmierzonej siły ścinającej przeliczono na wytrzymałość odnosząc wartość zmierzonej siły do powierzchni połączenia (dla każdej próbki równej  $12 \text{ mm}^2$ ). Pomiary tak wykonanych struktur wykazały, że dla kolejnych próbek umieszczonych na tym samym podłożu wartość siły ścinającej zmniejszała się do tego stopnia, że część próbek odrywała się od podłoża samoistnie. Przyczyną tego zjawiska mogło

być naprężanie podłoża podczas kolejnych testów. Stąd do dalszych prac przygotowano indywidualne struktury testowe. Na rysunku 6.16 przedstawiono średnią wytrzymałość połączeń dla trzech pierwszych prób zrywania.



Rys. 6.16. Wytrzymałość na zrywanie próbek na wspólnym podłożu

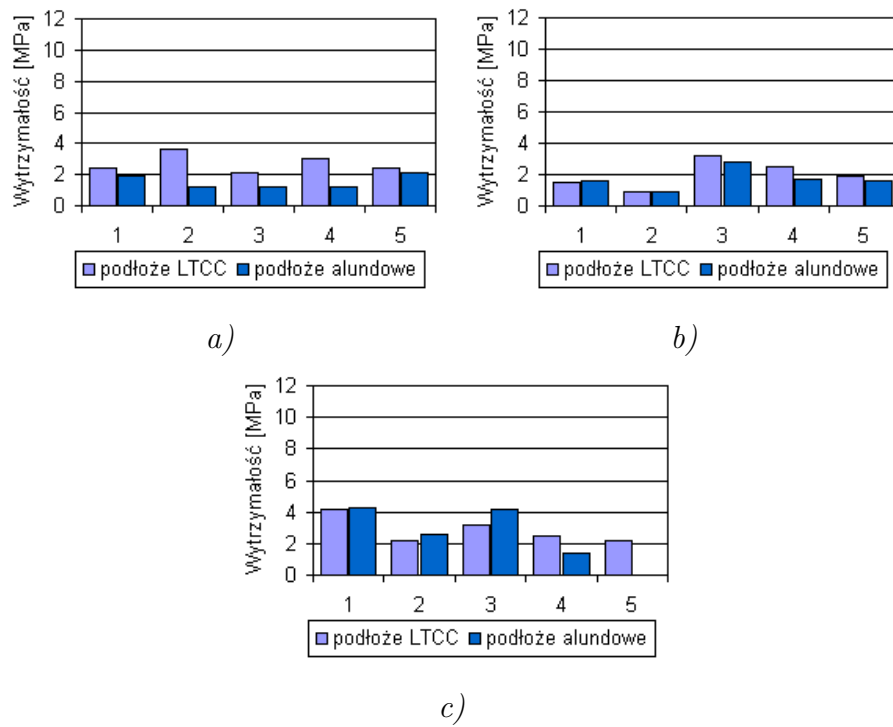
Do kolejnych badań zastosowano jedynie pastę ESL599E. Pozostałe pasty nie mogą być stosowane ze względu na zbyt wysoką temperaturę wypalania, która może uszkodzić strukturę czujnikową. Ich zastosowanie w pierwszej fazie badań miało na celu jedynie uzyskanie wyników referencyjnych. Kolejne badania prowadzono używając podłoży w postaci pasków z ceramiki alundowej o wymiarach  $10 \times 30 \text{ mm}^2$  oraz pasków z ceramiki LTCC o wymiarach  $8 \times 25 \text{ mm}^2$  (rys. 6.17). Pastę wypalano w temperaturze  $350^\circ\text{C}$ ,  $400^\circ\text{C}$  lub  $450^\circ\text{C}$ . Na rysunkach 6.18 - 6.20 zostały przedstawione wyniki pomia-



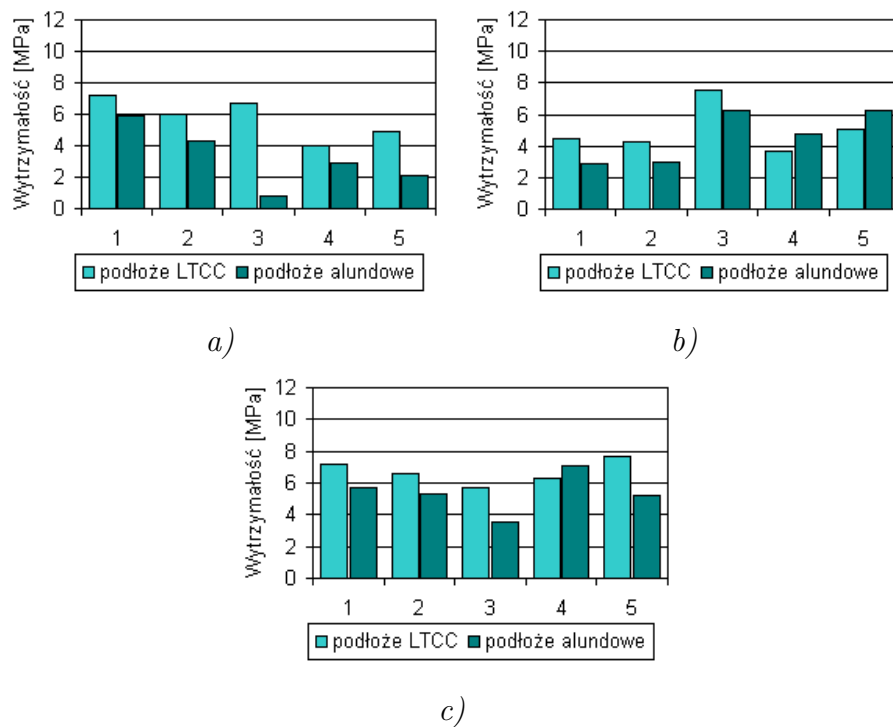
Rys. 6.17. Pojedyncze struktury testowe na podłożu LTCC i alundowym

rów wytrzymałości na zrywanie dla poszczególnych próbek różniących się temperaturą wypalania pasty niskotemperaturowej.

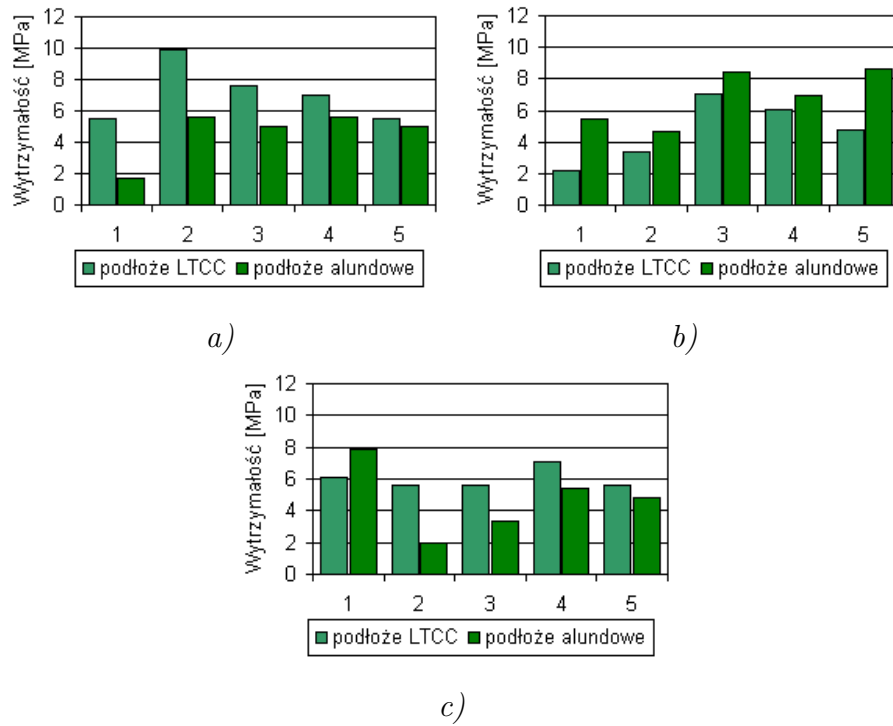
Rysunek 6.21 przedstawia zestawienie średnich wartości wytrzymałości na ścinanie uszeregowanych względem temperatury wypalania. Przeprowadzone badania wykazały, że obniżenie temperatury wypalania do  $350^\circ\text{C}$  powoduje spadek wytrzymałości połączenia prawie o połowę, niezależnie od zastosowanego podłoża. Największą wytrzymałość osiągały połączenia formowane w temperaturze powyżej  $400^\circ\text{C}$ . Starzenie w  $200^\circ\text{C}$  próbek na podłożach LTCC pogarsza parametry połączenia, natomiast kolejne wygrzewanie zwiększa wytrzymałość. Dla podłoży alundowych każdorazowe starzenie wpływa na zwiększenie wytrzymałości na ścinanie.



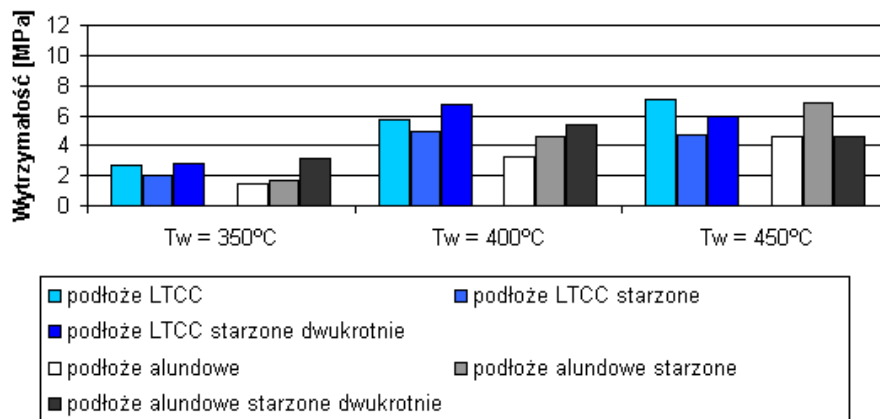
Rys. 6.18. Wytrzymałość na ścinanie,  $T_w = 350^\circ\text{C}$ , a) struktury niestarzone, b) starzenie 168 h,  $200^\circ\text{C}$ , c) starzenie 168 h,  $200^\circ\text{C}$  i 168 h,  $300^\circ\text{C}$



Rys. 6.19. Wytrzymałość na ścinanie,  $T_w = 400^\circ\text{C}$ , a) struktury niestarzone, b) starzenie 168 h,  $200^\circ\text{C}$ , c) starzenie 168 h,  $200^\circ\text{C}$  i 168 h,  $300^\circ\text{C}$



Rys. 6.20. Wytrzymałość na ścinanie,  $T_w = 450^\circ\text{C}$ , a) struktury niestarzone, b) starzenie 168 h,  $200^\circ\text{C}$ , c) starzenie 168 h,  $200^\circ\text{C}$  i 168 h,  $300^\circ\text{C}$



Rys. 6.21. Średnie wartości wytrzymałości na ścinanie



## 6.6. Podsumowanie

W powyższym rozdziale przedstawiono koncepcję i wytwarzanie wysokotemperaturowej obudowy do czujnika wodoru. Przeprowadzono symulacje rozkładu temperatury w strukturze. Zaproponowano montaż struktur czujnikowych z wykorzystaniem kompozycji grubowarstwowych. W celu wyboru materiału na połączenie czujnika z obudową podjęto próbę ilościowej charakteryzacji adhezji połączenia ceramiki LTCC oraz ceramiki alundowej przy użyciu różnych spoiw. Wykonane pomiary wykazały, że pasta srebrowa ESL599E wypalana w temperaturze niższej niż zalecana przez producenta daje połączenie wystarczająco wytrzymałe i powtarzalne. Stwierdzono, że sezonowanie w podwyższonej temperaturze nie pogarsza, a długotrwałe sezonowanie nawet poprawia wytrzymałość połączenia. Pomiary rezystancji wytworzonych grzejników wykazały dobrą powtarzalność procesu wytwarzania struktur zagrzebanych. Pomiary cykliczne dowiodły, że przykładanie do grzejnika mocy do 3 W nie zmienia w sposób znaczący jego rezystancji. Otrzymane wyniki pozwalają sądzić, że grzejniki palladowo-srebrne, znacznie tańsze niż często stosowane grzejniki platynowe, mogą być stosowane w zastosowaniach wysokotemperaturowych. Pomiary wykonane kamerą termowizyjną wykazały, że rozkład temperatury na powierzchni badanej struktury jest podobny do otrzymanego w symulacjach. Wyniki te pozwalają oczekiwać, że użycie opisanej technologii umożliwi otrzymanie równomiernego rozkładu temperatury na powierzchni struktury.

## Rozdział 7

# Podsumowanie i wnioski końcowe

Rozszerzenie zakresu temperatury pracy nowoczesnych elementów i układów elektronicznych jest wyraźnym trendem współczesnej elektroniki. Ponadto obserwowana jest postępująca miniaturyzacja wytwarzanych urządzeń. Autorzy wielu publikacji pokazują możliwości zastosowania przyrządów aktywnych i układów scalonych w zakresie wysokiej temperatury. Niemniej jednak autorowi niniejszej rozprawy nie są znane kompleksowe prace, które poruszają zagadnienia wytwarzania oraz charakterystyki wysokotemperaturowych elementów i układów biernych. Z drugiej strony od kilku lat na Wydziale Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki Politechniki Wrocławskiej są prowadzone prace nad możliwościami miniaturyzacji różnych komponentów biernych realizowanych w technice grubowarstwowej i LTCC. Dlatego łącząc oba nurty prac badawczych autor szczegółowo zajął się badaniami miniaturywnych elementów biernych na potrzeby elektroniki wysokotemperaturowej. Podczas realizacji rozprawy określił właściwości miniaturywnych rezystorów, cewek i kondensatorów w szerokim zakresie temperatury. Ponadto wykonał prototypową obudowę wysokotemperaturową do czujnika wodoru.

W wypadku rezystorów grubowarstwowych zastosowanie past światłoczułych oraz metody obróbki laserowej pozwoliło na wytworzenie w sposób powtarzalny elementów o minimalnym wymiarze 30  $\mu\text{m}$ , czyli znacznie poniżej granicy osiągananej dotychczasowymi technikami. Wykonane tą metodą struktury charakteryzowały się znacznie lepszymi właściwościami geometrycznymi (definicją krawędzi) w porównaniu z uzyskanymi metodą standardowego sitodruku. Rezystory wytwarzane obiema technikami posiadały parametry elektryczne o akceptowalnym rozrzucie wartości. Redukcja rozmiarów rezystorów skutkowała wprawdzie pojawieniem się silnych efektów rozmiarowych (czyli zależności parametrów elementu od jego wymiarów), jednak w praktycznym zastosowaniu mikrorezystorów można je uwzględnić w fazie projektowania i otrzymać element o żądanych parametrach. Wartość gorącego temperaturowego współczynnika rezystancji również zależała od geometrii i rodzaju materiałów, nie przekraczając jednak zakresu 600 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ . Wytworzone mikrorezystory wykazywały bardzo dobrą odporność na działanie impulsów wysokonapięciowych - zmiany rezystancji w niektó-

rych strukturach pojawiały się dopiero przy amplitudach impulsów ponad 500 V/mm i powierzchniowej gęstości mocy ponad 1500 W/mm<sup>2</sup>. Odpowiednie kombinacje materiałów rezystywnych, przewodzących i podłoży umożliwiły wytworzenie rezystorów o dobrych właściwościach stabilnościowych w zakresie temperatury do 350–400°C.

Autor przeprowadził również badania kondensatorów i cewek grubowarstwowych i LTCC. Do precyzyjnego formowania struktur zastosowano technikę fotoformowania lub obróbkę laserem Nd:YAG pracującym przy częstotliwości podstawowej lub trzeciej harmonicznej ( $\lambda = 1064$  nm lub 355 nm). Umożliwiło to wykonanie w sposób powtarzalny elektrod i ścieżek o szerokości i odstępach 30  $\mu$ m. Wytworzone struktury zbadano metodą spektroskopii impedancyjnej w szerokim zakresie częstotliwości i temperatury. Określono również ich stabilność przy narażeniach termicznych. Na podstawie zmierzonych charakterystyk częstotliwościowych autor opracował proste elektryczne modele równoważne wykonanych struktur, uwzględniające zjawiska zachodzące w wysokiej temperaturze. Dzięki połączeniu odpowiednich technik wytwarzania i materiałów (np. warstw przewodzących na bazie złota) możliwe było wytworzenie miniaturowych cewek i kondensatorów grubowarstwowych, które mogą pracować w temperaturze do 400°C.

W ramach pracy badawczej zaprojektowano i wytworzono wysokotemperaturową obudowę czujnika wodoru. Wykonana struktura zapewnia pożądaną temperaturę pracy czujnika oraz równomierny rozkład temperatury na powierzchni roboczej chipu. Parametry elektryczne zintegrowanego grzejnika wykazywały dobrą stabilność w warunkach narażeń termicznych wynikających z normalnego trybu pracy czujnika.

Autor ma świadomość, że przeprowadzone przez niego prace nie wyczerpują wszystkich możliwości badań i analizy właściwości wytworzonych w trakcie realizacji rozprawy mikrokomponentów biernych pod kątem ich pracy w podwyższonej temperaturze. Ze względu jednak na szeroki zakres oraz czasochłonność niektórych z wykonywanych badań, przeprowadzenie bardziej szczegółowych analiz nie było możliwe w czasie przeznaczonym na realizację rozprawy. Autor uważa, że teza, którą postawił została dowiedziona, a cel pracy - zrealizowany. Uzyskane wyniki wskazują na zasadność dalszych badań nad wytwarzaniem elementów biernych na potrzeby elektroniki wysokotemperaturowej przy zastosowaniu stosunkowo prostej i taniej technologii grubowarstwowej i LTCC.

# Bibliografia

- [1] **D. Nowak**, A. Dziejczak, „Technika grubowarstwowa i LTCC w realizacji elementów elektroniki wysokotemperaturowej”, *Elektronika (Warszawa)*, no. 2, R. 53, pp. 61–64, 2012.
- [2] A. Dziejczak, **D. Nowak**, „Thick-film and LTCC passive components for high-temperature electronics”, *Proc. Electronic Devices and Systems IMAPS CS International Conference, Brno*, pp. 33–42, 2012.
- [3] E. Miś, „Wytwarzanie i właściwości strukturalne, elektryczne oraz stabilność miniaturowanych elementów biernych na potrzeby technologii grubowarstwowej i LTCC”, rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, 2008.
- [4] **D. Nowak**, A. Dziejczak, T. Piasecki, „Influence of ferrite layer on electrical and stability properties of laser-shaped thick-film and LTCC inductors”, *Proc. 32nd International IMAPS-CPMT Poland Conference, Warszawa-Pultusk*, 2008.
- [5] **D. Nowak**, A. Dziejczak, T. Piasecki, J. Kita, „Laser-shaped thick-film inductors embedded in ferrite material”, *Proc. 33rd International Conference of IMAPS - CPMT IEEE Poland, Pszczyna*, pp. 273–276, 2009.
- [6] M. Haskard, K. Pitt, „Thick-film technology and applications”, Electrochemical Publications, 1997.
- [7] F. Barlow, A. Elshabini, „Ceramic interconnect technology handbook”, CRC Press, 2007.
- [8] A. Rafferty, Y. Gun'ko, R. Raghavendra, „An investigation of co-fired varistor-ferrite materials”, *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 24, pp. 2005–2013, 2004.
- [9] A. Dziejczak, E. Miś, W. Mielcarek, „Microvaristors for thick-film and ltcc microcircuits”, *Proc. 1st Electronic Systemintegration Technology Conference*, pp. 961–965, 2006.
- [10] C. Lucat, M.P. Martin, H. Debéda-Hickel, A. Largeteau, F. Ménil, „Screen-printed varistors: New strategy for high non-linear coefficient”, *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 27, pp. 3883–3886, 2007.
- [11] M. de la Rubia, M. Peiteado, J. de Frutos, F. Rubio-Marcos, J. Fernández, A. Caballero, „Improved non-linear behaviour of ZnO-based varistor thick films prepared by

- tape casting and screen printing”, *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 27, pp. 3887–3891, 2007.
- [12] O. Aleksič, P. Nikolič, D. Lukovič, K. Radulovič, D. Radovič, S. Savič, „Thermal diffusivity of NTC layers obtained with photoacoustic technique”, *Microelectronics International*, vol. 21, pp. 10–14, 2004.
- [13] D. Belavič, M. Hrovat, J. Kita, J. Holc, J. Cilensšek, L. Golonka, A. Dziedzic, „Evaluation of compatibility of thick-film PTC thermistors and LTCC structures”, *Microelectronics Reliability*, vol. 45, pp. 1924–1929, 2005.
- [14] A. Dziedzic, „Grubowarstwowe rezystywne mikrokompozyty polimerowo-węglowe”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2001.
- [15] L. Golonka, „Zastosowanie ceramiki LTCC w mikroelektronice”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2001.
- [16] X. Ding, Y. Li, D. Wang, Q. Yin, „Fabrication of BaTiO<sub>3</sub> dielectric films by direct ink-jet printing”, *Ceramics International*, vol. 30, pp. 1885–1887, 2004.
- [17] R. Noguera, M. Lejeune, T. Chartier, „3D fine scale ceramic components formed by ink-jet prototyping process”, *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 25, pp. 2055–2059, 2005.
- [18] W. Diel, M. Waßmer, K. Krüger, „Inkjet printing of fine-line thick-film inductors”, *Journal of Microelectronics and Electronic Packaging*, vol. 7, pp. 205–213, 2010.
- [19] M. Lahti, S. Leppävuori, V. Lantto, „Gravure-offset-printing technique for the fabrication of solid films”, *Applied Surface Science*, vol. 142, pp. 367–370, 1999.
- [20] J. Hagberg, M. Pudas, S. Leppävuori, K. Elsey, A. Logan, „Gravure offset printing development for fine line thick film circuits”, *Microelectronics International*, vol. 18, no. 3, pp. 32–35, 2001.
- [21] M. Pudas, J. Hagberg, S. Leppävuori, „Printing parameters and ink components affecting ultra-fine-line gravure-offset printing for electronics applications”, *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 24, pp. 2943–2950, 2004.
- [22] D. Dimos, B. King, P. Yang, „Direct-write fabrication of integrated, multilayer passive components”, *Proc. International Symposium on Advanced Packaging Materials: Processes, Properties and Interfaces*, pp. 186–190, 1999.
- [23] B. King, D. Dimos, P. Yang, S. Morissette, „Direct-write fabrication of integrated, multilayer ceramic components”, *Journal of Electroceramics*, vol. 3, pp. 173–178, 1999.
- [24] V. Tohver, S.L. Morissette, J.A. Lewis, B.A. Tuttle, J.A. Voigt, D.B. Dimos, „Direct-write fabrication of zinc oxide varistors”, *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 85, pp. 123–128, 2002.
- [25] A. Dziedzic, E. Miś, L. Rebenklau, K.J. Wolter, „Geometrical and electrical properties of LTCC and thick-film microresistors”, *Microelectronics Int.*, vol. 22, no. 1, pp. 26–33, 2005.

- [26] A. Dziedzic, E. Miś, L. Rebenklau, K.J. Wolter, „Geometrical and electrical properties of LTCC and thick-film microresistors”, *Proc. 27th Int. Conf. IMAPS-Poland, Podlesice*, pp. 134–139, 2003.
- [27] A. Dziedzic, L. Rebenklau, L. Golonka, K.J. Wolter, „Fodel microresistors processing and basic electrical properties”, *Microelectronics Reliability*, vol. 43, pp. 377–383, 2003.
- [28] A. Dziedzic, E. Mis, L. Rebenklau, K.J. Wolter, „LTCC and thick-film microresistors”, *Proc. 54th Electronic Components and Technology Conference*, vol. 2, pp. 1885–1890, 2004.
- [29] A. Pietrikova, S. Slosarčik, M. Bujalobokova, P. Cabuk, I. Vehec, „Chosen electrical and reliability properties of thick film photoimageable components”, *Proc. 28th International Spring Seminar on Electronics Technology, Wiener Neustadt*, pp. 407–412, 2005.
- [30] J. Kita, A. Dziedzic, L.J. Golonka, A. Bochenek, „Properties of laser cut ltcc heaters”, *Microelectronics Reliability*, vol. 40, pp. 1005–1010, 2000.
- [31] V. Kripesh, W. Gust, S. Bhatnagar, H. Osterwinter, „Effect of Nd:YAG laser micromachining on gold conductor printed over ceramic substrates”, *Materials Letters*, vol. 44, pp. 347–351, 2000.
- [32] Z. Kantor, „Sub-picosecond excimer laser machining of a thick film circuit material”, *Thin Solid Films*, vol. 453–454, pp. 350–352, 2004.
- [33] **D. Nowak**, T. Józeków, A. Dziedzic, J. Kita, „Miniaturization of thick-film and LTCC resistors by laser-shaping”, *Proc. 32nd International IMAPS-CPMT Poland Conference, Warszawa-Pultusk*, 2008.
- [34] **D. Nowak**, A. Dziedzic, M. Hrovat, J. Cilenšek, „Miniaturization of thick-film resistors by laser-shaping”, *Proc. 33rd International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2010, Warszawa*, pp. 82–86, 2010.
- [35] **D. Nowak**, E. Miś, A. Dziedzic, J. Kita, „Fabrication and electrical properties of laser-shaped thick-film and LTCC microresistors”, *Microelectronics Reliability*, vol. 49, pp. 600–606, 2009.
- [36] Dyrektywa RoHS 2002/95/WE (Ograniczenie użycia substancji niebezpiecznych).
- [37] M. Gongora-Rubio, P. Espinoza-Vallejos, L. Sola-Laguna, J. Santiago-Avilés, „Overview of low temperature co-fired ceramics tape technology for meso-system technology (MsST)”, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 89, pp. 222–241, 2001.
- [38] K.A. Peterson, K.D. Patel, C.K. Ho, S.B. Rohde, C.D. Nordquist, C.A. Walker, B.D. Wroblewski, M. Okandan, „Novel microsystem applications with new techniques in low-temperature co-fired ceramics”, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, vol. 2, pp. 345–363, 2005.
- [39] L.J. Golonka, „Technology and applications of Low Temperature Cofired Ceramic (LTCC) based sensors and microsystems”, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences*, vol. 54, pp. 221–231, 2006.

- [40] L. Golonka, H. Roguszczak, T. Zawada, J. Radojewski, I. Grabowska, M. Chudy, A. Dybko, Z. Brzozka, D. Stadnik, „LTCC based microfluidic system with optical detection”, *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 111-112, pp. 396–402, 2005.
- [41] M. Goldbach, H. Axthelm, M. Keusgen, „LTCC-based microchips for the electrochemical detection of phenolic compounds”, *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 120, pp. 346–351, 2006.
- [42] M. Sobocinski, J. Juuti, H. Jantunen, L. Golonka, „Piezoelectric unimorph valve assembled on an LTCC substrate”, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 149, pp. 315–319, 2009.
- [43] J. Kita, „Badanie właściwości ceramiki LTCC pod kątem zastosowań niestandardowych”, rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, 2003.
- [44] „Karta katalogowa HeraLock 2000.”, <http://www.heraeus-thickfilm.com>, 10.02.2012.
- [45] „Karta katalogowa DP951.”, <http://www2.dupont.com/MCM>, 10.02.2012.
- [46] R. Johnson, J. Evans, P. Jacobsen, J. Thompson, M. Christopher, „The changing automotive environment: high-temperature electronics”, *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, vol. 27, pp. 164–176, 2004.
- [47] P. Lall, M. Pecht, E. Hakim, „Influence of temperature on microelectronics and system reliability”, CRC Press, 1997.
- [48] [www.cissoid.com](http://www.cissoid.com).
- [49] C. Johnston, A. Crossley, „High temperature electronics in geothermal tools”, *Proc. High Temperature Electronics Network 2010, Oxford*, 2010.
- [50] L. Coppola, D. Huff, F. Wang, R. Burgos, D. Boroyevich, „Survey on high-temperature packaging materials for SiC-based power electronics modules”, *Proc. 37th Power Electronics Specialists Conference*, pp. 2234–2240, 2007.
- [51] Praca zbiorowa pod redakcją W. Janke, „Wybrane zagadnienia współczesnej elektroniki”, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2011.
- [52] V. Manikam, K.Y. Cheong, „Die attach materials for high temperature applications: a review”, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 1, pp. 457–478, 2011.
- [53] P. Neudeck, R. Okojie, L.Y. Chen, „High-temperature electronics - a role for wide bandgap semiconductors?”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, pp. 1065–1076, 2002.
- [54] O. Saadeh, H. Mantooth, J. Balda, A. Agarwal, A. Kashyap, „The modeling and characterization of silicon carbide thyristors”, *Proc. 39th Power Electronics Specialists Conference*, pp. 1092–1097, 2008.
- [55] [www.integratech.com](http://www.integratech.com).
- [56] **D. Nowak**, M. Janiak, A. Dziedzic, T. Piasecki, „High temperature properties of thick-film and LTCC components”, *Elektronika (Warszawa)*, no. 1, R. 53, pp. 35–37, 2012.

- [57] **D. Nowak**, A. Dzedzic, T. Piasecki, T. Baraniecki, J. Reiner, „High temperature properties of miniaturized thick-film components”, *Proc. 8th International Conference and Exhibition on Ceramic Interconnect and Ceramic Microsystems Technologies (CICMT 2012)*, *Erfuhrt*, pp. 400–405, 2012.
- [58] F. McCluskey, R. Grzybowski, T. Podlesak, „High Temperature Electronics”, CRC Press, 1997.
- [59] C. Landrock, B. Kaminska, „High temperature polymer capacitors for aerospace applications”, *Proc. Design, Automation Test in Europe Conference Exhibition*, pp. 1349–1352, 2010.
- [60] T. Funaki, J. Balda, J. Junghans, A. Kashyap, F. Barlow, H. Mantooth, T. Kimoto, T. Hikihara, „Power conversion with SiC devices at extremely high ambient temperatures”, *Proc. 36th Power Electronics Specialists Conference*, pp. 2030–2035, 2005.
- [61] R. Johannessen, F. Oldervoll, F. Strisland, „High temperature reliability of aluminium wire-bonds to thin film, thick film and low temperature co-fired ceramic (LTCC) substrate metallization”, *Microelectronics Reliability*, vol. 48, pp. 1711–1719, 2008.
- [62] R. Kisiel, Z. Szczepański, „Die-attachment solutions for SiC power devices”, *Microelectronics Reliability*, vol. 49, pp. 627–629, 2009.
- [63] T. Braun, K.F. Becker, J.P. Sommer, T. Loher, K. Schottenloher, R. Kohl, R. Pufall, V. Bader, M. Koch, R. Aschenbrenner, H. Reichl, „High temperature potential of flip chip assemblies for automotive applications”, *Proc. 55th Electronic Components and Technology Conference*, pp. 376–383, 2005.
- [64] J. Michalski, „Technologia i montaż płytek drukowanych”, WNT, 1992.
- [65] S. Dagdag, T. Lebey, S. Dinculescu, M.L. Locatelli, E. Dutarde, „High temperature behaviour of ceramic substrates for power electronics integration”, *Proc. International Conference on Electronic Materials and Packaging*, pp. 1–5, 2006.
- [66] N. Chasserio, S. Guillemet-Fritsch, T. Lebey, „Ceramic substrates for high-temperature electronic integration.”, *Journal of Electronic Materials*, vol. 38, pp. 164–174, 2009.
- [67] J. Felba, „Montaż w elektronice”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2010.
- [68] H.A. Mantooth, M.M. Mojarradi, R.W. Johnson, „Emerging capabilities in electronics technologies for extreme environments. Part I – high temperature electronics”, *Power Electronics Society Newsletter*, vol. 18, pp. 9–14, 2006.
- [69] A. Dzedzic, L. Golonka, B. Licznarski, B. Morten, M. Prudenziati, „Technika grubo-warstwowa i jej zastosowania”, Fundacja Rozwoju Systemu Edukacji, 1998.
- [70] L. Golonka, K.J. Wolter, A. Dzedzic, J. Kita, L. Rebenklau, „Embedded passive components for MCM”, *Proc. 24th International Spring Seminar on Electronics Technology ISSE 2001*, pp. 73–77, 2001.
- [71] J.S. Shah, W.C. Hahn, „Material Characterization of Thick Film-Resistor Pastes”, *IEEE Trans. on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, vol. 1, pp. 73–77, 1978.



- [72] M. Hrovat, Z. Samardzija, D. Belavič, „Microstructural, XRD and electrical characterization of some thick-film resistors”, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, vol. 11, pp. 199–208, 2000.
- [73] M. Hrovat, D. Belavič, Z. Samardzija, J. Holc, „An investigation of thick-film resistor, fired at different temperatures, for strain sensors”, *Proc. 24th International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2001*, pp. 32–36, 2001.
- [74] G. Busana, M. Prudenziati, M. Hormadaly, „Microstructure development and electrical properties of RuO<sub>2</sub>-based lead-free thick film resistors”, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, vol. 11, pp. 951–962, 2006.
- [75] T. Podprocky, B. Vandecasteele, J.D. Baets, A.V. Calster, J. Banský, „Integration of thick film resistors in a multilayer structure”, *Proc. 26th International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2003*, pp. 137–140, 2003.
- [76] R.W. Vest, „A model for sheet resistivity of RuO<sub>2</sub> thick film resistors”, *IEEE Trans. on Components, Hybrids, and Manufacturing Techn.*, vol. 14, pp. 396–406, 1991.
- [77] M. Yiwu, C. Jianqun, L. Minqiang, „Bi<sub>2</sub>Ru<sub>2</sub>O<sub>7</sub> conductive phase and its effects on the gauge factor of Ru-based thick-film resistors”, *Proc. 2006 IEEE International Conference on Information Acquisition*, pp. 245–248, 2006.
- [78] A. Dziedzic, „Thick film resistors with IrO<sub>2</sub> and CaI<sub>x</sub>Ti<sub>1-x</sub>O<sub>3</sub> — examples of chemically reactive and unreactive systems”, *Microelectronics Journal*, vol. 19, no. 6, pp. 24–42, 1988.
- [79] S. Tankiewicz, B. Morten, M. Prudenziati, L. Golonka, „New thick-film material for piezoresistive sensors”, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 95, pp. 39–45, 2001.
- [80] P. Markowski, M. Jakubowska, E. Zwierkowska, M. Danielkiewicz, K.J. Wolter, M. Luniak, „Properties of thick-film photoimageable inks for LTCC substrates”, *Elektronika (Warszawa)*, no. 3, R. 52, pp. 109–111, 2011.
- [81] E. Mis, M. Borucki, A. Dziedzic, S. Kaminski, L. Rebenklau, K.J. Wolter, F. Sonntag, „Laser-shaped thick-film and LTCC microresistors”, *Proc. 1st Electronic System Integration Technology Conference*, vol. 2, pp. 954–960, 2006.
- [82] L. De Schepper, W. De Ceuninck, H. Stulens, L.M. Stals, R. Vanden Berghe, S. Demolder, „A new approach to the study of the intrinsic ageing kinetics of thick film resistors”, *Microelectronics International*, vol. 7, pp. 5–13, 1990.
- [83] A. Dziedzic, A. Kolek, W. Ehrhardt, H. Thust, „Advanced electrical and stability characterization of untrimmed and variously trimmed thick-film and LTCC resistors”, *Microelectronics Reliability*, vol. 46, pp. 352–359, 2006.
- [84] T. Tobita, H. Takasago, „New trimming technology of a thick film resistor by the pulse voltage method”, *IEEE Trans. on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, vol. 14, pp. 613–617, 1991.
- [85] A. Dziedzic, L. Golonka, J. Kita, H. Roguszczak, T. Źdanowicz, „Some remarks about "short" pulse behaviour of LTCC and thick-film microresistors”, *Proc. 1st Eur. Microelectronics and Packaging Symp., Praga*, pp. 194–199, 2000.

- [86] D. Rocak, D. Belavič, M. Hrovat, J. Sikula, P. Koktavy, J. Pavelka, V. Sedlakova, „Low-frequency noise of thick-film resistors as quality and reliability indicator”, *Microelectronics Reliability*, vol. 41, pp. 531–542, 2001.
- [87] A. Kolek, P. Ptak, A. Dziedzic, „Noise characteristics of resistors buried in low-temperature co-fired ceramics”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 36, pp. 1009–1017, 2003.
- [88] A. Kolek, „Szumy niskoczęstotliwościowe: metody badań eksperymentalnych”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2006.
- [89] A.W. Stadler, „Noise properties of thick-film resistors in extended temperature range”, *Microelectronics Reliability*, vol. 51, pp. 1264–1270, 2011.
- [90] A. Masoero, A.M. Rietto, B. Morten, M. Prudenziati, „Excess noise and its temperature dependence in thick-film (cermet) resistors”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 16, pp. 669–674, 1983.
- [91] S. O'Reilly, J. Flannery, T. O'Donnell, A. Muddiman, G. Healy, M. Byrne, S.C. O'Mathuna, „A comparative analysis of interconnection technologies for integrated multilayer inductors”, *Microelectronics International*, vol. 15, no. 1, pp. 6–10, 1998.
- [92] L. Živanov, V. Desnica, O. Aleksič, „Analysis, modeling and optimization of thick film solenoid-bar type inductors and transformers”, *Proc. 22nd International Conference on Microelectronics, MIEL2000*, vol. 2, pp. 513–516, 2000.
- [93] J. Murbe, J. Topfer, „Ni-Cu-Zn ferrites for low temperature firing: II. effects of powder morphology and  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  addition on microstructure and permeability”, *Journal of Electroceramics*, vol. 16, pp. 199–205, 2006.
- [94] J. Murbe, J. Topfer, „Mg-Cu-Zn ferrites for multilayer inductors”, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, vol. 4, pp. 415–422, 2007.
- [95] K. Delaney, J. Barrett, J. Barton, R. Doyle, „Characterization and performance prediction for integral capacitors in low temperature co-fired ceramic technology”, *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, vol. 22, no. 1, pp. 68–77, 1999.
- [96] M. Hrovat, J. Holc, S. Drnovsek, D. Belavič, J. Bernard, M. Kosec, L. Golonka, A. Dziedzic, J. Kita, „Ferroelectric thick films on LTCC substrates - preliminary results”, *Proc. 26th International Spring Seminar on Electronics, Slovakia*, pp. 179–183, 2003.
- [97] B. Lok, A. Lu, L. Wai, W. Fan, C. Wong, K. Wong, M. Chee, „Low temperature embedded capacitor fabrication”, *Proc. 54th Electronic Components and Technology Conference*, vol. 1, pp. 531–535, 2004.
- [98] M.R. Ehlert, S. Branchevsky, „Embedded high k ceramic capacitors in LTCC for wireless communication applications”, *Proc. 1999 International Symposium on Microelectronics*, pp. 653–656, 1999.
- [99] B. Rząsa, „Technologia grubowarstwowych kondensatorów rutyłowych”, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Rzeszowskiej, 1980.

- [100] R. Perrone, J. Mueller, „Integrated passives for LTCC microwave modules - technology and design improvement”, *Proc. 33th International Conference and Exhibition IMAPS - Poland*, vol. 2, 2009.
- [101] S. Mohan, M. del Mar Hershenson, S. Boyd, T. Lee, „Simple accurate expressions for planar spiral inductances”, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 34, pp. 1419–1424, 1999.
- [102] P. Balaban, „Calculation of the capacitance coefficients of planar conductors on a dielectric surface”, *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 18, no. 1, pp. 35–43, 1970.
- [103] R. Igreja, C.J. Dias, „Analytical evaluation of the interdigital electrodes capacitance for a multi-layered structure”, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 112, pp. 291–301, 2004.
- [104] A. Arshak, K. Arshak, D. Morris, O. Korostynska, E. Jafer, „Investigation of TiO<sub>2</sub> thick film capacitors for use as strain gauge sensors”, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 122, pp. 242–249, 2005.
- [105] K. Kim, M. Ahn, J. Kang, I. Yun, „Circuit modeling of interdigitated capacitors fabricated by high-K LTCC sheets”, *ETRI Journal*, vol. 28, pp. 182–190, 2006.
- [106] **D. Nowak**, A. Dziedzic, „Some aspects of planar inductors integration”, *Proc. 33rd International Conference of IMAPS-CPMT Poland, Pszczyna*, pp. 277–280, 2009.
- [107] R.F. Harrington, „Field Computation by Moment Methods”, Wiley-IEEE Press, 1993.
- [108] M. Djordjevic, B. Notaros, „Double higher order method of moments for surface integral equation modeling of metallic and dielectric antennas and scatterers”, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 52, pp. 2118–2129, 2004.
- [109] <http://global.kyocera.com/>.
- [110] K. Nitsch, „Zastosowanie spektroskopii impedancyjnej w badaniach materiałów elektronicznych”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1999.
- [111] J. Domaradzki, K. Nitsch, „Electrical characterization of semiconducting V and Pd-doped TiO<sub>2</sub> thin films on silicon by impedance spectroscopy”, *Thin Solid Films*, vol. 515, pp. 3745–3752, 2007.
- [112] K. Nitsch, „Microelectronic materials and structures characterization by impedance spectroscopy”, *Microelectronics Reliability*, vol. 51, pp. 1213–1218, 2011.
- [113] M. Dudek, K. Nitsch, A. Dziedzic, T. Piasecki, „Wide frequency range ac electrical characterization of thick-film microvaristors”, *Microelectronics Reliability*, vol. 51, pp. 1219–1224, 2011.
- [114] [www.scribner.com](http://www.scribner.com).
- [115] C. Harper, „Electronic packaging and interconnection handbook”, Electronic packaging and interconnection series, McGraw-Hill, 1997.

- [116] H. Naguib, B. MacLaurin, „Silver migration and the reliability of Pd/Ag conductors in thick-film dielectric crossover structures”, *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, vol. 2, pp. 196–207, 1979.
- [117] R. Zhang, R.W. Johnson, A. Vert, T. Zhang, D. Shaddock, „Failure mechanism in thick film materials for 300°C operation”, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 2, pp. 1750–1758, 2012.
- [118] **D. Nowak**, D. Kulczak, M. Januszkiewicz, A. Dziedzic, „High temperature LTCC package for SiC-based gas sensor”, *Optica Applicata*, vol. 39, pp. 701–704, 2009.
- [119] **D. Nowak**, A. Dziedzic, „LTCC package for high temperature applications”, *Microelectronics Reliability*, vol. 51, pp. 1241–1244, 2011.
- [120] B. Paszkiewicz, M. Wośko, W. Macherzyński, R. Paszkiewicz, M. Tłaczała, „Czujnik wodoru AlGaIn/GaN FAT-HEMT”, *Elektronika (Warszawa)*, no. 2, R. 53, pp. 58–60, 2012.
- [121] [www.ansys.com](http://www.ansys.com).
- [122] D. Kulczak, „Obudowa LTCC do pracy w podwyższonej temperaturze”, praca magisterska, Politechnika Wroclawska, 2008.
- [123] W. Kalita, M. Węglarski, S. Slosarčik, „Method of measurement of thermal conductivity of resistive layers in thick – film structure”, *Journal of Electrical Engineering*, vol. 52, no. 11-12, pp. 372–375, 2001.
- [124] W. Kalita, D. Klepacki, M. Węglarski, „Simulation of transient thermal states in layered electronic microstructures”, *Microelectronics Reliability*, vol. 48, pp. 1021–1026, 2008.
- [125] P. Markowski, „Właściwości termoelektryczne kompozytów grubowarstwowych”, rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, 2009.
- [126] J. Shackelford, W. Alexander, „CRC Materials Science and Engineering Handbook, Third Edition”, Taylor & Francis, 2010.
- [127] T. Zawada, A. Dziedzic, L. Golonka, G. Hanreich, J. Nicolics, „Temperature field analysis in Low Temperature Cofired Ceramic microsystem”, *Proc. IMAPS - Europe Prague*, 2000.
- [128] C. Strumiłło, „Ruch ciepła”, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 1982.
- [129] M. Januszkiewicz, „Wysokotemperaturowa obudowa LTCC”, praca magisterska, Politechnika Wroclawska, 2009.