

Politechnika Wrocławska
Wydział Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki

Rozprawa doktorska

**Wytwarzanie i właściwości
strukturalne, elektryczne oraz
stabilność miniaturowych elementów
biernych na potrzeby technologii
grubowarstwowej i LTCC**

Edward Miś

Promotor:

dr hab. inż. Andrzej Dzedzic, prof. PWr

Wrocław 2008

**Rozprawa została wykonana w ramach grantu
promotorskiego nr 3 T11B 075 29**

Chciałbym gorąco podziękować mojemu promotorowi, prof. Andrzejowi Dzedzicowi za nieocenioną pomoc przy realizacji niniejszej rozprawy. Pragnę też wyrazić wdzięczność wszystkim innym osobom, które miały swój udział w powstaniu tej pracy.

Spis treści

Spis oznaczeń i symboli.....	6
1. Cel i zakres prac.....	8
2. Wytwarzanie miniaturowych grubowarstwowych elementów biernych i ich właściwości – przegląd literatury.....	14
2.1. Technika grubowarstwowa.....	14
2.2. Niskotemperaturowa ceramika współwypalana (LTCC).....	15
2.3. Sitodruk.....	18
2.4. Technika fotoformowania (pasty światłoczułe).....	19
2.5. Metoda mikropióra.....	21
2.6. Technika druku atramentowego.....	22
2.7. Druk offsetowy.....	23
2.8. Metoda cięcia wiązką laserową.....	24
2.9. Rezystory grubowarstwowe.....	26
2.10. Rezystory wielokontaktowe.....	29
2.11. Kondensatory w układach grubowarstwowych.....	30
2.12. Cewki indukcyjne.....	32
2.13. Warystory grubowarstwowe.....	33
2.14. Inne elementy grubowarstwowe.....	34
3. Rezystory dwuelektrodowe planarne.....	35
3.1. Wstęp.....	35
3.2. Wytwarzanie struktur testowych.....	35
3.3. Makro- i mikrostruktura.....	38
3.4. Właściwości geometryczne.....	40
3.5. Parametry elektryczne.....	46
3.6. Stabilność długoczasowa.....	55
3.7. Odporność impulsowa.....	57
3.8. Analiza wyników.....	64
4. Rezystory wielokontaktowe.....	66
4.1. Wstęp.....	66
4.2. Algorytm projektowania.....	67
4.3. Wytwarzanie struktur testowych.....	74

4.4. Właściwości geometryczne.....	75
4.5. Parametry elektryczne.....	78
4.6. Stabilność długoczasowa.....	89
4.7. Odporność impulsowa.....	91
4.8. Model rezystora z uwzględnieniem efektów rozmiarowych.....	96
4.9. Model rezystora dwukontaktowego.....	103
4.10. Model szumowy rezystora trójkontaktowego.....	104
4.11. Analiza wyników.....	106
5. Mikrowarystory.....	109
5.1. Wstęp.....	109
5.2. Wytwarzanie struktur testowych.....	109
5.3. Właściwości mikrostrukturalne.....	111
5.4. Parametry elektryczne.....	115
5.5. Stabilność długoczasowa właściwości elektrycznych.....	120
5.6. Obciążenie elektryczne.....	123
5.7. Narazenia impulsowe.....	124
5.8. Analiza wyników.....	126
6. Kondensatory.....	129
6.1. Wstęp.....	129
6.2. Wytwarzanie struktur testowych.....	129
6.3. Właściwości mikrostrukturalne.....	131
6.4. Właściwości geometryczne.....	133
6.5. Parametry elektryczne.....	136
6.6. Stabilność długoczasowa właściwości elektrycznych.....	146
6.7. Model zastępczy kondensatora.....	148
6.8. Analiza wyników.....	155
7. Podsumowanie.....	157
8. Literatura.....	161

Spis oznaczeń i symboli:

C_p	pojemność kondensatora w zastępczym modelu równoległym
CPE	element stałofazowy (<i>Constant Phase Element</i>)
d_0	wymiar struktury mierzony na poziomie podłoża
$d_{1/2}$	wymiar struktury mierzony w połowie grubości warstwy
E_{MAX}	pole elektryczne impulsu, przy którym dochodzi do uszkodzenia rezystora
$erf()$	funkcja błędu
$F()$	całka eliptyczna zupełna I rodzaju
$GTWR$	gorący temperaturowy współczynnik rezystancji
k	moduł całki eliptycznej
k_{sz}	wskaźnik szumów nadmiarowych
k_{szij}	wskaźnik szumów nadmiarowych mierzonych między kontaktami i i j rezystora wielokontaktowego
k_{szskal}	wskaźnik szumów nadmiarowych znormalizowany względem rezystora o powierzchni 1 mm^2
LTCC	niskotemperaturowa ceramika współwypalana (<i>Low Temperature Cofired Ceramics</i>)
P_{MAX}	powierzchniowa gęstość mocy w impulsie, przy której dochodzi do uszkodzenia rezystora
P_r	powierzchniowa gęstość mocy rozpraszanej w rezystorze
r	rezystancja połączenia między elementarnymi blokami rezystora w modelu szumowym
R_{\square}	rezystancja powierzchniowa
R_{ij}	rezystancja mierzona między kontaktami i i j rezystora wielokontaktowego
$s_{d1/2}$	odchylenie standardowe wymiaru $d_{1/2}$
SEM	skaningowa mikroskopia elektronowa (<i>Scanning Electron Microscopy</i>)
s_{GTWR}	odchylenie standardowe gorącego temperaturowego współczynnika rezystancji
$sn()$	sinus eliptyczny
S_U	widmowa gęstość mocy szumu
$tg\delta$	współczynnik strat kondensatora
TWC	temperaturowy współczynnik pojemności

TWR	temperaturowy współczynnik rezystancji
U_{1mA}	napięcie na warystorze przy prądzie 1 mA
U_{MAX}	napięcie impulsu, przy którym dochodzi do uszkodzenia rezystora
U_{pol}	napięcie stałe polaryzujące rezystor
U_{polij}	napięcie polaryzujące mierzone między kontaktami i i j rezystora wielokontaktowego
U_{sz}	napięcie skuteczne szumu nadmiarowego
v_R	współczynnik zmienności rezystancji
v_{Rij}	współczynnik zmienności rezystancji międzykontaktowej R_{ij}
Y	macierz admitancyjna
Z	macierz impedancyjna
α	wykładnik napięciowy widmowej gęstości mocy szumu; współczynnik nieliniowości warystora
δr	fluktuacja rezystancji połączenia między elementarnymi blokami rezystora w modelu szumowym
ϵ_r	względna przenikalność elektryczna
γ	wykładnik częstotliwościowy widmowej gęstości mocy szumu
φ_n	potencjał n -tego kontaktu rezystora

1. Cel i zakres prac

Technologia grubowarstwowa jest powszechnie stosowana do wytwarzania elektronicznych elementów biernych i układów hybrydowych. Decyduje o tym jej prostota oraz relatywnie niski koszt materiałów oraz aparatury technologicznej. Możliwa jest w niej realizacja szerokiej gamy elementów elektronicznych – rezystorów, termistorów, kondensatorów, cewek indukcyjnych i innych [1,2]. Technika ta pozwala również na wykonywanie różnorodnych czujników wielkości fizycznych i chemicznych - temperatury, ciśnienia, odkształcenia, jak również wilgotności czy stężenia gazów [3-6]. Znaczne rozszerzenie możliwości techniki grubowarstwowej przyniosło opracowanie ceramiki niskotemperaturowej współwypalanej (LTCC) [3,4,7-10]. Daje ona możliwość integracji układu elektronicznego przez wykonanie go w postaci struktury wielowarstwowej, redukując powierzchnię zajmowaną przez układ. Co więcej, przy jej pomocy realizowane mogą być również struktury przestrzenne w postaci kanałów, komór, belek czy wnęk, pozwalając na konstrukcję kompletnego mikrosystemu [5,6,11,12].

Jednym z głównych kierunków rozwoju współczesnej elektroniki jest miniaturyzacja i integracja układów i urządzeń. Dzięki niej oprócz redukcji wymiarów i masy osiąga się wzrost szybkości działania oraz poprawę niezawodności. Trend ten jest obecny również w technice grubowarstwowej. Niestety, w przypadku tradycyjnych metod nanoszenia warstw grubych (np. sitodruku), wytwarzanie elementów o wymiarach poniżej 150÷200 μm sprawia istotne trudności [13-16].

Wymagane jest zatem opracowanie nowych technik wytwarzania elementów lub modyfikacja metod już istniejących w celu przystosowania ich do wytwarzania struktur miniaturowych. Możliwe jest tu zarówno podejście bazujące na redukcji wymiarów samych elementów, jak też opracowanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych, pozwalające na przykład na ograniczenie marginesów technologicznych, co skutkuje zmniejszeniem powierzchni zajmowanej przez układ. Problematyka miniaturyzacji elementów grubowarstwowych nie ogranicza się wyłącznie do problemu sposobu redukcji wymiarów. Element grubowarstwowy jest układem co najmniej dwóch lub więcej warstw i podłoża. W wysokiej temperaturze, stosowanej w procesie wypalania naniesionych warstw, wymienione wyżej części składowe elementu grubowarstwowego silnie ze sobą oddziałują [17-20]. Powoduje to powstanie obszarów przejściowych na styku poszczególnych warstw. W rezultacie otrzymany element jest złożonym układem fizykochemicznym w stanie nierównowagi. Względny zakres powyższych oddziaływań rośnie wraz ze zmniejszaniem się

wymiarów elementu, czego skutkiem może być istotna różnica we właściwościach elementów miniaturowych i tych o wymiarach standardowych. Efekty te muszą być zatem uwzględniane w procesie projektowania miniaturowych elementów grubowarstwowych, co może znacznie go skomplikować.

W technice grubowarstwowej i LTCC podstawową metodą nakładania warstw jest sitodruk. Wymiary elementów wytwarzanych z wykorzystaniem standardowego sitodruku są rzędu co najmniej kilkuset mikrometrów. Przy wytwarzaniu elementów miniaturowych, a więc charakteryzujących się wymiarami planarnymi rzędu kilkudziesięciu mikrometrów, zastosowanie standardowego sitodruku oraz standardowych past grubowarstwowych napotyka na istotne ograniczenia i nie daje jak dotychczas zadowalających rezultatów. Obiecująca pod tym względem wydaje się być technika past światłoczułych, w której elementy w naniesionej warstwie odwzorowuje się wykorzystując proces fotolitografii [21-24]. Umożliwia ona wytworzenie struktur o minimalnych wymiarach dochodzących do 20 μm . Dotychczas jednak komercyjnie dostępne są tylko światłoczułe pasty przewodzące i dielektryczne. Ciągle jednak brakuje odpowiednich kompozycji rezystywnych.

Z uwagi na wspomniane powyżej ograniczenia autor zainteresował się miniaturyzacją elementów biernych na potrzeby technologii grubowarstwowej i LTCC. **Celem niniejszej rozprawy autor uczynił opracowanie metod wytwarzania oraz określenie na podstawie pomiarów i analizy właściwości strukturalnych, elektrycznych i stabilności aktualnej granicy miniaturyzacji rozumianej jako zdolność do wytwarzania takich elementów o akceptowalnych parametrach techniczno-użytkowych.** Badania obejmowały mikrorezystory dwu- i wielokontaktowe, mikrowarystory i mikrocondensatory.

W pierwszej kolejności przeprowadzono prace związane z wytwarzaniem dwukontaktowych mikrorezystorów planarnych. Z powodu ograniczeń sitodruku standardowego zastosowano i porównano trzy odmienne techniki nanoszenia warstw i odwzorowania struktur. We wszystkich przypadkach ścieżki przewodzące wykonano przy użyciu techniki fotoformowania, różne były natomiast metody formowania warstwy rezystywnej. W pierwszych dwóch wariantach użyto eksperymentalnej rezystywnej pasty światłoczułej. Zastosowano dwie techniki formowania warstwy. W pierwszej pastę rezystywną nanoszono standardowym sitodrukiem, w drugiej ta sama pasta posłużyła do wykonania identycznych struktur testowych, odwzorowywanych jednak w procesie fotoformowania [14-16]. Trzecia technika polegała na wycinaniu struktur w wypalonych warstwach za pomocą wiązki laserowej w podobny sposób, jak to ma miejsce przy korekcji grubowarstwowych elementów biernych, w szczególności właśnie rezystorów [1,2,25-29].

Elementy testowe kształtowano przez nacinanie warstwy rezystywnej i elektrod elementu. Dolna granica wymiarów osiągalnych przy użyciu tej metody zależała głównie od parametrów wiązki laserowej, wynoszącej w tym przypadku około 30 μm . Należy zauważyć, że ta metoda nie wymaga modyfikacji sposobu nakładania warstw ani stosowania nowych materiałów. Zwrócono tutaj uwagę na efekty oddziaływania wiązki lasera na parametry rezystora, zwłaszcza poziom szumów elementu. W trakcie badań przeanalizowano i porównano właściwości geometryczne i elektryczne elementów uzyskanych wytworzonych wszystkimi trzema powyższymi metodami.

Zbadano również możliwość rozwiązania problemu miniaturyzacji rezystorów przez zastosowanie elementów wielokontaktowych. Podejście to polega na zastąpieniu sieci elementów o stałych skupionych pojedynczym elementem wielokontaktowym o stałych rozłożonych, równoważnym pod względem funkcjonalnym [30,31]. Wówczas kilka czy kilkanaście rezystorów miniaturowych o wymiarach kilkudziesięciu mikrometrów można zastąpić jedną strukturą o wymiarach rzędu kilkuset mikrometrów, którą można wykonać przy pomocy standardowego sitodruku i dobrze opanowanych, typowych past rezystywnych. Natomiast do wykonania doprowadzeń, wymagających dużej precyzji, posłużyły przewodzące pasty światłoczułe. Należy podkreślić, że autor zna jedynie pojedyncze przykłady wykonania rezystorów wielokontaktowych w technologii grubowarstwowej [32,33]. Ponadto w literaturze nie ma informacji o algorytmach szybkiego projektowania oraz właściwościach użytkowych rezystorów wielokontaktowych. W pierwszym etapie badań opracowano metody projektowania struktur wielokontaktowych o założonych parametrach oraz określono klasy sieci rezystywnych, których realizacja jest możliwa w praktyce w postaci takich komponentów. Teoretycznie istnieje nieskończenie wiele możliwości wyboru topologii elementu wielokontaktowego. Ponadto analityczne wyznaczenie jego macierzy admitancyjnej jest zadaniem trudnym i w ogólnym przypadku możliwym do rozwiązania jedynie w sposób przybliżony. Dlatego niezbędny jest wybór określonej topologii struktury, uwzględniający z jednej strony właściwości stosowanej technologii (np. marginesy technologiczne), z drugiej możliwość praktycznego obliczenia i projektowania parametrów struktury. Przeanalizowano także algorytmy korekcji takich elementów, która jest niezbędna w związku ze znacznym rozrzutem parametrów elementów w technice grubowarstwowej.

Oprócz rezystorów liniowych zbadano także miniaturowe warystory grubowarstwowe. Autor dążył tutaj do poprawy właściwości fizykochemicznych i elektrycznych warystorów opartych na tlenku cynku ZnO. Podstawowym problemem jest niedostateczne spiekanie

ziaren ZnO podczas wypalania w relatywnie niskiej temperaturze standardowego procesu wypalania [34-37]. Skutkuje to niedostateczną adhezją warstwy warystorowej do podłoży alundowych oraz niskim współczynnikiem nieliniowości charakterystyki prądowo-napięciowej. Przeprowadzono zatem prace nad doбором odpowiednich modyfikatorów, np. proszków Bi_2O_3 , które pozwolą na uzyskanie warstw o lepszej adhezji i stabilności, a także nad wpływem konstrukcji elementu oraz metalurgii elektrod na właściwości elektryczne warystorów, w szczególności na współczynnik nieliniowości.

Grubowarstwowe dielektryki kondensatorowe charakteryzują się relatywnie dużą grubością, rzędu 20÷40 μm . Skutkiem tego są względnie małe wartości pojemności przypadające na jednostkę powierzchni (kilka pF/mm^2 ÷kilka nF/mm^2), co jest pewnym ograniczeniem, zwłaszcza w zakresie niskich częstotliwości [1,2,38-40]. Dotychczasowe badania dotyczą głównie kondensatorów grubowarstwowych na podłożach alundowych. Niewiele jest natomiast w literaturze danych na temat kondensatorów wytwarzanych w układach LTCC, zwłaszcza elementów zagrzebanych, czyli wykonywanych wewnątrz wielowarstwowego układu LTCC [41-44]. Ponadto takie informacje dotyczą zwykle kondensatorów wykonanych w typowej konfiguracji kanapkowej. Tymczasem w układach wielkiej częstotliwości często stosuje się kondensatory grzebieniowe (planarne) [45-47]. Prace autora obejmowały elementy pojemnościowe obu rodzajów wykonywane na standardowych podłożach z ceramiki alundowej, jak i wytworzone w układach LTCC (powierzchniowe i zagrzebane). Wykorzystano dostępne komercyjnie pasty dielektryczne, przeznaczone do zastosowania w układach LTCC. Właściwości wytworzonych elementów pojemnościowych badano w szerokim zakresie częstotliwości metodą spektroskopii impedancyjnej. Na podstawie uzyskanych rezultatów opracowano modele zastępcze struktur.

Wytworzone elementy zostały poddane kompleksowym badaniom właściwości fizykochemicznych, elektrycznych i stabilności. Obejmują one m.in.:

- określenie mikro- i makrostruktury elementów (mikroskopia optyczna, skaningowa mikroskopia elektronowa SEM, dyfrakcja rentgenowska) - szczególnie w odniesieniu do kompozycji warystorowych i dielektrycznych,
- badania geometrii mikrokomponentów (wymiarów planarne, profile grubości, rozrzuty statystyczne),
- pomiary i analizę charakterystyk stałoprądowych (rezystory liniowe i nieliniowe),
- modelowanie efektów rozmiarowych w rezystorach,

- pomiar charakterystyk temperaturowych ($R(T)$, $C(T)$, itp.) w szerokim zakresie temperatury,
- badania stabilności długoczasowej i obciążalności,
- określenie odporności elementów na działanie impulsów wysokonapięciowych o różnej amplitudzie i czasie trwania,
- pomiary i analizę szumów niskoczęstotliwościowych,
- wyznaczenie charakterystyk częstotliwościowych elementów pojemnościowych metodą spektroskopii impedancyjnej i opracowanie elektrycznego modelu równoważnego.

Otrzymane wyniki skorelowano z technologią i zastosowanymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi elementów. Pozwoliło to sformułować następującą tezę pracy:

Zastosowanie nowych oraz modyfikacja dotychczasowych metod wytwarzania i rozwiązań konstrukcyjnych umożliwiają znaczącą miniaturyzację elementów biernych wykonywanych w technice grubowarstwowej i LTCC.

Praca składa się z 8 rozdziałów. W rozdziale 1 opisano cel i zakres badań. Rozdział 2 przedstawia przegląd literatury dotyczącej problematyki miniaturyzacji elementów i układów grubowarstwowych 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 omawia miniaturowe planarne rezystory dwukontaktowe wytwarzane przy pomocy sitodruku, techniki past światłoczułych oraz wycinania wiązką laserową. Przedstawiono sposób formowania elementów i zasadnicze właściwości otrzymywanych struktur rezystorowych. Zaprezentowano wyniki badań geometrii oraz podstawowych parametrów elektrycznych i stabilności mikrorezystorów. Przeanalizowano wpływ cięcia laserem na parametry elektryczne elementów ze szczególnym uwzględnieniem ich szumu niskoczęstotliwościowego. Przedstawiono również model rezystora uwzględniający efekty wymiarowe i ich wpływ na parametry rezystora.

Rozdział 4 poświęcony jest rezystorom wielokontaktowym. Wyjaśniono ideę wykorzystania takich elementów do integracji układów grubowarstwowych i LTCC. Przedstawiono zalety i wady powyższego podejścia. Omówiono metodę projektowania wielokontaktowych struktur rezystorowych bazującą na modelu idealnego rezystora oraz jej modyfikacje, uwzględniające zjawiska zachodzące w strukturze rzeczywistej. Przeprowadzono również algorytm korekcji laserowej elementów wieloelektrodowych. Rozdział ten zawiera także wyniki kompleksowych badań właściwości trój- i sześciokontaktowych rezystorów testowych.

W rozdziale 5 przedstawiono zagadnienia miniaturyzacji rezystorów nieliniowych – warystorów – w technice grubowarstwowej i LTCC. Skupiono się na opracowaniu warystorowych kompozycji grubowarstwowych wypalanych w zakresie typowym dla technologii grubowarstwowej ($850^{\circ}\text{C}\div 950^{\circ}\text{C}$) a równocześnie o wysokim współczynniku nieliniowości. Omówiono proces wytwarzania takich warystorów oraz ich charakterystyki prądowo-napięciowe. Rozdział zawiera również wyniki badań stabilności długoczasowej przy narażeniach termicznych i elektrycznych oraz odporności warystorów na impulsowe narażenia elektryczne.

Rozdział 6 dotyczy prac nad mikrocondensatorami grubowarstwowymi i LTCC, ze szczególnym uwzględnieniem elementów zagrzebanych. Omówiono w nim właściwości kondensatorów standardowych i planarnych w szerokim zakresie częstotliwości ($1\text{ kHz}\div 30\text{ MHz}$) i temperatury ($25^{\circ}\text{C}\div 145^{\circ}\text{C}$). Zaproponowano elektryczny model równoważny takich elementów i wyznaczono wartości elementów tego modelu w zależności od materiału dielektryka, metalurgii elektrod, materiału podłoża i wariantu konstrukcyjnego. Zbadano stabilność długoczasową kondensatorów podczas starzenia termicznego, określono również jego wpływ na elementy składowe modelu zastępczego.

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

2. Wytwarzanie miniaturowych grubowarstwowych elementów biernych i ich właściwości – przegląd literatury

2.1. Technika grubowarstwowa

Technikę grubowarstwową powszechnie stosuje się we współczesnej elektronice do wytwarzania dyskretnych elementów biernych oraz hybrydowych układów scalonych [1,2]. Znajduje ona również szerokie zastosowanie przy produkcji różnych czujników [3-5,48-50] oraz ogniw słonecznych [13]. Podstawową jej zaletą jest relatywnie niski koszt, zwłaszcza w porównaniu z technologią cienkowarstwową i półprzewodnikową. Nieskomplikowana aparatura i prosty, nie wymagający stosowania próżni proces technologiczny, jak również mało czasochłonny proces projektowy czynią technikę grubowarstwową szczególnie konkurencyjną w przypadku produkcji mało- i średnioseryjnej. Elementy i układy grubowarstwowe charakteryzują się dużą niezawodnością i stabilnością oraz zdolnością do obciążania znacznymi mocami. Są one również odporne na działanie czynników środowiskowych, takich jak wilgoć czy podwyższona temperatura.

Elementy grubowarstwowe są wytwarzane przez selektywne nanoszenie specjalnych past na podłoże izolacyjne (najczęściej różne ceramiki). Otrzymaną w ten sposób strukturę wypala się w wysokiej temperaturze $750^{\circ}\text{C}\div 950^{\circ}\text{C}$. W miejscach nałożenia pasty pozostają warstwy odpowiedniego materiału – rezystywnego, dielektrycznego lub przewodzącego, związane trwale z podłożem. Układ elektroniczny powstaje w wyniku naniesienia kombinacji poszczególnych rodzajów warstw.

Najczęściej na podłoża układów grubowarstwowych wykorzystuje się ceramikę alundową (o zawartości tlenku glinu równej 96% wag.). Dużą przewodność cieplną gwarantuje wykorzystanie podłoży stalowych emaliowanych lub ceramiki AlN [51-54]. Coraz szerzej materiałem podłożowym jest także niskotemperaturowa ceramika współwypalana (*Low Temperature Cofired Ceramics* – LTCC) [1-4,7-10]. Stosowana jest ona w postaci miękkich surowych folii ceramicznych, które można łatwo formować w różne kształty lub łączyć w strukturę wielowarstwową. Ostateczną postać sztywnej ceramiki uzyskuje po wypaleniu. Grubości stosowanych podłoży wahają się od 0,125 mm do 1 mm, zaś wymiary planarne w granicach 10÷150 mm. W przypadku podłoży LTCC układ wielowarstwowy może składać się nawet z kilkudziesięciu warstw, co daje grubości rzędu kilku milimetrów.

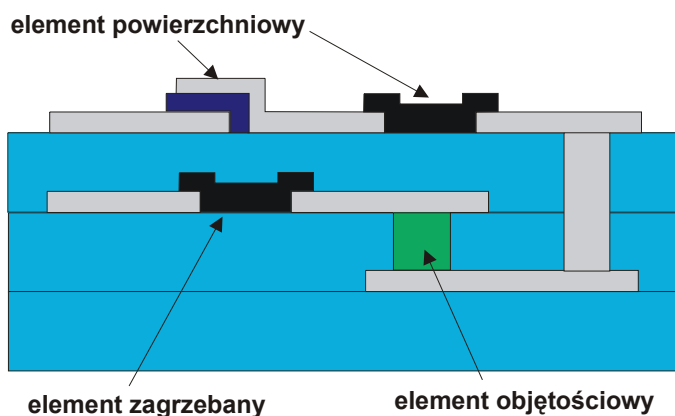
Pasta grubowarstwowa zwykle składa się z trzech komponentów [1,2]. Faza funkcjonalna jest proszkiem materiału (średnica ziaren rzędu kilku dziesiątych μm), który ma zostać osadzony na podłożu. Fazę wiążącą, której zadaniem jest połączenie ziaren fazy funkcjonalnej ze sobą i z podłożem, stanowią proszki szkieł bądź tlenków metali. Uziarnienie jest tu większe – kilka μm . Powyższe fazy tworzą strukturę wypalanej warstwy. Trzecia faza – nośna – składa się z żywicy z dodatkiem rozpuszczalników. Jej zadaniem jest nadanie paście odpowiednich właściwości reologicznych, umożliwiających jej naniesienie na podłoże. Podczas suszenia i wypalania faza nośna jest usuwana z warstwy, zaś materiał fazy wiążącej spaja ziarna fazy funkcjonalnej ze sobą i podłożem.

2.2. Niskotemperaturowa ceramika współwypalana (LTCC)

Technika LTCC oferuje możliwość wytwarzania szerokiej gamy układów elektronicznych i kompletnych mikrosystemów. Pozwala na wytwarzanie rezystorów powierzchniowych i zagrzebanych, kondensatorów, warystorów i innych komponentów biernych (rys. 2.1). Wykonuje się w niej różne czujniki wielkości fizycznych i chemicznych, jak również elementy wykonawcze, takie jak mikrozawory czy elementy grzejne. Obszar zastosowań technologii LTCC rozciąga się od standardowych aplikacji (np. hermetyczne i odporne mechanicznie obudowy układów scalonych) po skomplikowane trójwymiarowe struktury mikrofluidyczne. Obecnie tę technologię wykorzystuje się bardzo często do wytwarzania wielowarstwowych układów hybrydowych [3,4,7-10]. Wcześniej układy takie produkowano metodą naprzemiennego nanoszenia na podłoże ceramiczne izolujących warstw dielektrycznych oraz past przewodzących, tworzących elementy kolejnych poziomów układu. Za każdym razem po naniesieniu nowej warstwy i przed nadrukiem następnej należało ją wysuszyć. Połączenia między poziomami realizowano przez wypełnione pastą przewodzącą okna w warstwach dielektrycznych. Stosowano zarówno współwypalanie całej struktury wielowarstwowej jak i oddzielne wypalanie każdej warstwy z osobna. Technologia ta miała jednak istotne ograniczenia - np. elementy nadrukowane na niższym poziomie powodowały, że powierzchnia pokrywającej go warstwy dielektryka, na której drukowano elementy następnego poziomu układu nie była płaska. Skutkiem tego był duży rozrzut grubości nadrukowywanych komponentów. Konieczność tworzenia układu metodą warstwa po warstwie ograniczała też liczbę takich warstw. Wady te wyeliminowano dzięki tworzeniu układu wielowarstwowego metodą składania w stos i laminowania arkuszy surowej folii ceramicznej, na których uprzednio oddzielnie nadrukowano elementy tworzące poszczególne

poziomy układu. Po wypaleniu uzyskuje się jednolitą strukturę ceramiczną z elementami elektronicznymi wbudowanymi wewnątrz.

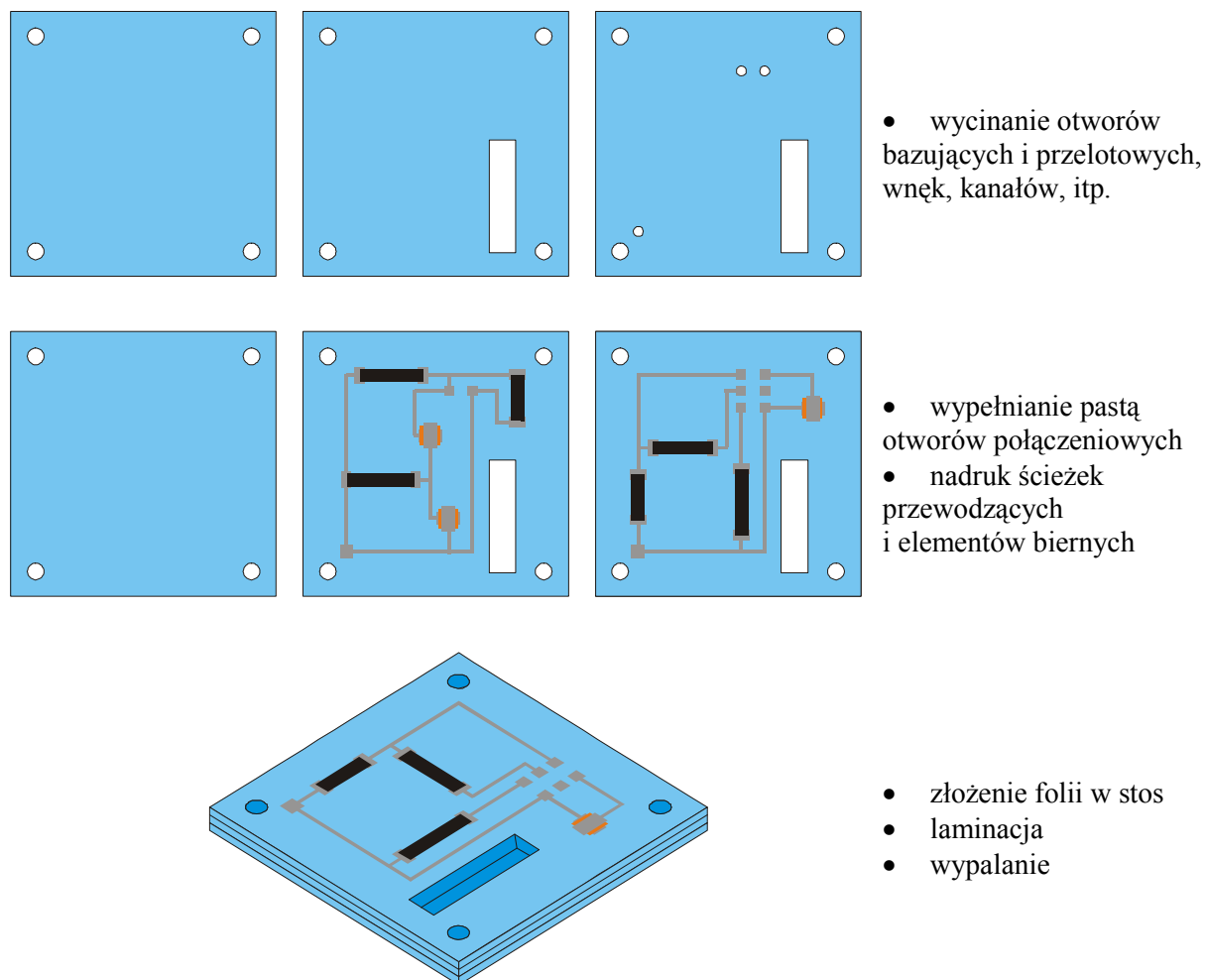
Początkowo stosowano ceramikę wysokotemperaturową współwypalaną HTCC (*High Temperature Cofired Ceramics*) [1,2]. Charakteryzowała się ona bardzo wysoką temperaturą wypalania rzędu $1600^{\circ}\text{C} \div 1800^{\circ}\text{C}$ w atmosferze wodoru. Chociaż dzięki temu układy HTCC uzyskiwały dużą odporność na szkodliwe warunki otoczenia i wysoką niezawodność, zakres temperatury wypalania uniemożliwiał zastosowanie standardowych past grubowarstwowych. Możliwe było wyłącznie wykonywanie zagrzebanych wolframowych lub molibdenowych ścieżek przewodzących. Elementy bierne wytwarzano jedynie na górnej powierzchni układu, wypalając je w dodatkowym, już standardowym procesie.



Rys. 2.1. Wielowarstwowy układ LTCC (wg [2])

Opracowanie niskotemperaturowej ceramiki współwypalanej LTCC o znacznie niższej temperaturze wypalania (rzędu 850°C) pozwoliło na zaadaptowanie standardowych materiałów i procesów techniki warstw grubych. Elementy bierne mogą być w jej przypadku z równym powodzeniem wytwarzane zarówno wewnątrz układu wielowarstwowego jak i na jego powierzchni. Obniżenie temperatury wypalania osiągnięto dzięki opracowaniu nowych materiałów. Surowa folia LTCC składa się z mieszaniny krystalizujących szkieł, zawierających SiO_2 i Al_2O_3 w układzie z jednym z następujących tlenków: MgO , CaO , BaO lub ZnO . Po wypaleniu materiał ten przyjmuje postać szkło-ceramiki. Rzadziej stosowane są mieszaniny szkła i składnika krystalicznego, dające po wypaleniu kompozyt szklano-

ceramiczny. Używa się tutaj m.in. Al_2O_3 , kwarcu, kordierytu i mullitu jako ceramiki i szkła krzemowego lub borokrzemowego. Oprócz tego folie zawierają oczywiście lepiszcze organiczne, zapewniające spójność i odpowiednie właściwości mechaniczne surowej ceramiki.



Rys. 2.2. Etapy wytwarzania układu wielowarstwowego LTCC (wg [2])

Wytwarzanie układu LTCC składa się z kilku etapów [2,55-57]. W pierwszej kolejności wycinane są arkusze surowej ceramiki o zadanym wymiarze. Następnie wykonuje się otwory bazujące oraz otwory do połączeń międzywarstwowych. Te drugie wypełnia się pastą przewodzącą. Na tym etapie wytwarza się również struktury przestrzenne w mikrosystemach LTCC, np. kanały, wnęki lub belki. Kolejnym krokiem jest nadrukowanie ścieżek przewodzących oraz elementów biernych - rezystorów, kondensatorów, induktorów, itp. Po naniesieniu każdej z warstw folia z nadrukiem jest suszona w standardowy sposób (5÷10 min./120°C). Czasami zaleca się suszenie w niższej temperaturze. Poszczególne folie

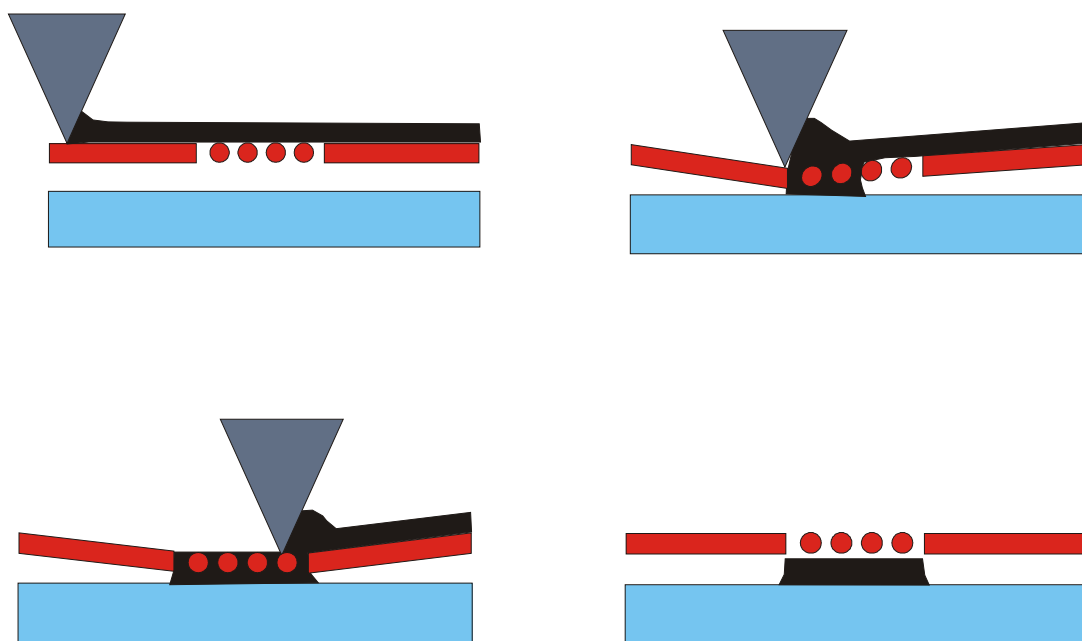
są następnie składane w stos i poddawane laminacji pod wysokim ciśnieniem i w podwyższonej temperaturze (200 atmosfer/70°C/10 min.), podczas której następuje wstępne wzajemne połączenie się folii. Końcowym etapem jest wypalanie struktury. Przeprowadza się je w specjalnym profilu temperaturowym, z wydłużonym czasem przetrzymania w zakresie temperatur 300°C÷500°C. Podyktowane jest to koniecznością usunięcia znacznie większych ilości składnika organicznego (zawartego w dużej objętości podłoża) niż w przypadku typowego układu grubowarstwowego.

Jakkolwiek do produkcji układów LTCC wykorzystuje się typowe procesy techniki warstw grubych, projekt i wykonanie struktur musi uwzględniać pewne istotne różnice. Spowodowane są one odmiennymi właściwościami podłoża LTCC. Jedną z podstawowych różnic jest skurcz ceramiki LTCC podczas wypalania, zarówno w płaszczyźnie poziomej jak i na grubości. Wynosi on 10%÷15% (w zależności od producenta folii ceramicznej). Taka jest również redukcja wymiarów planarnych wszystkich elementów elektronicznych i struktur przestrzennych w układzie. Ostatnio dostępne są jednak folie LTCC praktycznie o zerowym skurczu w płaszczyźnie x-y [58]. Równie istotnym czynnikiem jest oddziaływanie podłoża na elementy układu, znacznie silniejsze niż w przypadku ceramiki alundowej z powodu wspólnego wypalania naniesionych warstw i surowej folii LTCC [15,59-62]. Zmienia to istotnie parametry wytworzonych elementów i powoduje konieczność stosowania past o innym składzie i właściwościach, przeznaczonych specjalnie do układów LTCC. Co więcej, z uwagi na różnice w składzie i właściwościach fizykochemicznych ceramiki LTCC, pasty i podłoża różnych producentów mogą być wzajemnie niekompatybilne.

2.3. Sitodruk

Podstawową metodą nanoszenia warstw grubych jest sitodruk [1,2,6]. Polega on na przeciskaniu pasty za pomocą rakli przez sita stalowe lub polimerowe. Na sito jest uprzednio nanoszona emulsja, w której metodami fotolitograficznymi wykonuje się okna w kształcie zadanego wzoru. Transfer pasty na podłoże następuje wyłącznie przez niezamaskowane obszary sita (rys. 2.3). Technika ta przynosi bardzo dobre rezultaty w przypadku elementów o wymiarach powyżej 150 μm [14-16]. Poniżej tej wartości pojawiają się istotne problemy, których źródłem jest przede wszystkim ziarnista struktura sita, odwzorowana na nanoszoną warstwę. Skutkuje to niejednorodną grubością warstwy oraz „ząbkowanymi” krawędziami. Defekty warstwy są w przybliżeniu tego samego rzędu jak okres sita. Gęstość używanych sit, mierzona liczbą oczek na cal długości, waha się od 200 do 400. Jedno oczko ma zatem

wymiar $50\div 120\ \mu\text{m}$, przy grubości nici $20\div 50\ \mu\text{m}$. Zatem w przypadku struktur o rozmiarach przekraczających kilkaset μm niedoskonałości druku mają niewielkie znaczenie. Przy rozmiarach planarnych porównywalnych z rozmiarami oczka ich wpływ na właściwości elementu znacznie rośnie. Naniesione warstwy posiadają wówczas „wyspowy”, bardzo nieregularny kształt, znacznie odbiegający od idealnej struktury prostokątnej. Dochodzi często wręcz do utraty ciągłości warstwy. Ponadto występuje duży rozrzut uzyskiwanych rozmiarów, spowodowany przypadkowym ułożeniem wzoru na masce względem oczek sita. Natomiast dokładne ich pozycjonowanie byłoby bardzo kłopotliwe. Powyższe czynniki sprawiają, że granica zastosowania standardowego sitodruku sięga ok. $150\ \mu\text{m}$. Poniżej tej granicy wymiary nanoszonych warstwy znacznie różnią się od wartości planowanych. Duży jest także ich rozrzut statystyczny.

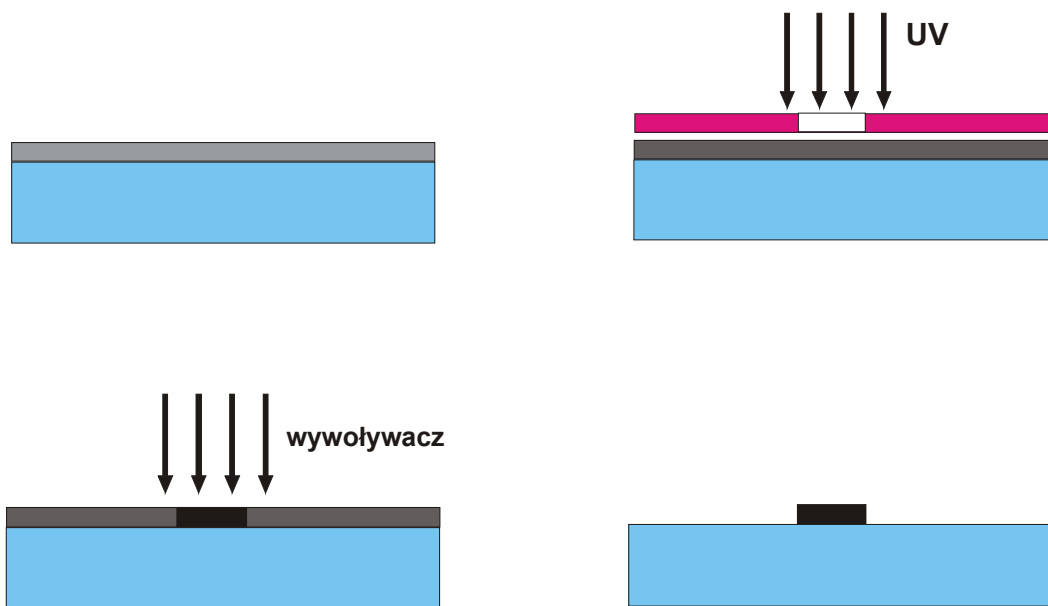


Rys. 2.3. Przebieg procesu sitodruku

2.4. Technika fotoformowania (pasty światłoczułe)

Znaczne rozszerzenie możliwości miniaturyzacji elementów grubowarstwowych przyniosło opracowanie past światłoczułych [14-16,21-24]. Do precyzyjnego naniesienia warstw grubych na wybrane obszary podłoża wykorzystuje się technikę fotolitograficzną.

Najpierw pastę nakłada się na podłoże za pomocą standardowego sitodruku i suszony. Kolejnym etapem jest naświetlanie warstwy promieniowaniem UV o długości z zakresu 350÷450 nm przez maskę z wzorem zadanej struktury. Pod wpływem światła następuje utwardzanie polimerów tworzących fazę nośną pasty, przez co stają się ona odporna na działanie wywoływacza, którym zwykle jest wodny roztwór Na_2CO_3 . Natomiast nienaświetlone obszary warstwy zostają wypłukane podczas wywoływania. Dalsza część procesu przebiega standardowo, tzn. naniesioną warstwą wypala się w typowym profilu temperaturowym i ewentualnie nanosi się kolejne warstwy. Technika fotoformowania pozwala w sposób powtarzalny uzyskać szerokości ścieżek i odstępów między nimi rzędu 40÷50 μm w przypadku warstw przewodzących i 25 μm dla past dielektrycznych [22,63]. Kompozycje przewodzące firmy Hibridas umożliwiają zaś osiągnięcie minimalnych szerokości i odstępów rzędu 15÷20 μm [21,64,65], przy nieco bardziej złożonym procesie technologicznym. Przebieg procesu technologicznego na przykładzie past firmy DuPont pokazano na rys. 2.4.



Rys. 2.4. Technika fotoformowania warstw grubych

Poza znaczną redukcją minimalnych rozmiarów przewaga techniki fotoformowania nad sitodrukiem przejawia się także w wyraźnie lepszej odtwarzalności uzyskiwanych warstw [14-16,63,66]. Nawet w przypadku struktur o wymiarach 50 μm uzyskuje się warstwy o przekroju prostokątnym, czyli o powierzchniach bocznych gładkich i prostopadłych do

podłoża oraz równej powierzchni górnej. Szczególne znaczenie ma to w przypadku zastosowań w technice mikrofalowej. Pewną niedogodnością techniki fotoformowania jest skurcz past światłoczułych podczas wypalania. Powoduje to, że wymiary planarne wytworzonego wzoru są mniejsze o ok. 20÷25 μm od planowanych, co należy uwzględnić na etapie projektowania [14-16,22,23,66].

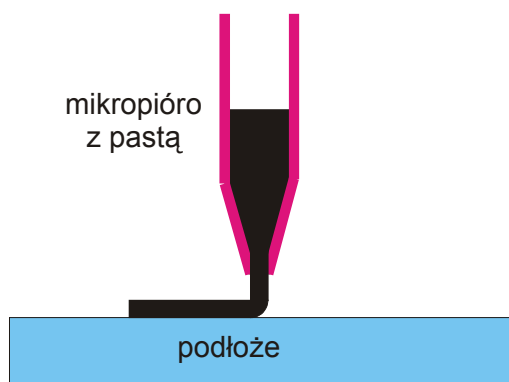
Wybór fotoformowalnych materiałów grubowarstwowych jest ograniczony. Dotychczas opracowane zostały światłoczułe kompozycje przewodzące i dielektryczne (izolacyjne). Niestety, mimo że prowadzi się intensywne prace nad pastami rezystywnymi, wciąż brakuje tu komercyjnie dostępnych produktów, choć pojawiały się już pasty eksperymentalne [23]. Dotychczas jednak wykonane z nich elementy były bardzo słabo charakteryzowane elektrycznie, chociaż znacznie przewyższały elementy sitodrukowane pod względem precyzji wykonania i geometrii. Natomiast możliwość wytwarzania wąskich i dobrze zdefiniowanych ścieżek przewodzących o dużej gęstości upakowania znajduje szerokie zastosowanie przy wykonywaniu połączeń dla układów scalonych w obwodach hybrydowych [24,65,67,68]. Ponadto w kombinacji z dielektrykami fotodefiniowalnymi możliwe staje się wytwarzanie linii transmisyjnych, rezonatorów, filtrów i innych elementów stosowanych w technice wielkich częstotliwości i mikrofalowej [66,69-75].

2.5. Metoda mikropióra

W przypadku sitodruku lub fotoformowania konieczne jest wykonywanie osobnych masek i sit dla każdego projektowanego wzoru. W przypadku masowej produkcji nie jest to istotną wadą. Natomiast wyraźnie zwiększa koszt i czasochłonność przy produkcji małoseryjnej lub prototypowej. Ponadto transfer pasty i wytworzenie wzoru na podłożu odbywa się w sposób pośredni - za pomocą sita, którego właściwości silnie wpływają na parametry warstwy. W metodzie mikropióra (*Direct Write Printing*) pasta jest bezpośrednio nanoszona na podłoże przy pomocy poruszającej się nad nim głowicy piszącej (rys. 2.5) [76-79]. Wypływ pasty z dyszy głowicy zachodzi po podaniu ciśnienia. Szerokość i grubość nanoszonego wzoru są kontrolowane przez ustawienia mikropióra, takie jak średnica dyszy i jej przekrój poprzeczny, odległość dysza-podłoże, szybkość przesuwu głowicy. Zasadnicze znaczenie mają tutaj właściwości reologiczne pasty, nieco inne niż wymagane od kompozycji wykorzystywanych do sitodruku.

Technika ta umożliwia uzyskiwanie warstw o bardzo szerokim zakresie grubości, od kilku do ponad 200 μm , nieosiągalnym przy sitodruku. Minimalna szerokość ścieżek wynosi ok.

50 μm (przy zastosowaniu dysz o średnicy 25 μm). Natomiast odstęp jest determinowany przez rozpliw pasty po podłożu po naniesieniu i wynosi minimalnie 10÷15 μm . Rozdzielczość jest więc lepsza niż w przypadku sitodruku. Wielką zaletą druku mikropiórem jest możliwość nakładania pasty na podłoża niepłaskie, np. cylindryczne, lub posiadające wgłębienia lub wypukłości, przy zachowaniu ciągłości i jednorodnej grubości warstwy. Możliwe jest także dogodne tworzenie struktur wielowarstwowych. W obu przypadkach odpowiednio koryguje się odległość głowicy od podłoża. Jednak jak wynika z istoty tej metody czas potrzebny do naniesienia wzoru jest znacznie dłuższy niż w przypadku techniki standardowej. Zatem możliwość stosowania mikropióra w produkcji masowej jak dotychczas jest ograniczona.



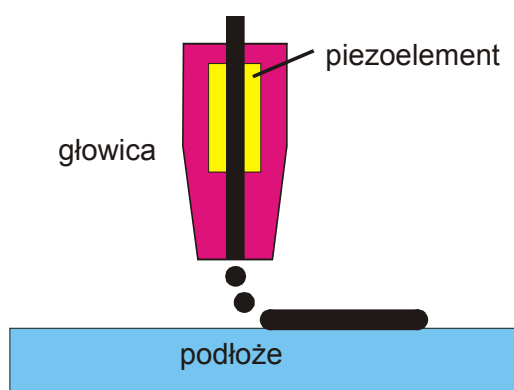
Rys. 2.5. Zasada druku przy pomocy mikropióra

2.6. Technika druku atramentowego

Inną techniką druku bezpośredniego jest druk atramentowy [80,81]. Mechanizm osadzania pasty jest podobny jak w drukarkach atramentowych. Głowica drukująca wyrzuca pod ciśnieniem krople pasty, które osiadają na podłożu tworząc przy odpowiedniej gęstości nadruku warstwę ciągłą. W umieszczonym w głowicy zbiorniku z pastą znajduje się element piezoelektryczny, który rozszerzając się powoduje wzrost ciśnienia pasty i wypchnięcie kropli pasty przez dyszę (rys. 2.6). Stosuje się również rozwiązanie polegające na wykorzystaniu elementu grzejjego i uzyskaniu wzrostu ciśnienia pasty przez jej gwałtowne podgrzewanie.

Stosowane są dwa tryby drukowania. W trybie ciągłym generowany jest ciągły strumień kropli ze stałą częstotliwością z zakresu 80 kHz ÷ 1 MHz, który następnie jest odchylany przy pomocy pola elektrycznego w celu osadzenia pasty w wybranym punkcie podłoża.

W drugim przypadku, tzw. "kropla na żądanie", formowane są pojedyncze krople w zadanych chwilach czasu, przy czym możliwe jest oczywiście wytworzenie całej ich serii. Można uzyskać krople o minimalnej średnicy $15 \div 20 \mu\text{m}$, chociaż typowo jest to $50 \div 100 \mu\text{m}$. Metoda druku atramentowego pozwala na wytwarzanie ścieżek o minimalnej szerokości $100 \mu\text{m}$, aczkolwiek przy pomocy pojedynczych kropli można utworzyć detale nawet rzędu $25 \mu\text{m}$. Technika ta jest użyteczna przy produkcji struktur wielowarstwowych i trójwymiarowych. Nadaje się również doskonale do osadzania warstw na podłożach nieplanarnych.

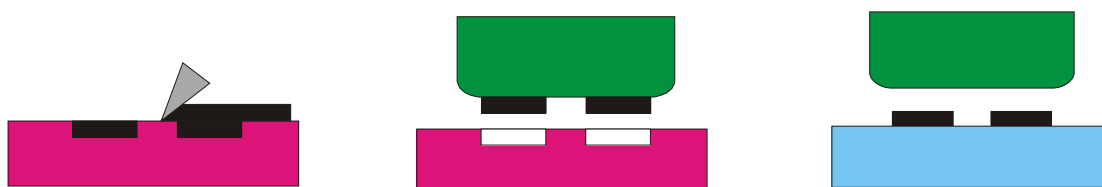


Rys. 2.6. Zasada druku atramentowego

2.7. Druk offsetowy

Wykorzystuje się także rozmaite techniki oparte na wytwarzaniu wzoru przy pomocy stempla, takie jak druk offsetowy czy druk mikrokontaktowy [82-87]. Idea powyższych metod jest podobna. W metodzie druku offsetowego grawurowego wzór struktury jest wykonywany w postaci rowków w specjalnej formie, zwykle metalowej, polimerowej bądź szklanej. Wzór wytrawia się chemicznie lub wycina laserem. Następnie rowki wypełnia się pastą przy pomocy zgarniaka, po czym do formy jest dociskany polimerowy stempel. Następuje wtedy transfer pasty ze wzoru na formie na powierzchnię stempla. W kolejnym kroku wzór ten jest odciskany na podłożu docelowym. Należy przy tym zauważyć, że transfer pasty nie jest całkowity - tylko część jej objętości jest przenoszona na podłoże; reszta pozostaje w formie i na stemplu. Zamiast stempla można także użyć wałka, który jest przetaczany po formie i następnie po podłożu. W druku offsetowym fleksograficznym wzór wykonywany jest na powierzchni wałka. Podczas jego obrotu jest napełniany w sposób ciągły

pastą, którą drugi wałek na bieżąco przenosi na kolejne podłoża. Spotyka się również modyfikacje tej metody - bezpośredni druk grawurowy (*direct gravure printing*), w którym wzór wytwarza się na powierzchni stempla i po wypełnieniu pastą odciska bezpośrednio na podłożu [88]. Pasta jest suszona i dopiero wtedy następuje oderwanie stempla od podłoża. Efektem jest transfer praktycznie całej objętości pasty z rowków wzoru.



Rys. 2.7. Druk offsetowy grawurowy

O rozdzielczości powyższych metod decyduje kilka czynników [89-91]. Największe znaczenie mają właściwości reologiczne pasty, która musi się charakteryzować znacznie mniejszą lepkością niż typowe kompozycje sitodrukowalne oraz mniejszym uziarnieniem składnika stałego. Niezwykle istotne są również właściwości powierzchni stempla, formy oraz samego podłoża, decydujące o transferze pasty. Druk offsetowy pozwala na wykonywanie w sposób powtarzalny struktur o minimalnych rozmiarach $15 \div 25 \mu\text{m}$.

W przypadku druku mikrokontaktowego na stemplu wytwarzany jest wypukły wzór struktury [92,93]. Następnie stempel zanurza się w paście, co powoduje jej przyłgnięcie do powierzchni wzoru, po czym wzór jest odciskany na podłożu. Technika ta charakteryzuje się bardzo wysoką rozdzielczością, nawet poniżej $1 \mu\text{m}$. Przy jej użyciu wytworzono linie o szerokości $2 \mu\text{m}$ i odstępach $4 \mu\text{m}$, jak również rezystory o szerokości $12 \mu\text{m}$ [92]. Uzyskanie tak wysokiej precyzji wymaga jednak użycia specjalnych past.

2.8. Metoda cięcia wiązką laserową

Do wytwarzania miniaturowych elementów można być wykorzystać również metodę cięcia wiązką laserową, zwykle przy użyciu lasera Nd:YAG ($\lambda = 1064 \text{ nm}$) [94-97]. Standardowo jest on stosowany do korekcji rezystorów i kondensatorów grubowarstwowych. Można jednak użyć wiązki laserowej do precyzyjnego formowania mikrostruktur. Ogólnie rzecz biorąc podejście to polega na naniesieniu warstwy materiału jedną z wymienionych dotychczas metod i wykorzystaniu lasera do selektywnego usunięcia wybranych obszarów. Pozostający obszar warstwy tworzy żądaną strukturę. Z uwagi na czas i koszt procesu usuwany obszar nie powinien być zbyt duży w stosunku do całej warstwy. Najczęściej

formuje się w ten sposób warstwy przewodzące - meandry bądź spirale w grzejnikach lub cewkach indukcyjnych, elektrody palczaste kondensatorów i czujników, itp. [95,98].

Jak widać, planarne rozmiary struktury określone są przez laser. Metoda użyta do uprzedniego naniesienia warstwy ma wpływ jedynie na jej grubość oraz właściwości powierzchni, np. gładkość. Osiąga się szerokości i odstępów rzędu 10÷15 μm (laser Nd:YAG z trzecią harmoniczną, $\lambda = 355 \text{ nm}$) [99]. Wartość ta jest zdeterminowana przez średnicę wiązki lasera. Cechą charakterystyczną nacięć wykonywanych laserem jest ich stożkowy profil, spowodowany spadkiem mocy wiązki wraz z odległością od jej środka. Tym samym szerokość nacięcia jest mniejsza przy podłożu niż przy powierzchni. Trudno więc uzyskać dokładnie pionowe i równoległe do siebie ściany boczne wycinanej struktury. Ponadto cięcie musi być nieco szersze, by zapewnić rozseparowanie warstwy przy podłożu. Obszar oddziaływania wiązki nie ogranicza się jednak do usuniętego fragmentu warstwy - rejony po obu stronach cięcia ulegają podgrzaniu i przetopieniu. W obszarach położonych w nieco większej odległości może zaś wystąpić pęknięcie warstwy, zwiększające jej rezystywność i pogarszające stabilność elementu jak również zwiększające poziom szumów. Ogranicza to minimalną osiąganą szerokość struktury. Parametry nacięcia zależą od właściwości ciętego materiału, między innymi stopnia pochłaniania promieniowania lasera. Na przykład warstwy przewodzące, składające się z ziaren metali, odbijają znaczną część promieniowania i są trudniejsze w obróbce niż warstwy rezystywne lub dielektryczne.

Znaczenie ma także podłoże, na którym naniesiono strukturę. W przypadku najczęściej stosowanej ceramiki alundowej promieniowanie lasera Nd:YAG (zarówno pierwsza jak i trzecia harmoniczna) praktycznie nie jest pochłaniane przez podłoże [1,94,97]. Można więc przeciąć warstwę dokładnie na całej grubości nie uszkadzając podłoża. W przypadku układów LTCC sytuacja jest inna. Podczas współwypalania na granicy warstwy i podłoża tworzy się obszar przejściowy (międzypowierzchnia). Jeśli naniesiono warstwę rezystywną lub przewodzącą, obszar ten również będzie posiadał pewną przewodność, zwierając wycięte struktury [2,97]. Cięcie musi tu zatem być poprowadzone na większą głębokość.

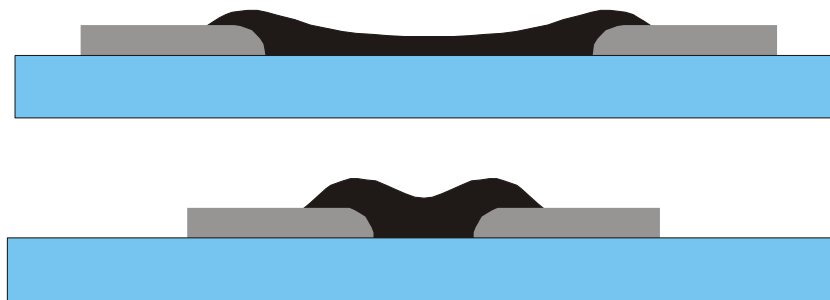
Szerokość wytwarzanych detali jest określona przez krok lasera między kolejnymi cięciami i można ją łatwo kontrolować. Inaczej jest z odstępem między poszczególnymi strukturami. Jak wcześniej wspomniano w przybliżeniu jest on równy średnicy wiązki. Wykonywanie szerszych odstępów wymaga więc kilkakrotnego przemieszczenia wiązki lasera wzdłuż linii cięcia, za każdym razem z pewnym przesunięciem. Można w ten sposób

wykonać cięcie o dowolnej i dokładnie dobranej szerokości. Jednak cały proces znacznie się wydłuża.

2.9. Rezystory grubowarstwowe

Rezystory są najczęściej wytwarzanymi biernymi elementami grubowarstwowymi [1,7,100,101]. Współczesne pasty rezystywne bazują na dwutlenku rutenu RuO_2 lub rutenianach, zwykle $\text{Bi}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$ bądź $\text{Pb}_2\text{Ru}_2\text{O}_{6+x}$ [17-20,102-104]. Stosuje się także dwutlenek irydu IrO_2 [105]. Fazą wiążącą jest zwykle szkło borokrzemowe. Zawartość objętościowa składnika przewodzącego w wypalanej warstwie waha się od kilku do ponad 40%. Pokrywają one zakres wartości rezystancji powierzchniowej od 1 do $10^7 \Omega/\square$. Typową konstrukcję rezystora pokazuje rys. 2.9. Rezystory z reguły są wykonywane jako elementy planarne. Najpierw na podłoże nanosi się i wypala warstwy przewodzące, które stanowią elektrody rezystora. Następnie jest наносzona warstwa rezystywna, po czym cała struktura jest ponownie wypalana. Szerokość rezystora jest określona przez szerokość warstwy rezystywnej, natomiast o długości decyduje odstęp między elektrodami. Odpowiednio zdefiniowane są również rozrzuty obydwu wymiarów planarnych. Cechą charakterystyczną warstw sitodrukowanych jest fluktuacja grubości w obszarze rezystora, związana z ziarnistą budową sita i tym samym z nierównomiernym transferem pasty na podłoże.

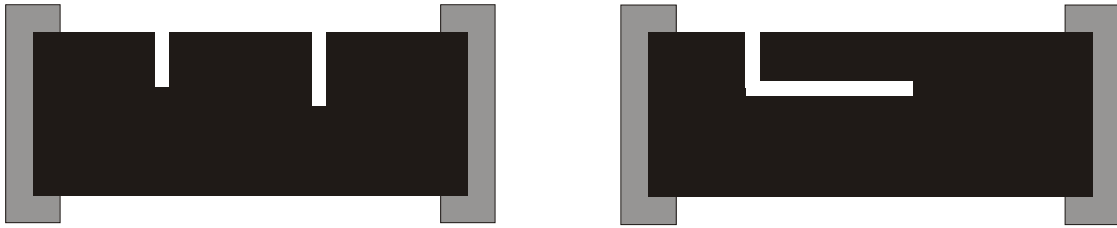
Powyższa konstrukcja rezystora powoduje, że z uwagi na obecność elektrod materiał rezystywny jest osadzany na podłożu już nieplanarnym. Skutkiem tego jest charakterystyczny wzrost grubości osadzonej warstwy przy kontaktach. Oznacza to spadek rezystancji powierzchniowej w tym obszarze elementu i tym samym zmniejszenie całkowitej rezystancji i jej odchylenie od wartości projektowanej [1]. Czasami spotyka się odwrotną konfigurację rezystora, w której warstwę rezystywną nadrukowuje się jako pierwszą, dopiero później elektrody. Pozwala to ograniczyć znacznie powyższy rozrzut grubości. Jednak w takim przypadku warstwa rezystywna jest wypalana dwukrotnie, co powoduje zmiany jej parametrów, w tym rezystancji powierzchniowej. Podobna sytuacja ma miejsce przy naniesieniu elektrod na niewypaloną warstwę rezystorową i ich wspólnym wypalaniu. Czynnikiem wpływającym negatywnie na właściwości rezystora jest tutaj silne oddziaływanie między niewypalonymi warstwami - przewodzącą i rezystywną.



Rys. 2.8. Zależność grubości rezystora od jego długości

Ponieważ nieodłączną częścią procesu technologicznego jest wypalanie w wysokiej temperaturze, zwykle z przedziału $750^{\circ}\text{C}\div 950^{\circ}\text{C}$, wyżej wspomniane interakcje między poszczególnymi materiałami wchodzącymi w skład elementu są nieuniknione [62,106-110]. Powodują one powstanie warstw przejściowych wzdłuż powierzchni styku poszczególnych materiałów, posiadających właściwości pośrednie, płynnie zmieniające się od jednego do drugiego ośrodka. Ich wpływ jest tym silniejszy, im większy jest ich udział w całkowitej objętości elementu. W przypadku rezystora najistotniejsze jest oddziaływanie warstw przewodzących tworzących doprowadzenia [14-16,18,109,111]. Podczas wypalania następuje migracja cząstek metalicznych w głąb warstwy rezystywnej. Prowadzi to z reguły do obniżenia rezystywności. Zdecydowanie rzadziej spotyka się zachowanie odwrotne, czyli jej wzrost, będący rezultatem formowania się w międzywarstwie związków o wysokiej oporności właściwej.

Jak można łatwo zauważyć, wpływ powyższego zjawiska będzie się nasilał wraz ze zmniejszaniem się długości rezystora. Dodatkowo będzie on wzmocniany przez wspomnianą zależność grubości warstwy rezystywnej od długości elementu. Przekłada się to na znaczne zmiany rezystancji powierzchniowej w funkcji długości rezystora. Na przykład przy zmianie długości od 800 do 200 μm wyznaczona rezystancja powierzchniowa spada nawet kilkakrotnie [14-16,112]. Podobna jest skala zmian innych parametrów, np. temperaturowego współczynnika rezystancji (TWR). Ponadto elementy miniaturowe charakteryzują się wyraźnie gorszymi właściwościami geometrycznymi, tzn. tolerancją wymiarów i odwzorowaniem warstwy. Przekłada się to na znaczny rozrzut parametrów elektrycznych. Ponadto ich zależność od wymiarów rezystora komplikuje proces projektowania.



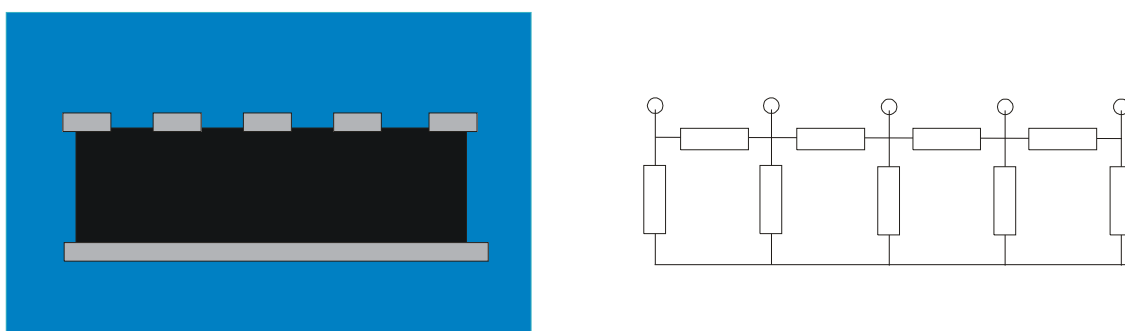
Rys. 2.9. Różne konfiguracje cięć korygujących

Niewielkie wymiary elementu pociągają za sobą jeszcze inne konsekwencje. Cechą charakterystyczną rezystorów grubowarstwowych jest znaczny rozrzut rezystancji, sięgający 15%÷20% wartości nominalnej. Odpowiada za to heterogeniczna struktura warstwy, o rezystywności której decyduje losowe rozmieszczenie ziaren fazy funkcjonalnej w matrycy szklanej oraz rozrzut rozmiarów rezystora [62,113]. Standardową częścią procesu wytwarzania rezystorów grubowarstwowych jest więc korekcja, zwykle przy użyciu lasera [1,2,25,28,29,114,115]. Polega ona na zmianie geometrii rezystora przez przecinanie warstwy rezystywnej, co powoduje wydłużenie linii prądu i wzrost rezystancji (rys. 2.9). Aby uzyskać dostateczną precyzję korekcji lub by w ogóle była ona wykonalna wymiary elementu muszą być znacznie większe od szerokości cięcia. Odpowiada ona w przybliżeniu średnicy wiązki lasera i minimalnie wynosi kilkanaście μm . Nie można więc zastosować tej metody korekcji w przypadku elementów miniaturowych. Ponadto elementy korygowane muszą się znajdować na powierzchni podłoża. Możliwe jest też nacinanie przez pojedynczą warstwę folii LTCC, jednak dla elementów zagrzebanych znajdujących się pod większą ilością warstw korekcja laserowa nie jest możliwa. Istnieje alternatywna metoda, polegająca na poddawaniu rezystora działaniu impulsu lub serii impulsów wysokonapięciowych [114-119]. Powoduje to zmiany struktury materiału rezystora i tym samym jego rezystywności. Możliwe jest zarówno zwiększanie jak i zmniejszanie korygowanej rezystancji. Metoda ta jest jednak bardziej skomplikowana, zaś parametry impulsu korygującego muszą być dobierane indywidualnie do danej pasty i wymiarów elementu.

Miniaturyzacja pogarsza również właściwości szumowe rezystorów grubowarstwowych. Dominuje w nich szum niskoczęstotliwościowy $1/f$ [120-123]. Widmowa gęstość mocy tego szumu charakteryzuje się odwrotnie proporcjonalną zależnością od objętości rezystora. Wzrasta zatem z kwadratem stopnia redukcji wymiarów planarnych.

2.10. Rezystory wielokontaktowe

Brak odpowiednich światłoczułych materiałów rezystywnych ogranicza stosowanie techniki past światłoczułych przy wytwarzaniu standardowych grubowarstwowych elementów biernych. Choć elektrody elementu można wykonać precyzyjnie, zasadniczą warstwa czynna musi być naniesiona sitodrukiem, tym samym uniemożliwiając zasadniczą redukcję rozmiarów. Problem można obejść przez zastosowanie odmiennej konstrukcji elementu. Ponieważ trudno zmniejszyć rozmiary pojedynczej struktury rozwiązaniem może być zwiększenie jej funkcjonalności tak, by była ona pod tym względem równoważna kilku-kilkunastu elementom standardowym (rys. 2.10). Podejście takie w stosunku do rezystorów polega na wykonaniu struktury wieloelektrodowej, odpowiadającej kompletnej sieci rezystywnej [30-33,124-126].



Rys. 2.10. Rezystor wielokontaktowy i równoważna sieć rezystorowa

Miniaturyzacja jest tutaj realizowana przez integrację obwodu. Pomimo relatywnie dużych rozmiarów element wieloelektrodowy zajmuje mniejszą powierzchnię niż równoważny układ rezystorów dwukontaktowych. W części jest to spowodowane wyeliminowaniem marginesów technologicznych między poszczególnymi strukturami indywidualnymi. Elementy wielokontaktowe wydają się ponadto posiadać lepsze właściwości w zakresie mikrofal [32,33]. Wykorzystywanie struktur wielokontaktowych wiąże się jednak z nowymi problemami, nieobecnymi przy stosowaniu rezystorów dwuelektrodowych. Podstawowym z nich jest znacznie bardziej złożony proces projektowania takiej struktury, zwłaszcza w porównaniu z prostymi obliczeniami dla rezystora standardowego [30,31]. W ogólnym przypadku konieczne jest stosowanie metod numerycznych. Co więcej, przy danej funkcji układowej wybór topologii elementu nie jest jednoznaczny. Istnieje nieskończenie wiele

wariantów realizacji elementu. Tylko niektóre z nich są realizowalne technologicznie. Np. stosunek największego i najmniejszego wymiaru takiej struktury nie może przyjmować zbyt dużej wartości, gdyż byłby to element o zbyt dużych rozmiarach bądź też o wymiarze minimalnym poniżej granicy precyzyjnego odtworzenia.

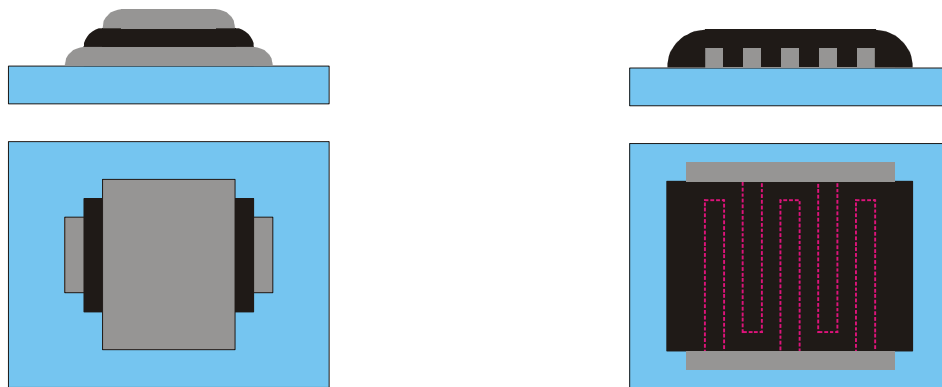
2.11. Kondensatory w układach grubowarstwowych

Drugą grupę najpowszechniej stosowanych grubowarstwowych elementów biernych stanowią kondensatory [1,34,38-44,127,128]. Wytwarza się przy użyciu past o względnej przenikalności elektrycznej ϵ_r z zakresu $10 \div 10\ 000$. Materiałem funkcjonalnym są szkła lub w przypadku wyższych przenikalności TiO_2 bądź BaTiO_3 . Typowo wykorzystywana jest konfiguracja kanapkowa, w której dwie elektrody planarne są przedzielone warstwą dielektryczną (rys. 2.11a). Z reguły każdą z warstw wypala się po naniesieniu, czyli dielektryk jest wypalany dwukrotnie. W przypadku podłoży LTCC proces przebiega nieco inaczej, jako że stosowane jest współwypalanie. Ponieważ warstwy dielektryczne są porowate, aby uniknąć zwarć między elektrodami stosuje się dwukrotny ich nadruk. Przy typowej grubości pojedynczej warstwy ($10 \div 15\ \mu\text{m}$) oznacza to $20 \div 30\ \mu\text{m}$ grubości dielektryka. Jest to relatywnie dużo, zwłaszcza w porównaniu z techniką cienkowarstwową. Stąd ograniczone możliwości wytwarzania kondensatorów grubowarstwowych o dużej pojemności. Wymaga to stosowania materiałów ferroelektrycznych, których właściwości silnie zależą od temperatury. Nie można więc uzyskać przy ich pomocy termostabilnych elementów pojemnościowych.

W porównaniu z rezystorami miniaturyzacja kondensatorów powoduje nieco odmienne efekty. Teoretycznie, z punktu widzenia geometrii, zmniejszenie długości i szerokości przy zachowaniu ich stosunku nie powoduje zmiany rezystancji. Natomiast w przypadku kondensatora taka zmiana prowadzi do zmniejszenia powierzchni okładek i spadku pojemności, proporcjonalnego do kwadratu względnych zmian wymiarów. Ponadto przy wymiarach rzędu kilkudziesięciu μm stają się one porównywalne z grubością dielektryka, czyli odległością między okładkami. Ujawniają się wówczas efekty brzegowe, związane z polem elektrycznym rozproszonym na krawędziach elektrod, i tym samym następuje dodatkowy spadek pojemności. Dlatego tym większa staje się zatem konieczność użycia dielektryków o wysokiej przenikalności.

Stosuje się również odmienną konstrukcję kondensatora w postaci struktury palczastej (rys. 2.11b) [16,45-47]. W uproszczeniu wykorzystuje się tutaj pojemność między

równoległymi ścieżkami przewodzącymi. Obie elektrody wytwarza się w formie grzebieni o naprzemiennie ułożonych palcach. Warstwę dielektryczną nanosi się na elektrody. Strukturę taką możemy więc traktować jako planarną. W przeciwieństwie do struktur kanapkowych pole elektryczne 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 niż dla struktury standardowej (zal. 2.1). Stosuje się w tym celu metody przybliżone (zal. 2.2-2.4) lub prowadzi się obliczenia numeryczne [45-47,128]. Warto także zauważyć, że grubszy dielektryk oznacza w tym przypadku większą, a nie mniejszą pojemność. Wartości pojemności uzyskiwane w strukturach palczastych są kilkakrotnie mniejsze niż w kondensatorze kanapkowym o tej samej powierzchni. Pamiętać jednak należy, że nie zawsze wymagane są duże pojemności. W zakresie wielkich częstotliwości i mikrofal wystarczają pojemności małe, rzędu kilkunastu - kilkudziesięciu pF.



a) b)
Rys. 2.11. Standardowa konfiguracja kanapkowa (a) i palczasta (b) kondensatora grubowarstwowego

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d} \text{ - kondensator kanapkowy} \quad (2.1)$$

$$C = \varepsilon_0 \frac{(n-1)l}{2} \left[\varepsilon_r \frac{K'(k_2)}{K(k_2)} + \frac{K'(k_1)}{K(k_1)} \right] \text{ - kondensator planarny palczasty} \quad (2.2)$$

$$k_1 = \frac{w_2}{2w_1 + w_2} \quad (2.3)$$

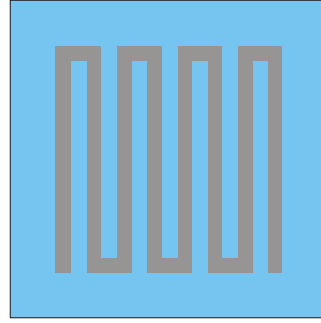
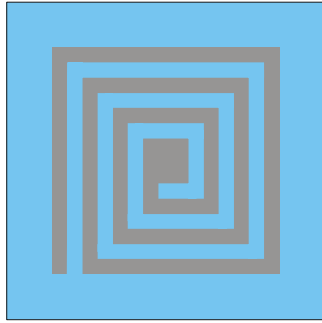
$$k_2 = \frac{\operatorname{th}\left(\frac{\pi w_2}{4d}\right)}{\operatorname{th}\left(\frac{\pi(2w_1 + w_2)}{4d}\right)} \quad (2.4)$$

gdzie ε_0 , ε_r - przenikalność elektryczna próżni i względna przenikalność elektryczna, S , d - pole powierzchni i grubość dielektryka, w_1 , l , - szerokość i długość elektrod palczastych, w_2 - odstęp pomiędzy elektrodami, n - liczba palców, $\operatorname{th}()$ - tangens hiperboliczny, $K(k)$, $K'(k)$ - całka eliptyczna zupełna I rodzaju i jej dopełnienie [127].

Pojemność takiego kondensatora jest proporcjonalna do liczby i długości palców, w mniejszym stopniu zależy od ich szerokości. Miniaturyzacja powoduje redukcję tych wielkości. Znacznie silniejsza jest jednak zależność pojemności od odstępów między elektrodami. Zmniejszanie odstępów powoduje wzrost pojemności. Ponadto powiększanie szerokości palców elektrody powyżej wartości odstępów nie powoduje już wyraźnego wzrostu pojemności. Przy redukcji wymiarów spadek pojemności można skompensować przez zwiększenie gęstości wzoru, zmniejszając odstęp między palcami elektrod oraz ich liczbę. Można tu wykorzystać np. technikę past światłoczułych lub wycinać elektrody laserem, co pozwala na uzyskanie wymiarów nawet do kilkunastu μm . W odróżnieniu od struktur kanapkowych zmienia się tutaj odległość między elektrodami. Powoduje to zmiany udziału warstwy przejściowej elektroda-dielektryk w całkowitej objętości dielektryka, pojawi się zatem efekt rozmiarowy. Będzie on wyraźniejszy w układach LTCC, gdyż zakres wzajemnych oddziaływań jest większy wskutek współwypalania.

2.12. Cewki indukcyjne

Grubowarstwowe cewki indukcyjne jak dotychczas są wytwarzane zdecydowanie rzadziej niż rezystory i kondensatory [76,129-134]. Głównym powodem są ogólne problemy z konstrukcją cewek w technice warstwowej (klasyczna cewka jest raczej komponentem trójwymiarowym). Ponadto ścieżki przewodzące w układach grubowarstwowych charakteryzują się wyraźnie mniejszą przewodnością niż materiał lity, co skutkuje znaczną szeregową rezystancją pasożytniczą. Tym samym dobroć cewek planarnych nie przekracza kilkudziesięciu. Naturalną topologią cewki w technice warstwowej jest planarna ścieżka przewodząca w kształcie meandra bądź spirali prostokątnej lub okrągłej (rys. 2.12).



a) b)
Rys. 2.12. Konstrukcje cewek indukcyjnych - spirala (a) i meander (b)

Niestety, indukcyjności takich struktur są stosunkowo niewielkie. Z kolei struktura trójwymiarowa jest kłopotliwa w realizacji. Musi ona być wykonana co najmniej na dwóch poziomach układu wielowarstwowego. Zwoje na poszczególnych poziomach są połączone przez otwory przelotowe. Nie da się więc uzyskać uzwojenia o dużej gęstości. Rolę rdzenia może spełniać warstwa magnetyczna naniesiona na lub znajdująca się pod ścieżką przewodzącą. Stosuje się także folie LTCC z materiału magnetycznego [132]. Również tutaj, jak w przypadku kondensatorów palczastych, wykonanie precyzyjnego wzoru o dużej rozdzielczości umożliwia zachowanie wartości indukcyjności przy redukcji wymiarów. Niestety, z praw skalowania (zal. 2.5-2.6) wynika, że dobroć kondensatora przy miniaturyzacji nie ulega zmianie, ale w przypadku cewki zmniejsza się z kwadratem zmian wymiarów. Ogranicza to istotnie możliwości wytwarzania miniaturowych induktorów.

$$Q_c(d) = const \quad (2.5)$$

$$Q_L(d) = \frac{1}{d^2} \quad (2.6)$$

gdzie d - wymiar charakterystyczny elementu

2.13. Warystory grubowarstwowe

Miniaturyzacja układu grubowarstwowego może być też ograniczona przez konieczność zastosowania elementów dyskretnych. Przykładem mogą być warystory grubowarstwowe [34-37,135-137]. Używane są one do ochrony elementów i układów elektronicznych przed wysokonapięciowymi narażeniami impulsowymi, do czego wykorzystuje się silną

nieliniowość ich charakterystyki prądowo-napięciowej. Właściwość tą ceramika warystorowa uzyskuje podczas wypalania w wysokiej temperaturze (powyżej 1200°C). Proces ten jest zatem niekompatybilny ze standardową technologią warstw grubych. Z kolei obniżenie temperatury wypalania do wartości typowych dla tej techniki skutkuje znacznym obniżeniem nieliniowości charakterystyki warystora i tym samym pogorszeniem jego właściwości ochronnych. Narzuca to potrzebę użycia elementów dyskretnych, ceramicznych lub grubowarstwowych, powiększając powierzchnię zajmowaną przez układ. Zasadniczym celem jest tutaj opracowanie warystorowej pasty o temperaturze wypalania obniżonej do typowego zakresu 750°C-850°C. Umożliwiłoby to wytwarzanie zintegrowanych elementów warystorowych w jednym procesie razem z resztą układu, na wspólnym podłożu.

2.14. Inne elementy grubowarstwowe

W technice grubowarstwowej wytwarza się również wiele innych rodzajów elementów. Jednymi z szerzej stosowanych są termistory, zarówno typu PTC [138,139] jak i NTC [140-143], pełniące zwykle funkcję czujników temperatury. Podobne zadanie realizują termopary (termostosy) [144-148], które jednocześnie mogą jednak pracować jako generatory zasilające układy elektroniczne. Wykonuje się je zarówno w pełnym procesie grubowarstwowym, jak też w mieszanej technologii cienko- i grubowarstwowej. Oprócz pojedynczych induktorów wykonywane są także transformatory grubowarstwowe [76,149-152], wykorzystujące jako podłoże ceramikę ferromagnetyczną. Technika grubowarstwowa pozwala na realizację szerokiej gamy czujników różnych wielkości fizycznych i chemicznych, np. siły (ciśnienia) i przesunięcia [4-6, 50], wilgotności i zawartości gazów [3,48,49,153]. Wytwarzane są w niej elementy typowe dla techniki wielkich częstotliwości i mikrofalowej - linie transmisyjne, falowody, filtry, rezonatory, itp. [64-75].

3. Rezystory dwuelektrodowe planarne

3.1. Wstęp

Klasyczny rezystor grubowarstwowy wykonany jest w postaci planarnego prostokątnego elementu dwuelektrodowego. Na naniesione uprzednio doprowadzenia z past przewodzących nakłada się warstwę rezystywną. Obie stanowią integralne części elementu. Odstęp między elektrodami określa długość rezystora. Natomiast wymiary warstwy rezystywnej decydują o szerokości i grubości elementu. Standardową metodą nanoszenia warstw grubych jest sitodruk. W przypadku elementów miniaturowych ta technika okazuje się niedostatecznie precyzyjna i nie gwarantuje odpowiedniej jakości warstw. Konieczne jest zatem zastosowanie innych metod nanoszenia.

Obiecująca wydaje się tu technika fotoformowania. Obecnie jednak komercyjnie dostępne są jedynie światłoczułe pasty dielektryczne i przewodzące. Rezystywne kompozycje światłoczułe są natomiast przedmiotem prac badawczych, m.in. takich producentów materiałów na potrzeby techniki grubowarstwowej jak DuPont lub Hibridas [21,23]. Podjęto zatem próbę wykonania rezystorów przy użyciu eksperymentalnej pasty rezystywnej EP E-93350-153, dostarczonej przez firmę DuPont [14-16,23]. Zastosowano przy tym trzy warianty wytwarzania mikrorezystorów testowych - warstwę rezystywną odwzorowywano metodą fotolitograficzną oraz przy pomocy zwykłego sitodruku, z tej samej pasty. Trzeci wariant wytwarzania mikrorezystorów opierał się na połączeniu klasycznego sitodruku do naniesienia warstwy rezystywnej, fotoformowania elektrod oraz nacinania struktury wiązką lasera [97].

3.2. Wytwarzanie struktur testowych

Na potrzeby badań wykonano serię dwukontaktowych mikrorezystorów planarnych. W większości przypadków wykorzystano materiały firmy DuPont. Jako podłoża zastosowano standardową ceramikę alundową (96% Al_2O_3) oraz folię LTCC DP951, zarówno niewypaloną, jak i przygotowaną w postaci odpowiedniego podłoża ceramicznego. Podłoże LTCC składano z 4 warstw folii o grubości 114 μm . Następnie przeprowadzono laminację pod ciśnieniem 200 barów przez 10 min. w temperaturze 70°C. W przypadku struktur współwypalanych na podłożu wytwarzane były rezystory testowe, po czym całą strukturę wypalano zgodnie z zaleceniami producenta w profilu z temperaturą szczytową 875°C [55]. W wariantcie z oddzielnym wypalaniem najpierw wypalano w powyższym profilu samo

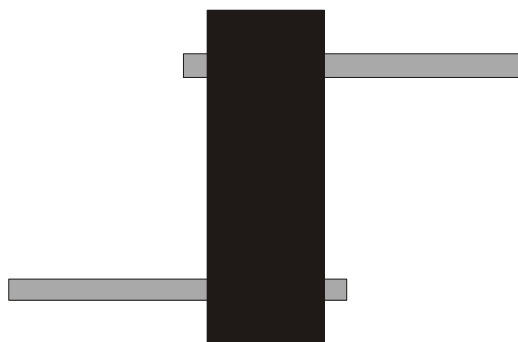
podłoże. Następnie procedura przebiegła identycznie jak w przypadku podłoży alundowych, tzn. nanoszono i wypalano kolejne warstwy w standardowym profilu 850°C/60 min.

Światłoczuła srebrowa pasta przewodząca DP6453 została wykorzystana do wytworzenia elektrod rezystorów. Zastosowano następujące pasty rezystywne: EP E-93350-153 (kompozycja eksperymentalna 1 kΩ/□), DP2031 (1 kΩ/□), CF041 (10 kΩ/□) - wszystkie firmy DuPont - oraz pastę firmy Heraeus R8951 (100 kΩ/□).

Rezystory wytworzono w trzech wariantach technologicznych (tab. 3.1). W każdym z nich elektrody elementów wykonano metodą fotoformowania. W dwóch pierwszych wariantach użyto eksperymentalnej pasty rezystywnej EP E-93350-153. W pierwszym wariantcie obszar rezystywny uformowano w procesie fotolitografii. Struktury wytworzono jedynie na podłożach alundowych. Zastosowano jednak rzadko spotykaną kolejność realizacji poszczególnych warstw, tzn. w pierwszej kolejności naniesiono i wypalono warstwę rezystywną i na niej elektrody (warstwa rezystywna była tu wypalana dwukrotnie), podczas gdy w przypadku pozostałych struktur kolejność była odwrotna. Drugie podejście polegało na zastosowaniu standardowego procesu nanoszenia, czyli zwykłego sitodruku bez żadnych modyfikacji. W obu przypadkach zastosowano jednakowe wzory struktur testowych (rys. 3.1). Wytworzono rezystory o trzech różnych szerokościach nominalnych: 50, 100 i 200 μm. Dla każdej z nich zaprojektowano długości 50, 100, 200, 400 i 800 μm.

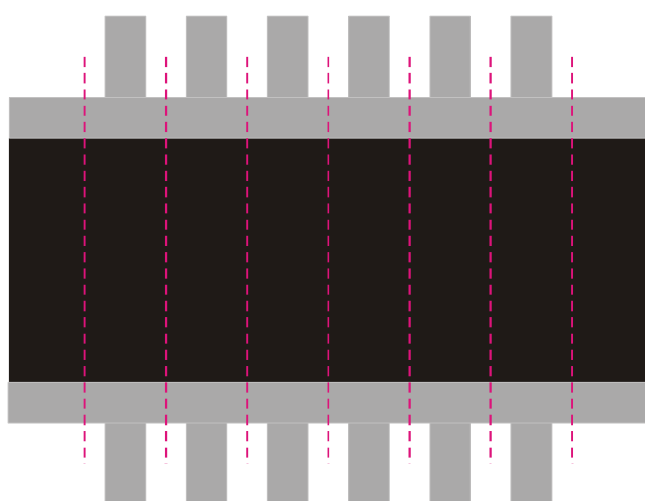
Tab. 3.1. Warianty wykonania rezystorów testowych

fotoformowanie	sitodruk		wycinanie wiązką laserową
	wypalanie oddzielne	współwypalanie	
nadruk warstwy rezystywnej	laminacja i wypalanie (podłoże LTCC)	laminacja folii LTCC	nadruk elektrod
suszenie	nadruk elektrod	nadruk elektrod	suszenie
wypalanie	suszenie	suszenie	nadruk warstwy rezystywnej
nadruk elektrod	wypalanie	nadruk warstwy rezystywnej	suszenie
suszenie	nadruk warstwy rezystywnej	suszenie	wypalanie
naświetlanie	suszenie	wypalanie	cięcie wiązką laserową
wywołanie	wypalanie		
wypalanie			



Rys. 3.1. Przykładowa struktura testowa wykonywana metodą sitodruku lub fotoformowania warstwy rezystywnej

Trzeci wariant polegał na zastosowaniu lasera [193]. Wykorzystano pozostałe 3 pasty rezystywne - DP2031, CF041 i R8951. Identycznie jak w dwóch poprzednich przypadkach elektrody wykonano z przewodzących past światłoczułych przy wykorzystaniu procesu fotolitografii, warstwę rezystywną natomiast nanoszono wyłącznie sitodrukiem. Struktura testowa miała stałą szerokość 1600 μm . Długość struktury (odległość elektrod) wynosiła 200, 400, 600 lub 800 μm . Następnie struktura była dzielona laserem na sześć jednakowych rezystorów przy pomocy nacięć wykonywanych w odstępnie 200 μm , z pozostawieniem po obu bokach również 200 μm marginesów (rys. 3.2).



Rys. 3.2. Struktura wycinana wiązką laserową

Zastosowano laser ekscymerowy KrF (model LPX 210 Lambda Physik) o następujących parametrach wiązki:

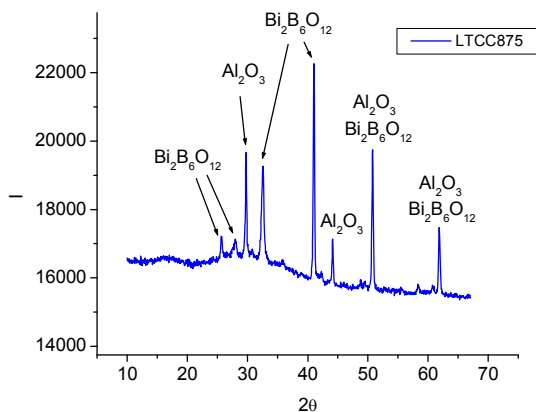
- długość fali 248 nm
- średnica wiązki 30 μm
- gęstość energii 40 J/cm^2
- częstotliwość 200 Hz
- krok przesuwu wiązki 1 μm [97].

Wszystkie struktury testowe zostały zaprojektowane przez autora pracy, natomiast wykonano je częściowo na Uniwersytecie Technicznym w Dreźnie.

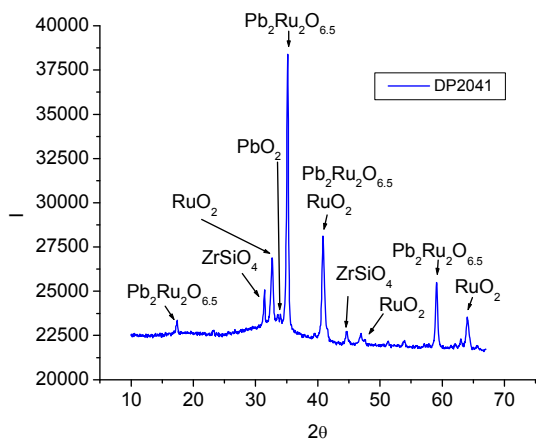
3.3. Makro- i mikrostruktura

Przeprowadzono badania makro- i mikrostruktury rezystorów testowych. Fazy krystaliczne w badanych próbkach zidentyfikowano metodą dyfraktometrii proszkowej. Badania przeprowadzono na dyfraktometrze DRON-2 przy wykorzystaniu promieniowania lampy kobaltowej Co z filtrem Fe ($\lambda = 1,785313 \text{ \AA}$). Obserwacje powierzchni oraz przekrojów warstw wykonano przy pomocy elektronowego mikroskopu skaningowego. Na potrzeby badań wykonano specjalne struktury testowe w postaci kwadratów o wymiarach $15 \times 15 \text{ mm}^2$, składające się z samych warstw rezystywnych na podłożu ceramicznym. W celu ograniczenia liczby badanych próbek zbadano tylko pasty CF041 oraz - w zastępstwie pasty DP2031 - DP2041 z tej samej rodziny past. Jako podłoża wykorzystano wypalone folie LTCC. Dyfraktogramy podłoża LTCC oraz badanych struktur umieszczono na rys. 3.3-3.5. Natomiast rys. 3.6-3.7 prezentują przełomy przez warstwy rezystywne, obserwowane pod mikroskopem skaningowym.

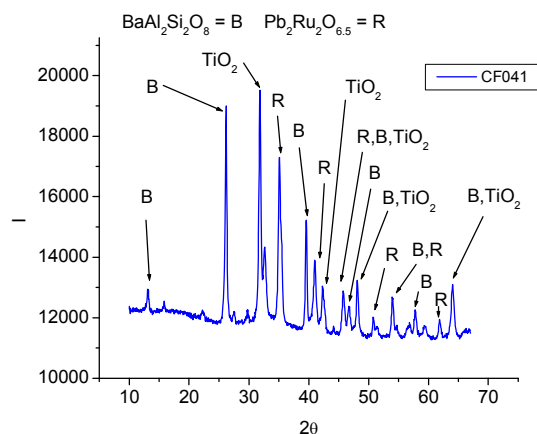
Analiza rentgenowska potwierdziła typowy skład past rezystywnych. Wykryto obecność związków rutenu - dwutlenku rutenu (RuO_2) oraz rutenianu ołowiu ($\text{Pb}_2\text{Ru}_2\text{O}_{6,5}$) (rys. 3.4-3.5). Pierwszy z nich stwierdzono tylko w paście DP2041. Oba te tlenki są powszechnie stosowane jako faza funkcjonalna w pastach rezystywnych [17-20]. W paście DP2041 stwierdzono także obecność krzemianu cyrkonu (ZrSiO_4) oraz tlenku ołowiu, pochodzącego najprawdopodobniej z zawartego w paście szkła ołowiwoborokrzemowego. Dyfraktogram kompozycji CF041 zawierał natomiast liczne linie odpowiadające rutyłowi TiO_2 jak również $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$.



Rys. 3.3. Dyfraktogram podłoża LTCC wypalonego w 875°C



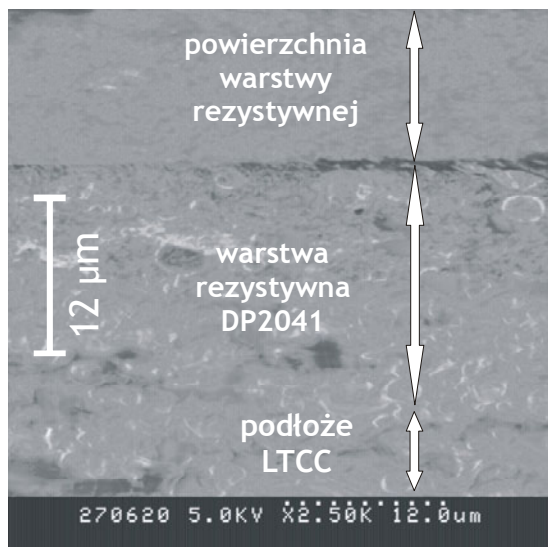
Rys. 3.4. Dyfraktogram pasty rezystywnej DP2041 na podłożu LTCC wypalonym w 875°C



Rys. 3.5. Dyfraktogram pasty rezystywnej CF041 na podłożu LTCC wypalonym w 875°C

Badania podłoża LTCC ujawniły głównie tlenek glinu Al_2O_3 i $\text{Bi}_2\text{B}_6\text{O}_{12}$. Pierwsza z tych substancji jest jednym z podstawowych materiałów stosowanych w produkcji folii LTCC [2]. Nie zostały natomiast zidentyfikowane inne znane składniki LTCC, jak chociażby SiO_2 . Krzywe otrzymane dla podłoża wypalanych w różnych temperaturach nie wykazywały większych różnic. Nie stwierdzono pojawienia się żadnych nowych faz krystalicznych. Zmianie uległ jedynie stosunek wysokości niektórych maksimum dla najmniejszych kątów. Porównując wyniki uzyskane dla warstw rezystywnych oraz samych podłoża można stwierdzić, że fazy występujące w podłożu nie zostały wykryte w naniesionych warstwach. Może to świadczyć o niewielkim zakresie oddziaływania rezystora z podłożem, zwłaszcza, że użyto wypalonych już podłoża LTCC. W przypadku współwypalania wzajemne interakcje niewątpliwie byłyby silniejsze. Z drugiej strony podstawowa informacja dotyczy warstwy

dosyć znacznie oddalonej od podłoża i stąd skład fazowy międzypowierzchni nie jest tutaj dokładnie analizowany.



Rys. 3.6. Warstwa pasty DP2041 na podłożu LTCC - powiększenie x2500

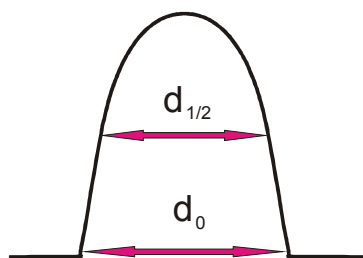


Rys. 3.7. Warstwa pasty CF041 na podłożu LTCC - powiększenie x2500

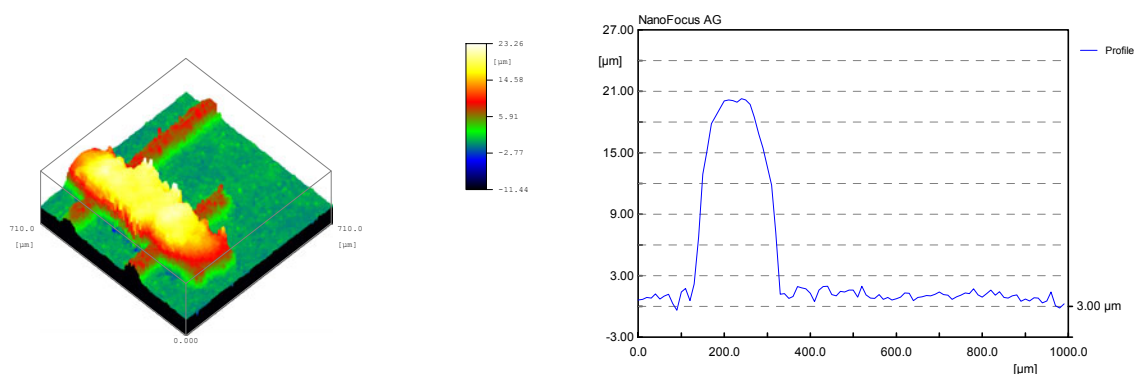
Obserwacje za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego wykazały, że w przypadku obu past rezystywnych otrzymano zwarte warstwy, pozbawione porów czy pęknięć. Również w podłożu nie występowały zauważalne defekty. Pojawiła się wyraźna granica między warstwą i podłożem, bez obszaru przejściowego. Nie zaobserwowano istotnych różnic w mikrostrukturze obu warstw rezystywnych.

3.4. Właściwości geometryczne

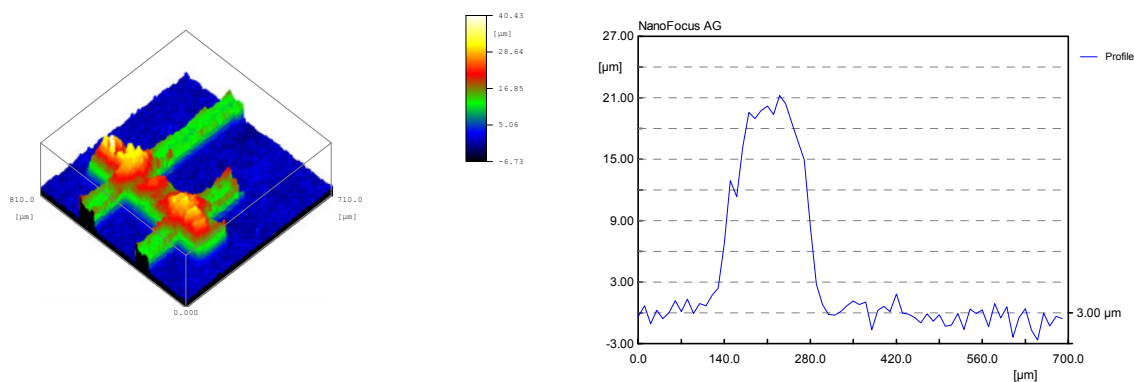
Właściwości geometryczne struktur autor zbadał przy pomocy profilometru OME μScan AF2000 firmy Nanofocus. Pomiary przeprowadzono na Uniwersytecie Technicznym w Dreźnie. Zmierzono rozkłady grubości elementów i na ich podstawie wyznaczono profile przekrojów poprzecznych w wybranych obszarach struktur. Ponadto określono wymiary planarne rezystorów. Z uwagi na trapezowe profile przekroju warstw powyższe wymiary określano na poziomie połowy grubości warstwy (rys. 3.8). Wymiary rzeczywiste struktur porównano z wartościami projektowanymi. Wyniki pomiarów pokazane są na rysunkach 3.9-3.14, natomiast tabele 3.2-3.5 zawierają obliczone wymiary rezystorów testowych.



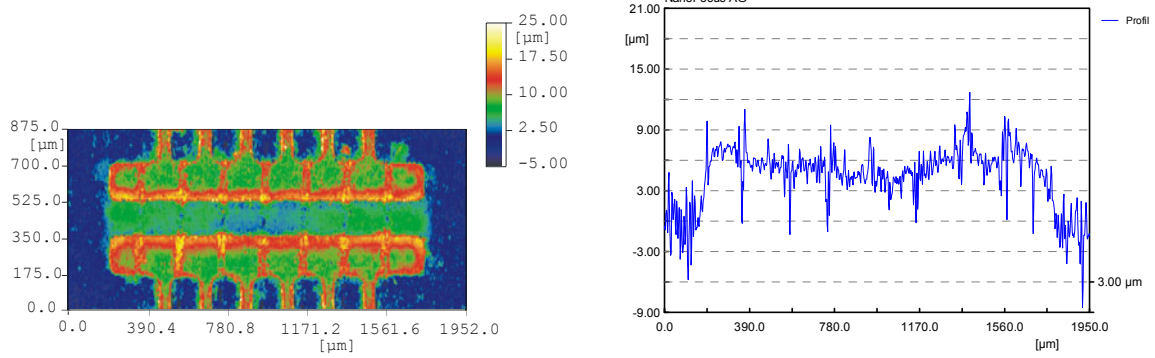
Rys. 3.8. Sposób wyznaczania wymiarów planarnych struktur



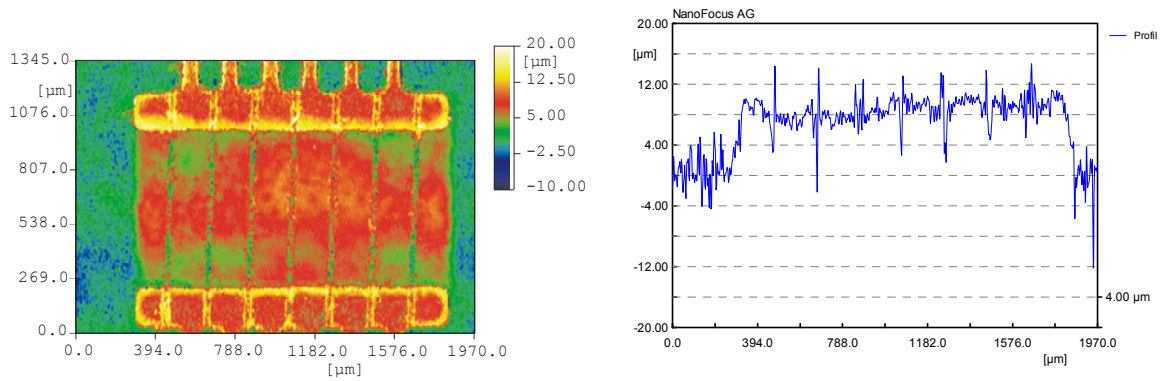
Rys. 3.9. Rozkład grubości i profil przekroju struktury o długości 200 μm na podłożu alundowym, sitodruk warstwy rezystywnej



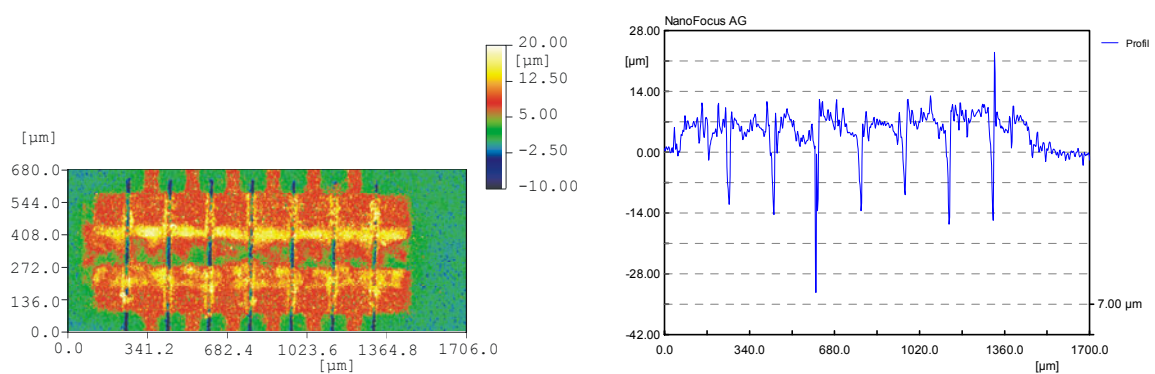
Rys. 3.10. Rozkład grubości i profil przekroju struktury o długości 200 μm na podłożu LTCC, fotoformowanie warstwy rezystywnej



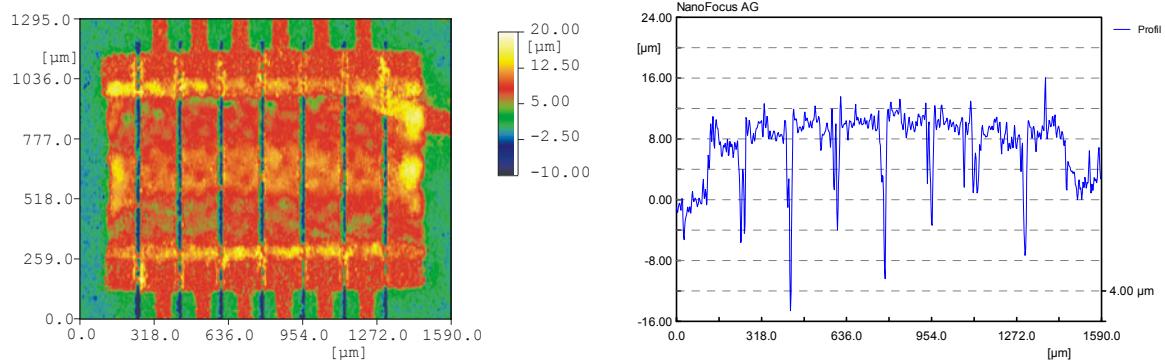
Rys. 3.11. Rozkład grubości i profil przekroju struktury o długości 200 μm na podłożu alundowym, cięcie wiązką laserową



Rys. 3.12. Rozkład grubości i profil przekroju struktury o długości 800 μm na podłożu alundowym, cięcie wiązką laserową



Rys. 3.13. Rozkład grubości i profil przekroju struktury o długości 200 μm na podłożu LTCC, cięcie wiązką laserową



Rys. 3.14. Rozkład grubości i profil przekroju struktury o długości 800 μm na podłożu LTCC, cięcie wiązką laserową

Właściwości geometryczne rezystorów silnie zależą od zastosowanej techniki wytwarzania. Struktury fotoformowane charakteryzowały się wyraźnie lepszymi parametrami niż nanoszone sitodrukiem. Przekrój poprzeczny warstwy fotoformowanej jest znacznie bliższy idealnego kształtu prostokątnego w porównaniu z typowym trapezowym profilem warstwy sitodrukowanej. Boczne ściany są gładziej i nachylone do podłoża pod kątem zbliżonym do kąta prostego, co potwierdza wyniki uzyskane przez innych badaczy [63,66]. Widoczne jest to szczególnie przy porównaniu wymiarów planarnych warstw mierzonych w różnej odległości od podłoża, czyli d_0 i $d_{1/2}$ (rys. 3.9-3.10). Różnica ta jest znacznie większa w przypadku stosowania sitodruku ($50 \div 100 \mu\text{m}$) w porównaniu z $10 \div 20 \mu\text{m}$ dla fotoformowania. Mniej więcej dwukrotnie mniejszy jest też rozrzut statystyczny wymiarów. Ponadto należy zauważyć, że rzeczywiste wymiary warstw nanoszonych sitodrukiem są większe niż wymiary wzoru na sicie, co jest zapewne skutkiem rozplywu pasty po podłożu podczas drukowania. Odwrotny efekt obserwuje się dla past fotodefiniowalnych. Ich cechą charakterystyczną jest skurcz podczas wypalania. W rezultacie wytworzone struktury mają wymiary mniejsze niż wzór na masce użytej do naświetlania warstwy. Wpływ danej techniki na właściwości geometryczne rezystora zależy także od tego, który element rezystora, tzn. elektrody czy warstwa rezystywna, jest wytwarzany przy jej pomocy. Węższe niż w projekcie elektrody przekładają się na większy odstęp między nimi i tym samym większą długość rezystora, szersze zaś powodują jej zmniejszenie. Element z elektrodami fotoformowanymi będzie zatem miał rezystancję większą, a z sitodrukowanymi mniejszą niż planowana. Odwrotna sytuacja ma miejsce w przypadku warstwy rezystywnej - jej szerokość jest wprost szerokością samego rezystora. Oznacza to, że w przypadku rezystorów z warstwą rezystywną nanoszoną sitodrukiem oba wymiary planarne są większe niż nominalne. Tym samym wprowadzane przez nie zmiany liczby kwadratów elementu wzajemnie się kompensują i wypadkowa odchyłka jest mniejsza. Przy fotoformowanej warstwie rezystywnej zauważony

trend zmian długości i szerokości prowadzi do wzrostu liczby kwadratów w porównaniu z planowaną. Niezależnie od techniki wytwarzania struktury względna różnica między projektowanymi i rzeczywistymi wymiarami rośnie wraz z ich zmniejszaniem. Zatem elementy miniaturowe charakteryzować się będą większym rozrzutem rezystancji. Jak jednak wspomniano wcześniej, w przypadku techniki fotoformowania ten rozrzut jest mniejszy niż przy sitodruku.

Tab. 3.2. Projektowane i rzeczywiste wymiary struktur sitodrukowanych (pasta rezystywna DP2031) i fotoformowanych (pasta przewodząca DP6453) - mierzone na poziomie podłoża (d_0) i w połowie grubości warstwy ($d_{1/2}$), ($s_{d_{1/2}}$ - odchylenie standardowe wymiaru $d_{1/2}$)

		DP2031 (sitodruk)				DP6453 (fotoformowana)				
		projekt	sito	d_0	$d_{1/2}$	$s_{d_{1/2}}$	projekt	d_0	$d_{1/2}$	$s_{d_{1/2}}$
		[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
szerokość	800	788	813	745	21	400	396	383	14	
	600	584	609	541	17	200	194	176	8	
	400	385	415	345	18	100	84	69	7	
	200	190	213	148	15	50	46	35	5	
długość	800	788	803	683	27	200	179	173	8	
	600	586	601	502	28	150	127	118	7	
	400	387	413	337	20	100	83	69	6	
	200	191	212	166	16	50	45	38	4	

Tab. 3.3. Projektowane i rzeczywiste szerokości rezystorów - sitodruk

w [μm]						
projekt	LTCC współwypalane			alund/LTCC wypalane oddzielnie		
	wymiary rzeczywiste			wymiary rzeczywiste		
	min.	śr.	maks.	min.	śr.	maks.
50	61	84	105	71	81	91
100	107	119	126	119	139	151
200	196	207	221	228	236	257

Dodatkowym czynnikiem wpływającym na finalne rozmiary struktur jest rodzaj podłoża. Cechą zastosowanej folii LTCC jest jej skurcz we wszystkich trzech osiach podczas wypalania, wynoszący ok. 12,7% w kierunkach x,y [55]. Powoduje to porównywalną redukcję rozmiarów elementów wykonanych na niej. Zmniejszenie wymiarów jest jednakowe w obu kierunkach na płaszczyźnie, zatem liczba kwadratów rezystora nie ulega zmianie. Teoretycznie nie powinno to mieć wpływu na rezystancję elementu, jeśli uwzględni się wyłącznie czynnik geometryczny.

Tab. 3.4. Projektowane i rzeczywiste długości rezystorów dla ścieżek fotoformalnych

projekt	l [μm]					
	LTCC współwypalane			alund/LTCC wypalane oddzielnie		
	wymiary rzeczywiste			wymiary rzeczywiste		
	min.	śr.	maks.	min.	śr.	maks.
50	60	67	73	78	85	96
100	120	123	127	123	134	141
200	218	228	238	230	234	241
400	410	423	435	430	440	447
800	819	821	824	814	831	850

Tab. 3.5. Projektowane i rzeczywiste szerokości rezystorów - cięcie wiązką laserową

krok cięcia	w [μm]					
	LTCC			alund		
	wymiary rzeczywiste			wymiary rzeczywiste		
	min.	śr.	maks.	min.	śr.	maks.
200	168	172	177	178	182	187

Odmienna sytuacja ma miejsce w przypadku rezystorów wycinanych laserem. Metoda nanoszenia warstw ma znaczenie tylko w odniesieniu do długości rezystorów. W tym przypadku elektrody wykonywano wyłącznie metodą fotoformowania. Należy podkreślić, że dla tych struktur na etapie projektowania uwzględniono różnice między wymiarami planowanymi i rzeczywistymi warstw przewodzących, określone przy wytwarzaniu dwóch poprzednich rodzajów struktur. Szerokość pojedynczego rezystora jest równa wielkości kroku lasera pomniejszonego o szerokość nacięcia, którą określają ustawienia parametrów lasera oraz właściwości fizykochemiczne nacinanej warstwy. Nie wpływa zatem na nią sposób nanoszenia warstwy rezystywnej. Zastosowanie dodatkowych marginesów po obu brzegach struktury powoduje, że powyższa reguła dotyczy również rezystorów położonych na krawędziach struktury. W przypadku badanych past rezystywnych nacięcie miało szerokość około 20 μm dla warstw na podłożu alundowym i około 30 μm dla warstw na podłożu LTCC (tab. 3.5). Trzeba zwrócić uwagę, że w drugim przypadku cięcie musi być głębsze i wchodzić w głąb podłoża. Przy cięciu tylko na głębokość równą grubości warstwy rezystywnej separacja poszczególnych rezystorów nie była wystarczająca, często występowały połączenia między sąsiednimi elementami (aczkolwiek o rezystancji rzędu kilku $\text{M}\Omega$). Prawdopodobnie podczas wypalania na granicy podłoże-rezystor formowała się wysokorezystywna warstwa przejściowa zawierająca rezystory, która również musi być przecięta. W przypadku podłoży alundowych przecinana była tylko warstwa rezystywna, nacinanie podłoża nie było konieczne. Co więcej, w ogóle ono wtedy nie zachodziło, co jest okolicznością korzystną,

gdyż uszkodzenia podłoża mogą się propagować i pogarszać ewentualnie stabilność i niezawodność elementu.

Należy wziąć pod uwagę, że przekrój nacięcia nie jest idealnie prostokątny, ale ma kształt ściętego stożka, tzn. szerokość cięcia zmniejsza się wraz z zagłębianiem w warstwę. Szerokość struktury zmienia się więc w funkcji odległości od podłoża. Zależność ta jest jednak znacznie słabsza niż w przypadku warstwy sitodrukowanej i porównywalna z uzyskaną dla warstw fotoformowanych.

3.5. Parametry elektryczne

Dla każdego z wariantów technologicznych zmierzono podstawowe parametry elektryczne elementów testowych. Wyznaczono wartości średnie rezystancji elementów oraz ich rozrzuty statystyczne. Określono zmiany rezystancji w funkcji temperatury. Wybrane rezystory schładzane były przy pomocy ciekłego azotu do temperatury -170°C i następnie podgrzewane stopniowo do $+130^{\circ}\text{C}$. W wybranych temperaturach mierzono rezystancje elementów. Obliczone zostały rezystancje powierzchniowe R_{\square} (zal. 3.1). W celu wyznaczenia $GTWR$ (zal. 3.2) przeprowadzono prostszy pomiar na liczniejszej próbie rezystorów, mierząc ich rezystancje w temperaturze 25°C i 125°C .

$$R_{\square sr} = R_{sr} \frac{w_{sr}}{l_{sr}} \quad (3.1)$$

$$GTWR = \frac{R(125^{\circ}\text{C}) - R(25^{\circ}\text{C})}{R(25^{\circ}\text{C})} \times 10^6 [\text{ppm}/^{\circ}\text{C}] \quad (3.2)$$

gdzie l_{sr} , w_{sr} - średnia długość i szerokość rezystora, $R(25^{\circ}\text{C})$, $R(125^{\circ}\text{C})$ - rezystancje mierzone w temperaturze 25°C i 125°C .

Zbadano także właściwości szumowe rezystorów, szczególnie w zakresie niskich częstotliwości, gdzie zwykle dominuje szum typu $1/f$.

Tabele 3.6-3.8 prezentują wyniki pomiarów podstawowych parametrów elektrycznych rezystorów testowych. Natomiast na rys. 3.16-3.18 pokazano przebieg zmian rezystancji elementów w funkcji temperatury. Generalnie właściwości rezystorów są silnie powiązane z technologią oraz ich rozmiarami. W przypadku rezystorów wykonanych z past DP2031 i R8951 oraz pasty eksperymentalnej EP E-93350-153 wartości rezystancji elementów największych odpowiadały wartościom projektowanym. Potwierdzeniem tego była zbieżność obliczonej rezystancji powierzchniowej z danymi katalogowymi producenta [154]. Wyniki

takie uzyskano zarówno dla rezystorów na podłożu alundowym jak i na LTCC. Rezystancja powierzchniowa pasty CF041 nieco odbiegała od wartości nominalnej.

Tab. 3.6. Podstawowe parametry elektryczne rezystorów sitodrukowanych ($w = 200 \mu\text{m}$) (v_R - współczynnik zmienności, tj. stosunek odchylenia standardowego do wartości średniej R)

podłoże	l [μm]	R_{sr} [k Ω]	v_R [%]	$R_{\square sr}$ [k Ω/\square]	l/w	$GTWR_{sr}$ [ppm/ $^{\circ}\text{C}$]	S_{GTWR} [ppm/ $^{\circ}\text{C}$]
LTCC współ- wypalane	50	0,106	27	0,371	0,29	143	27
	100	0,196	11	0,381	0,52	114	12
	200	0,443	11	0,459	0,97	60	17
	400	1,142	10	0,639	1,79	14	8
	800	2,814	6	0,807	3,48	-22	13
LTCC wypalane oddzielnie	50	0,198	27	0,486	0,41	91	106
	100	0,280	28	0,434	0,64	11	51
	200	0,709	26	0,627	1,13	-4	92
	400	2,000	9	0,947	2,12	-9	69
	800	4,723	3	1,183	4,00	-27	9
alund	50	0,112	-	0,280	0,40	100	-
	100	0,209	-	0,320	0,65	85	-
	200	0,424	-	0,390	1,09	50	-
	400	1,207	-	0,600	2,01	15	-
	800	3,790	-	1,000	3,79	5	-

Tab. 3.7. Podstawowe parametry elektryczne rezystorów fotoformowanych ($w = 200 \mu\text{m}$)

podłoże	l [μm]	R_{sr} [k Ω]	$R_{\square sr}$ [k Ω/\square]	l/w	$GTWR_{sr}$ [ppm/ $^{\circ}\text{C}$]
alund	50	0,243	0,630	0,38	55
	100	0,446	0,660	0,68	40
	200	0,765	0,690	1,11	10
	400	1,786	0,930	1,92	-20
	800	3,514	0,930	3,78	-15

We wszystkich wariantach technologicznych stwierdzono silny efekt rozmiarowy, czyli zależność parametrów struktur od wymiarów planarnych. Zmniejszanie długości rezystorów skutkowało zmniejszaniem się rezystancji powierzchniowej. Tym samym mierzone rezystancje były mniejsze od wartości założonych. Przy zmianie długości elementu od 800 μm do 200 μm spadek rezystancji powierzchniowej wynosił od 30% dla struktur DP2031/ Al_2O_3 do 70% dla rezystorów CF041/LTCC. W przypadku struktur DP2031/LTCC efekt ten był analogiczny z wyjątkiem najmniejszych struktur, gdzie zaobserwowano wzrost rezystancji powierzchniowej. Zachowanie to można jednak przypisać defektom tych elementów, co potwierdzałyby znaczna liczba struktur wadliwych, o rezystancjach znacznie przekraczających planowane wartości. Pasta EP E-93350-153 charakteryzowała się spadkiem rezystancji rzędu 50-60% w przypadku zastosowania sitodruku. Warstwy wytworzono

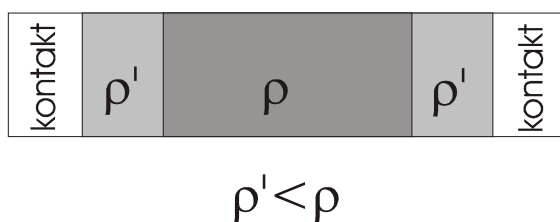
w pełnym procesie fotoformowania wykazywały zmiany ok. 30%. Można zatem uznać, że wszystkie struktury testowe wykazują tzw. normalny efekt rozmiarowy, czyli zmniejszanie się rezystancji powierzchniowej wraz ze zmniejszaniem długości elementu [1,155]. Przyczyną tego zjawiska jest m.in. występujący wtedy wzrost grubości nanoszonej warstwy (zilustrowany na rys. 2.10). Większe znaczenie ma jednak interakcja między materiałem rezystywnym a elektrodami, wykonanymi w tym przypadku ze srebra [18,20,111,156,157]. Migracja cząstek metalicznych z elektrody w głąb obszaru rezystora skutkuje spadkiem jego rezystywności. Powoduje to powstanie wokół elektrod obszarów niskorezystywnych, których udział w całej objętości rezystora rośnie przy jego miniaturyzacji (rys. 3.15). Jak można się przekonać efekt ten jest bardzo silny i znacznie komplikuje proces projektowania mikrorezystorów.

Tab. 3.8. Podstawowe parametry elektryczne rezystorów wycinanych wiązką laserową ($w = 200 \mu\text{m}$)

podłoże	pasta	l [μm]	R_{sr} [k Ω]	V_R [%]	l/w	R_{sr} [k Ω/\square]	GTWR _{sr} [ppm/ $^{\circ}\text{C}$]	S_{GTWR} [ppm/ $^{\circ}\text{C}$]
Al_2O_3	DP2031	200	0,814	17,7	1,18	0,692	255	10
		400	1,645	6,6	2,35	0,699	257	22
		600	2,801	6,5	3,53	0,794	215	3
		800	4,772	12,7	4,71	1,014	157	36
	R8951	200	76,7	22,4	1,18	65,2	190	13
		400	168,7	6,8	2,35	71,7	125	26
		600	350,0	5,1	3,53	99,2	79	8
		800	617,3	6,3	4,71	131,2	42	6
LTCC	DP2031	200	2,168	24,9	1,18	1,843	275	86
		400	2,562	23,5	2,35	1,089	187	21
		600	3,870	13,2	3,53	1,097	155	8
		800	5,898	18,9	4,71	1,253	128	60
	CF041	200	4,93	24,3	1,18	4,19	456	170
		400	16,48	19,5	2,35	7,00	502	55
		600	29,54	11,7	3,53	8,37	411	41
		800	69,15	18,3	4,71	14,69	277	42

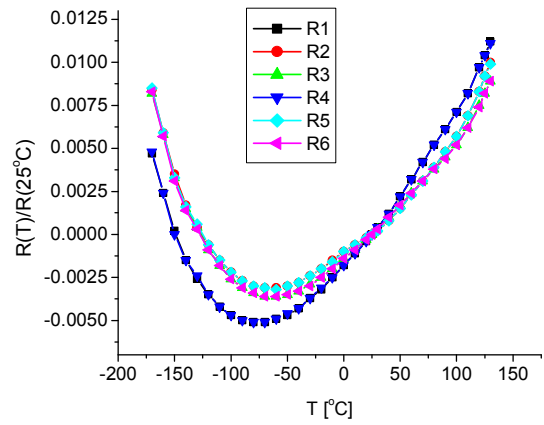
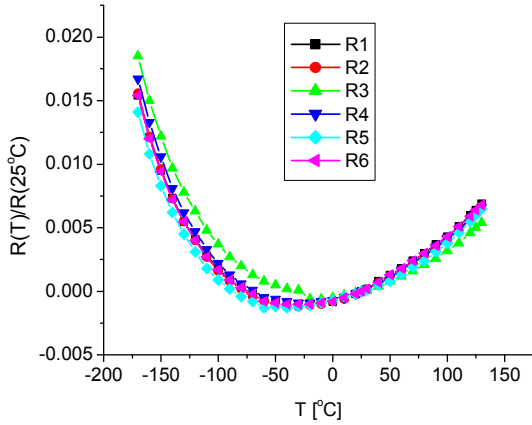
Rozrzut statystyczny rezystancji elementów mieścił się w zakresie od 5% do 30%. Największe rozrzuty we wszystkich przypadkach wykazywały rezystory najmniejsze. Wzrost rozrzutu szczególnie wyraźnie uwidocznił się dla rezystorów na podłożu alundowym (parametr ten zwiększał się mniej więcej trzykrotnie przy zmianie długości rezystora z 400 μm na 200 μm). Dla struktur na podłożu alundowym najmniejszy rozrzut, rzędu 5%÷7%, uzyskano przy długości rezystorów równej 800 μm (jedynie w przypadku elementów z pasty DP2031 rozrzut ten zwiększył się do 13%). Użycie podłoża LTCC zwiększało rozrzut 2÷3 razy, chociaż w przypadku najmniejszych rezystorów różnice były niewielkie. Rozrzut rezystancji rezystorów ciętych laserem był porównywalny z otrzymanym dla rezystorów

wytwarzanych klasyczną metodą sitodruku oraz metodą fotoformowania. Zwiększanie się rozrzutu parametrów wraz z redukcją wymiarów jest bezpośrednio związane z rosnącą rolą niedokładności procesu wytwarzania, tzn. tolerancją wymiarów elektrod rezystora czy precyzją cięcia laserem. Zasadnicze znaczenie wydaje się jednak mieć fluktuacja grubości warstwy na obszarze rezystora (rys. 3.9-3.14). Przy dużej powierzchni elementu wpływ tych niejednorodności zostaje uśredniony, natomiast dla mikrorezystora uśrednienie jest znacznie słabsze.

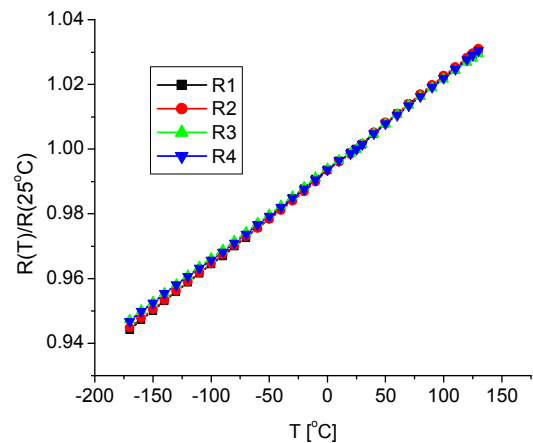
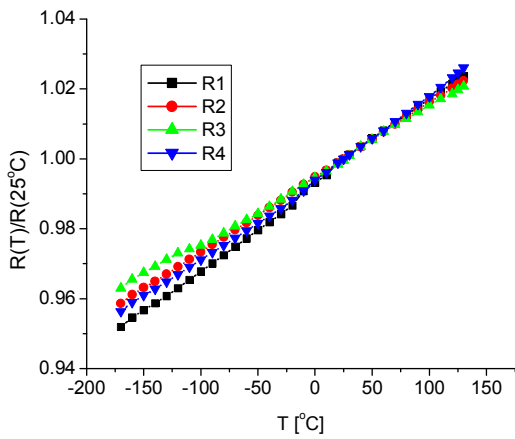


Rys. 3.15. Wpływ obszarów przykontaktowych na rezystywność warstwy rezystywnej

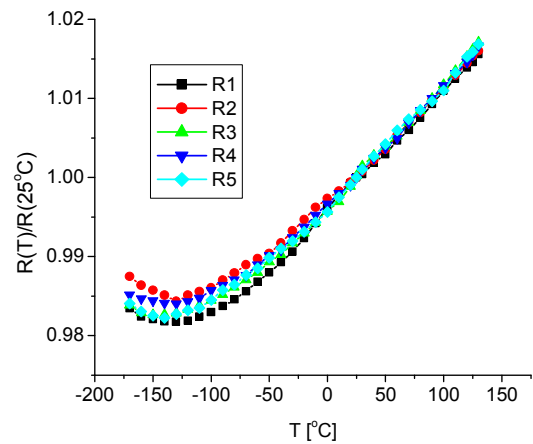
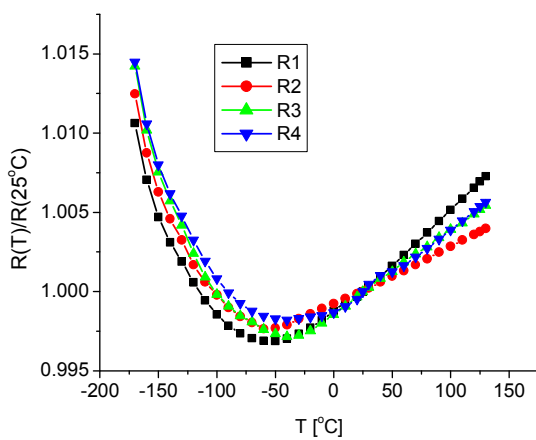
Charakterystyki temperaturowe mikrorezystorów (rys. 3.16-3.18) miały przebieg typowy dla rezystorów grubowarstwowych, z występującym minimum rezystancji dla pewnej temperatury [112,115]. Jedynie dla elementów DP2031 na alundzie otrzymano charakterystykę monotonicznie rosnącą, co jest jednak raczej skutkiem tego, że minimum leży poniżej badanego zakresu temperatur. Wartości gorącego temperaturowego współczynnika rezystancji zależały od użytej pasty rezystywnej i podłoża. Otrzymano wartości 150÷250 ppm/°C dla pasty DP2031, niezależnie od rodzaju podłoża, 50÷200 ppm/°C dla R8951 oraz -30÷150 ppm/°C dla pasty EP E-93350-153, przy czym dla rezystorów fotoformowanych był to zakres -15÷50 ppm/°C - jedynie dla tej pasty GTWR przyjmował wartości ujemne. Są to wartości akceptowalne, aczkolwiek dla rezystorów nieminiaturowych osiąga się wyraźnie mniejsze wartości. Wyraźnie gorsza od pozostałych była pasta CF041, gdzie GTWR kształtował się w granicach 300÷500 ppm/°C. Również tutaj ujawnił się istotny efekt rozmiarowy. Redukcja wymiarów rezystora prowadziła do przesunięcia minimum charakterystyki do niższej temperatury. Skutkowało to znacznym wzrostem wartości GTWR. Rozrzut charakterystyk temperaturowych był również większy dla najmniejszych rezystorów.



a) b)
Rys. 3.16. Charakterystyki temperaturowe rezystorów o długości 800 μm (a) i 200 μm (b), struktury EP E-93350-153/LTCC współwypalane, sitodrukowane

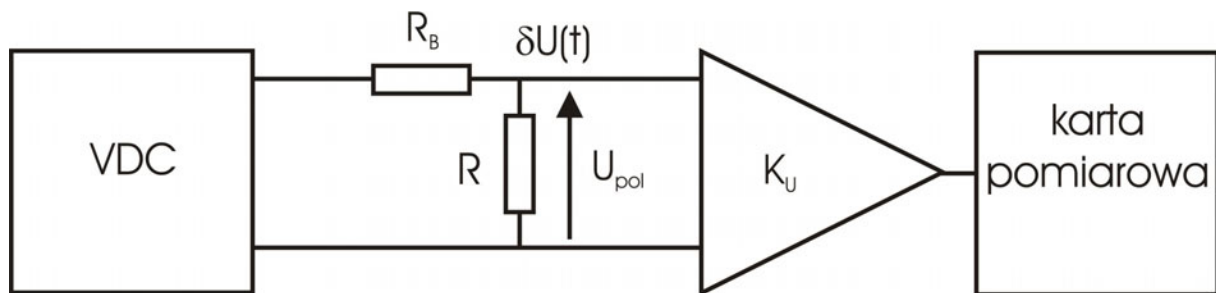


a) b)
Rys. 3.17. Charakterystyki temperaturowe rezystorów o długości 800 μm (a) i 200 μm (b), struktury DP2031/Al₂O₃ wycinane wiązką laserową



a) b)
Rys. 3.18. Charakterystyki temperaturowe rezystorów o długości 800 μm (a) i 200 μm (b), struktury R8951/Al₂O₃ wycinane wiązką laserową

Zbadano również właściwości szumowe rezystorów z pasty DP2031 wycinanych wiązką laserową. Pomiarów te autor wykonał w Katedrze Podstaw Elektroniki Politechniki Rzeszowskiej. Mierzono widmową gęstość mocy napięcia szumu S_U w zakresie 2 Hz÷5 kHz. Zastosowano metodę stałoprądową pomiaru fluktuacji napięcia na badanym rezystorze (rys. 3.19). Przy braku napięcia polaryzującego rezystor mierzono widmo sumy szumu termicznego oraz szumu toru pomiarowego. W celu otrzymania widma szumu nadmiarowego badanej struktury odejmowano je od widm mierzonych dla rezystora spolaryzowanego [123]. Widma szumu wyznaczano przy różnych wartościach napięcia polaryzującego. Następnie korzystając z zależności (3.3) i (3.4) obliczono napięcie szumów U_{sz} oraz wskaźnik szumów k_{sz} . Uwzględniając zależność szumu od objętości elementu (zal. 3.5) obliczono również teoretyczną wartość wskaźnika szumów dla rezystora o znormalizowanej powierzchni 1 mm², k_{szskat} .



Rys. 3.19 Układ do pomiarów szumów prądowych mikrorezystorów (δU - fluktuacja napięcia na rezystorze)

$$U_{sz} = \sqrt{\int_{20Hz}^{200Hz} S_U(f) df} \quad (3.3)$$

$$k_{sz} = 20 \log \left(\frac{U_{sz}}{U_{pol}} \times 10^6 \right) \quad (3.4)$$

$$S_U(f) = c \frac{U_{pol}^\alpha}{f^\gamma} \frac{1}{V} \quad (3.5)$$

gdzie S_U - widmowa gęstość mocy szumu, U_{sz} - napięcie skuteczne szumu, U_{pol} - napięcie stałe na rezystorze, α, γ, c - stałe, V - objętość rezystora [123,158].

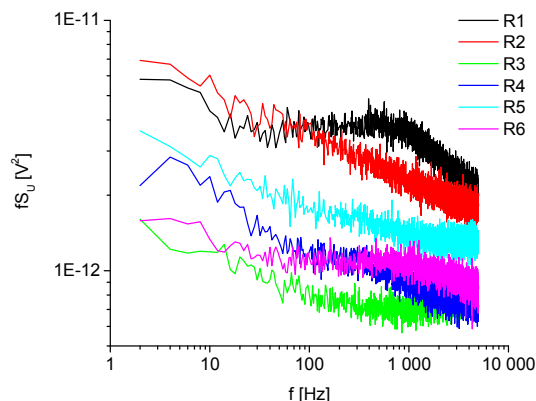
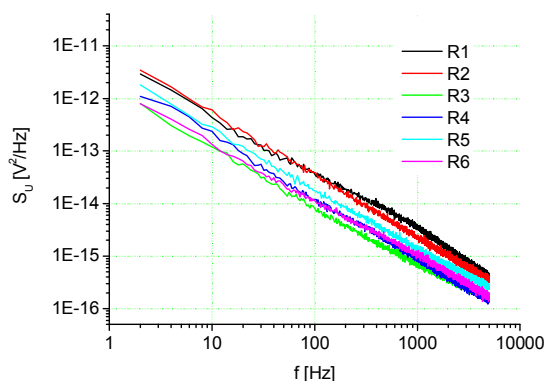
Obliczone parametry szumowe zebrano w tabeli 3.9, natomiast charakterystyki szumowe prezentowane są na rysunkach 3.20-3.22.

Tab. 3.9. Właściwości szumowe rezystorów dwuelektrodowych DP2031 wycinanych wiązką laserową

podłoże	l [μm]	U _{pol} [V]	U _{sz} [μV]	k _{sz} [dB]	k _{szskal} [dB]
Al ₂ O ₃	200	1	1,6 ÷ 3,3	4,0 ÷ 10,3	-10,0 ÷ -3,7
	800	4	3,7 ÷ 17,3	-0,6 ÷ 12,7	-8,6 ÷ 4,7
LTCC	200	1	13,0	22,3	8,3
	400	1	2,4 ÷ 7,2	7,8 ÷ 17,2	-3,2 ÷ 6,2
	800	4	2,8	-3,1	-11,0

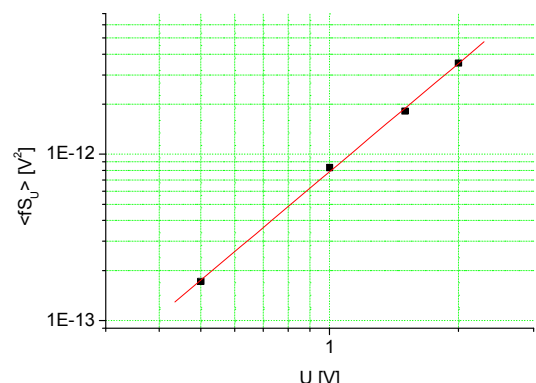
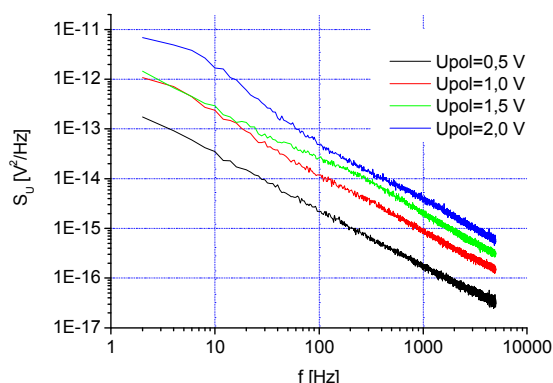
Na podstawie zmierzonych widm $S_U(f)$ szumu nadmiarowego można stwierdzić, że w badanych elementach dominuje szum prądowy $1/f$. Wskazuje na to nachylenie charakterystyk wykreślonych w układzie podwójnie logarytmicznym zbliżone do wartości równej -1. Potwierdza to również kwadratowa zależność uśrednionego iloczynu $\langle fS_U \rangle$ od napięcia polaryzującego U_{pol} . Zależność widmowej gęstości mocy S_U od częstotliwości i napięcia polaryzującego przybliżano zatem wzorem (3.5). Na podstawie nachylenia otrzymanych prostych wyznaczono stałe α i γ . Teoretyczne wartości tych współczynników dla szumu prądowego wynoszą $\alpha = 2$ i $\gamma = 1$. Dla struktur testowych otrzymano wartości α z przedziału 1,80÷2,16, zaś γ z przedziału 0,85÷1,20. Jedynie dla struktur o długości 400 μm na podłożu LTCC stała α przyjmowała wartości 1,5÷1,7. Potwierdza to wspomniane wyżej charakter szumów. Stwierdzono pewną zmienność widma iloczynu fS_U , który teoretycznie powinien być stały, szczególnie dla rezystorów o długości 200 μm na podłożu alundowym. Można to wyjaśnić przy pomocy modelu opisującego szum $1/f$ jako superpozycję szumów telegrafistów o różnych częstotliwościach [159]. Ich nierównomierny rozkład powoduje wspomniane zafalowania widma fS_U .

Wskaźnik szumów przyjmował wartości od -3,1 do 22,3 dB i był większy dla struktur LTCC. Wartości te są dość znaczne jak na technikę grubowarstwową [115,122,123,160-162]. Generalnie poziom szumu rósł znacząco dla elementów mniejszych. Przy zmianie długości od 800 do 200 μm był to wzrost o 4,6 dB w przypadku rezystorów na alundzie i aż o 25 dB dla elementów na podłożu LTCC (biorąc pod uwagę wartości graniczne). Tak duża różnica w drugim przypadku zdaje się być jednak spowodowana raczej defektami mniejszych elementów.



a) $S_U = f(f)$, $U_{pol} = 1 \text{ V}$

b) $fS_U = f(f)$, $U_{pol} = 1 \text{ V}$

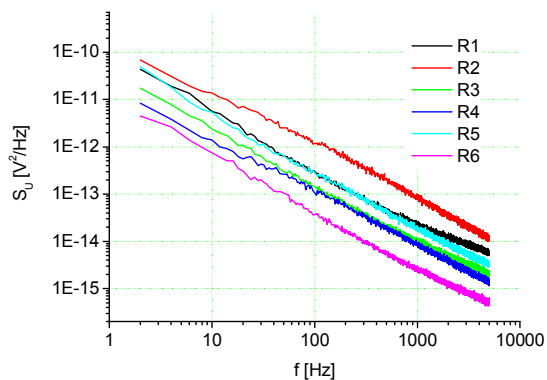


c) $S_U = f(f, U_{pol})$ (rezystor R4)

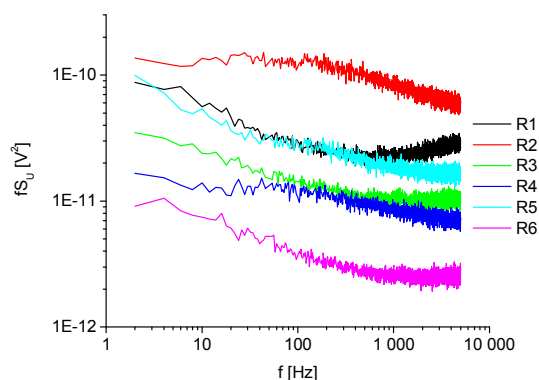
d) $\langle fS_U \rangle = f(U_{pol})$ (rezystor R4)

Rys. 3.20. Charakterystyki szumowe sześciu różnych rezystorów DP2031/ Al_2O_3 o długości $l = 200 \mu\text{m}$ (R1 - R6)

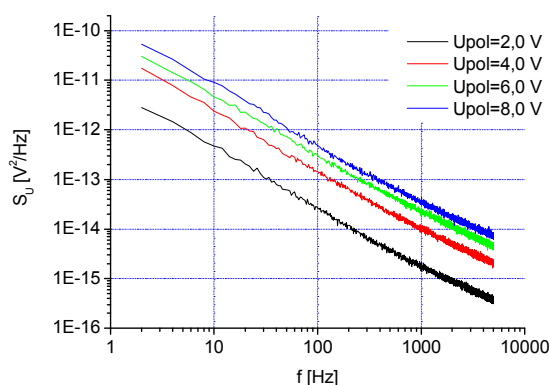
Zaobserwowano przy tym duży rozrzut mierzonego napięcia szumów. Nawet dla jednakowych rezystorów minimalny i maksymalny wskaźnik szumów różniły się nawet o około 13 dB. Zakładając odwrotnie proporcjonalną zależność wskaźnika szumów od objętości elementu na podstawie jego wartości dla rezystorów testowych obliczono teoretyczny wskaźnik szumów k_{szskal} dla rezystora o znormalizowanych wymiarach $1 \times 1 \text{ mm}^2$ (dla takiego elementu podawane są zwykle katalogowe wartości wskaźnika szumów; wg producenta pasty DP2031 wynosi on -20 dB [154]). W wyniku obliczeń dla wszystkich struktur testowych otrzymano większe wartości. W przypadku rezystorów na podłożu alundowym k_{szskal} malał dla mniejszych elementów, podczas gdy mikrorezystory na ceramice LTCC wykazywały wzrost jego wartości przy zmniejszaniu rozmiarów. Może to sugerować większe możliwości miniaturyzacji elementów na podłożu alundowym.



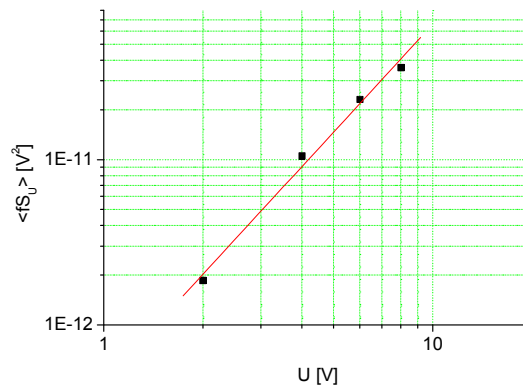
a) $S_U = f(f)$, $U_{pol} = 4 \text{ V}$



b) $\langle fS_U \rangle = f(f)$, $U_{pol} = 4 \text{ V}$



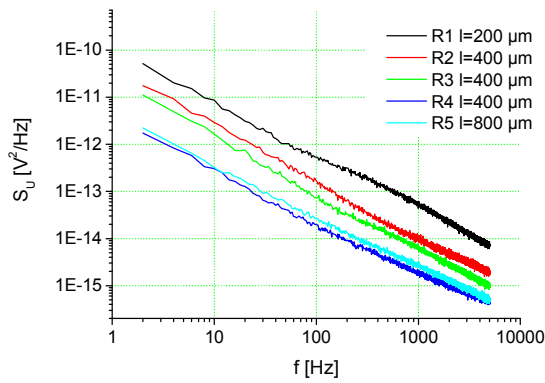
c) $S_U = f(f, U_{pol})$ (rezystor R3)



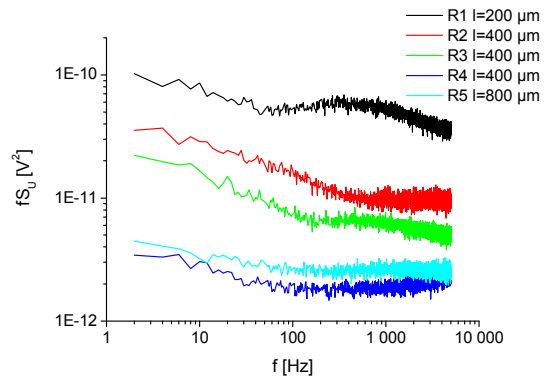
d) $\langle fS_U \rangle = f(U_{pol})$ (rezystor R3)

Rys. 3.21. Charakterystyki szumowe sześciu różnych rezystorów DP2031/Al₂O₃ o długości $l = 800 \mu\text{m}$ (R1 - R6)

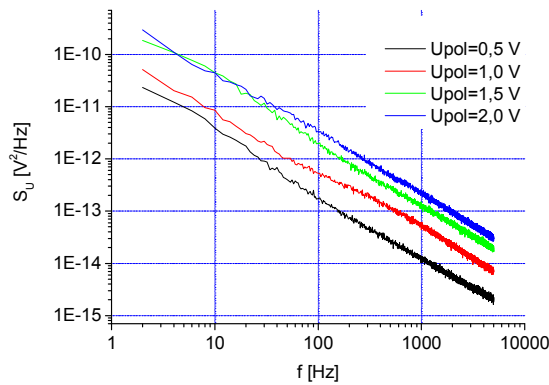
Należy przy tym wziąć pod uwagę niewielką licznosc badanej populacji rezystorów, która w połączeniu z dużym rozrzutem ich właściwości szumowych utrudnia wyciągnięcie ogólnych wniosków - zdaniem autora problem ten zasługuje na dokładniejszą analizę ilościową. Można jednak stwierdzić, że cięcie wiązką laserową nie spowodowało znaczącego pogorszenia właściwości szumowych elementów i z punktu widzenia tych właściwości ta metoda wytwarzania mikrorezystorów może być stosowana w praktyce.



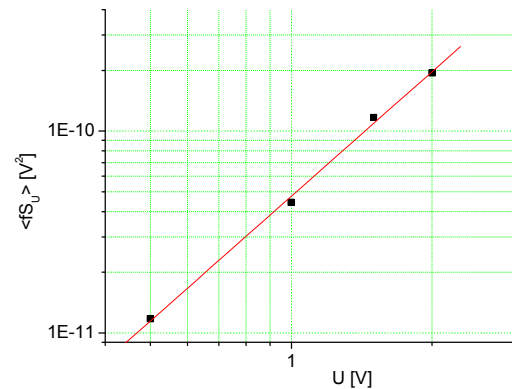
a) $S_U = f(f)$, $U_{pol} = 1$ V (4 V dla $l = 800$ μ m)



b) $fS_U = f(f)$, $U_{pol} = 1$ V (4 V dla $l = 800$ μ m)



c) $S_U = f(f, U_{pol})$ (rezystor R1)



d) $\langle fS_U \rangle = f(U_{pol})$ (rezystor R1)

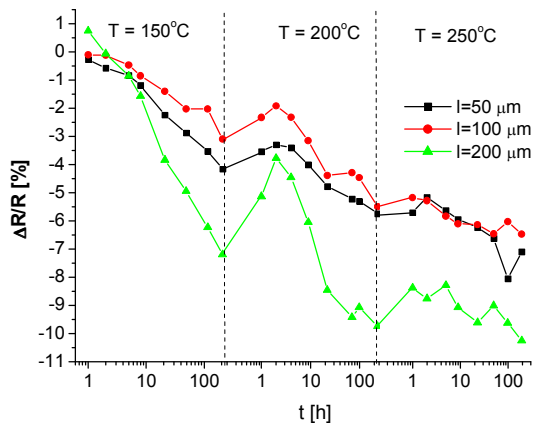
Rys. 3.22. Charakterystyki szumowe rezystorów DP2031/LTCC

3.6. Stabilność długoczasowa

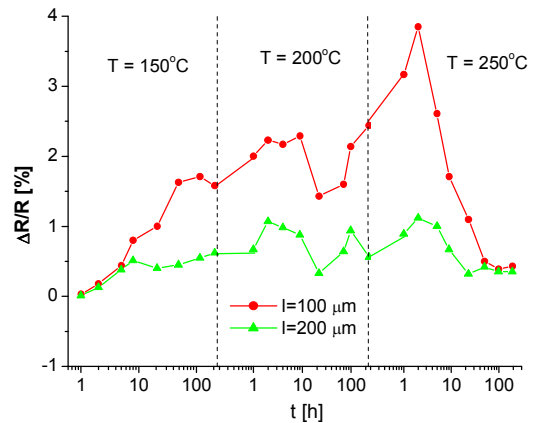
Aby określić stabilność długoczasową rezystorów poddano je przyspieszonemu starzeniu termicznemu kolejno w temperaturach 150, 200 i 250°C przez okres 200÷250 h w każdej z nich. Zmiany rezystancji mierzono w wybranych chwilach czasu w temperaturze pokojowej. Wyniki przedstawiono na rys. 3.23-3.28.

Najmniej stabilnie zachowywały się rezystory z eksperymentalnej pasty EP E-93350-153. Zmiany rezystancji sięgały nawet -10% dla struktur na alundzie (rys. 3.23) i 4% w przypadku podłoża LTCC (rys. 3.24). Wartości te są zdecydowanie powyżej akceptowalnego poziomu i wykluczają przydatność tej pasty do celów komercyjnych. Pozostałe pasty wykazywały wyraźnie lepszą stabilność. Rezystory wykonane z pasty DP2031 charakteryzowały się zmianami rezystancji w zakresie $\pm 3\%$ przy zastosowaniu podłoża alundowego (rys. 3.25) i $-0,5\% \div 2,5\%$ w przypadku folii LTCC (rys. 3.26). Podobny poziom zmian stwierdzono dla kompozycji R8951 (rys. 3.27). Najlepsze rezultaty uzyskano dla struktur CF041/LTCC

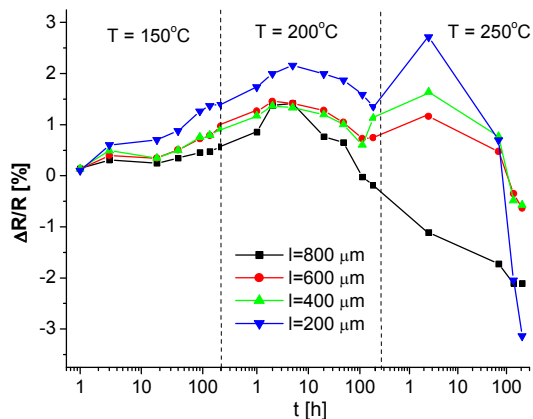
(rys. 3.28). Były to jednak struktury o bardzo dużej wartości GTWR. Charakter zmian rezystancji w funkcji czasu zależał również od rodzaju pasty. Dla kompozycji DP2031 niezależnie od typu podłoża następował stopniowy wzrost rezystancji w miarę czasu starzenia. Spadek następował w drugiej części lub dla podłoża LTCC dopiero pod sam koniec starzenia termicznego. Dla odmiany, rezystancja elementów z pasty R8951 zwiększała się do połowy każdego podcyklu, po czym zaczynała się zmniejszać. Sumaryczne zmiany były przy tym ujemne. W przypadku pasty CF041 obserwowano natomiast fluktuacje wartości rezystancji w górę i w dół, bez wyraźnie określonego trendu.



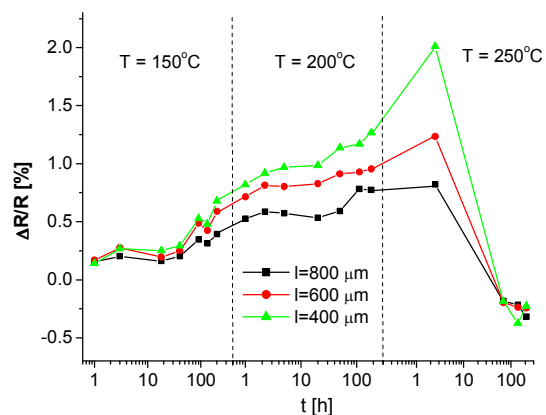
Rys. 3.23 Zmiany rezystancji w czasie starzenia termicznego, struktury EP E-93350-153/Al₂O₃ fotoformowane



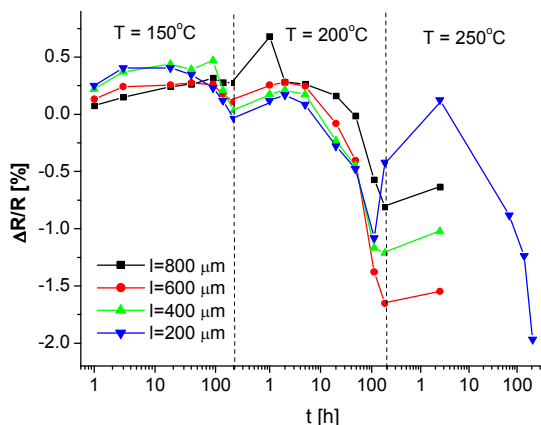
Rys. 3.24 Zmiany rezystancji w czasie starzenia termicznego, struktury EP E-93350-153/LTCC nanoszone sitodrukiem



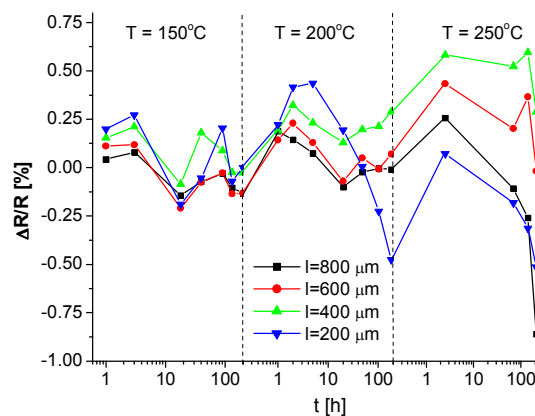
Rys. 3.25 Zmiany rezystancji w czasie starzenia termicznego, struktury DP2031/Al₂O₃ cięte laserem



Rys. 3.26 Zmiany rezystancji w czasie starzenia termicznego, struktury DP2031/LTCC cięte laserem



Rys. 3.27 Zmiany rezystancji w czasie starzenia termicznego, struktury R8951/Al₂O₃ cięte laserem



Rys. 3.28 Zmiany rezystancji w czasie starzenia termicznego, struktury CF041/LTCC cięte laserem

Niezależnie od wariantu technologicznego zmniejszenie wymiarów rezystorów prowadziło do pogorszenia ich stabilności. Szczególnie dużą różnicę zauważono dla rezystorów o długości 200 μm, zarówno jeśli chodzi o wartości jak i przebieg zmian rezystancji. Zależność stabilności od wymiarów można tłumaczyć rosnącym udziałem obszaru przykontaktowego w objętości mikrorezystora. W tym obszarze procesy starzeniowe postępują najintensywniej. Podkreślić jednak należy, że dla rezystorów wycinanych wiązką laserową pogorszenie stabilności nie jest duże i nawet dla najmniejszych rezystorów zakres zmian parametrów wywołanych starzeniem termicznym nie przekracza akceptowalnych wartości.

3.7. Odporność impulsowa

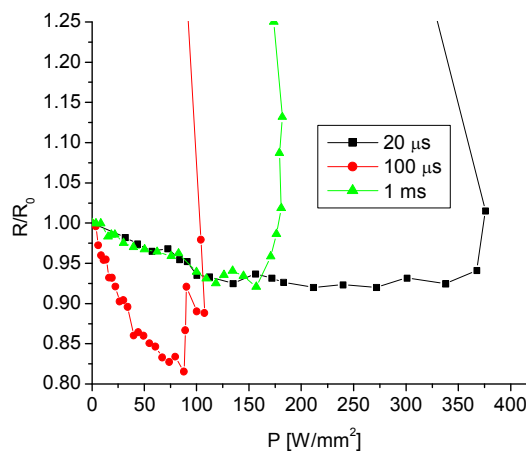
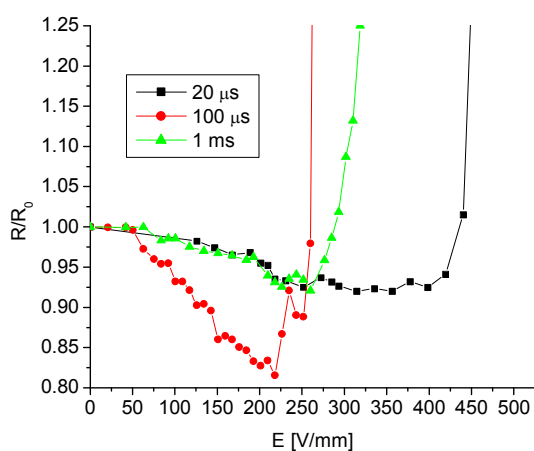
Elementy elektroniczne, w tym i rezystory, mogą podczas pracy być poddane działaniu impulsów wysokiego napięcia, pojawiających się w układzie np. w wyniku wyładowań atmosferycznych. Czas trwania takich impulsów może zmieniać się od pojedynczych nanosekund do kilkudziesięciu mikrosekund. Przeprowadzono zatem badania odporności impulsowej wytworzonych mikrorezystorów. Element testowy był poddawany działaniu dwóch następujących po sobie jednakowych impulsów napięciowych, po czym mierzono jego rezystancję. Następnie amplitudę impulsów zwiększano o 2% i narażenie powtarzano. Test prowadzono aż do uszkodzenia rezystora (jako kryterium przyjęto wzrost lub spadek rezystancji o więcej niż 10% wartości początkowej) [115,116-118,163]. W przypadku rezystorów nacinanych wiązką laserową (odległość sąsiednich elementów rzędu 20÷30 μm)

w pierwszej kolejności określono napięcie przebicia między sąsiednimi rezystorami. Impulsy podawano na elektrody rezystorów aż do pojawienia się przejścia lub zniszczenia struktury [97]. Następnie badano odporność samych rezystorów. Stosowano impulsy o czasie trwania od 20 μs do 10 ms. Przyjęto 1 s odstępu między impulsami. Na rys. 3.29-3.36 przedstawiono przebieg zmian rezystancji badanych elementów w funkcji pola elektrycznego i powierzchniowej gęstości mocy w impulsie. Natomiast tabele 3.10-3.12 zawierają graniczne wartości dwu wymienionych wyżej zmiennych, przy których następowało uszkodzenie rezystora.

Badania wykazały, że w przypadku rezystorów otrzymanych przez cięcie wiązką laserową możliwe jest obciążanie ich znacznymi napięciami, bez ryzyka wystąpienia przebicia między sąsiednimi elementami. Mimo niewielkiej szerokości nacięcia, wynoszącej około 30 μm , w najgorszym przypadku uzyskano napięcie przebicia równe 237 V. Przeważnie przekraczało ono maksymalną amplitudę stosowanych impulsów, wynoszącą 475 V (tab. 3.10).

Tab. 3.10. Wartości napięcia przebicia między sąsiednimi rezystorami w strukturze wycinanej wiązką laserową

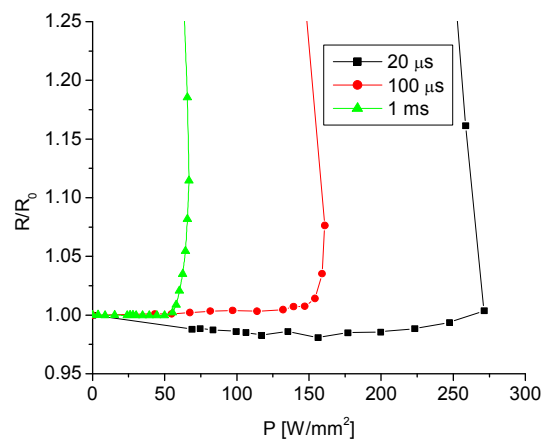
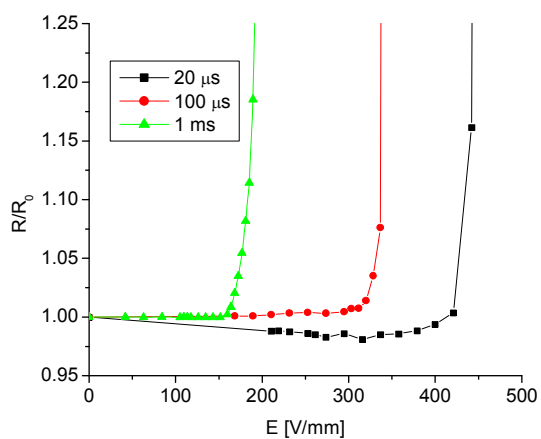
alund			LTCC		
l [μm]	U_{max} [V]		l [μm]	U_{max} [V]	
	20 μs	1 ms		20 μs	1 ms
800	>475	365	800	280	237
600	>475	460	600	410	345
400	>475	>475	400	>475	450
200	>475	320	200	>475	410



a)

b)

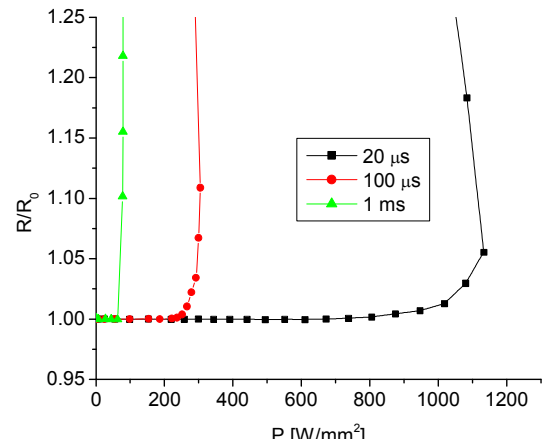
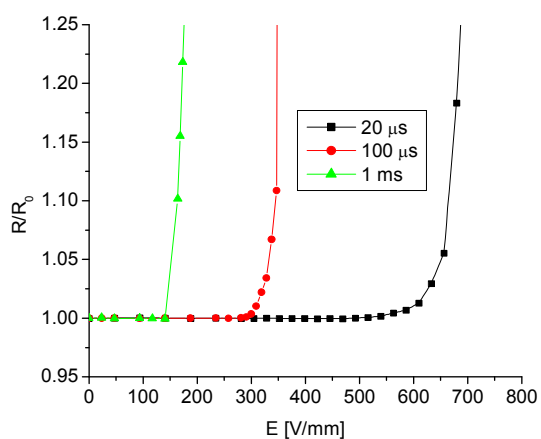
Rys. 3.29. Zmiany rezystancji w funkcji pola elektrycznego (a) oraz gęstości mocy w impulsie (b) - struktury EP E-93350-153/ Al_2O_3 nanoszone sitodrukiem, $l = 200 \mu\text{m}$



a)

b)

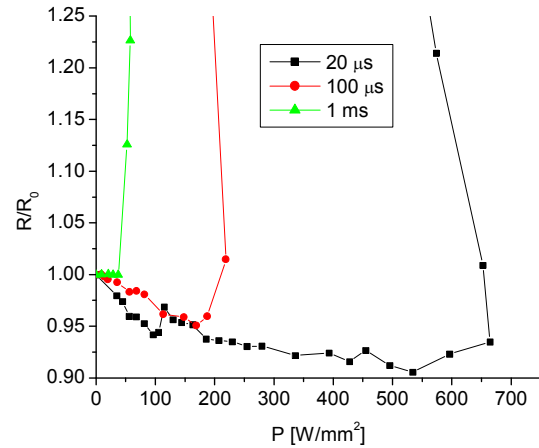
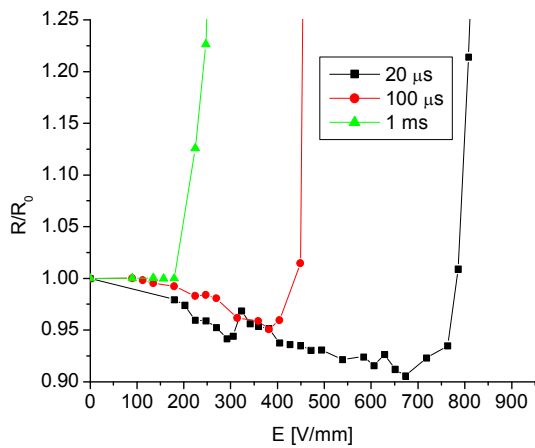
Rys. 3.30. Zmiany rezystancji w funkcji pola elektrycznego (a) oraz gęstości mocy w impulsie (b) - struktury EP E-93350-153/LTCC nanoszone sitodrukiem i wypalane oddzielnie, $l = 200 \mu\text{m}$



a)

b)

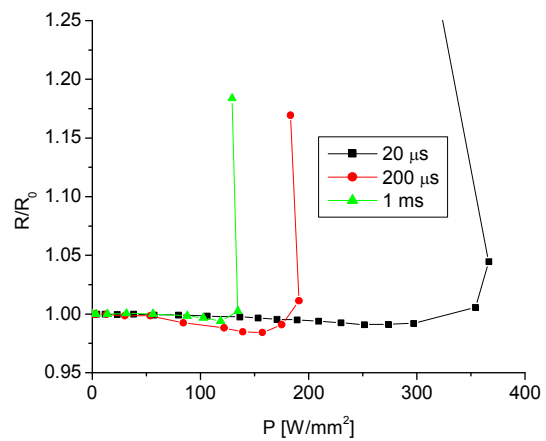
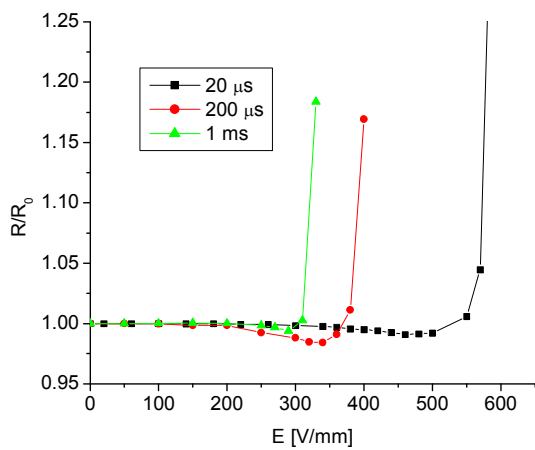
Rys. 3.31. Zmiany rezystancji w funkcji pola elektrycznego (a) oraz gęstości mocy w impulsie (b) - struktury EP E-93350-153/LTCC nanoszone sitodrukiem i współwypalane, $l = 200 \mu\text{m}$



a)

b)

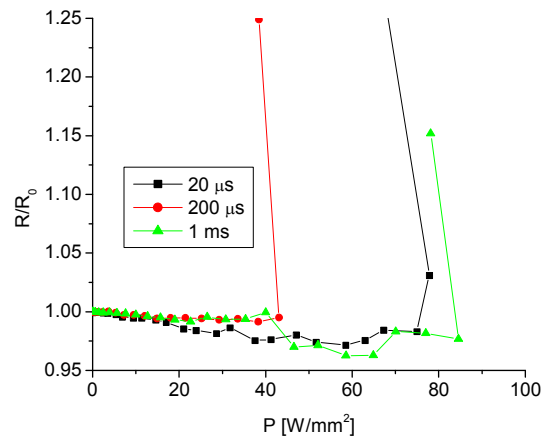
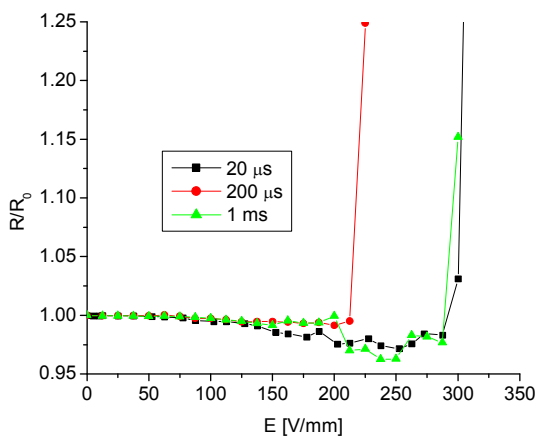
Rys. 3.32. Zmiany rezystancji w funkcji pola elektrycznego (a) oraz gęstości mocy w impulsie (b) - struktury EP E-93350-153/Al₂O₃ fotoformowane, $l = 200 \mu\text{m}$



a)

b)

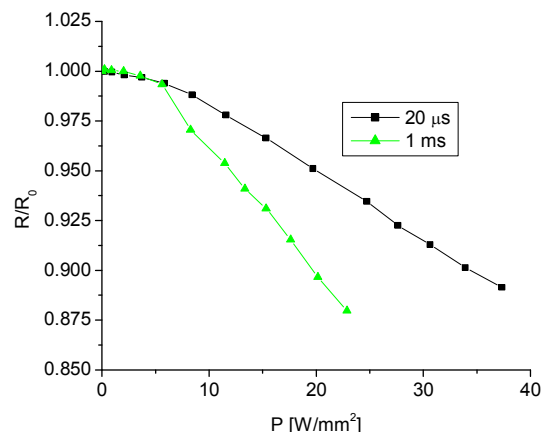
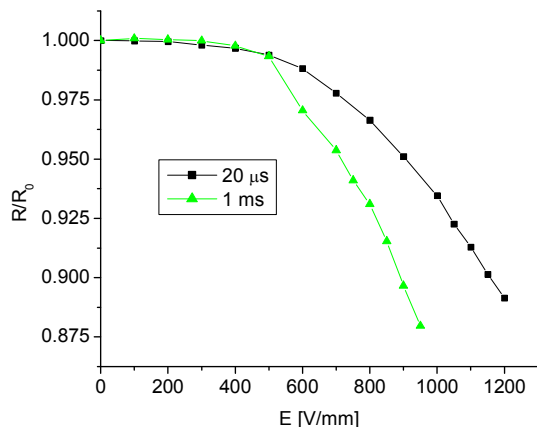
Rys. 3.33. Zmiany rezystancji w funkcji pola elektrycznego (a) oraz gęstości mocy w impulsie (b) - struktury DP2031/Al₂O₃ cięte laserem, $l = 200 \mu\text{m}$



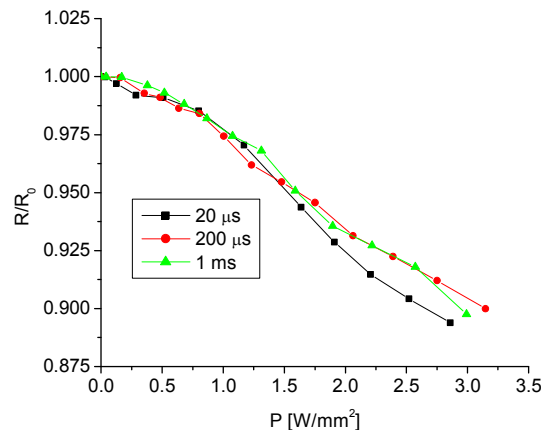
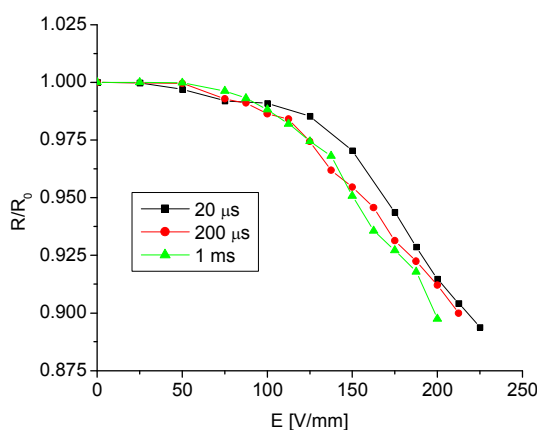
a)

b)

Rys. 3.34. Zmiany rezystancji w funkcji pola elektrycznego (a) oraz gęstości mocy w impulsie (b) - struktury DP2031/Al₂O₃ cięte laserem, $l = 800 \mu\text{m}$



a) b)
Rys. 3.35. Zmiany rezystancji w funkcji pola elektrycznego (a) oraz gęstości mocy w impulsie (b) - struktury R8951/Al₂O₃ cięte laserem, $l = 200 \mu\text{m}$



a) b)
Rys. 3.36. Zmiany rezystancji w funkcji pola elektrycznego (a) oraz gęstości mocy w impulsie (b) - struktury CF041/LTCC cięte laserem, $l = 800 \mu\text{m}$

W zdecydowanej większości przypadków uszkodzenie rezystora miało charakter katastroficzny, tzn. następowała destrukcja (przepalenie) elementu. Pod względem przebiegu zmian rezystancji w trakcie testu można wyróżnić trzy typy uzyskanych krzywych. Dla rezystorów DP2031 ciętych laserem oraz EP E-93350-153 na LTCC zmiany te - polegające na zmniejszeniu się rezystancji - były niewielkie, aż do osiągnięcia amplitudy impulsu zbliżonej do granicznej, przy której następował bardzo silny, skokowy wzrost rezystancji. W drugim przypadku, dotyczącym rezystorów EP E-93350-153 na alundzie, również następował wspomniany wyżej gwałtowny wzrost rezystancji po przekroczeniu dopuszczalnego progu napięcia. Jednak wcześniejsze ujemne zmiany rezystancji były znacznie wyraźniejsze (w niektórych przypadkach przekraczające przyjęty próg

dziesięcioprocentowy). Wreszcie dla struktur R8951 i CF041 obserwowano stopniowy spadek rezystancji aż do spełnienia kryterium uszkodzenia.

Tab. 3.11. Maksymalne dopuszczalne wartości pola elektrycznego i gęstości mocy dla rezystorów sitodrukowanych i fotoformowanych ($w = 200 \mu\text{m}$)

	wymiar projekt. [μm^2]	E_{MAX} [V/mm]			P_{MAX} [W/mm ²]		
		20 μs	100 μs	1 ms	20 μs	100 μs	1 ms
alund sitodruk	50×50	205	155	148	96	35	42
	100×100	300	145	233	231	53	166
	200×200	398	148	248	356	37	137
alund fotoform.	50×50	450	350	265	562	232	216
	100×100	570	300	213	879	293	149
	200×200	748	390	240	593	182	60
LTCC wypalane oddzielnie	50×50	288	340	308	78	112	75
	100×100	448	333	238	315	250	82
	200×200	390	320	183	201	146	62
LTCC współ- wypalane	50×50	330	345	305	104	71	98
	100×100	663	330	208	964	234	81
	200×200	595	328	160	988	295	67

Tab. 3.12. Maksymalne dopuszczalne wartości pola elektrycznego i gęstości mocy dla rezystorów ciętych laserem ($w = 200 \mu\text{m}$)

	wymiar projekt. [μm^2]	E_{MAX} [V/mm]			P_{MAX} [W/mm ²]		
		20 μs	200 μs	1 ms	20 μs	200 μs	1 ms
alund DP2031	200×200	573	395	323	356	188	133
	400×200	382	314	244	198	150	87
	600×200	235	136	252	70	22	84
	800×200	301	217	296	75	41	80
alund R8951	200×200	1160	-	890	34	-	20
	400×200	1700	-	-	55	-	-
	800×200	957	-	-	9,4	-	-
LTCC CF041	400×200	171	-	178	3,2	-	4,8
	800×200	218	213	199	2,6	3,1	2,9

Z reguły spełniona była intuicyjna zależność, zgodnie z którą przy krótszych impulsach ich dopuszczalna amplituda wzrastała. W niektórych przypadkach stwierdzono jednak zachowanie anomalne, np. odporność rezystorów EP E-93350-153/ Al_2O_3 o długości 800 μm na impulsy o czasie trwania 200 μs była mniejsza niż przy 1 ms. Wydaje się jednak, że można to przypisać raczej wadom struktur, nie ujawnionym podczas wcześniejszej wstępnej charakteryzacji. Od ogólnego schematu odbiegały rezystory CF041, gdzie zależność

dopuszczalnej amplitudy impulsu od czasu trwania była słaba, szczególnie w porównaniu z pozostałymi strukturami testowymi.

Obie wyznaczone krzywe - zmian rezystancji w funkcji natężenia pola elektrycznego i gęstości powierzchniowej mocy - mają we wszystkich przypadkach zbliżony kształt. Pojawiające się wsteczne zagięcie krzywej R/R_0 w funkcji gęstości mocy przy jej końcu oznacza spadek tejże mocy, który jest spowodowany szybkim wzrostem rezystancji elementu, kompensującym zwiększenie pola elektrycznego impulsu.

Brak było wyraźnego powiązania odporności impulsowej rezystorów z ich wymiarami. Dla różnych kombinacji metody wytwarzania rezystorów, rodzaju podłoża i czasu trwania impulsów najbardziej odporne okazywały się struktury o innej kombinacji wymiarów. Generalnie uzyskane wartości natężenia pola, sięgające nawet 1700 V/mm, wyraźnie przekraczają publikowane w literaturze wyniki, uzyskiwane dla rezystorów o wymiarach standardowych [116-118,163,164]. Porównanie elementów sitodrukowanych, fotoformowanych i wycinanych laserem jest utrudnione z powodu zastosowania odmiennych past rezystywnych. Najwyższe dopuszczalne natężenia pól impulsu otrzymano dla wysokoomowej pasty R8951, najniższe dla CF041. Wartości dla pozostałych wariantów technologicznych były mniej więcej porównywalne. Co ważne, uzyskane wyniki nie wykazują, by metoda wycinania laserem powodowała pogorszenie odporności impulsowej mikrorezystorów.

Obserwowane zmiany rezystancji elementów poddanych działaniu impulsów wysokonapięciowych można tłumaczyć zmianami w ich mikrostrukturze, a dokładniej w cienkiej warstwie szkliwa na granicach ziaren przewodzących [163,164]. 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 (rys. 3.28-3.34). Zmniejszanie się rezystancji elementu w trakcie narażeń można natomiast wyjaśnić obniżeniem bariery energetycznej na granicach ziaren przewodzących bądź też przebiciami izolacyjnej warstwy szkliwa otaczającej ziarna. Pod uwagę może być też brana dyfuzja z ziaren przewodzących do szkliwa, zwiększająca przewodnictwo hoppingowe, aktywowana przez wzrost temperatury warstwy obciążonej elektrycznie. Zjawiska te zachodzą w warstwach o dużej rezystywności, co potwierdziło się w przypadku past R8951 i CF041 (rys.3.35-3.36)

3.8. Analiza wyników

Zaprojektowano i wykonano mikrorezystory grubowarstwowe o wymiarach od $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ do $800 \times 200 \mu\text{m}^2$. Wykorzystano trzy techniki wytwarzania elementów: klasyczny sitodruk, pasty światłoczułe i fotoformowanie oraz wycinanie laserem. Podczas kompleksowej charakteryzacji mikrorezystorów zbadano właściwości geometryczne wytworzonych elementów, podstawowe parametry elektryczne oraz stabilność długoczasową i odporność impulsową. Uzyskane wyniki skorelowano ze sposobem wykonania rezystorów.

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. Jak można się przekonać klasyczna technika sitodruku nie jest odpowiednim rozwiązaniem. Dokonano tutaj jej bezpośredniego porównania z metodą fotoformowania. Elektrody rezystorów testowych wykonano w procesie fotoformowania, natomiast obszar rezystywny naniesiono w ten sposób, lub przy pomocy sitodruku. Wykorzystano jednak tę samą rezystywną pastę światłoczułą, co pozwoliło wyeliminować czynnik materiałowy. Szczególnie wyraźna była różnica we właściwościach geometrycznych struktur. Technika fotoformowania pozwala uzyskać znacznie lepszą precyzję wykonania elementów miniaturowych. Rozumieć należy przez to lepszą definicję warstwy oraz dużo większą zgodność rzeczywistej geometrii struktury z projektem. W przypadku rezystorów o najmniejszej szerokości ($50 \mu\text{m}$) zastosowanie sitodruku prowadziło wręcz do otrzymania elementów zdefektowanych o nieciągłej warstwie rezystywnej. Problemem w tym przypadku są jednak wciąż niezadowalające parametry elektryczne rezystorów fotoformowalnych, przez co nadal brak jest komercyjnie dostępnych takich past. Jeśli chodzi o badaną tu kompozycję światłoczułą, to wykazywała ona niezadowalającą stabilność długoczasową przy starzeniu termicznym. Ponadto pojawiały się problemy z adhezją warstwy rezystywnej do podłoża LTCC.

Połączenie techniki cięcia laserem oraz fotoformowanych past przewodzących pozwoliło na wytwarzanie z pojedynczej nieminiaturowej struktury wyjściowej kilku lub nawet kilkunastu mikrorezystorów. Elementy takie są wykonywane z dużą precyzją. Długość pojedynczego rezystora jest określana przez proces fotoformowania warstwy przewodzącej, zaś o szerokości decyduje precyzja cięcia laserem, który może być pozycjonowany z dokładnością do $1 \mu\text{m}$. Równocześnie minimalna szerokość nacięcia dobrze zogniskowaną wiązką może być rzędu kilkunastu μm . Nie stwierdzono przy tym, by nacinanie warstwy wpływało negatywnie na parametry rezystora, takie jak charakterystyka $R(T)$, poziom szumu,

stabilność czy odporność impulsowa. Istotną zaletą tej metody wytwarzania mikrorezystorów jest znaczne zmniejszenie marginesów technologicznych między poszczególnymi rezystorami w strukturze - wystarczający jest odstęp równy szerokości cięcia.

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 rzędu 750°C ÷ 1050°C . Rezultatem 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 tutaj bardzo silne. Obserwowano nawet kilkukrotne zmniejszanie się rezystancji powierzchniowej mikrorezystora przy zmniejszaniu jego długości z 800 do 200 μm . Znacznie zmieniały się też inne parametry, np. GTWR czy wskaźnik szumów. Dlatego przy zastosowaniu tej samej kombinacji materiałów i metody wytwarzania, ale w zależności od wymiarów uzyskuje się elementy o nieco innych właściwościach. Utrudnia to projektowanie i stosowanie rezystorów miniaturowych, choć oczywiście nie czyni tego niewykonalnym ani nieopłacalnym. Pomimo wspomnianych wyżej problemów wykonanie rezystora miniaturowego jest jak najbardziej możliwe, jakkolwiek wymaga większego nakładu pracy. Nawet w przypadku najmniejszych rezystorów (o wymiarach $50\times 50 \mu\text{m}^2$) osiągnięto satysfakcjonujące właściwości geometryczne oraz parametry elektryczne. Mała stabilność spowodowana była zaś nieoptymalnymi właściwościami eksperymentalnej pasty rezystywnej. W przypadku rezystorów wycinanych wiązką laserową najmniejsze struktury (o wymiarach $200\times 200 \mu\text{m}^2$) charakteryzowały się dobrymi parametrami elektrycznymi, stabilnością długoczasową i odpornością impulsową. Obecnie w Wydziałowym Zakładzie Mikrosystemów i Fotoniki kontynuowane są prace nad miniaturyzacją rezystorów przy wykorzystaniu nacinania wiązką laserową.

4. Rezystory wielokontaktowe

4.1. Wstęp

Rezystory grubowarstwowe wykonywane są zwykle jako prostokątne elementy dwuelektrodowe. Zadana wartość rezystancji osiąga się przez wybór pasty o optymalnej rezystancji powierzchniowej oraz liczby kwadratów rezystora, czyli stosunku jego długości do szerokości (wzór 4.1). Wartości obu wymiarów planarnych, a tym samym powierzchnia rezystora, określone są przez moc w nim rozpraszaną (zal. 4.2), lub minimalne rozmiary, charakterystyczne dla danej metody nakładania warstw.

$$R = R_{\square} \frac{l}{w} \quad (4.1)$$

$$S = lw = \frac{P}{P_r} = \frac{UI}{P_r} = \frac{U^2}{RP_r} = \frac{RI^2}{P_r} \quad (4.2)$$

gdzie R - rezystancja elementu, R_{\square} - rezystancja powierzchniowa pasty, S , l , w - pole powierzchni, długość i szerokość rezystora, P_r - dopuszczalna powierzchniowa gęstość mocy, P , U , I - moc, napięcie i prąd płynący przez rezystor. Ponieważ rezystory grubowarstwowe charakteryzują się znacznym rozrzutem rezystancji, wynoszącym nawet 20% wartości nominalnej, ostatnim etapem z reguły jest korekcja laserowa wytworzonych struktur.

Jak wspomniano w rozdz. 3, standardowa metoda sitodruku nie zapewnia wystarczającej precyzji wykonania i jakości warstwy, koniecznych przy wytwarzaniu rezystorów miniaturowych. Jako metodę alternatywną można rozważyć zastosowanie past światłoczułych i fotolitografię. Niestety, poważnym ograniczeniem jest w tym przypadku brak fotoformalnych past rezystywnych. Istnieje możliwość wytworzenia w ten sposób tylko elektrod rezystora.

Problem można rozwiązać stosując inne podejście, polegające na integracji obwodu. Sieć miniaturowych rezystorów można zastąpić przez pojedynczy element wielokontaktowy, równoważny pod względem funkcjonalnym [30-33]. Powierzchnia tego elementu może wtedy pozostać względnie duża, gdyż i tak osiągnięta jest znaczna redukcja w porównaniu z obszarem zajmowanym przez całą sieć. Pozwala to wykorzystać do wytworzenia rezystora standardowy sitodruk. Technika fotolitograficzna służy zaś do precyzyjnego wykonania elektrod elementu przy pomocy światłoczułych past przewodzących.

Powyższa metoda wytwarzania struktur rezystywnych posiada jednak pewne wady. Podstawową jest znacznie bardziej skomplikowany proces projektowania, szczególnie w porównaniu z trywialnymi obliczeniami dla konwencjonalnych rezystorów dwukontaktowych. W ogólnym przypadku zarówno analiza jak i synteza elementu wymaga użycia metod numerycznych, gdyż rozwiązanie analityczne istnieje tylko w niektórych sytuacjach. Wybór topologii struktury nie jest przy tym jednoznaczny, założone parametry można uzyskać teoretycznie na nieskończenie wiele sposobów. Tylko część z nich jest realizowalna technologicznie. Na przykład, przy znacznej różnicy poszczególnych wymiarów struktury musi być ona na tyle duża, by minimalny wymiar był możliwy do wykonania z akceptowalną dokładnością. Rezystory wielokontaktowe wymagają zatem znacznie większego nakładu pracy w fazie projektowania.

4.2. Algorytm projektowania

W przypadku klasycznego prostokątnego rezystora dwukontaktowego proces projektowania jest stosunkowo prosty. Zagadnienie znacznie się komplikuje, gdy rozważana jest struktura wielokontaktowa o dowolnym kształcie. Generalnie rzecz biorąc rezystor o n elektrodach scharakteryzowany jest przez macierz admitancyjną Y lub impedancyjną Z o wymiarze $(n-1) \times (n-1)$. Z uwagi na symetrię obu macierzy oznacza to $n(n-1)/2$ parametrów niezależnych. Dla rezystora dwukontaktowego sprowadza się to do jednego parametru - rezystancji, natomiast dla struktury trójkontaktowej mamy już 3, dla czteroelektrodowej 6, a dla sześciokontaktowej 15 niezależnych zmiennych. Złożoność problemu zatem szybko rośnie wraz ze zwiększaniem liczby doprowadzeń, czyli stopniem integracji obwodu. Z tego powodu autor skupił się na prostszych strukturach trójkontaktowych. Badał jednak także bardziej skomplikowane rezystory sześciokontaktowe.

W obwodzie równoważnym, składającym się z elementów dyskretnych, każdy z tych parametrów może być ustalany indywidualnie, niezależnie od pozostałych. W strukturze wielokontaktowej w ogólnym przypadku jest to niemożliwe. Każda zmiana geometrii rezystora wpływa na kilka lub nawet na wszystkie elementy jego macierzy, choć oczywiście w różnym stopniu. Nie jest tu więc możliwe selektywne ustalanie wartości poszczególnych rezystancji czy konduktancji składowych. Przy projektowaniu należy od razu uwzględnić wszystkie parametry równocześnie.

Problem analizy bądź syntezy rezystora wielokontaktowego zasadniczo polega na określeniu zależności między prądami i potencjałami poszczególnych kontaktów. W tym celu

należy znaleźć funkcję rozkładu potencjału $\varphi(x,y)$ w obszarze rezystora. Polega to na rozwiązaniu równania Laplace'a z odpowiednimi warunkami brzegowymi I i II rodzaju.

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \varphi(x,y) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \varphi(x,y) = 0 \quad (4.3)$$

$$\varphi(x,y) = \varphi_n \quad \text{wzdłuż krawędzi kontaktów} \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial \bar{n}} \varphi(x,y) = 0 \quad \text{wzdłuż brzegu rezystora} \quad (4.5)$$

gdzie φ_n - potencjał n -tego kontaktu, \bar{n} - normalna do brzegu obszaru rezystora

Znalezienie rozwiązania analitycznego jest możliwe jedynie dla obszarów o prostej topologii, np. koła lub prostokąta. W przypadku bardziej złożonych kształtów rozwiązanie można znaleźć tylko metodami numerycznymi. Zastosowano zatem odmienne podejście. Można zauważyć, że do określenia zależności prądów i napięć na kontaktach rezystora całkowicie wystarcza znajomość rozkładu natężenia pola elektrycznego na brzegu obszaru. Obowiązują mianowicie następujące zależności [31]:

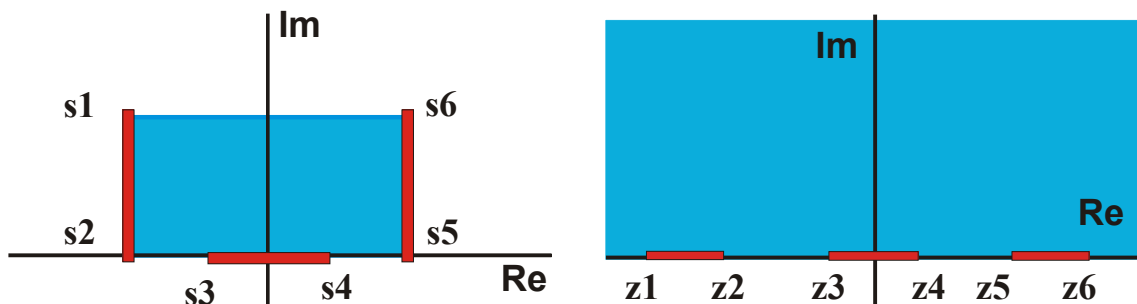
$$\varphi_{n+1} - \varphi_n = \int_{z_{2n}}^{z_{2n+1}} \vec{E} d\vec{l} = \int_{z_{2n}}^{z_{2n+1}} E dl \quad (4.6)$$

$$I_n = \frac{1}{R_{\square}} \int_{z_{2n-1}}^{z_{2n}} \vec{E} d\vec{l} = \frac{1}{R_{\square}} \int_{z_{2n-1}}^{z_{2n}} E dl \quad (4.7)$$

gdzie φ_n , I_n - potencjał i prąd n -tego kontaktu z_{2n} , z_{2n-1} - współrzędne początku i końca n -tego kontaktu, E - natężenie pola elektrycznego, R_{\square} - rezystancja powierzchniowa pasty rezystywnej. Jeśli odcinek brzegu należy do kontaktu, wówczas przy założeniu idealnego przewodnika istnieje tylko składowa normalna pola. Z kolei na fragmencie brzegu nie należącym do kontaktów natężenie pola posiada tylko składową styczną. Pozwala to zastąpić w powyższych wzorach wektor \vec{E} jego modulem E .

Podstawą zastosowanej metody obliczeniowej jest przekształcenie geometrii rezystora, przy zachowaniu jego parametrów, do postaci umożliwiającej obliczenie funkcji rozkładu pola na brzegu elementu. Wykorzystuje się do tego przekształcenia konforemne, tzn. zachowujące kąty między krzywymi [165,166]. Przekształcenie takie realizuje dowolna funkcja zespolona o niezerowej pochodnej w danym obszarze. Postać funkcji decyduje o sposobie przekształcenia. Obszar rezystora umieszcza się na płaszczyźnie zespolonej i transformuje w górną półpłaszczyznę zespoloną (rys. 4.1). Brzeg rezystora jest

przekształcany w oś rzeczywistą, natomiast jego wnętrze - w półpłaszczyznę. Kontaktom odpowiadają odcinki na osi rzeczywistej. Otrzymana struktura jest równoważna pierwotnej i opisywana identycznymi macierzami Y i Z .



Rys. 4.1. Przekształcenie geometrii rezystora za pomocą odwzorowania konforemne $z = f(s)$

Dla powyższej topologii znana jest ogólna postać zależności modułu wektora natężenia pola elektrycznego wzdłuż osi rzeczywistej (wzór 4.8). Zawiera ona nieznanne współczynniki A_i , które muszą być wyznaczone z układu równań wiążącego je ze współrzędnymi kontaktów z_j oraz różnicami potencjałów kontaktów $\varphi_{n+1} - \varphi_n$ bądź prądami kontaktów I_n , w zależności od tego, które z tych wielkości są dane (zal. 4.9-4.11). Wartości A_i służą następnie do obliczenia nieznanych prądów lub napięć, co umożliwia ostatecznie wyznaczenie macierzy impedancyjnej lub admitancyjnej.

$$|E| = \sum_{i=1}^{N-1} A_i \frac{z^{N-1-i}}{\sqrt{\prod_{j=1}^{2N} |z - z_j|}} \quad (4.8)$$

$$\varphi_{n+1} - \varphi_n = \int_{z_{2n}}^{z_{2n+1}} \sum_{i=1}^{N-1} A_i \frac{z^{N-1-i}}{\sqrt{\prod_{j=1}^{2N} |z - z_j|}} dz = \sum_{i=1}^{N-1} A_i \int_{z_{2n}}^{z_{2n+1}} \frac{z^{N-1-i}}{\sqrt{\prod_{j=1}^{2N} |z - z_j|}} dz = \sum_{i=1}^{N-1} A_i a_{ni} \quad (4.9)$$

$$I_n = \frac{1}{R_{\square}} \int_{z_{2n-1}}^{z_{2n}} \sum_{i=1}^{N-1} A_i \frac{z^{N-1-i}}{\sqrt{\prod_{j=1}^{2N} |z - z_j|}} dz = \frac{1}{R_{\square}} \sum_{i=1}^{N-1} A_i \int_{z_{2n-1}}^{z_{2n}} \frac{z^{N-1-i}}{\sqrt{\prod_{j=1}^{2N} |z - z_j|}} dz = \sum_{i=1}^{N-1} A_i a_{ni}^* \quad (4.10)$$

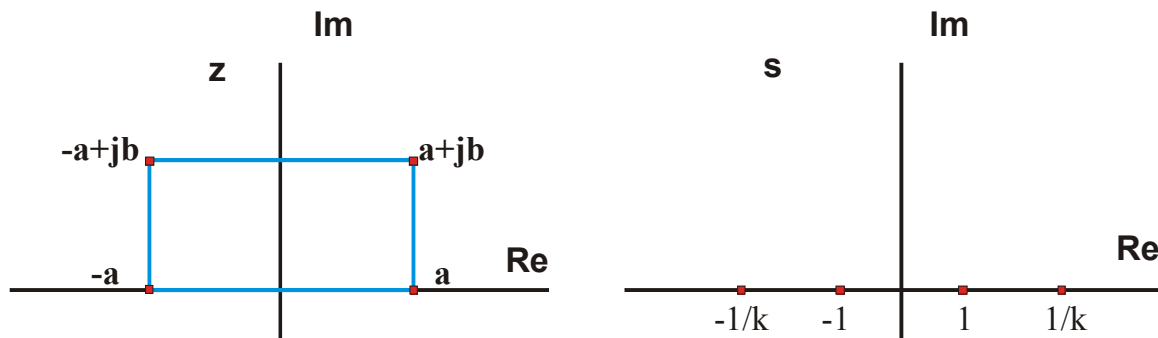
gdzie φ_n , I_n - potencjał i prąd n -tego kontaktu, z_{2n} , z_{2n-1} - współrzędne początku i końca n -tego kontaktu, E - natężenie pola elektrycznego, R_{\square} - rezystancja powierzchniowa pasty rezystywnej, A_i , a_{ni} , a_{ni}^* - współczynniki

Na przykład dla struktury o trzech kontaktach otrzymujemy poniższy układ równań:

$$\begin{aligned}
 \varphi_2 - \varphi_1 &= A_1 a_{11} + A_2 a_{12} \\
 \varphi_3 - \varphi_2 &= A_1 a_{21} + A_2 a_{22} \\
 I_1 &= A_1 a_{11}^* + A_2 a_{12}^* \\
 I_2 &= A_1 a_{21}^* + A_2 a_{22}^* \\
 I_3 &= A_1 a_{31}^* + A_2 a_{32}^*
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

Syntezę rezystora prowadzi się w sposób odwrotny. Punktem wyjścia ponownie jest rezystor rozwinięty do postaci półpłaszczyzny zespolonej. Problem sprowadza się do znalezienia położenia kontaktów na osi rzeczywistej tak, by spełnione były zadane relacje między prądami i potencjałami kontaktów. Z układu równań postaci (4.11) wyznacza się współrzędne kontaktów z_j . Ani przesunięcie kontaktów wzdłuż osi rzeczywistej, ani proporcjonalne przeskalowanie ich współrzędnych nie powoduje zmiany parametrów rezystora. Stąd by uzyskać jednoznaczne rozwiązanie wartości dwóch współrzędnych trzeba przyjąć arbitralnie. Następnie przy pomocy transformacji konforemnych półpłaszczyznę przekształca się w obszar o docelowej geometrii.

Wprawdzie powyższa metoda ułatwia analizę i syntezę struktur wielokontaktowych, ale wymaga ona przeprowadzenia złożonych obliczeń. Całki występujące w zależnościach (4.9) i (4.10) są nieelementarne i oblicza się je numerycznie. Podobnie przy syntezie struktury poszukiwania współrzędnych kontaktów muszą być dokonywane z zastosowaniem metod numerycznych, np. Newtona-Raphsona. Istotnym problemem jest także znalezienie odwzorowania konforemnego obszaru rezystora w półpłaszczyznę i odwrotnie dla dowolnego kształtu tego obszaru. Zdecydowano się zatem na ograniczenie klasy rozpatrywanych elementów. Przyjęto prostokątny kształt obszaru rezystora z elektrodami znajdującymi się dokładnie na jego brzegu, tzn. nie wchodzącymi w głąb rezystora. W takim przypadku powyższe odwzorowania mają znaną postać. Rozważmy zatem rezystor prostokątny, umieszczony w płaszczyźnie zespolonej z oraz półpłaszczyznę zespoloną s (rys. 4.2)



Rys. 4.2. Przekształcanie charakterystycznych punktów geometrii rezystora w odwzorowaniu konforemnym

Przekształcenie prostokąt \rightarrow półpłaszczyzna realizuje funkcja

$$f(s) = sn\left(\frac{s}{c}, k\right) \quad (4.12)$$

natomiast przekształcenie odwrotne ma postać

$$cF(z, k) = c \int_0^z \frac{dz}{\sqrt{(1-z^2)(1-k^2z^2)}} = f^{-1}\left(\frac{s}{c}, k\right) \quad (4.13)$$

gdzie $sn()$ - sinus eliptyczny, k - moduł całki eliptycznej zupełnej I rodzaju $K(k)$, c - stała.

Obie wielkości obliczane są z układu równań:

$$\frac{K(k)}{K(k')} = \frac{a}{b}, \text{ gdzie } k' = \sqrt{1-k^2} \quad (4.14)$$

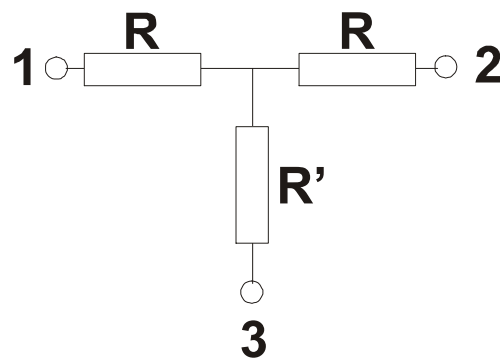
$$c = \frac{a}{K(k)}, \text{ gdzie } a, b - \text{współrzędne wierzchołków prostokąta.} \quad (4.15)$$

W obu powyższych przekształceniach wzajemnie odpowiadają sobie następujące pary punktów:

$$\begin{aligned} a &\Leftrightarrow 1 \\ -a &\Leftrightarrow -1 \\ a + jb &\Leftrightarrow 1/k \\ -a + jb &\Leftrightarrow -1/k \end{aligned} \quad (4.16)$$

Widać, że wymiary a i b rezystora decydują o wartości modułu k , który określa postać obu odwzorowań. W przypadku przekształcenia $f(s)$ transformacja obszaru jest jednoznaczna i nie ma potrzeby zmiany parametrów funkcji konforemnej. Postać odwzorowania odwrotnego $cF(z, k)$ zależy natomiast od wybranej geometrii rezystora. Zależności (4.16) pozwalają na prosty dobór parametrów przekształcenia. Na przykład, dla symetrycznej

struktury trójkontaktowej z rys. 4.1 należy unormować współrzędne z tak, by $z_5 = 1$, a następnie wybrać wartość $k = 1/z_6$. Odcinki osi z_1-z_2 oraz z_5-z_6 przekształcą się w boki prostokąta s_1-s_2 i s_5-s_6 . Natomiast odcinek z_3-z_4 przekształci się w boczną elektrodę s_3-s_4 . Jak można dostrzec, parametry przekształcenia dobrano były tutaj pod kątem uzyskania struktury o założonej konfiguracji elektrod - na krawędziach końcowych i na środku boku rezystora. Stosunek długości i szerokości elementu nie może być wtedy dobierany swobodnie - określa go zależność 4.14. Zakładając natomiast określony stosunek wymiarów z tego samego wzoru otrzymujemy wartość modułu k , która narzuca sposób rozłożenia kontaktów na brzegu rezystora. Oczywiście można równocześnie kontrolować oba te aspekty. Jednak nie da się ich dobierać niezależnie od siebie.



Rys. 4.3. Schemat zastępczy rezystora trójkontaktowego - symetryczny trójnik rezystorowy

W ramach pracy zaprojektowano struktury trójkontaktowe równoważne symetrycznym trójnikom rezystorowym (rys. 4.3) oraz rezystory sześciokontaktowe, realizujące funkcję sumowania prądów lub napięć. W przypadku struktur trójelektrodowych wybrano cztery różne topologie struktur (rys. 4.4) i przeprowadzono ich analizę. Przyjęto prostokątny kształt warstwy rezystywnej o proporcjach 3:1 (2:1 dla typu C) oraz symetryczne rozmieszczenie elektrod. Dla takich struktur, równoważnych trójnikom symetrycznym, analiza znacznie się upraszcza, zależności 4.9 i 4.10 prowadzą do wzorów [31,167]:

$$R = R_{\square} \frac{K(k_1)}{K(k_1')} \quad (4.17)$$

$$R' = R_{\square} \left(\frac{K(k_2)}{K(k_2')} - \frac{K(k_1)}{K(k_1')} \right)$$

$$k_1 = \sqrt{\frac{z_5^2 - z_4^2}{z_6^2 - z_4^2}} \quad (4.18)$$

$$k_2 = \frac{z_6}{z_5} k_1$$

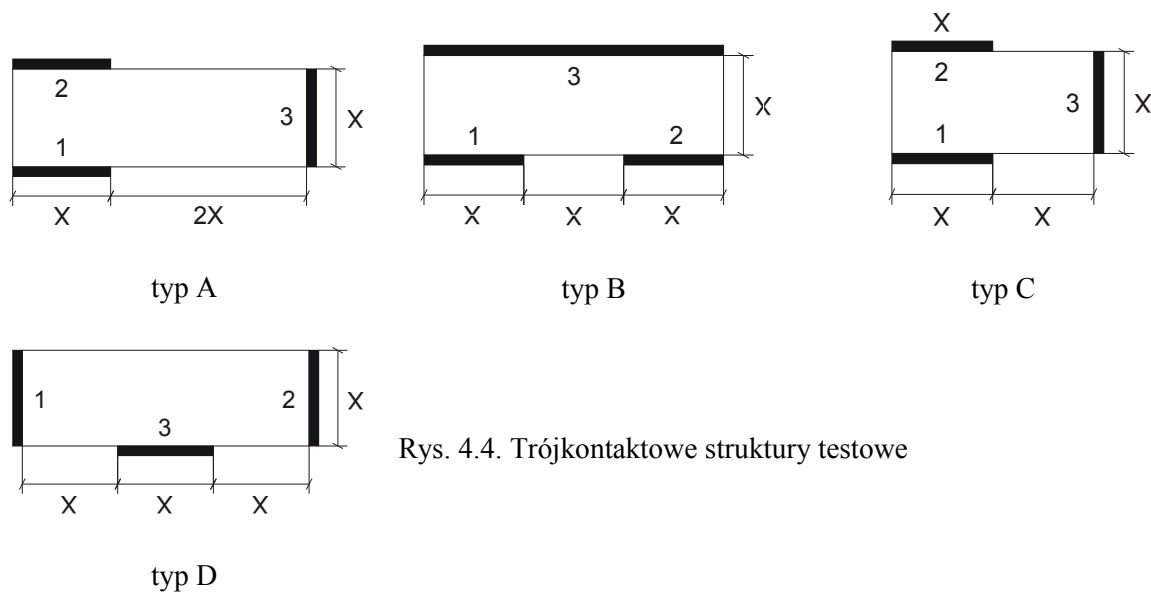
$$z_1 = -z_6$$

$$z_2 = -z_5$$

$$z_3 = -z_4$$

(4.19)

gdzie $z_1 \div z_6$ są współrzędnymi kontaktów po przekształceniu konforemnym rezystora w półpłaszczyznę, R_{\square} jest rezystancją powierzchniową warstwy rezystywnej.



Rys. 4.4. Trójkontaktowe struktury testowe

W dalszej części pracy autor odwołuje się do rezystancji międzykontaktowych R_{ij} , (z uwagi na prostotę ich pomiaru oraz określenie ich relacji z geometrią struktury). Ich związek z rezystancjami R i R' jest następujący:

$$R_{12} = 2R$$

$$R_{13} = R_{23} = R + R'$$

(4.20)

W tabeli 4.1 zamieszczono wartości rezystancji międzykontaktowych R_{ij} (znormalizowane względem rezystancji powierzchniowej) dla badanych czterech topologii struktur trójkontaktowych.

Tab. 4.1. Znormalizowane parametry rezystorów trójkontaktowych

typ	R_{12}/R_{\square}	R_{13}/R_{\square}	R_{12}/R_{13}
A	0,817	2,424	0,34
B	1,262	0,696	1,81
C	0,816	1,424	0,57
D	2,643	1,456	1,82

Rezystory sześciokontaktowe zaprojektowano pod kątem realizacji funkcji sumowania prądów lub napięć zgodnie ze wzorem:

$$X_1 = \sum_{i=2}^4 X_i \cdot 2^{1-i} \quad (4.21)$$

gdzie X_i oznacza prąd lub napięcie na i -tym kontakcie

W takiej sytuacji istotne są tylko wartości w pierwszym wierszu odpowiednio macierzy impedancji dla sumowania prądów i admitancji dla napięć, tzn. $z_{1i}/z_{11} = 2^{1-i}$ oraz $y_{1i}/y_{11} = 2^{1-i}$. Ponadto dla zapewnienia jednakowego obciążenia każdego ze źródeł prądowych lub napięciowych, dołączanych do zacisków wejściowych sumatorów, założono $z_{11} = z_{22} = z_{33} = z_{44} = z_{55} = 1,25R_{\square}$ i $y_{11} = y_{22} = y_{33} = y_{44} = y_{55} = 1/R_{\square}$. Przyjęto stosunek długości do szerokości rezystora 2:1. Uzyskane w wyniku syntezy struktury pokazane są na rys. 4.5.



a)

b)

Rys. 4.5. Struktury sześciokontaktowe - sumator prądów (a) i napięć (b)

4.3. Wytwarzanie struktur testowych

Zastosowano identyczny zestaw materiałów jak w przypadku rezystorów dwukontaktowych. Elementy wykonano na podłożu alundowym oraz niewypalanej folii ceramicznej DP951 firmy DuPont. Wykorzystano pasty rezystywne DP2031 ($1 \text{ k}\Omega/\square$), CF041 ($10 \text{ k}\Omega/\square$) i R8951 ($100 \text{ k}\Omega/\square$). Do wytworzenia elektrod użyto przewodzącej pasty światłoczułej DP6453.

Proces wytwarzania struktur rozpoczynano od nadrukowania warstwy przewodzącej na podłożu. Następnie naświetlano ją przez maskę z wzorem kontaktów rezystorów,

wywoływano i suszono. W przypadku struktur na ceramice alundowej ścieżki wypalano w typowym profilu 850°C/1h, dla podłoży LTCC krok ten pomijano. Na uformowane elektrody nadrukowywano warstwę rezystywną i wypalano całą strukturę - rezystory na alundzie ponownie w typowym profilu 850°C/1h, natomiast struktury LTCC w profilu podawanym przez producenta folii LTCC.

Wykonano struktury trójkontaktowe o czterech różnych topologiach. Wybrano następujące wymiary struktur testowych: 1500×500, 900×300, 600×200 i 300×100 μm². Dla topologii C przy tych samych szerokościach długości rezystorów wynosiły odpowiednio 1000, 600, 400 i 200 μm. Wykonano również dwa typy rezystorów sześciokontaktowych o wymiarach 4×2, 3×1,5 i 2×1 mm². Szerokości elektrod, x_i oraz odstęp między nimi, d_i podano w tabeli 4.2.

Tab. 4.2. Szerokości elektrod x_i oraz odstęp między nimi d_i dla struktur sumatorów prądów i napięć

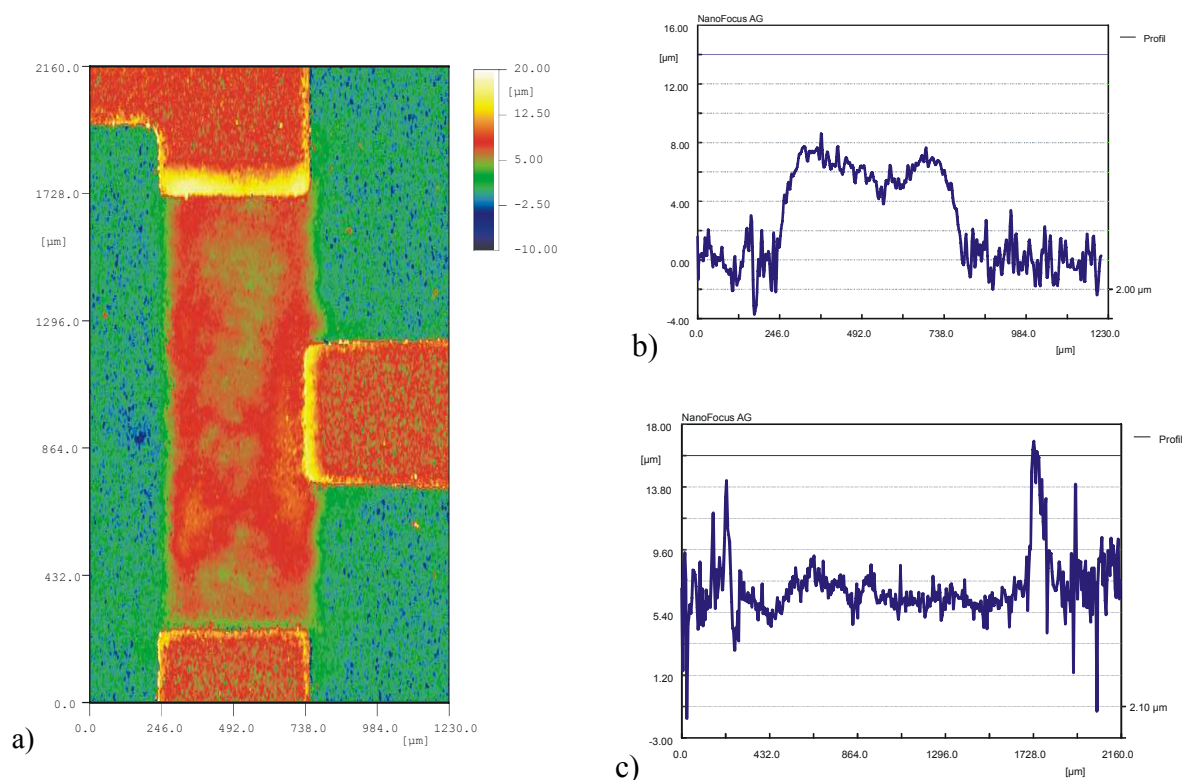
sumator prądów	$l \times w$	d_1	x_1	d_2	x_2	d_3	x_3	d_4	x_4	d_5	x_5	d_6
	[mm ²]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
	2×1	458	62	62	70	184	82	262	80	245	62	433
	3×1,5	687	93	93	105	276	123	393	120	368	93	650
4×2	916	124	124	140	368	164	524	160	490	124	866	
sumator napięć	$l \times w$	x_1	d_1	x_2	d_2	x_3	d_3	x_4	d_4	x_5	d_5	x_6
	[mm ²]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
	2×1	633	152	65	144	96	325	101	144	65	125	150
	3×1,5	950	228	98	216	144	488	152	216	98	188	225
4×2	1266	304	130	288	192	650	202	288	130	250	300	

4.4. Właściwości geometryczne

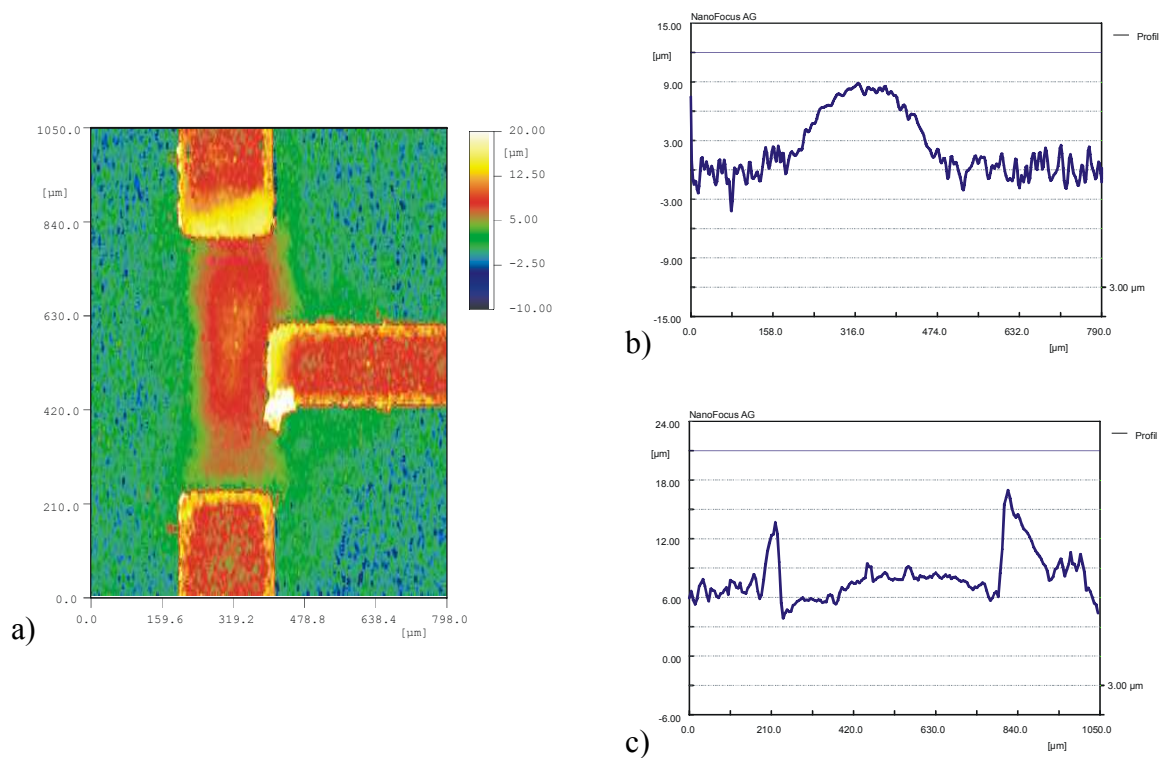
Geometrię struktur zbadano profilometrem OME μScan AF2000 firmy Nanofocus. Zmierzono dwuwymiarowe rozkłady grubości rezystorów i określono profile wybranych przekrojów poprzecznych elementów. Wyniki pomiarów prezentują rysunki 4.6-4.9.

Pomiary wykazały znaczne odstępstwa geometrii rzeczywistych rezystorów od idealnego modelu, który zakłada m. in. stałą wartość rezystancji powierzchniowej w obrębie obszaru rezystora. Tymczasem wpływająca na nią bezpośrednio grubość warstwy wykazuje znaczne wahania. Zależy ona od technologii - struktury na alundzie posiadały grubość rzędu 7÷9 μm, dla podłoża LTCC grubość warstwy rezystywnej wynosiła 14÷16 μm. Dla większych elementów przekrój poprzeczny rezystora ma charakterystyczny kształt z minimum grubości w środku elementu; spadek grubości wynosi tutaj ok. 25%. Dla mniejszych rezystorów

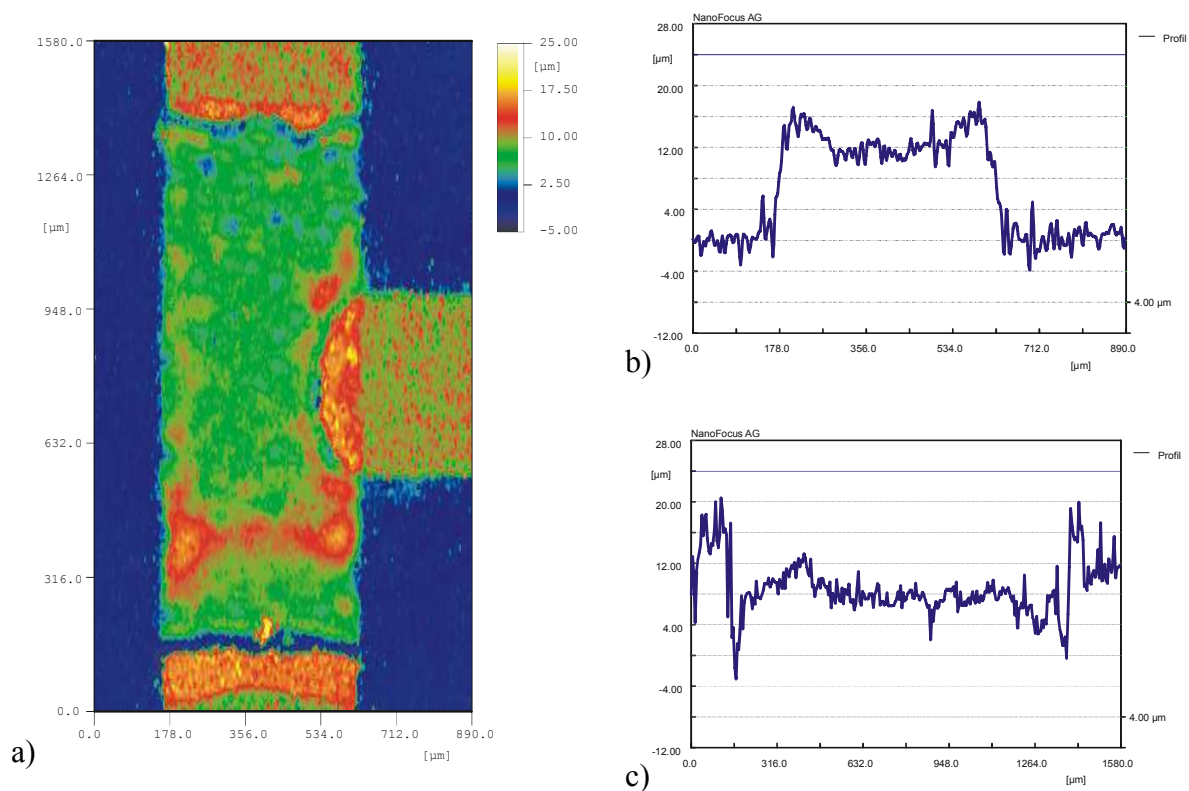
sytuacja jest odwrotna, na środku występuje maksimum grubości. Ponadto sama grubość podlega lokalnym fluktuacjom rzędu $2\div 4\ \mu\text{m}$, w zależności od struktury. Przekłada się to na zmiany rezystancji powierzchniowej. Same wymiary planarne nie są przy tym wyraźnie zdefiniowane z uwagi na pochyłe powierzchnie boczne warstwy. Dlatego jako wymiar planarny warstwy przyjmowano wartość określoną w połowie jej grubości. Wyraźnie widoczny jest też wpływ przesunięcia między elektrodami a warstwą rezystywną. Widoczne jest ono zwłaszcza dla struktur na alundzie. Trzeba jednak zdawać sobie sprawę, że zbadano tylko kilka struktur i trudno na tej podstawie wyciągać wnioski odnośnie całej populacji rezystorów. Warto przy tym zauważyć, że dla rezystora dwuelektrodowego zastosowanie nakładek technologicznych elektroda/rezystor minimalizuje wpływ przesunięć w obu osiach. Natomiast w powyższych rezystorach trójkontaktowych kompensacja ma miejsce tylko przy przesunięciu w jednej osi. Na przykład, dla struktur typu D przesunięcie w osi poziomej (na poniższych skanach) powoduje mniejsze lub większe zagłębienie się bocznego kontaktu w warstwę rezystywną i tym samym zmianę geometrii rezystora.



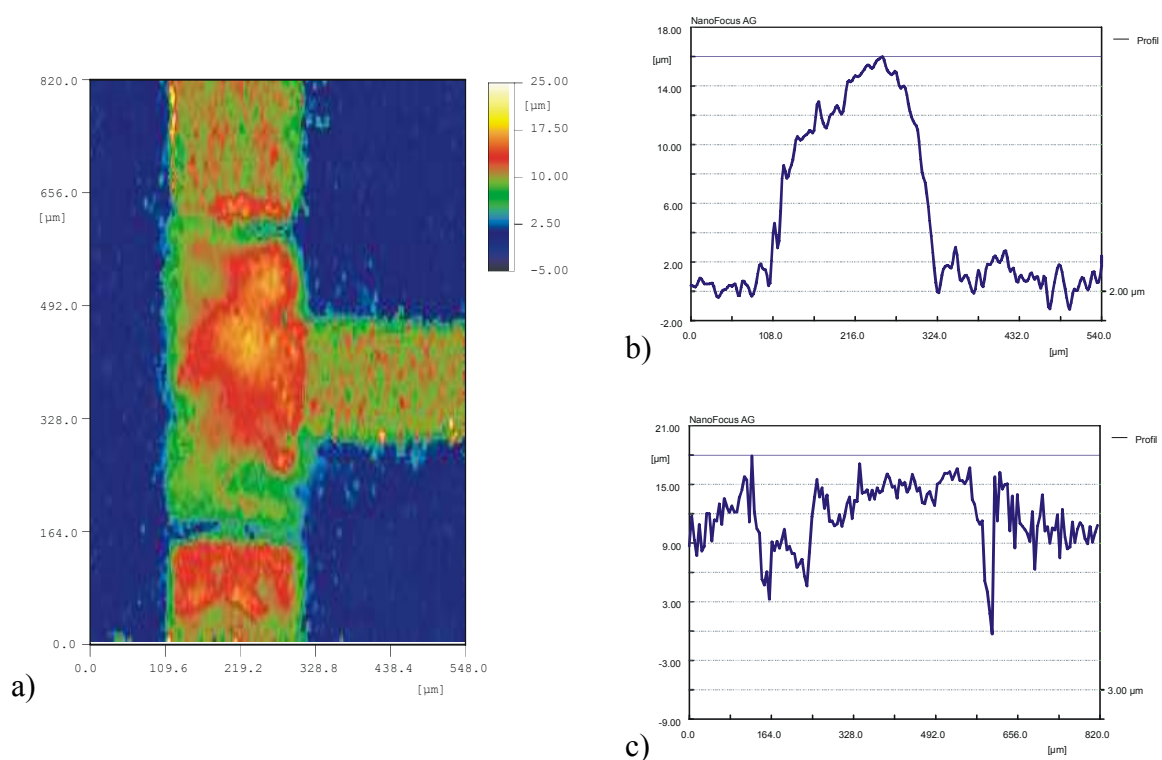
Rys. 4.6. Rozkład grubości (a) oraz przykładowy przekrój poprzeczny (b) i podłużny (c) przez rezystor DP2031/ Al_2O_3 o wymiarach $1500\times 500\ \mu\text{m}^2$, topologia D



Rys. 4.7. Rozkład grubości (a) oraz przykładowy przekrój poprzeczny (b) i podłużny (c) przez rezystor DP2031/ Al_2O_3 o wymiarach $600 \times 200 \mu\text{m}^2$, topologia D



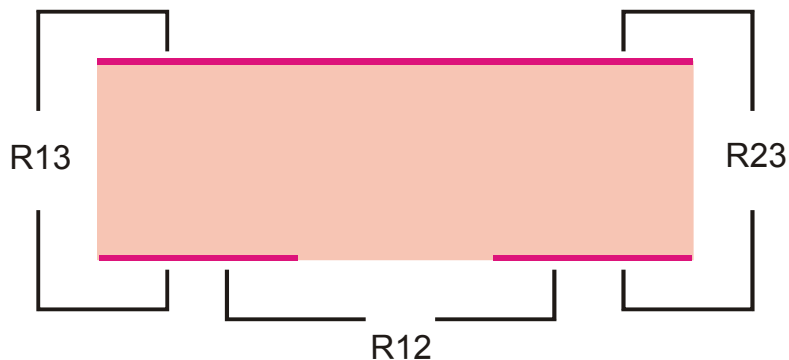
Rys. 4.8. Rozkład grubości (a) oraz przykładowy przekrój poprzeczny (b) i podłużny (b) przez rezystor DP2031/LTCC o wymiarach $1500 \times 500 \mu\text{m}^2$, topologia D



Rys. 4.9. Rozkład grubości (a) oraz przykładowy przekrój poprzeczny (b) i podłużny (c) przez rezystor DP2031/LTCC o wymiarach $600 \times 200 \mu\text{m}^2$, topologia D

4.5. Parametry elektryczne

Zbadano podstawowe parametry elektryczne wykonanych grubowarstwowych mikrorezystorów trójkontaktowych i sześciokontaktowych. Wyznaczono wartości średnie rezystancji międzykontaktowych (rys. 4.10) elementów oraz ich rozrzut statystyczny. Badano też charakterystyki temperaturowe struktur wielokontaktowych i określono ich właściwości szumowe.



Rys. 4.10. Sposób wyznaczania rezystancji międzykontaktowych rezystora trójelektrodowego

Tabele 4.3-4.6 prezentują wartości średnie i rozrzuty rezystancji międzykontaktowych dla poszczególnych wariantów wykonania rezystorów trójkontaktowych. Oczywiście parametry te silnie zależą od technologii. Niemniej we wszystkich przypadkach można zauważyć podobne efekty rozmiarowe. Praktycznie wszystkie struktury o rozmiarach $300 \times 100 \mu\text{m}^2$ i $200 \times 100 \mu\text{m}^2$ były zdefektowane. Dlatego też nie uwzględniono ich w tabelach. Przy tak małych elementach najwyraźniej rozrzuty wymiarów są relatywnie zbyt duże, by można w prawidłowy sposób uformować strukturę rezystora. Dla pasty CF041 naniesionej na podłoża LTCC stwierdzono ponadto znaczny rozrzut parametrów (przede wszystkim dla struktur B i D) z wyjątkiem największych rezystorów. Wszystkie rezystancje składowe znacznie zmieniały swoją wartość przy zmianie rozmiarów elementu. Jedynie dla struktur o szerokości $500 \mu\text{m}$ rzeczywiste parametry rezystorów były zgodne z projektowanymi. Zmniejszanie wymiarów rezystora skutkowało spadkiem wszystkich rezystancji składowych w granicach $30\% \div 70\%$. Najsłabszą zależność stwierdzono dla pasty DP2031, szczególnie na podłożu alundowym. Rezystory z past R8951 i CF041 wykazywały silniejszą podatność na zmianę wymiarów rezystora. Rozrzut statystyczny wahał się w granicach od 5% do 30% , dla większości przypadków wynosił około $15\% - 20\%$. Najlepsze wyniki osiągnięto dla pasty R8951, najgorzej wypadły elementy wykonane przy użyciu kompozycji CF041. Brakuje jednak wyraźnej korelacji rozrzutu z rozmiarami rezystorów. Generalnie najmniejszy rozrzut występował dla rezystorów o szerokości $500 \mu\text{m}$, dla szerokości $300 \mu\text{m}$ i $200 \mu\text{m}$ lepsze wyniki uzyskiwano w pewnych przypadkach dla pierwszej, w innych dla drugiej z tych wartości. Można jednak zauważyć, że stosunek rezystancji R_{12}/R_{13} zmienia się w znacznie mniejszym stopniu niż same rezystancje i pozostaje bardzo zbliżony do wartości planowanej, co wskazywałoby na podobny wpływ efektów rozmiarowych na wszystkie rezystancje składowe dla badanych topologii. Sugerowałoby to również wykorzystanie takich elementów w układach, w których bardziej istotny jest stosunek rezystancji, a nie ich wartości bezwzględne.

Struktury były projektowane jako symetryczne, co oznaczało równość R_{13} i R_{23} . Warunek ten nie jest zachowany przez rzeczywiste rezystory. Różnica osiąga w niektórych sytuacjach 30% , przeważnie rośnie wraz ze zmniejszaniem wymiarów, lecz nie we wszystkich przypadkach. Można zauważyć, że odchylenie to ma charakter systematyczny. Dla danego wariantu technologicznego i typu rezystora R_{13} jest zawsze większa od R_{23} lub na odwrót. Natomiast dla różnych egzemplarzy i wymiarów relacja ta nie zmienia się na przeciwną. Wskazuje to na efekt przesunięcia między elektrodami i obszarem rezystora, który skutkuje

mniej więcej taką samą zmianą ich względnego ustawienia dla rezystorów z danej partii - fakt ten zostanie przeanalizowany numerycznie w modelu przestawionym w punkcie 4.8.

Tab. 4.3. Parametry rezystorów trójkontaktowych na podłożu alundowym, pasta DP2031 (v_{Rij} - współczynnik zmienności rezystancji R_{ij})

		Al ₂ O ₃ , DP2031							
typ	wym. [μm ²]	R ₁₂ [kΩ]	R ₁₃ [kΩ]	R ₂₃ [kΩ]	v _{R12} [%]	v _{R13} [%]	v _{R23} [%]	R ₁₂ /R ₁₃	R ₁₃ /R ₂₃
A	1500×500	0,817	2,771	2,479	26,1	11,4	9,7	0,31	1,12
	900×300	0,646	1,694	1,506	20,7	18,3	16,4	0,40	1,13
	600×200	0,526	1,303	1,171	19,9	23,2	23,3	0,43	1,11
	projekt	0,817	2,424	2,424	-	-	-	0,34	1,00
B	1500×500	1,127	0,545	0,670	17,1	15,2	17,5	1,86	0,81
	900×300	0,748	0,355	0,477	20,2	19,1	20,5	1,80	0,75
	600×200	0,578	0,284	0,387	10,4	14,2	11,3	1,72	0,73
	projekt	1,262	0,696	0,696	-	-	-	1,81	1,00
C	1000×500	0,844	1,214	0,907	12,4	11,3	11,9	0,80	1,34
	600×300	0,520	0,727	0,600	13,8	17,0	22,0	0,78	1,21
	400×200	0,437	0,587	0,513	15,3	13,0	19,8	0,79	1,14
	projekt	0,816	1,424	1,424	-	-	-	0,57	1,00
D	1500×500	2,358	1,140	1,340	7,7	8,6	8,2	1,90	0,85
	900×300	1,781	0,815	1,088	8,1	10,5	7,5	1,87	0,75
	600×200	1,427	0,667	0,862	20,6	23,4	21,3	1,87	0,77
	projekt	2,643	1,456	1,456	-	-	-	1,82	1,00

Tab. 4.4. Parametry rezystorów trójkontaktowych na podłożu alundowym, pasta R8951

		Al ₂ O ₃ , R8951							
typ	wym. μm ²	R ₁₂ [kΩ]	R ₁₃ [kΩ]	R ₂₃ [kΩ]	v _{R12} [%]	v _{R13} [%]	v _{R23} [%]	R ₁₂ /R ₁₃	R ₁₃ /R ₂₃
A	1500×500	67,61	365,5	349,9	10,4	4,4	3,9	0,19	1,04
	900×300	40,63	193,4	181,5	9,9	10,1	10,0	0,22	1,07
	600×200	35,27	115,3	104,5	20,7	18,8	16,6	0,32	1,10
	projekt	81,70	242,4	242,4	-	-	-	0,34	1,00
B	1500×500	98,37	51,61	55,77	6,2	7,1	4,0	1,83	0,93
	900×300	48,50	24,46	28,90	20,8	19,6	17,4	1,82	0,85
	600×200	33,13	16,74	24,59	14,7	17,4	9,8	1,60	0,68
	projekt	126,2	69,60	69,60	-	-	-	1,81	1,00
C	1000×500	68,38	127,32	109,7	5,9	4,5	5,7	0,58	1,16
	600×300	37,02	58,12	48,09	15,7	16,3	14,6	0,70	1,21
	400×200	34,26	49,59	41,90	10,8	8,7	13,4	0,75	1,18
	projekt	81,60	142,4	142,4	-	-	-	0,57	1,00
D	1500×500	262,5	136,9	128,3	5,5	6,3	10,6	1,98	1,07
	900×300	155,0	75,42	83,19	9,6	7,3	14,1	1,95	0,91
	600×200	107,7	48,71	61,23	13,7	16,9	13,6	1,96	0,80
	projekt	264,3	145,6	145,6	-	-	-	1,82	1,00

Tab. 4.5. Parametry rezystorów trójkontaktowych na podłożu LTCC, pasta DP2031

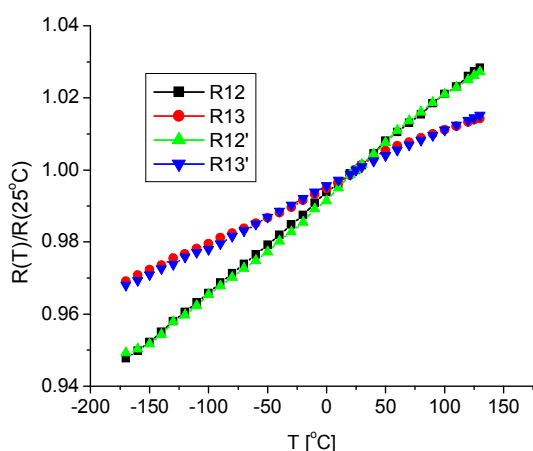
		LTCC, DP2031							
typ	wym. μm^2	R_{12} [k Ω]	R_{13} [k Ω]	R_{23} [k Ω]	V_{R12} [%]	V_{R13} [%]	V_{R23} [%]	R_{12}/R_{13}	R_{13}/R_{23}
A	1500×500	0,951	4,333	4,460	1,8	5,8	6,2	0,22	0,97
	900×300	0,667	2,557	2,524	17,8	10,7	8,4	0,26	1,01
	600×200	0,539	1,509	1,474	36,7	14,8	11,9	0,36	1,02
	projekt	0,817	2,424	2,424	-	-	-	0,34	1,00
B	1500×500	1,370	0,800	0,758	7,0	15,8	10,6	1,76	1,06
	900×300	0,896	0,414	0,622	17,0	32,5	29,7	1,73	0,67
	600×200	0,647	0,187	0,540	25,8	21,8	30,5	1,78	0,35
	projekt	1,262	0,696	0,696	-	-	-	1,81	1,00
C	1000×500	0,922	1,705	1,674	4,3	11,5	12,6	0,55	1,02
	600×300	0,538	1,119	0,787	24,8	40,3	21,1	0,56	1,42
	400×200	0,523	0,537	0,725	35,3	26,7	39,1	0,83	0,74
	projekt	0,816	1,424	1,424	-	-	-	0,57	1,00
D	1500×500	5,758	2,904	3,338	3,1	8,4	4,4	1,84	0,87
	900×300	9,340	3,174	6,167	-	33,0	-	2,00	0,51
	600×200	4,106	1,313	2,891	48,1	54,4	64,2	1,95	0,45
	projekt	2,643	1,456	1,456	-	-	-	1,82	1,00

Tab. 4.6. Parametry rezystorów trójkontaktowych na podłożu LTCC, pasta CF041

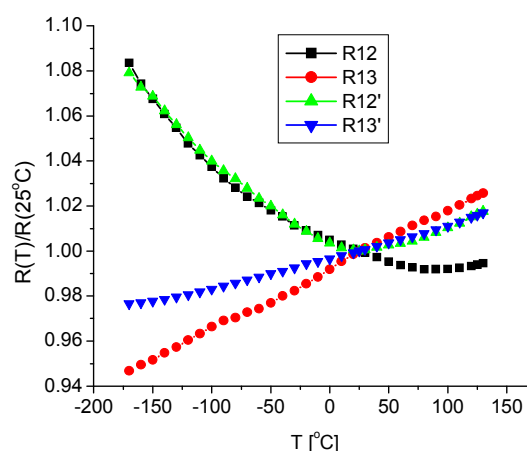
		LTCC, CF041							
typ	wym. μm^2	R_{12} [k Ω]	R_{13} [k Ω]	R_{23} [k Ω]	V_{R12} [%]	V_{R13} [%]	V_{R23} [%]	R_{12}/R_{13}	R_{13}/R_{23}
A	1500×500	9,76	58,0	57,4	24	21	22	0,17	1,01
	900×300	4,82	32,8	31,4	17	18	21	0,15	1,05
	600×200	3,78	23,7	23,3	29	20	23	0,16	1,02
	projekt	8,17	24,2	24,2	-	-	-	0,34	1,00
B	1500×500	16,10	9,58	8,07	29	26	32	1,82	1,19
	900×300	7,15	4,02	3,42	52	53	47	1,92	1,17
	600×200	5,87	2,14	4,23	61	52	65	1,84	0,51
	projekt	12,62	6,96	6,96	-	-	-	1,81	1,00
C	1000×500	9,45	26,84	26,4	19	22	20	0,36	1,02
	600×300	3,58	8,31	7,16	20	7	5	0,46	1,16
	400×200	4,12	5,98	4,50	26	33	22	0,78	1,33
	projekt	8,16	14,24	14,24	-	-	-	0,57	1,00
D	1500×500	47,91	23,48	26,12	26	24	29	1,93	0,90
	900×300	46,46	18,47	28,51	49	30	62	1,98	0,65
	600×200	51,38	12,21	39,68	58	57	60	1,98	0,31
	projekt	26,43	14,56	14,56	-	-	-	1,82	1,00

Zmierzono również przebieg zmian rezystancji międzykontaktowych w zakresie temperatur od -170°C do $+130^{\circ}\text{C}$. Pokazano je na rys. 4.11-4.14. Natomiast wartości GTWR zamieszczono w tab. 4.7 i 4.8. Dla rezystorów z past DP2031 i CF041 na podłożu LTCC charakterystyki wykazywały kształt typowy dla rezystorów grubowarstwowych. Uzyskane krzywe posiadały minimum dla pewnego przedziału temperatur. Rezystory wytworzone z pasty DP2031 posiadały charakterystyki w przybliżeniu liniowo rosnące w badanym

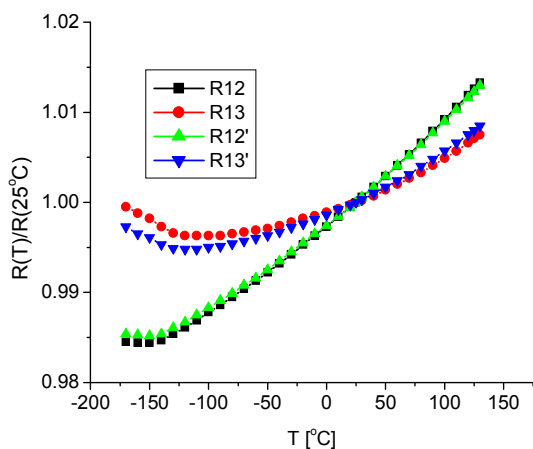
zakresie temperatury. Wskazywałyoby to na istnienie wspomnianego minimum w temperaturach poniżej badanego zakresu. Zakres zmian był odmienny w zależności od mierzonej rezystancji międzykontaktowej. Zmiany R_{I2} były wyraźnie większe niż rezystancji R_{I3} ; w przypadku rezystorów DP2031/alund o wymiarach $600 \times 200 \mu\text{m}^2$ uzyskano wręcz różnicę w kształcie charakterystyk, które dla parametru R_{I2} miały przebieg niemonotoniczny z minimum. Inną zależność poszczególnych rezystancji międzykontaktowych od temperatury można uzasadnić różnym wpływem efektów kontaktowych. Był on niewątpliwie silniejszy w przypadku, gdy mierzono rezystancję między kontaktami położonymi w rezystorze blisko siebie, słabszy kiedy elektrody znajdowały się dalej.



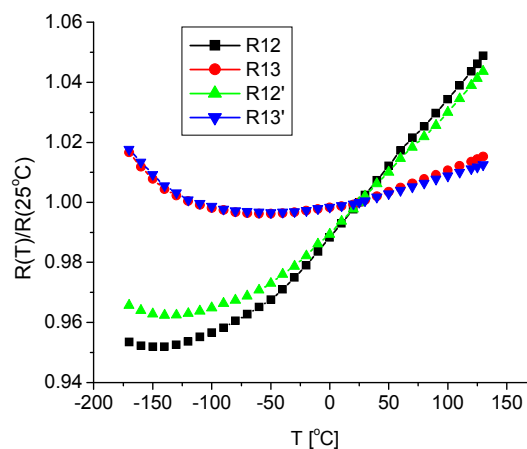
Rys. 4.11. Zmiany rezystancji w funkcji temperatury dla dwóch struktur typu A $1500 \times 500 \mu\text{m}^2$, DP2031/alund



Rys. 4.12. Zmiany rezystancji w funkcji temperatury dla dwóch struktur typu A $600 \times 200 \mu\text{m}^2$, DP2031/alund



Rys. 4.13. Zmiany rezystancji w funkcji temperatury dla dwóch struktur typu A $1500 \times 500 \mu\text{m}^2$, DP2031/LTCC



Rys. 4.14. Zmiany rezystancji w funkcji temperatury dla dwóch struktur typu A $1500 \times 500 \mu\text{m}^2$, CF041/LTCC

Gończy temperaturowy współczynnik rezystancji zmieniał się w szerokim zakresie, od 50 do ponad 500 ppm/°C. Większość wyników mieściła się w granicach 100÷250 ppm/°C, co w przybliżeniu odpowiadało wartościom uzyskanym dla rezystorów dwukontaktowych. Jedynie w przypadku rezystorów CF041 zakres ten był wyraźnie przekraczany przez większość struktur testowych. Efekt kontaktowy (rozmiarowy) uwidaczniał się również na charakterystykach temperaturowych. Mniejsze rezystory charakteryzowały się z reguły większą wartością GTWR, zwłaszcza dla struktur R8951 na alundzie i DP2031 na LTCC. Rezystory z tej drugiej pasty na podłożu alundowym przejawiały słabszą zależność GTWR od wymiarów. Wartości GTWR w większości przypadków wykazywały dość duży rozrzut, rzędu 50÷150 ppm/°C. Natomiast mały, nie przekraczający kilkunastu ppm/°C, rozrzut GTWR był charakterystyczny dla rezystorów R8951.

Tab. 4.7. Temperaturowy współczynnik rezystancji struktur DP2031 i R8951 na podłożu alundowym

typ	wym. [μm ²]	DP2031/Al ₂ O ₃			R8951/Al ₂ O ₃		
		GTWR ₁₂ [ppm/°C]	GTWR ₁₃ [ppm/°C]	GTWR ₂₃ [ppm/°C]	GTWR ₁₂ [ppm/°C]	GTWR ₁₃ [ppm/°C]	GTWR ₂₃ [ppm/°C]
A	1500×500	91	131	191	153	46	42
	900×300	269	272	319	207	140	136
	600×200	277	303	307	237	213	207
B	1500×500	233	264	200	136	137	229
	900×300	219	296	90	208	204	208
	600×200	261	333	233	221	214	224
C	1000×500	73	137	293	144	134	135
	600×300	311	322	358	212	212	206
	400×200	251	261	315	233	229	228
D	1500×500	221	245	220	104	104	105
	900×300	298	350	286	165	170	169
	600×200	325	358	315	215	211	220

Tab. 4.8. Temperaturowy współczynnik rezystancji struktur DP2031 i CF041 na podłożu LTCC

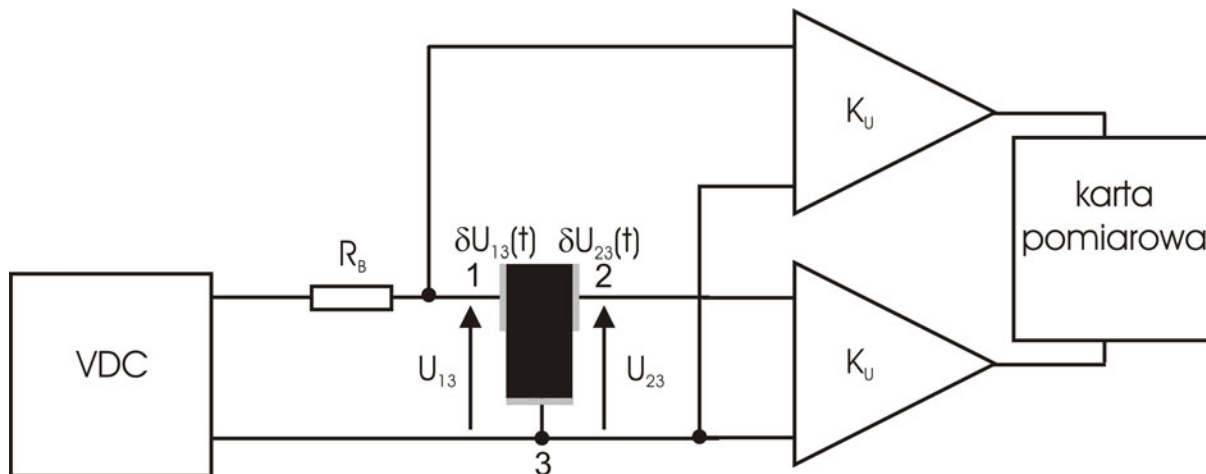
typ	wym. [μm ²]	DP2031/LTCC			CF041/LTCC		
		GTWR ₁₂ [ppm/°C]	GTWR ₁₃ [ppm/°C]	GTWR ₂₃ [ppm/°C]	GTWR ₁₂ [ppm/°C]	GTWR ₁₃ [ppm/°C]	GTWR ₂₃ [ppm/°C]
A	1500×500	125	51	65	331	141	137
	900×300	224	175	115	412	272	288
	600×200	287	229	242	466	336	340
B	1500×500	178	181	180	258	196	313
	900×300	259	279	251	553	458	548
	600×200	281	342	281	611	239	725
C	1000×500	163	166	166	341	220	212
	600×300	110	-49	88	521	474	521
	400×200	80	150	233	358	437	676
D	1500×500	116	108	103	253	256	260
	900×300	-	112	-	300	243	363
	600×200	-67	248	2	-301	117	-58

Osobno omówione zostaną struktury sześciokontaktowe. Niestety, próba wykonania elementów pełniących rolę sumatorów napięć i prądów zakończyło się niepowodzeniem. W przypadku sumatora napięć rozbieżność między założonymi a otrzymanymi parametrami była bardzo duża, powodując praktycznie utratę funkcjonalności elementu. Lepsze wyniki uzyskano dla sumatora prądów (tab. 4.9). Jednak i tu różnice były znaczne. Powodem tego zdaje się być trudna w realizacji technologicznej topologia obu struktur. Występuje tu duża różnica wymiarów poszczególnych detali struktury. Wymiary kontaktów są bardzo małe w porównaniu z całym rezystorem, co skutkuje automatycznie ich znacznym rozrzutem. Ponadto odstępstwo od idealnej struktury spowodowane nakładaniem się rezystora i elektrod okazało się dla struktur tego typu bardzo duże. Powoduje to, że praktyczne zastosowanie takich elementów wykonanych w technologii grubowarstwowej jest wyraźnie ograniczone.

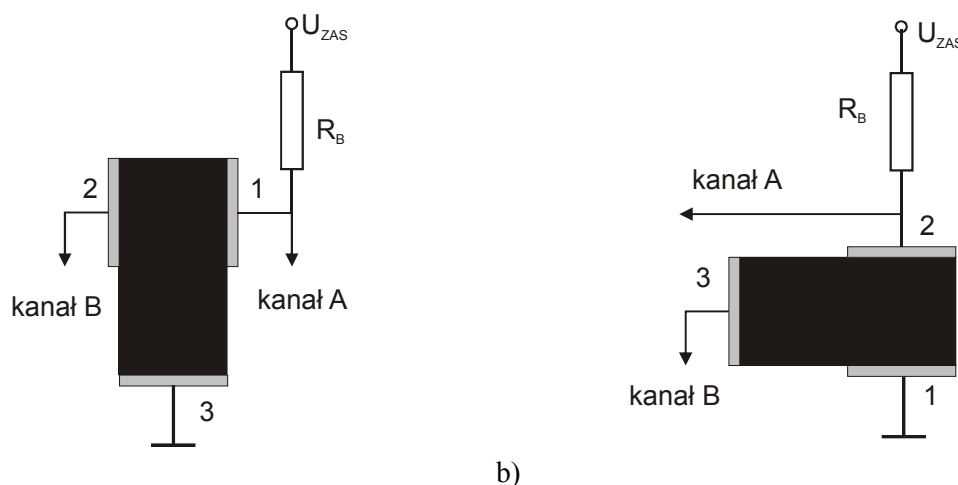
Tab. 4.9. Rzeczywiste i projektowane parametry sześciokontaktowych sumatorów prądów.

	wym. [mm ²]	z_{12}/z_{11}	z_{13}/z_{11}	z_{14}/z_{11}	z_{15}/z_{11}
Al ₂ O ₃ DP2031	4×2	0,775	0,417	0,210	0,108
	3×1,5	0,808	0,517	0,257	0,142
	2×1	0,821	0,549	0,323	0,192
Al ₂ O ₃ R8951	4×2	0,672	0,382	0,196	0,097
	3×1,5	0,713	0,418	0,219	0,111
	2×1	0,764	0,472	0,247	0,124
LTCC DP2031	4×2	0,751	0,403	0,196	0,096
	3×1,5	0,819	0,470	0,239	0,112
	2×1	0,739	0,496	0,267	0,129
LTCC CF041	4×2	0,596	0,296	0,159	0,084
	3×1,5	0,738	0,328	0,197	0,107
	2×1	0,788	0,469	0,276	0,158
projekt		0,500	0,250	0,125	0,063

Dokonano także pomiarów parametrów szumowych rezystorów trójkontaktowych. Z każdej serii rezystorów do pomiaru wybrano dwie egzemplarze. Z uwagi na bardziej złożoną strukturę niż w przypadku rezystorów dwuelektrodowych zastosowano układ pomiarowy pokazany na rys. 4.15, w którym napięcie szumów mierzono równocześnie na dwóch kontaktach rezystora. Zastosowano dwa różne warianty włączenia rezystora w układ pomiarowy (rys. 4.16). Pomiary prowadzono w analogiczny sposób jak w przypadku rezystorów dwuelektrodowych (punkt 3.5), mierząc fluktuacje napięcia na elektrodach elementu przy stałym prądzie polaryzującym. Parametry szumowe, wyznaczone za pomocą zależności (4.22) i (4.23), przedstawiono w tabelach 4.10 i 4.11. Natomiast charakterystyki widoczne są na rys. 4.17-4.20.



Rys. 4.15. Sposób pomiaru parametrów szumowych rezystorów trójkontaktowych (δU_{13} , δU_{23} - fluktuacje napięcia odpowiednio między kontaktami "1" i "3" oraz "2" i "3" rezystora)



a) b)
Rys. 4.16. Konfiguracje pomiarowe zastosowane przy pomiarze właściwości szumowych rezystorów trójkontaktowych - konfiguracja "123" (a) i "231" (b)

$$U_{szij} = \sqrt{\int_{20\text{Hz}}^{200\text{Hz}} S_{Uij}(f) df} \quad (4.22)$$

$$k_{szij} = 20 \log \left(\frac{U_{szij}}{U_{polij}} \times 10^6 \right) \quad (4.23)$$

gdzie S_{Uij} - widmowa gęstość mocy szumu, U_{szij} - napięcie skuteczne szumu, U_{polij} - napięcie polaryzujące, mierzone między i -tą oraz j -tą elektrodą rezystora.

Tab. 4.10. Parametry szumowe rezystorów DP2031, typ C, konfiguracja "123"

podłoże	wymiary [μm^2]	U_{13} [V]	U_{23} [V]	U_{sz13} [μV]	U_{sz23} [μV]	k_{sz13} [dB]	k_{sz23} [dB]
Al_2O_3	1000x500	1,00	0,64	3,99	3,47	12,0	14,7
		1,00	0,65	5,62	4,16	15,0	16,1
	400x200	1,00	0,64	2,57	2,08	8,2	10,2
		1,00	0,59	1,32	1,20	2,4	6,2
LTCC	1000x500	1,50	1,15	4,30	3,92	9,2	10,7
		1,00	0,68	1,62	1,43	4,2	6,5
	400x200	1,00	0,72	3,03	2,08	9,6	9,2
		1,00	0,56	3,61	1,59	11,1	9,1

Tab. 4.11. Parametry szumowe rezystorów DP2031, typ C, konfiguracja "231"

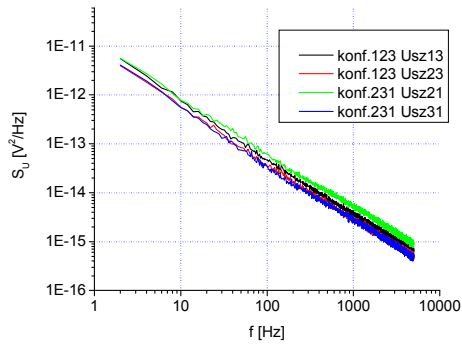
podłoże	wymiary [μm^2]	U_{21} [V]	U_{31} [V]	U_{sz21} [μV]	U_{sz31} [μV]	k_{sz21} [dB]	k_{sz31} [dB]
Al_2O_3	1000x500	1,00	0,50	4,32	3,44	12,7	16,7
		1,00	0,51	5,23	2,64	14,4	14,3
	400x200	1,00	0,48	2,80	2,26	9,0	13,4
		1,00	0,52	3,05	2,32	9,7	13,0
LTCC	1000x500	1,00	0,49	1,07	1,29	0,6	8,4
		1,00	0,54	1,13	1,00	1,0	5,3
	400x200	1,00	0,37	3,12	1,55	9,9	9,8
		1,00	0,54	3,63	2,54	11,2	13,9

Generalnie w badanych rezystorach dominował szum $1/f$. Znalazło to potwierdzenie w wartościach współczynników α i γ , obliczonych celem aproksymacji zależności widmowej gęstości mocy od częstotliwości zależnością [123,158]:

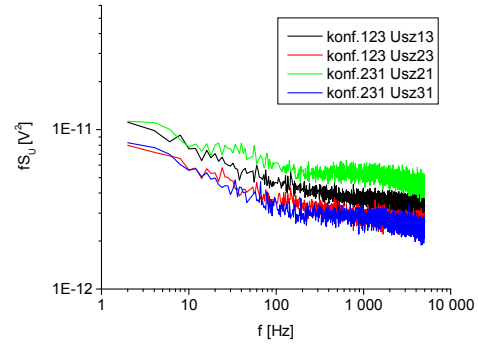
$$S_U(f) = a \frac{U_{pol}^\alpha}{f^\gamma} \quad (4.24)$$

gdzie S_U - widmowa gęstość mocy szumu, U_{pol} - napięcie polaryzujące, α, γ, a - stałe

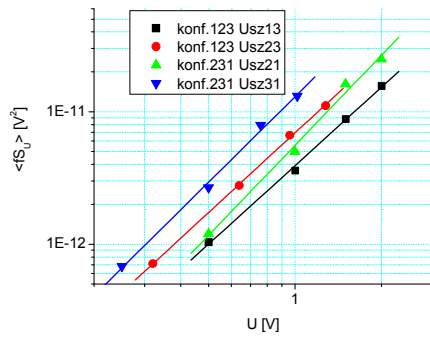
Dla idealnego szumu prądowego mamy $\alpha = 2$ i $\gamma = 1$. W przypadku badanych struktur wartości α wahały się od 1,79 do 2,25, co spełnia z akceptowalną dokładnością powyższą zależność. Tylko dla rezystora $1000 \times 500 \mu\text{m}^2$ na podłożu LTCC w jednym z pomiarów zanotowano wartość 1,4. Również wartości γ były bliskie teoretycznej wartości 1, mieszcząc się w zakresie $0,94 \div 1,13$. Wskaźnik szumów k_{sz} osiągał wartości od 1 do 16,1 dB. Zwraca uwagę znaczna różnica w poziomie szumów w identycznych strukturach testowych, co świadczy o dużej zmienności tego parametru. Nie znaleziono korelacji między wymiarami rezystora i napięciem szumów. Wskaźnik szumów elementów $400 \times 200 \mu\text{m}^2$ osiągał wartości porównywalne lub nawet mniejsze niż dla rezystorów $1000 \times 500 \mu\text{m}^2$. Nie jest tu spełniona odwrotna jego zależność od objętości elementu.



a)



b)



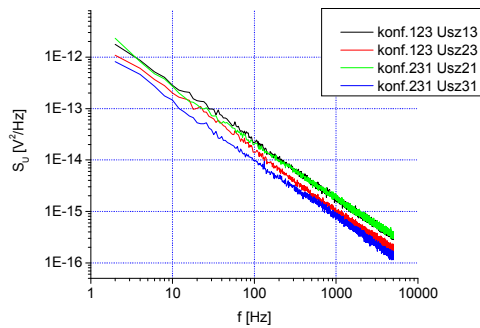
c)

Rys. 4.17. Charakterystyki szumowe rezystorów typu C, $1000 \times 500 \mu\text{m}^2$ na alundzie

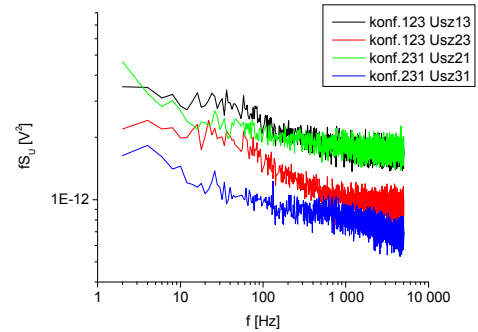
a) $S_U = f(f)$

b) $fS_U = f(f)$

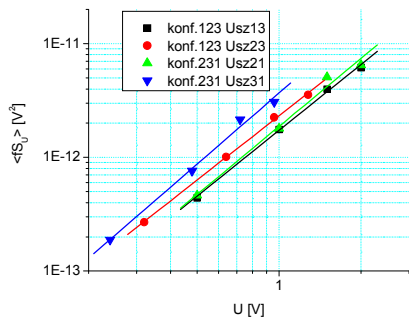
c) $\langle fS_U \rangle = f(U)$



a)



b)



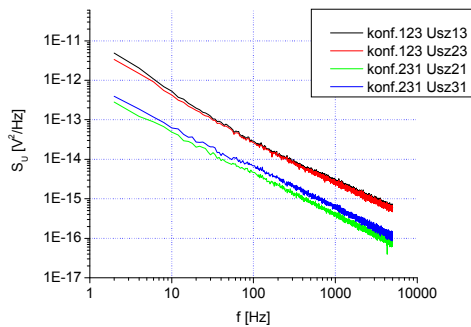
c)

Rys. 4.18. Charakterystyki szumowe rezystorów typu C, $400 \times 200 \mu\text{m}^2$ na alundzie

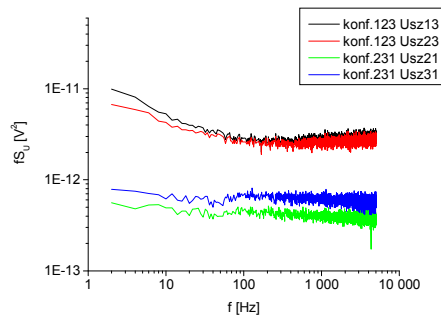
a) $S_U = f(f)$

b) $fS_U = f(f)$

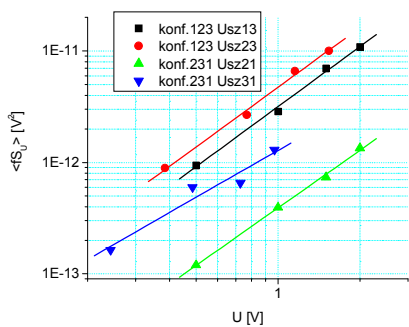
c) $\langle fS_U \rangle = f(U)$



a)



b)



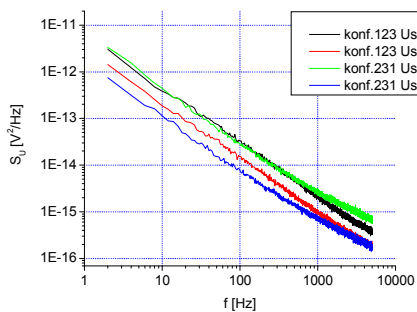
c)

Rys. 4.19. Charakterystyki szumowe rezystorów typu C, $1000 \times 500 \mu\text{m}^2$ na LTCC

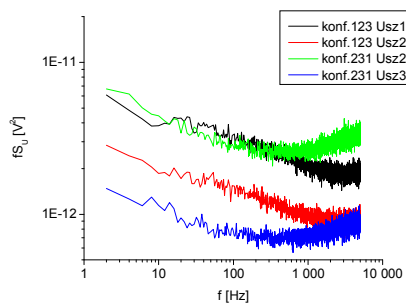
a) $S_U = f(f)$

b) $fS_U = f(f)$

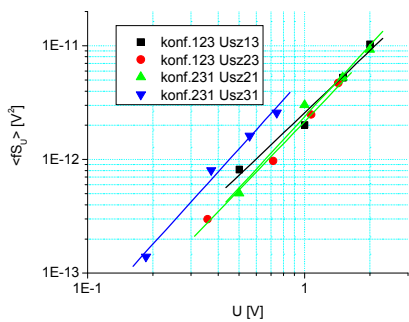
c) $\langle fS_U \rangle = f(U)$



a)



b)



c)

Rys. 4.20. Charakterystyki szumowe rezystorów typu C $400 \times 200 \mu\text{m}^2$ na LTCC

a) $S_U = f(f)$

b) $fS_U = f(f)$

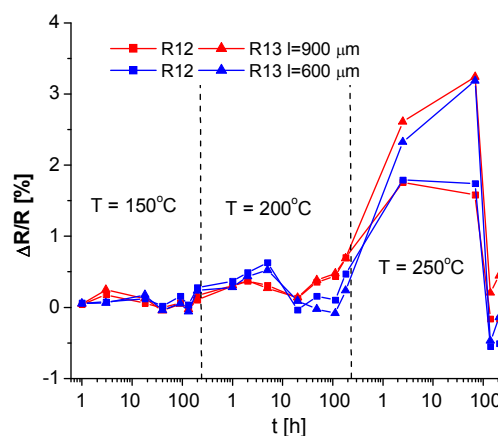
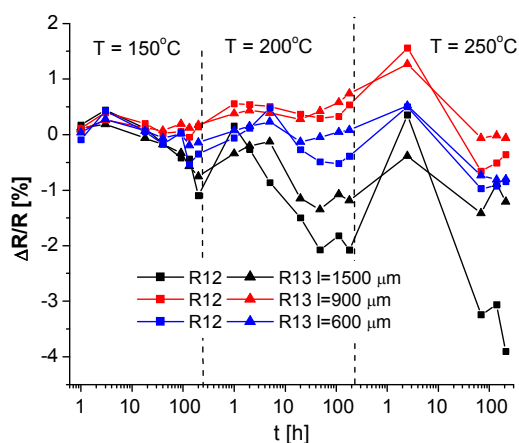
c) $\langle fS_U \rangle = f(U)$

Konfiguracja pomiarowa nie zdawała się mieć znaczącego wpływu na poziom szumu. Dla obu konfiguracji - przy zbliżonych napięciach polaryzacji - uzyskano podobne wartości napięcia szumów nadmiarowych i wskaźników szumów. Jediną wyraźną prawidłowością była mniejsza wartość wskaźnika szumów mierzona na elektrodzie, do której przykładano napięcie polaryzujące ("1" dla konfiguracji "123" i "2" dla "231") niż uzyskana dla drugiej elektrody.

Ponadto sam poziom szumów jest wysoki. Katalogowa wartość współczynnika szumów dla rezystora $1 \times 1 \text{ mm}^2$ wykonanego z pasty DP2031 wynosi -20 dB [154] i jest znacznie niższa niż uzyskana dla rezystorów $1000 \times 500 \text{ }\mu\text{m}^2$, porównywalnych pod względem rozmiarów. Jest to zapewne skutkiem nierównomiernego rozkładu pola elektrycznego w obszarze rezystora [168]. W rejonach koncentracji linii pola następować musi znaczny wzrost poziomu szumów zgodnie z opisaną wyżej zależnością kwadratową. Znaczący może też być wkład szumu kontaktów rezystora [169].

4.6. Stabilność długoczasowa

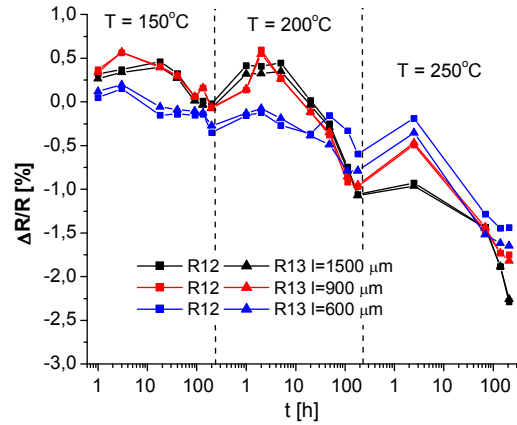
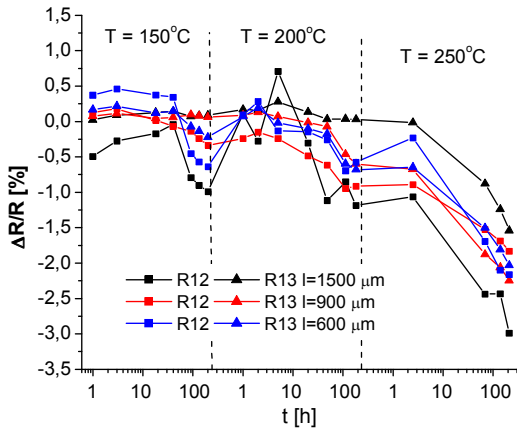
Analogicznie jak w przypadku rezystorów dwukontaktowych zbadano stabilność długoczasową rezystorów trójkontaktowych. Starzenie termiczne prowadzono kolejno w temperaturze 150, 200 i 250°C, odpowiednio przez okres 200÷250 h. W wybranych chwilach czasu mierzono wybrane rezystancje międzyelektrodowe. Pomiar przeprowadzano po schłodzeniu struktur do temperatury pokojowej. Wyniki przedstawiono na rysunkach 4.21-4.24.



a)

b)

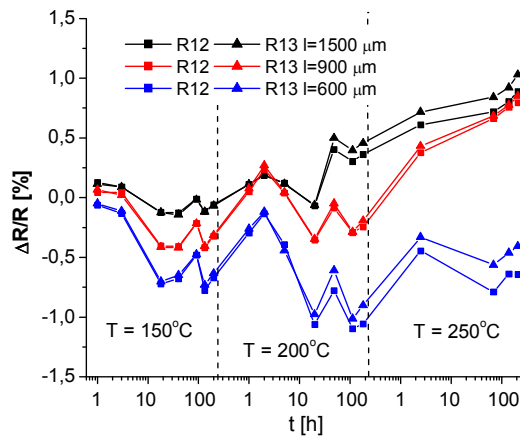
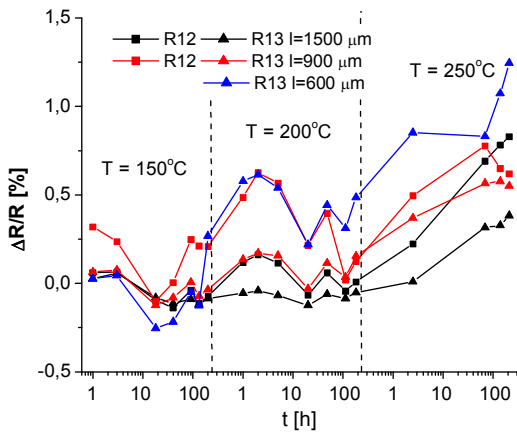
Rys. 4.21. Zmiany rezystancji w czasie starzenia termicznego rezystorów DP2031 na podłożu alundowym, struktury typu A (a) i typu B (b)



a)

b)

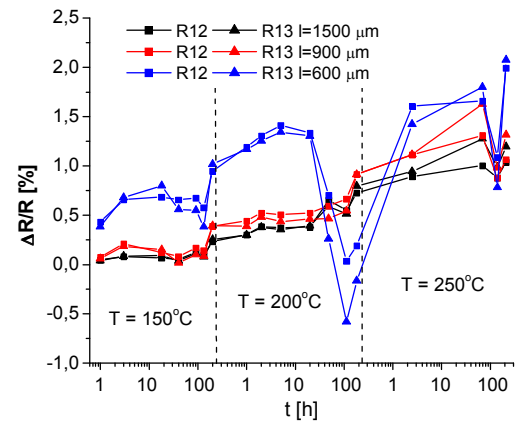
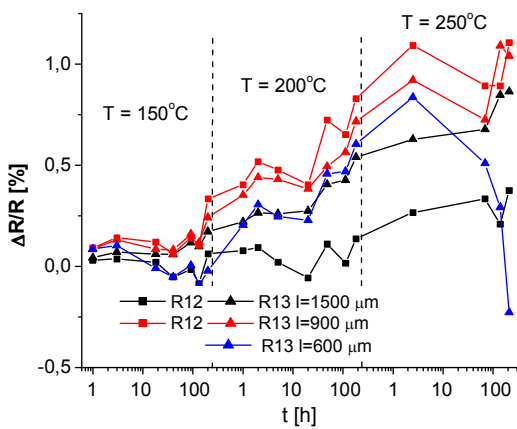
Rys. 4.22. Zmiany rezystancji w czasie starzenia termicznego rezystorów R8951 na podłożu alundowym, struktury typu A (a) i typu B (b)



a)

b)

Rys. 4.23. Zmiany rezystancji w czasie starzenia termicznego rezystorów CF041 na podłożu LTCC, struktury typu A (a) i typu B (b)



a)

b)

Rys. 4.24. Zmiany rezystancji w czasie starzenia termicznego rezystorów DP2031 na podłożu LTCC, struktury typu A (a) i typu B (b)

Stwierdzono dość znaczne zmiany rezystancji podczas starzenia, sięgające nawet $\pm 3\%$. Jednak w pierwszym cyklu starzenia w typowo stosowanej temperaturze 150°C zmiany te nie przekraczały $\pm 1\%$ i zwiększały się dopiero przy przetrzymaniu w wyższych temperaturach. Bardziej stabilne były struktury większe, szczególnie na podłożach LTCC (jakkolwiek nie była to zbyt silna korelacja). Rozmiar rezystora zasadniczo nie wpływał na kształt charakterystyk, czyli kierunek i sposób zmian rezystancji. Rezystory na ceramice alundowej wykazywały tendencje do wzrostu rezystancji na początku każdego cyklu starzenia, a następnie spadku, co sugeruje istnienie dwóch dominujących mechanizmów starzeniowych o przeciwnym wpływie na zmiany rezystancji [170]. Dla pasty R8951 rezystancja zmniejszała się po każdym cyklu. Przebieg zmian był również podobny w każdej z temperatur. Rezystory z pasty DP2031 zachowywały się nieco inaczej - po kolejnych cyklach starzenia obserwowano zarówno wzrost jak i spadek rezystancji, choć ta druga tendencja przeważała. Ponadto podwyższenie temperatury starzenia do 250°C znacznie zwiększyło zakres zmian rezystancji.

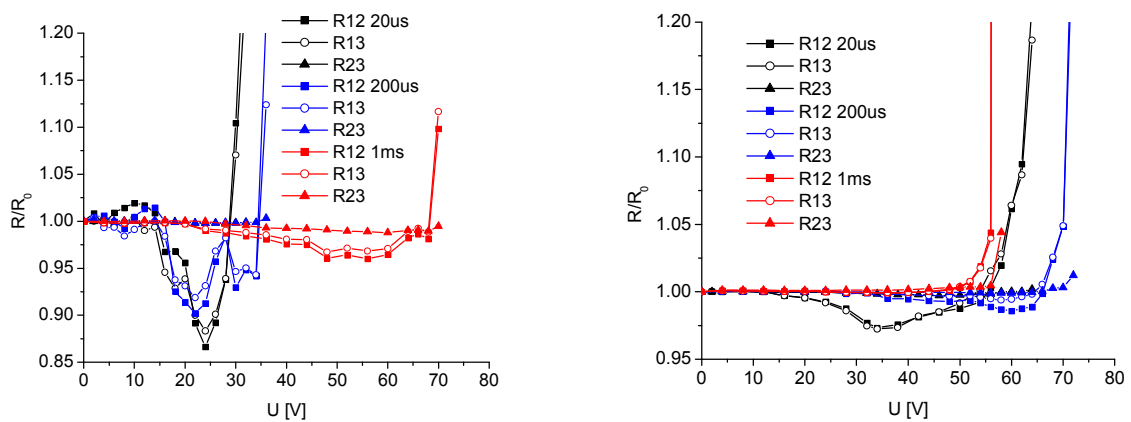
W przypadku struktur na podłożu LTCC rezystancja zwiększała się po każdym etapie starzenia. Wyjątkiem było zachowanie pasty CF041 po pierwszym cyklu starzeniowym, kiedy rezystancje wyraźnie zmniejszyły się. Większy był też wpływ temperatury starzenia. Dla temperatury 200°C charakterystyki miały przebieg podobny jak dla struktur na podłożu alundowym, tzn. rezystancje początkowo zwiększały się, po czym się zmniejszały. Dla najwyższej temperatury obserwowano już znacznie wyraźniejszą tendencję wzrostową.

Prawie we wszystkich przypadkach zmiany R_{12} i R_{13} były mocno skorelowane - krzywe otrzymane dla obu tych parametrów w dużym stopniu się pokrywały. Słaby był też wpływ topologii rezystora. Różnica pojawiła się w zasadzie tylko dla rezystorów CF041, gdzie w przypadku struktury A rezystancja mniejszych elementów nieznacznie się zwiększyła, zaś dla typu B - zmniejszyła.

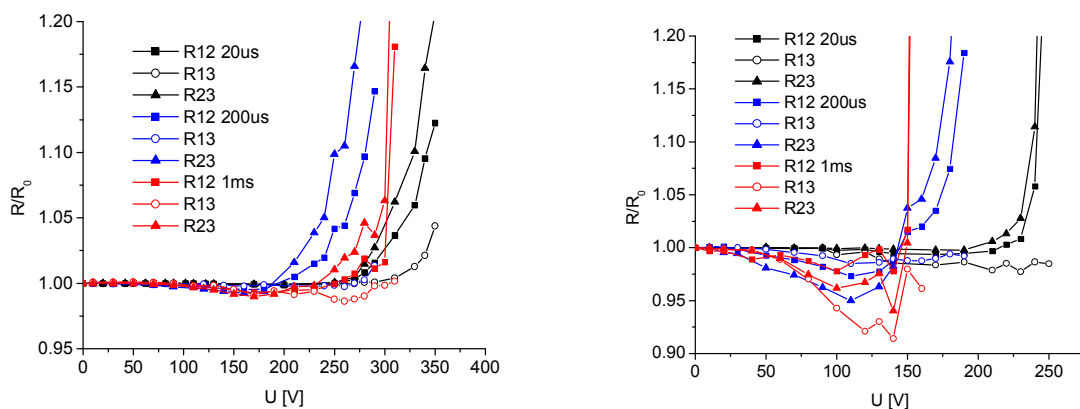
4.7. Odporność impulsowa

Przy badaniu odporności impulsowej rezystorów trójkontaktowych zastosowano tę samą procedurę jak w przypadku rezystorów dwuelektrodowych. Impulsy podawano między kontakty "1" i "2" rezystora przy trzecim doprowadzeniu nie podłączonym. Mierzono jednak zmiany wszystkich trzech rezystancji międzyelektrodowych. Rysunki 4.25-4.30 przedstawiają przebieg ich zmian w funkcji napięcia impulsu. Maksymalne dopuszczalne wartości napięć zebrano w tabeli 4.12.

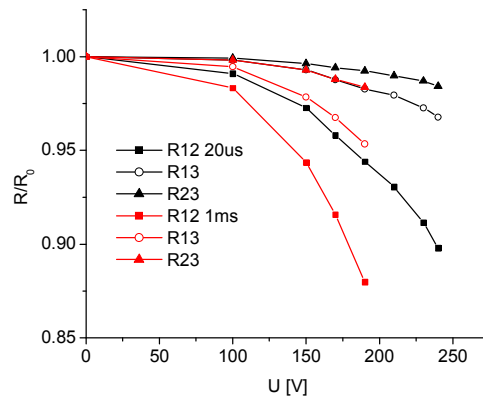
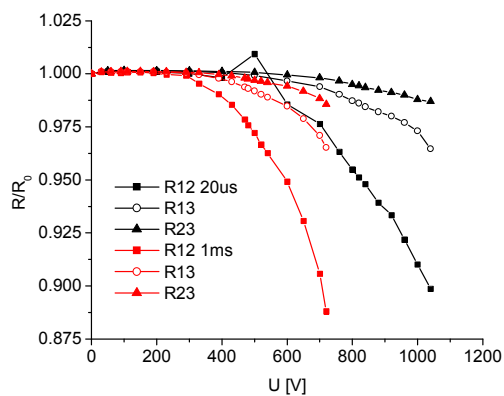
Zmiany rezystancji mają podobny charakter jak w klasycznych rezystorach dwuelektrodowych. Ogólnie wydłużanie czasu impulsu powoduje zmniejszenie jego dopuszczalnej amplitudy, choć napotkano na wiele odstępstw od tej reguły, tzn. uszkodzenie struktury następowało szybciej przy impulsach krótszych (np. dla struktur DP2031/alund $1000 \times 500 \mu\text{m}^2$). Podobny był także przebieg zmierzonych charakterystyk. Początkowe narażenia powodowały niewielkie zmiany rezystancji rezystorów z pasty DP2031, po czym po przekroczeniu wartości granicznej następował jej gwałtowny wzrost. Natomiast rezystancje elementów z past R8951 i CF041 zmniejszały się w miarę jednostajnie aż do przekroczenia założonego dziesięcioprocentowego progu uszkodzenia.



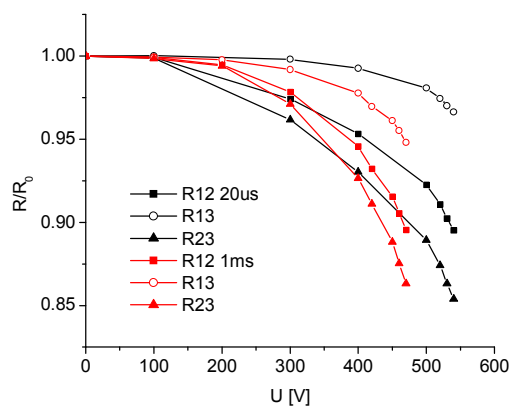
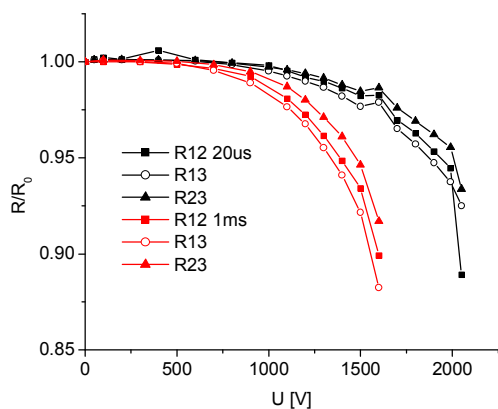
a) b)
Rys. 4.25. Zmiany rezystancji w funkcji napięcia impulsu - struktury DP2031/alund, typ C, $1000 \times 500 \mu\text{m}^2$ (a) i $400 \times 200 \mu\text{m}^2$ (b)



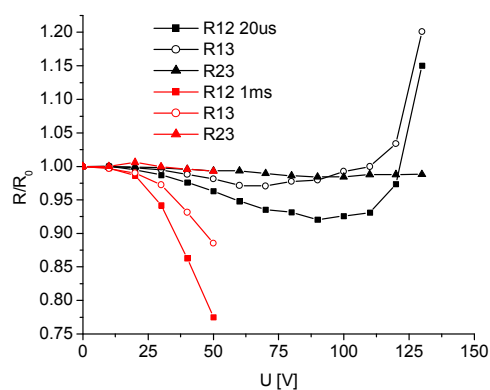
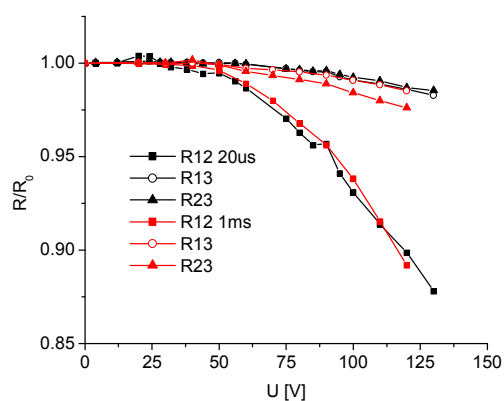
a) b)
Rys. 4.26. Zmiany rezystancji w funkcji napięcia impulsu - struktury DP2031/alund, typ D, $1500 \times 500 \mu\text{m}^2$ (a) i $600 \times 200 \mu\text{m}^2$ (b)



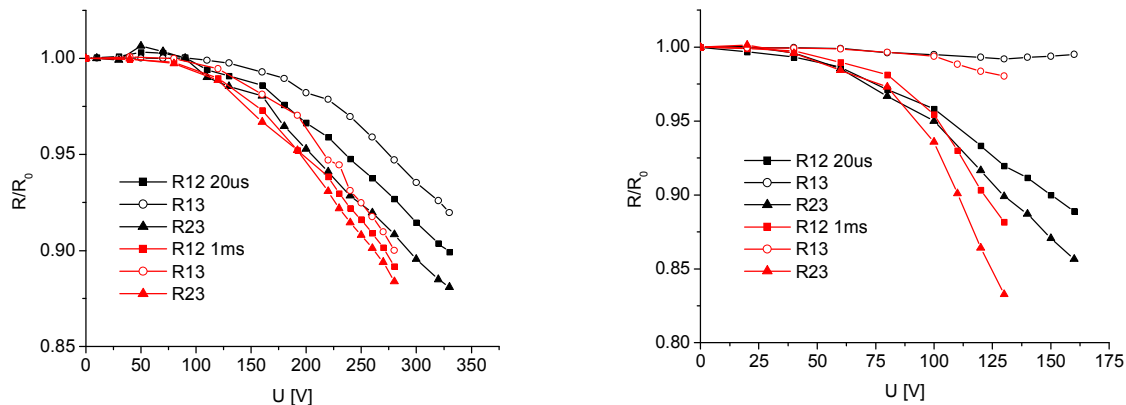
a) b)
Rys. 4.27. Zmiany rezystancji w funkcji napięcia impulsu - struktury R8951/alund, typ C, $1000 \times 500 \mu\text{m}^2$ (a) i $400 \times 200 \mu\text{m}^2$ (b)



a) b)
Rys. 4.28. Zmiany rezystancji w funkcji napięcia impulsu - struktury R8951/alund, typ D, $1500 \times 500 \mu\text{m}^2$ (a) i $600 \times 200 \mu\text{m}^2$ (b)



a) b)
Rys. 4.29. Zmiany rezystancji w funkcji napięcia impulsu - struktury CF041/alund, typ D, $1000 \times 500 \mu\text{m}^2$ (a) i $400 \times 200 \mu\text{m}^2$ (b)



a) b)
 Rys. 4.30. Zmiany rezystancji w funkcji napięcia impulsu - struktury CF041/alund, typ D, $1500 \times 500 \mu\text{m}^2$ (a) i $600 \times 200 \mu\text{m}^2$ (b)

Istotny był natomiast wpływ topologii rezystora. Choć napięcie podawano tylko na jedną z rezystancji międzykontaktowych - R_{12} , to zmiany dotyczyły wszystkich trzech z nich (choć w różnym stopniu). Impulsy napięciowe we wszystkich przypadkach prowadziły do przekroczenia progu uszkodzenia przez rezystancję R_{12} . Zazwyczaj dotyczyło to równocześnie R_{13} . Natomiast rezystancja R_{23} niekiedy pozostawała praktycznie stała w czasie całego testu (jak np. dla rezystorów DP2031/alund), innym razem zmieniała się analogicznie do dwóch pozostałych (np. dla struktur R8951). Istotne jest tutaj zapewne umiejscowienie obszaru, w którym koncentrują się zmiany rezystancji. Jego położenie jest uwarunkowane nie tylko topologią rezystora, ale również czynnikami niezależnymi od projektanta, np. lokalnymi fluktuacjami grubości warstwy rezystywnej i jej rezystywności. Na przykład, gdyby ten obszar znajdował się między elektrodami "1" i "2", to oddziaływałby przede wszystkim na rezystancję R_{12} , zaś na dwie pozostałe w znacznie mniejszym stopniu. Gdyby uszkodzeniu ulegał obszar wokół kontaktu "1" zmianom podlegałyby głównie rezystancje R_{12} i R_{13} , przy niewielkim wpływie na R_{23} . Jeśli natomiast zmiany rezystywności rozkładają się bardziej równomiernie w obszarze rezystora, to wszystkie rezystancje międzykontaktowe mogą się zmieniać w zbliżony sposób. To, która z tych sytuacji będzie mieć miejsce, jest częściowo kwestią losową. Należy jednak pamiętać, że już nadmierne zmiany jednej ze składowych rezystancji powodują uszkodzenie rezystora, nawet jeśli pozostałe dwie pozostają prawie niezmiennione.

Widoczna jest także zależność między zmierzonym napięciem maksymalnym a geometrią struktury testowej. Nawet trzykrotnie wyższe wartości napięć dla rezystorów typu D w porównaniu z typem C są związane z dużą różnicą w odległości między elektrodami "1"

i "2", do których podłączano generator impulsów - dla typu D jest to długość rezystora, dla typu C - jego szerokość, co przy tym samym napięciu oznacza trzykrotnie większe natężenie pola elektrycznego w strukturze C.

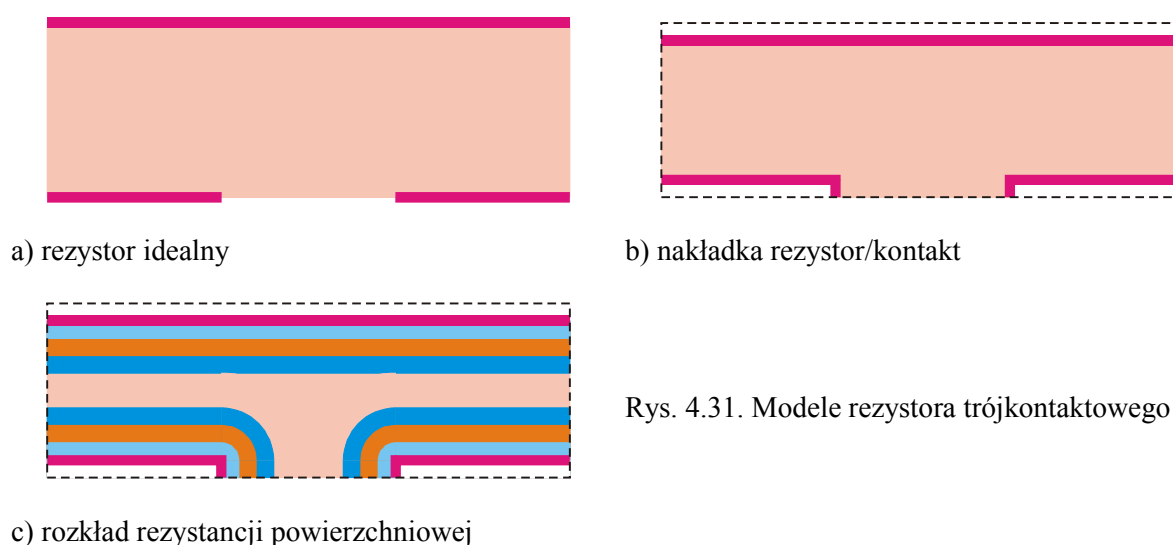
Tab. 4.12. Maksymalne wartości napięcia impulsów dla badanych rezystorów trójkontaktowych

		wymiar [μm^2]	U_{max} [V]					
			20 μs			1 ms		
			R_{12}	R_{13}	R_{23}	R_{12}	R_{13}	R_{23}
alund DP2031	C	1000x500	22	24	-	70	70	-
		600x300	26	26	-	78	80	78
		400x200	64	64	-	58	58	-
	D	1500x500	350	-	330	310	-	310
		900x300	270	-	250	230	-	230
		600x200	259	-	240	160	-	160
alund R8951	C	1000x500	1040	-	-	720	-	-
		600x300	450	-	-	360	-	-
		400x200	240	-	-	190	-	-
	D	1500x500	2050	-	-	1600	1600	-
		900x300	1170	1170	1170	830	-	820
		600x200	540	-	500	470	-	450
LTCC DP2031	C	1000x500	180	170	-	75	75	-
		600x300	95	100	-	40	40	-
		400x200	50	50	-	24	27	-
	D	1500x500	270	-	270	130	-	130
		900x300	60	-	60	-	-	-
		600x200	40	-	40	40	-	50
LTCC CF041	C	1000x500	120	-	-	120	-	-
		600x300	100	-	-	100	100	-
		400x200	130	130	-	40	50	-
	D	1500x500	330	-	300	280	-	270
		900x300	170	160	180	180	170	-
		600x200	150	130	-	130	-	120

W porównaniu z rezystorami dwukontaktowymi o podobnych wymiarach struktury trójkontaktowe wykazywały mniejszą odporność na impulsy napięciowe. W niektórych przypadkach, np. dla pasty wysokoomowej R8951, uzyskano podobne wartości maksymalnego natężenia pola; generalnie jednak były one wyraźnie niższe. Sytuacja taka nie jest zaskoczeniem. Element wielokontaktowy, z uwagi na nierównomierny rozkład gęstości prądu impulsu w obszarze rezystywnym jest bardziej podatny na uszkodzenie. Niemniej jednak uzyskane rezultaty pozwalają na zastosowanie rezystorów wielokontaktowych (o powyższych topologiach) w praktyce.

4.8. Model rezystora z uwzględnieniem efektów rozmiarowych

Pomiary struktur trójkontaktowych wykazały duże różnice między wartościami projektowanymi i rzeczywistymi, zwłaszcza dla rezystorów o mniejszych wymiarach. Autor uważa, że głównym tego powodem jest przyjęcie nadmiernie wyidealizowanego modelu rezystora. Założenie stałej wartości rezystancji powierzchniowej w całym obszarze rezystora oraz styku elektrod z warstwą rezystywną dokładnie na jej krawędzi, co daje idealnie prostokątny kształt elementu (rys. 4.31 a), nie odpowiada rzeczywistości.



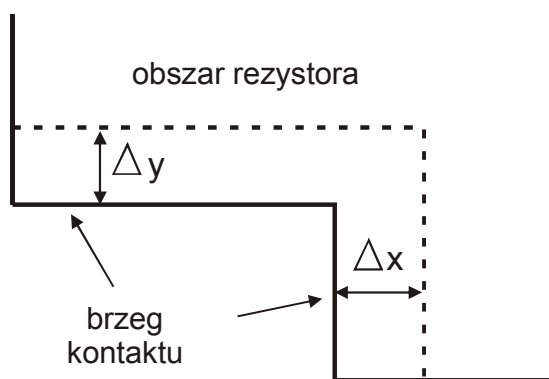
Rys. 4.31. Modele rezystora trójkontaktowego

W procesie projektowania musi być zatem wykorzystany bardziej złożony model, uwzględniający efekty kontaktowe, czyli wzrost grubości warstwy rezystywnej przy kontaktach oraz spadek jej rezystywności spowodowany dyfuzją cząstek metalicznych z elektrod. Uwzględnione muszą być także niedoskonałości procesu wytwarzania rezystora w postaci nakładania się na siebie warstwy przewodzącej i rezystywnej oraz przesunięcia między rezystorem i matrycą doprowadzeń (rys. 4.31 b i c).

Nawet w przypadku elementu idealnego proces projektowania pociąga za sobą konieczność wykonania złożonych obliczeń. Uwzględnienie zakładek technologicznych, skutkujące przekształceniem prostokątnego obszaru rezystora w wielokąt, nie wyklucza stosowania metody przekształceń konforemnych, choć wymaga wprowadzenia modyfikacji, znacznie komplikujących obliczenia. Metoda ta jednak nie pozwala na uwzględnienie niejednorodnego rozkładu rezystancji powierzchniowej. Analityczne rozwiązanie tego problemu, polegające na rozwiązaniu odpowiednich równań różniczkowych, również jest niezwykle trudne i pozwala uzyskać tylko przybliżone wyniki. Dlatego do analizy

uzupełnionego modelu rezystora zastosowano techniki numeryczne. Obliczenia prowadzono przy użyciu programu ANSYS 8.0 [171], bazującego na metodzie elementów skończonych.

Pierwsze uzupełnienie modelu rezystora dotyczyło wprowadzenia zakładki między warstwą przewodzącą i rezystywną (rys. 4.32). Istnieje ona zawsze w strukturach rzeczywistych w celu zagwarantowania pewnego kontaktu elektrycznego obu warstw. W rezystorach dwukontaktowych najczęściej stosuje się zakładkę warstwy rezystywnej na przewodzącą, dzięki czemu efektywna długość rezystora nie zmienia się. W przypadku elementów wieloelektrodowych nie można zastosować tego rozwiązania, gdyż wytworzenie precyzyjnych nakładek na elektrody wymaga dokładności, leżącej poza możliwościami sitodruku.



Rys. 4.32. Przesunięcie i zakładka między kontaktami i warstwą rezystywną

Przy wytwarzaniu struktur testowych stosowano zakładkę o wielkości $10 \mu\text{m}$. Jest to bardzo mała zakładka (np. dla rezystorów dwuelektrodowego jej minimalna wartość przyjmowana jest jako $125 \mu\text{m}$ [1,2]) i tym samym jest to trudny problem technologiczny. W tabeli 4.13 przedstawiono zmiany rezystancji międzykontaktowych idealnego rezystora, spowodowane taką właśnie zakładką. Wsuwanie się kontaktu w głąb rezystora powoduje spadek rezystancji, co jest spowodowane zwiększaniem się powierzchni kontaktu oraz zmniejszaniem odległości do pozostałych elektrod. Zgodnie z przewidywaniami wpływ nakładki jest silniejszy dla mniejszych rezystorów.

Tab. 4.13. Wpływ nakładki na parametry struktury typu B

l×w [μm ²]	R/R _□		
	R ₁₂	R ₁₃	R ₁₂ /R ₁₃
600×200	1,105	0,611	1,81
900×300	1,150	0,636	1,81
1500×500	1,229	0,653	1,88
element idealny	1,262	0,696	1,81

Znacznie istotniejsze jest oddziaływanie kontaktów na warstwę rezystywną. Objawia się ono dwójako. Zwiększenie grubości warstwy przy kontaktach, wynikające z właściwości procesu sitodruku, prowadzi do zmniejszenia w tym obszarze rezystancji powierzchniowej. Drugim czynnikiem jest wzajemna dyfuzja materiału elektrod do wnętrza rezystora i towarzysząca jej dyfuzja składników warstwy rezystywnej do elektrod. Zwykle proces ten prowadzi do zmniejszenia rezystywności obszarów przyelektrodowych. Określenie zasięgu tej dyfuzji oraz profilu zmian rezystancji powierzchniowej w funkcji odległości od kontaktu jest sprawą trudną. Zachowanie się rezystora zależy przede wszystkim od zastosowanej kombinacji past przewodzących i rezystywnych. Elektrody badanych rezystorów wytworzono przy użyciu pasty światłoczułej bazującej na srebrze. Materiał ten jest znany ze swej skłonności do migracji pod wpływem temperatury czy też pola elektrycznego. Dostępne w literaturze wyniki badań metodą mikrosondy rentgenowskiej ujawniły, że cząstki srebra obecne są w warstwie rezystywnej nawet w odległości 100÷200 μm od kontaktu [156]. Jest to znaczny zasięg, szczególnie biorąc pod uwagę rozmiary badanych mikrorezystorów.

Określenie rozkładu rezystancji powierzchniowej w obszarze przykontaktowym nie jest łatwe. Zmiany grubości i rezystywności nakładają się na siebie i sumują, co utrudnia ich rozgraniczenie. Obniżenie rezystywności warstwy jest zależne od ilości wdyfundowanego srebra. Rozkład domieszki w materiale jednorodnym opisywany jest przez dopełnienie funkcji błędu. Jednak rezystywna warstwa gruba to materiał kompozytowy. Ponadto niełatwo wyznaczyć zależność rezystywności warstwy od koncentracji domieszki, czyli atomów srebra. Rozkład rezystancji powierzchniowej modelowany był więc przy pomocy różnych funkcji - liniowej, eksponencjalnej i funkcji błędu (zal. 4.25-4.27):

$$\text{liniowy: } R_{\square}(d) = R_{0\square}(d/90) \text{ dla } d < 90, R_{0\square} \text{ dla } d > 90 \quad (4.25)$$

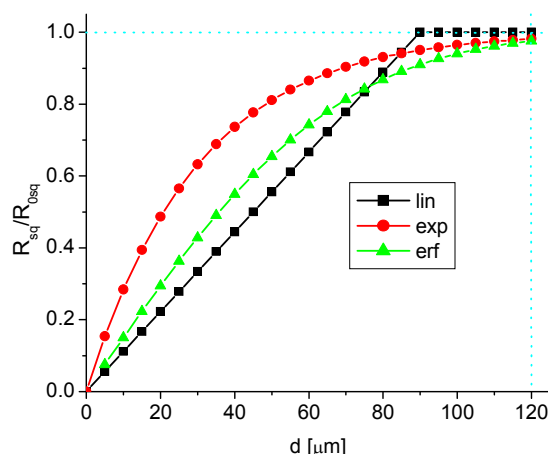
$$\text{eksponencjalny: } R_{\square}(d) = R_{0\square} \cdot [1 - \exp(-d/30)] \quad (4.26)$$

$$\text{funkcja błędu: } R_{\square}(d) = R_{0\square} \cdot \text{erf}(1.2 d/90) \quad (4.27)$$

gdzie: $R_{\square}(d)$, $R_{0\square}$ - rzeczywista i nominalna rezystancja powierzchniowa, d [μm] - odległość od brzegu kontaktu, $erf()$ - funkcja błędu dana zależnością:

$$erf(x) = \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (4.28)$$

Stałe liczbowe w tych zależnościach dobierano tak, aby w odległości 90÷120 μm od kontaktu, przyjętej jako zasięg efektu kontaktowego, rezystancja powierzchniowa osiągała już wartość nominalną $R_{0\square}$. Szczególnie ostatnia funkcja wydaje się najbardziej naturalna. Jej zastosowanie oznacza założenie o proporcjonalnej zmianie rezystancji powierzchniowej w funkcji koncentracji srebra w warstwie rezystywnej. Przebieg użytych funkcji widoczny jest na rys. 4.33.



Rys. 4.33. Profile rozkładu rezystancji powierzchniowej w funkcji odległości od brzegu kontaktu

Sam ciągły przebieg funkcji przybliżono za pomocą funkcji schodkowej. Każdy kontakt rezystora jest zatem otoczony pasami o stałej szerokości i rezystancji równej wartości danej funkcji rozkładu rezystywności w środku pasa (rys. 4.31 c) [157]. Ostatecznie wybrano szerokość każdego pasa równą 10 μm , a ich liczbę ustalono na 9 do 12. Tabela 4.14 przedstawia porównanie symulowanych wartości rezystancji międzykontaktowych uzyskanych dla różnych profili rozkładu. Natomiast tabela 4.15 porównuje zasymulowane parametry rezystorów typu B i D dla rozkładu $erf()$ z wartościami zmierzonymi dla rezystorów DP2031 na alundzie. Jak widać, przy zastosowaniu stosunkowo prostej funkcji z dużą dokładnością można zamodelować efekty kontaktowe.

Zamodelowano również wpływ przesunięcia elektrod względem obszaru rezystora w obu osiach x i y . Do symulacji wybrano pełny model, tzn. z nakładką i niejednorodnym rozkładem rezystancji powierzchniowej. Stosunkowo niewielkie przesunięcia - 5 i 10 μm - powodowały wyraźnie zmiany parametrów rezystora. Przy przesunięciach w osi x pojawiała się ponadto niesymetria rezystora - rezystancje R_{13} i R_{23} nie były sobie równe (tab. 4.16).

Pamiętać należy, że mimo rozbudowy model rezystora wciąż jest dość uproszczony. Rzeczywista struktura jest trójwymiarowa, a nie planarna [172]. Ponadto w modelu nie uwzględniono czynników losowych, jak chociażby fluktuacja rezystywności warstwy, spowodowana losowym rozkładem łańcuchów ziaren przewodzących w materiale rezystywnym, czy też przypadkowe wahania grubości od punktu do punktu warstwy rezystywnej. Nie uwzględniono też zmian grubości warstwy związanych ze zmianami odległości elektrod.

Tab. 4.14. Symulowane wartości rezystancji dla różnych rozkładów rezystancji powierzchniowej (struktura typu B)

profil	$l \times w$ [μm^2]	R/R_{\square}		
		R_{12}	R_{13}	R_{12}/R_{13}
lin	600×200	0,566	0,320	1,77
	900×300	0,735	0,413	1,78
	1500×500	0,914	0,512	1,79
exp	600×200	0,753	0,421	1,79
	900×300	0,888	0,496	1,79
	1500×500	1,017	0,567	1,79
erf	600×200	0,581	0,325	1,79
	900×300	0,760	0,426	1,78
	1500×500	0,931	0,521	1,79

Tab. 4.15. Symulowane i rzeczywiste wartości rezystancji - struktury DP2031/alund, typ B i D, profil $erf()$

		$l \times w$ [μm^2]	R_{12} [Ω]	R_{13} [Ω]	R_{12}/R_{13}
typ B	symulacja	600×200	546	313	1,74
		900×300	734	418	1,76
		1500×500	909	512	1,78
	pomiar	600×200	578	335	1,72
		900×300	748	416	1,80
		1500×500	1127	607	1,86
typ D	symulacja	600×200	1493	765	1,95
		900×300	1867	967	1,93
		1500×500	2174	1144	1,90
	pomiar	600×200	1427	764	1,87
		900×300	1781	952	1,87
		1500×500	2358	1240	1,90

Tab. 4.16. Wpływ przesunięcia kontaktów względem warstwy rezystywnej - struktura typu B $600 \times 200 \mu\text{m}^2$, profil $erf()$

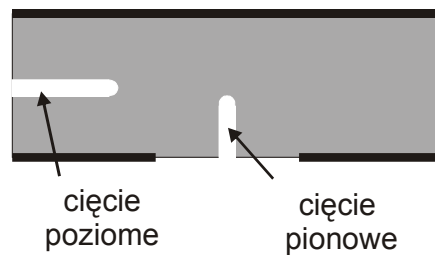
Δx [μm]	Δy [μm]	R/R_{\square}		
		R_{12}	R_{13}	R_{23}
0	0	0,546	0,313	0,313
5	0	0,546	0,308	0,319
10	0	0,546	0,303	0,324
0	5	0,532	0,309	0,309
0	10	0,519	0,305	0,305
0	-5	0,561	0,318	0,318
0	-10	0,578	0,324	0,324
5	5	0,532	0,304	0,314
5	-5	0,562	0,313	0,323
10	10	0,521	0,297	0,316
10	-10	0,579	0,313	0,335

Cechą charakterystyczną rezystorów grubowarstwowych jest stosunkowo duży rozrzut ich rezystancji, sięgający $\pm 20\%$ wartości średniej. Związana jest z tym konieczność korekcji tych elementów, zwykle metodą nacinania laserem. Dla rezystorów dwukontaktowych algorytmy korekcji są dobrze znane i niezbyt skomplikowane. Sytuacja zmienia się w przypadku elementu wielokontaktowego [33]. W ogólnym przypadku nacięcie warstwy rezystywnej w dowolnym miejscu powoduje zmianę wszystkich rezystancji składowych. Korygować należy zatem wszystkie rezystancje równocześnie, w porównaniu tylko z jednym parametrem dla rezystora klasycznego. Nie można tutaj zmieniać selektywnie po kolei wszystkich rezystancji do wartości zadanych.

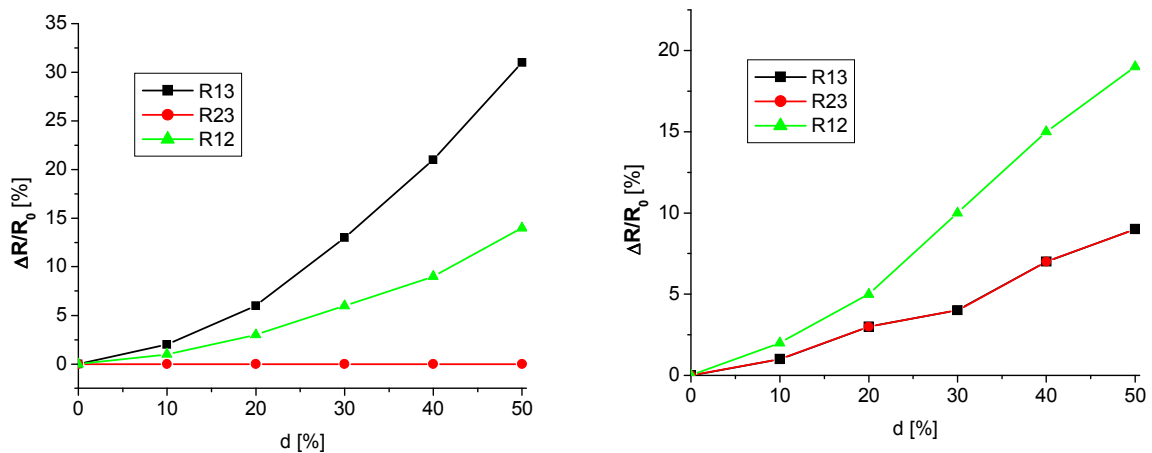
Wpływ cięcia na poszczególne rezystancje międzykontaktowe przeanalizowano na przykładzie rezystora typu B o rozmiarach $1500 \times 500 \mu\text{m}^2$ i $600 \times 200 \mu\text{m}^2$. Symulację cięcia przeprowadzono wykorzystując przedstawiony powyżej model rezystora. Badano dwie konfiguracje cięcia - pionowe i poziome (rys. 4.34), na długość odpowiadającą połowie krótszego boku rezystora. Przyjęto typowy kształt i wymiary nacięcia - prostokąt o szerokości $40 \mu\text{m}$, o półokrągłym zakończeniu.

Najważniejsze wyniki symulacji numerycznych zamieszczono na rys. 4.35 i 4.36. Widać zatem, że zmianie podlegają jednocześnie wszystkie rezystancje, chociaż w różnym stopniu. Przy cięciu poziomym między kontaktami "1" i "3" daje się nawet zachować rezystancję R_{23} prawie niezmienną. Cięcie pionowe wpływa jednak na wszystkie trzy rezystancje. Dokładna korekcja wszystkich parametrów do zadanych wartości wymaga wielokrotnego cięcia w dwóch lub więcej punktach. Ponadto należałoby te cięcia wykonywać jednocześnie,

tzn. laser musiałby wykonywać część nacięcia w jednym miejscu, po czym przesunąć się do miejsca drugiego nacięcia, itd. Znacznie zwiększa to czas i koszt korekcji. Co więcej, przebieg charakterystyk będzie inny w przypadku odmiennej topologii rezystora, co uniemożliwia opracowanie uniwersalnego algorytmu korekcji. Zadanie może ułatwić inne podejście do problemu, łatwiej niż konkretne wartości rezystancji uzyskać można określony ich stosunek, nadal jednak problem pozostaje trudny do rozwiązania.



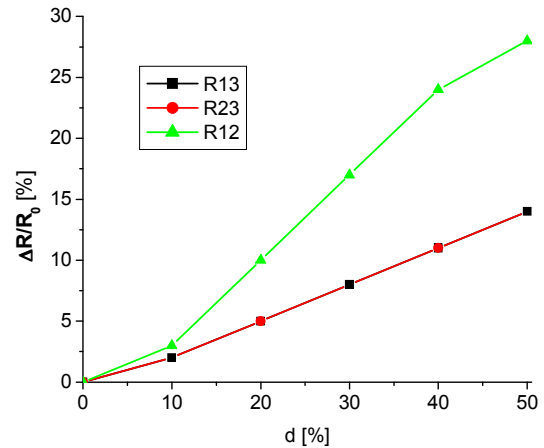
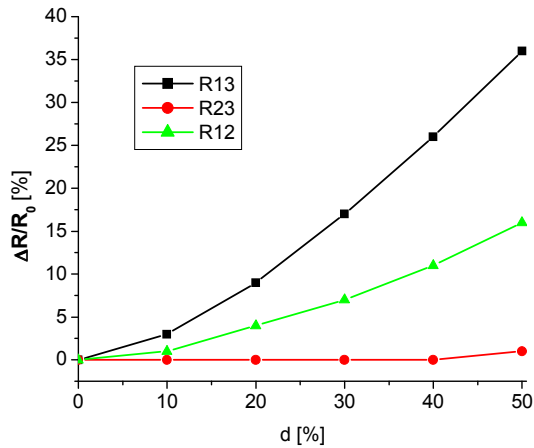
Rys. 4.34 Badane konfiguracje cięcia korygującego



a)

b)

Rys. 4.35 Zmiany rezystancji międzykontaktowych w funkcji względnej długości cięcia d poziomego (a) i pionowego (b), rezystor typu B $1500 \times 500 \mu\text{m}^2$, długość podawana względem długości krótszego boku rezystora



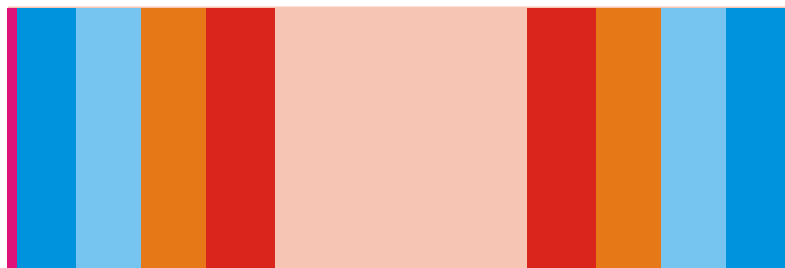
a)

b)

Rys. 4.36 Zmiany rezystancji międzykontaktowych w funkcji względnej długości cięcia d poziomego (a) i pionowego (b), rezystor typu B, $600 \times 200 \mu\text{m}^2$, długość podawana względem długości krótszego boku rezystora

4.9. Model rezystora dwukontaktowego

Korzystając z powyższego modelu elementu trójkontaktowego przeprowadzono symulacje zmian rezystancji w funkcji długości dla klasycznego rezystora dwuelektrodowego (rys. 4.37). Analizę przeprowadzono dla rezystorów z pasty DP2031 na podłożu alundowym. Rezultaty symulacji i wyniki pomiarów dwukontaktowych rezystorów testowych (zaprezentowane wcześniej w punkcie 3.5) przedstawiono w tabeli 4.17.



Rys. 4.37. Model rezystora dwukontaktowego z uwzględnieniem zakładki i rozkładu rezystancji powierzchniowej

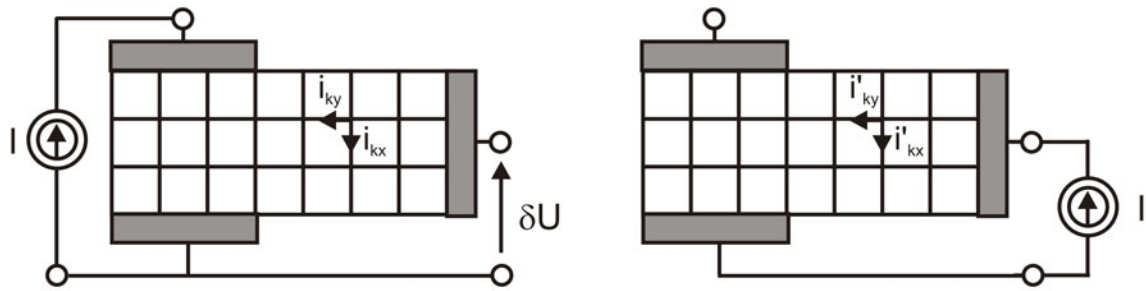
Tab. 4.17. Porównanie symulowanych oraz zmierzonych wartości rezystancji struktur dwukontaktowych DP2031/alund, profil $erf()$

l×w [μm ²]	R [Ω]	
	symulacja	pomiar
200×200	580	814
400×200	1570	1645
600×200	2560	2801
800×200	3590	4772

Wyniki symulacji odpowiadają w przybliżeniu rzeczywistemu przebiegowi zmian rezystancji w funkcji długości rezystora. Najlepszą zgodność uzyskano dla rezystorów o długości 400 i 600 μm, dla struktur najmniejszych i największych obliczone rezystancje były mniejsze od zmierzonych. Można zauważyć, że wydłużanie rezystora ponad podwojony zasięg efektu kontaktowego zwiększa tylko wielkość środkowego obszaru o nominalnej rezystancji powierzchniowej. Modelowana rezystancja rośnie wtedy liniowo z długością elementu. Ponadto dla wyniku symulacji istotna jest tylko całkowita rezystancja obszarów przykontaktowych, kształt profilu rozkładu rezystywności nie ma w takiej sytuacji znaczenia. Uzyskanie zgodności z danymi eksperymentalnymi jest zatem łatwiejsze. Ponadto można je uzyskać dla wielu - nawet niefizycznych - profili.

4.10. Model szumowy rezystora trójkontaktowego

Z uwagi na skomplikowaną geometrię rezystora trójkontaktowego problemem było obliczenie napięcia szumów między jedną parą zacisków przy podawanym napięciu polaryzującym na inną parę [123,173]. Obszar rezystora został podzielony na jednakowe bloki elementarne. Połączenie między każdą parą węzłów reprezentuje rezystancję pojedynczego bloku r i jej fluktuację δr . Rezystancję każdego połączenia założono jako stałą w całym obszarze rezystora. W celu obliczenia napięcia szumu U_{sz} na zaciskach rezystora spolaryzowanego prądem I oblicza się dla każdego połączenia między węzłami prądy \vec{i}_k i \vec{i}'_k . Pierwszy z nich liczony jest dla obwodu oryginalnego (rys. 4.38a). Drugi jest wyznaczany w tzw. obwodzie dołączonym (rys. 4.38b), w którym prąd podawany jest na zaciski, dla których obliczona ma być U_{sz} . Trzeci zacisk pozostawiany jest nie podłączony.



a) obwód oryginalny

b) obwód dołączony

Rys. 4.38. Sposób obliczania napięcia szumów nadmiarowych na elektrodach rezystora

Fluktuacja napięcia obliczana jest następnie z zal. (4.29):

$$U_{sz} = \sqrt{\frac{\sum_k \vec{i}_k^2 \vec{i}'_k{}^2 \delta r_k^2}{I^2}} \quad (4.29)$$

gdzie U_{sz} - napięcie szumu δr_k - fluktuacja rezystancji elementarnego bloku objętości rezystora, $\vec{i}_k = [i_{kx}, i_{ky}]$, $\vec{i}'_k = [i'_{kx}, i'_{ky}]$ - prądy w k -tym bloku odpowiednio dla obwodu oryginalnego i dołączonego, I - prąd polaryzujący

Zal. (4.29) umożliwia także wyznaczenie fluktuacji napięcia na zaciskach, na które podawany jest prąd polaryzujący. W takim przypadku obwód dołączony jest identyczny z oryginalnym i powyższa zależność przekształca się do postaci:

$$U_{sz} = \sqrt{\frac{\sum_k \vec{i}_k^4 \delta r_k^2}{I^2}} \quad (4.30)$$

Przy pomocy zal. (4.29) i (4.30) wyznaczono teoretyczny stosunek wartości napięć szumów nadmiarowych na poszczególnych parach kontaktów rezystora w obu konfiguracjach pomiarowych (pkt. 4.5). Rezultaty znajdują się w tab. 4.18 i 4.19.

Jak widać, uzyskano dobrą zgodność w przypadku struktur w konfiguracji "123". Dla konfiguracji "231" wartości zmierzone były niższe niż obliczone na podstawie powyższego modelu. Wartości napięcia szumu nadmiarowego na kontakcie niespolaryzowanym ("1" dla konfiguracji "231") są przeszacowane. Przyczyną może być nie uwzględnienie w tym uproszczonym modelu efektów związanych z oddziaływaniem elektrod na warstwę rezystywną.

Tab. 4.18. Porównanie wyników pomiaru i symulacji dla konfiguracji "123"

konf.	wym. [μm^2]	U_{sz13} [μV]	U_{sz12} [μV]	U_{sz12}/U_{sz13}	
				pomiar	symulacja
"123"	1500x500	7,530	6,458	0,86	0,77
		10,724	7,707	0,72	
	400x200	4,806	3,834	0,80	0,80
		2,508	2,238	0,89	

Tab. 4.19. Porównanie wyników pomiaru i symulacji dla konfiguracji "231"

konf.	wym. [μm^2]	U_{sz21} [μV]	U_{sz31} [μV]	U_{sz31}/U_{sz21}	
				pomiar	symulacja
"231"	1500x500	8,118	6,269	0,77	0,97
		9,950	4,960	0,50	
	400x200	5,273	4,159	0,79	0,94
		5,666	4,195	0,74	

4.11. Analiza wyników

Rezystory wielokontaktowe posiadają obiecujące właściwości. Możliwość realizacji funkcji pełnionej przez cały układ elementów dyskretnych za pomocą jednego rezystora wielokontaktowego byłaby niezwykle przydatna. Niestety, zaprojektowanie i wykonanie rezystora wielokontaktowego wiąże się ze znacznymi trudnościami. Nawet bardzo uproszczona analiza czy synteza rezystora wielokontaktowego przy użyciu modelu rezystora idealnego wiąże się ze znacznie większym nakładem pracy niż dla elementu dwukontaktowego, potrzebnym do wykonania skomplikowanych obliczeń. Dokładność metody projektowania jest mimo to niezadowalająca. Decydują o tym silne efekty rozmiarowe, związane głównie z oddziaływaniem kontaktów na warstwę rezystywną. Należy je uwzględnić w bardziej skomplikowanym modelu, wymagającym zastosowania metod numerycznych. Złożony i kłopotliwy jest też algorytm korekcji, koniecznej w przypadku elementów grubowarstwowych.

Mimo tych trudności wykonanie rezystora wielokontaktowego o żądanych parametrach jest możliwe, szczególnie gdy istotne będą nie wartości bezwzględne rezystancji składowych a ich stosunki, na które wpływ efektów rozmiarowych jest znacznie mniejszy. Zaprojektowanie i korekcja struktury są w takim przypadku łatwiejsze. Należy sobie przy tym zdawać sprawę, że do wytworzenia powyższych struktur testowych używano pasty

przewodzącej na bazie srebra. Zasięg dyfuzji tego metalu w warstwie rezystywnej jest szczególnie duży i zwiększa skalę efektu kontaktowego. Zastosowanie światłoczułych past przewodzących o innej metalurgii pozwoliłoby na jego minimalizację, co ułatwiłoby istotnie proces projektowania rezystora wielokontaktowego.

Główną korzyścią stosowania rezystora wielokontaktowego, jest redukcja wymiarów osiągana dzięki integracji w jednym elemencie funkcji realizowanej przez sieć rezystorów dyskretnych, z których każdy wymaga odpowiednich marginesów technologicznych, co wydatnie zwiększa powierzchnię zajmowaną przez podobwód bierny układu. Scalona struktura wielokontaktowa zapewnia też lepszą stabilność temperaturową, gdyż rozkład temperatury w obszarze rezystora jest bardziej jednorodny niż w układzie złożonym z elementów dyskretnych. Zmiany rezystancji składowych będą zatem w większym stopniu współbieżne, co ma duże znaczenie np. w dzielnikach napięcia.

Parametry elektryczne, stabilność i odporność impulsowa badanych rezystorów trójkontaktowych nie odbiegały od uzyskiwanych dla elementów dwuelektrodowych. Zastosowana konstrukcja nie powodowała pogorszenia tych parametrów ani istotnego ograniczenia ich funkcjonalności. Warunkiem tego jest jednak dobór odpowiedniej topologii rezystora. Na przykładzie sześciokontaktowych sumatorów prądów i napięć można zobaczyć efekt niewłaściwej (z uwagi na ograniczenia technologiczne) geometrii struktury. Mimo stosunkowo dużych rozmiarów całego rezystora obecność w jego strukturze detali o niewielkich rozmiarach uniemożliwiła uzyskanie projektowanych parametrów.

Rezystory wielokontaktowe mogą zatem znajdować zastosowanie w konstrukcji miniaturowych układów elektronicznych, choć klasa obwodów, jakie mogą być zrealizowane przy ich pomocy jest ograniczona. Komplikacja procesu projektowania i analizy właściwości elementu w stosunku do klasycznych rezystorów dwuelektrodowych mogłaby się wydawać istotną przeszkodą w szerszym zastosowaniu takich elementów. Samodzielne prowadzenie wymaganych obliczeń mogłoby istotnie sprawić trudności. Proces ten można jednak zautomatyzować przy pomocy komputera i odpowiedniego oprogramowania.

Wpływ efektów kontaktowych na rezystancje i szum niskoczęstotliwościowy autor przeanalizował w oparciu o oryginalny model dwuwymiarowy uwzględniający rozkład rezystancji powierzchniowej w pobliżu kontaktów, opisany funkcją $erf()$ (funkcja błędu), powszechnie stosowaną do opisu procesu dyfuzji ze źródła o nieskończonej wydajności do materiału homogenicznego. Dodatkowo w modelu uwzględniono istnienie zakładek

technologicznych i przesunięć między kontaktami a warstwą rezystywną. Mimo uproszczeń w większości rozpatrywanych przypadków symulowane wartości rezystancji międzykontaktowych i stosunku napięć szumu na poszczególnych kontaktach były porównywalne z wynikami eksperymentalnymi.

5. Mikrowarystory

5.1. Wstęp

Podczas pracy układów elektronicznych mogą się w nich pojawić impulsy wysokiego napięcia, powstające w wyniku wyładowań atmosferycznych, zakłóceń w sieci energetycznej, itp. Ich czas trwania może zmieniać się w bardzo szerokim zakresie, od pojedynczych nanosekund do kilkudziesięciu milisekund, zaś amplituda przy zasilaniu sieciowym może sięgać kilkuset woltów. Mimo tak krótkich czasów trwania mogą one powodować uszkodzenia elementów układu. W celach ochronnych powszechnie stosuje się warystory oparte na tlenku cynku [35-37,174]. Z reguły są to elementy dyskretne wytwarzane w technologii ceramicznej, choć również używa się dyskretnych warystorów grubowarstwowych. W obu przypadkach stosuje się wysoką temperaturę wypalania, sięgającą 1150°C ÷ 1300°C , która gwarantuje właściwe spiekanie warstwy oraz uzyskanie wysokiej nieliniowości charakterystyki prądowo-napięciowej elementu. Jest ona znacznie wyższa niż standardowy zakres temperatur wypalania w technice grubowarstwowej (850°C ÷ 950°C). Obniżenie jej do takich wartości pozwoliłoby na wykonanie warystora zintegrowanego w jednym procesie z pozostałymi elementami układu grubowarstwowego lub LTCC, poprawiając jego niezawodność i redukując zajmowaną powierzchnię. Niższe temperatury wypalania powodują jednak wyraźne zmniejszenie nieliniowości warystora oraz spistości warstwy. Konieczne są zatem dalsze badania nad poprawą właściwości takich warystorów.

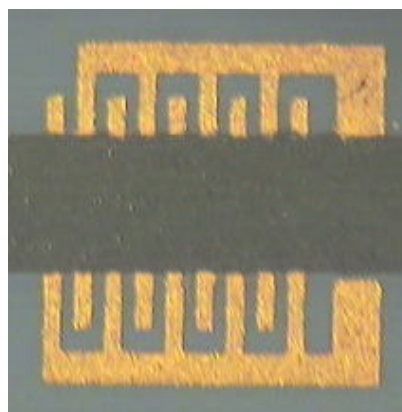
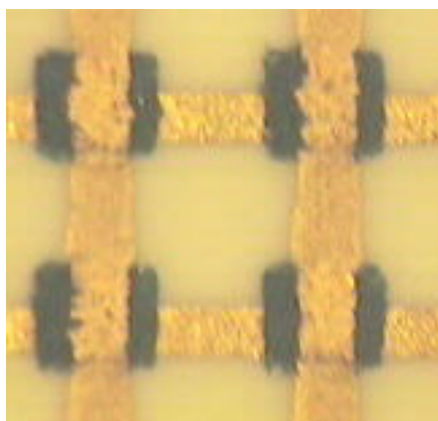
5.2. Wytwarzanie struktur testowych

Na potrzeby badań we własnym zakresie wytworzono pastę warystorową. Jako fazę funkcjonalną zastosowano sproszkowaną ceramikę warystorową opartą na tlenku cynku ZnO. Jej dokładny skład podano w tabeli 5.1. W celu ułatwienia procesu spiekania warstwy zastosowano dodatek w ilości 1% wag. sproszkowanego trójtlenku bizmutu Bi_2O_3 [175,176]. Następnie dodano nośnik organiczny formując pastę grubowarstwową o odpowiednich właściwościach reologicznych. Do wytworzenia elektrod warystorów wykorzystano trzy różne pasty przewodzące o odmiennej metalurgii: DP6146 (pallad/srebro), DP9894 (platyna) - obie firmy DuPont - oraz ESL8880H (złoto) firmy Electroscience Laboratories. Struktury testowe wykonywano na podłożach alundowych oraz na wypalanej folii LTCC DP951 firmy DuPont. Zastosowano dwa warianty topologii warystorów: struktury kanapkowe o wymiarach obszaru czynnego $0,5 \times 0,5$, 1×1 , 2×2 i 3×3 mm^2 (rys. 5.1a) oraz elementy planarne

z elektrodami palczastymi, o 9 "palcach" w odstępnie 0,25 mm i 2 mm szerokości warstwy warystorowej (rys. 5.1b).

Tab. 5.1. Skład ceramiki warystorowej użytej do wytworzenia pasty [174]

składnik	BaBiO ₃	Bi ₄ Ti ₃ O ₁₂	Sb ₂ O ₃	NiO	Co ₃ O ₄	MnO ₂	Cr ₂ O ₃	ZnO
% mol.	0,7	0,16	0,125	0,5	0,35	0,125	0,5	97,54



a)

b)

Rys. 5.1. Warystory kanapkowe 0,5×0,5 mm² (a) oraz struktura planarna palczasta (b)

Pierwszym krokiem wytwarzania struktur testowych było nadrukowanie i wypalenie elektrod. Wypalanie prowadzono w różnych temperaturach, w zależności od rodzaju pasty oraz podłoża: w 850°C dla elektrod PdAg na podłożu alundowym, 950°C dla pasty Pt lub Au na alundzie, 900°C dla wszystkich struktur na podłożu LTCC. Następnie nadrukowywano warstwę warystorową. Stosowano nadruk kilkakrotny - dwukrotny dla struktur planarnych palczastych, sześciokrotny dla warystorów LTCC i trzykrotny lub sześciokrotny dla elementów na podłożu alundowym. Po każdym nadruku strukturę suszono w temperaturze 120°C przez 10 min. Po naniesieniu wszystkich warstw pasty warystorowej następowało dodatkowe suszenie w 170°C, również przez 10 min., celem usunięcia składników lotnych z nośnika organicznego. Struktury planarne poddawano następnie laminacji pod ciśnieniem 200 atmosfer przez 10 min. w temperaturze 70°C, co miało za zadanie zwiększenie spoistości i gęstości warstwy warystorowej [37,177]. Otrzymane struktury wypalano w typowym jednogodzinnym profilu temperaturowym z 10 min. przetrzymaniem w temperaturze szczytowej, wynoszącej 850°C lub 950°C. Część warystorów planarnych na podłożu alundowym wypalono w odmiennym profilu dwugodzinnym z przetrzymaniem w temperaturze maksymalnej 1050°C przez godzinę. Następnie наносzono górne elektrody

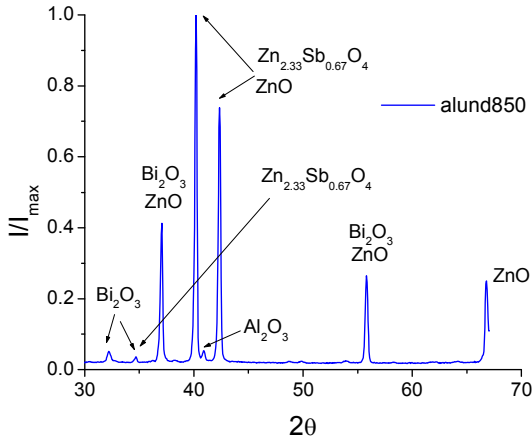
struktur kanapkowych, które wypalano w standardowym profilu w 850°C, niezależnie od metalurgii pasty przewodzącej.

Zwykle warystory pokrywa się jeszcze dodatkową warstwą zabezpieczającą, która chroni je przed szkodliwym wpływem otoczenia, np. wilgocią. Struktury testowe nie były w ten sposób zabezpieczane. Negatywny wpływ czynników zewnętrznych minimalizowała konstrukcja elementów. Warstwę warystorową w strukturach kanapkowych zakrywała od góry elektroda, zaś jej odsłonięte powierzchnie boczne były niewielkie w stosunku do objętości warystora. Przy konstrukcja planarnej prąd skupia się w obszarze przypodłożowym warstwy warystorowej, na który czynniki zewnętrzne również mają słabszy wpływ.

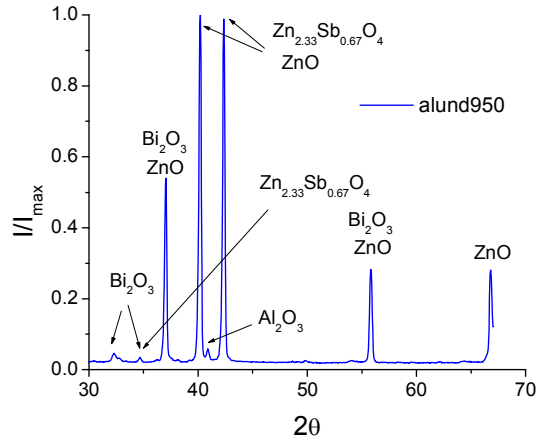
5.3. Właściwości mikrostrukturalne

Zakres i sposób prowadzenia badań mikrostrukturalnych był podobny jak dla elementów rezystywnych. Wykorzystywane w tym celu struktury testowe wykonano na podłożu alundowym oraz wypalonych foliach LTCC. Przeanalizowano układ podłoże/warstwa warystorowa (wypalane w temperaturze 850°C lub 950°C), oraz struktury podłoże/elektroda/warstwa warystorowa wypalane w 950°C. Pierwszy typ struktury odpowiada warystorowi planarnemu, drugi - kanapkowemu. Jako materiał elektrod wykorzystano w tym przypadku pastę PdAg DP6146 lub platynową DP9894. Dyfraktogramy otrzymane dla badanych struktur przedstawiono na rys. 5.2-5.7. Zdjęcia mikroskopowe przekrojów struktur testowych prezentują rys. 5.8-5.10.

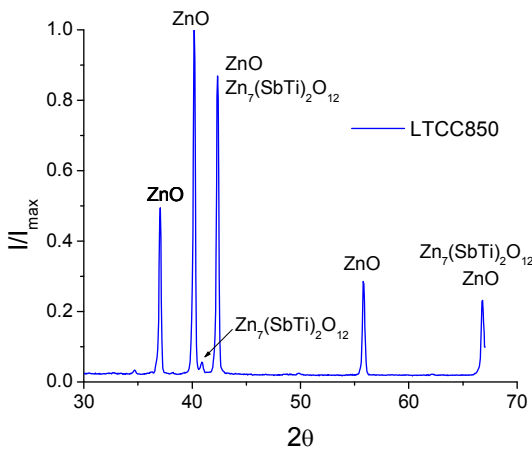
Dla badanych próbek otrzymano bardzo zbliżony rozkład maksimów krzywej dyfrakcyjnej. Różnice dotyczą głównie stosunku wysokości poszczególnych pików względem siebie oraz poziomu "tła". Zgodnie z oczekiwaniami stwierdzono przede wszystkim obecność związków cynku, głównie tlenku ZnO, oraz spinelu antymonowo-tytanowo-cynkowego lub $Zn_7(SbTi)_2O_{12}$ lub niestechiometrycznego spinelu antymonowo-cynkowego $Zn_{2.33}Sb_{0.67}O_4$. Pierwszy z tych związków występował w próbkach wytworzonych na podłożu LTCC, drugi w warstwach na alundzie, gdzie stwierdzono również obecność faz krystalicznych Al_2O_3 oraz Bi_2O_3 .



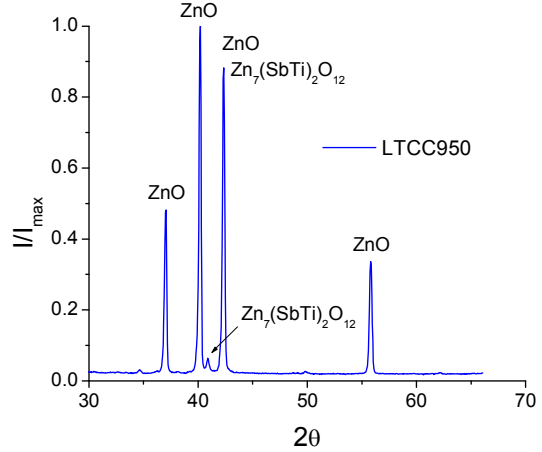
Rys. 5.2. Dyfraktogram warstwy warystorowej na podłożu alundowym ($T_w = 850^\circ\text{C}$)



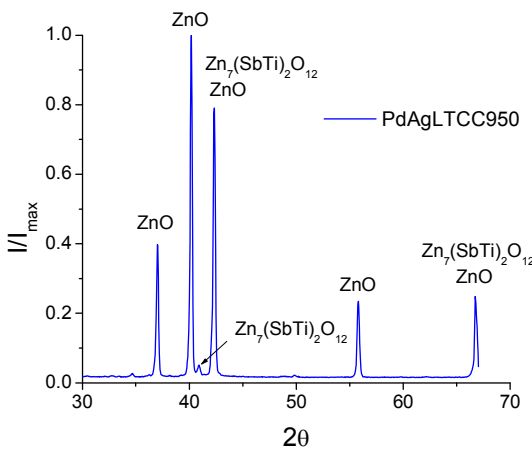
Rys. 5.3. Dyfraktogram warstwy warystorowej na podłożu alundowym ($T_w = 950^\circ\text{C}$)



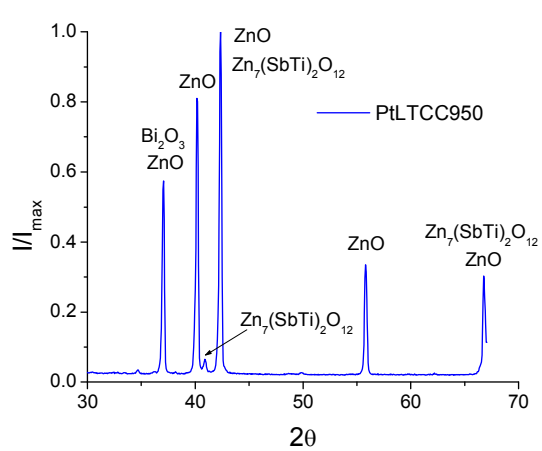
Rys. 5.4. Dyfraktogram warstwy warystorowej na podłożu LTCC ($T_w = 850^\circ\text{C}$)



Rys. 5.5. Dyfraktogram warstwy warystorowej na podłożu LTCC ($T_w = 950^\circ\text{C}$)

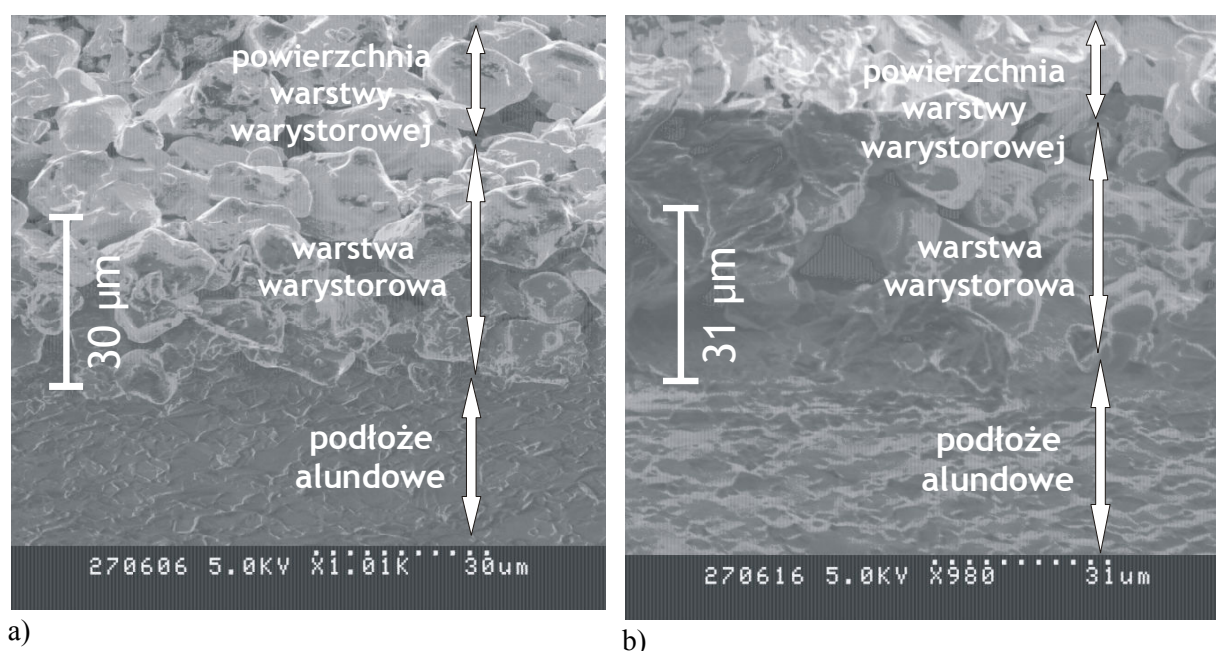


Rys. 5.6. Dyfraktogram struktury warstwa warystorowa/elektroda PdAg/podłożu LTCC ($T_w = 950^\circ\text{C}$)



Rys. 5.7. Dyfraktogram struktury warstwa warystorowa/elektroda Pt/podłożu LTCC ($T_w = 950^\circ\text{C}$)

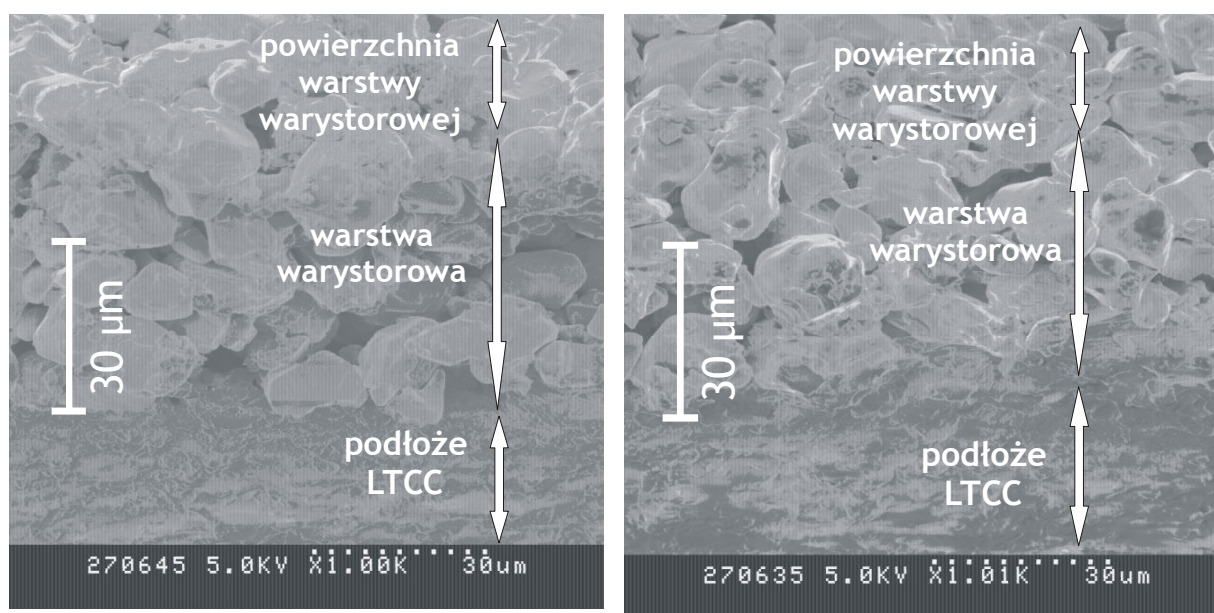
Najslabszy wpływ temperatury wypalania na skład warstwy zaobserwowano dla warystorów wykonanych bezpośrednio na podłożu LTCC, dla których dyfraktogramy różniły się nieznacznie. Przy niższej temperaturze wypalania otrzymano jedynie nieco wyższe maksima w stosunku do tła. Wyraźniejszy efekt wystąpił dla podłoża alundowych. Również w tym przypadku przy wzroście temperatury wypalania zmniejszyła się wysokość pików krzywej dyfrakcyjnej jak też i różnice między poszczególnymi pikami dla mniejszych wartości kąta 2θ . Mogło to być skutkiem zmniejszania się zawartości $Zn_{2.33}Sb_{0.67}O_4$ w wyższej temperaturze. Porównując rezultaty uzyskane dla obu rodzajów podłoża można stwierdzić, że maksima krzywej dyfrakcyjnej dla ceramiki alundowej są wyraźniejsze niż uzyskane dla próbek na LTCC; efekt ten jest silniejszy niż wpływ maksymalnej temperatury wypalania. Niewątpliwie odpowiada za to znacznie mniejsze wzajemne oddziaływanie między warstwą warystorową a podłożem alundowym niż ma to miejsce dla struktury warstwa warystorowa/ceramika LTCC. Obecność warstwy przewodzącej między kompozycją warystorową a podłożem istotnie wpływała na kształt krzywej dyfrakcyjnej w przypadku pasty platynowej. W porównaniu ze strukturą bez elektrody zmienił się wyraźnie stosunek wysokości maksimów w początkowej części krzywej, powiększyły się też piki wskazujące na obecność w warstwie trójtlenku bizmutu Bi_2O_3 i spinelu $Zn_7(SbTi)_2O_{12}$. Zastosowanie pasty palladowo-srebrzej spowodowało redukcję intensywności pików dla większych kątów dyfrakcji oraz piku odpowiadającego wspomnianemu wyżej spinelowi antymonowo-tytanowo-cynowemu.



a)

b)

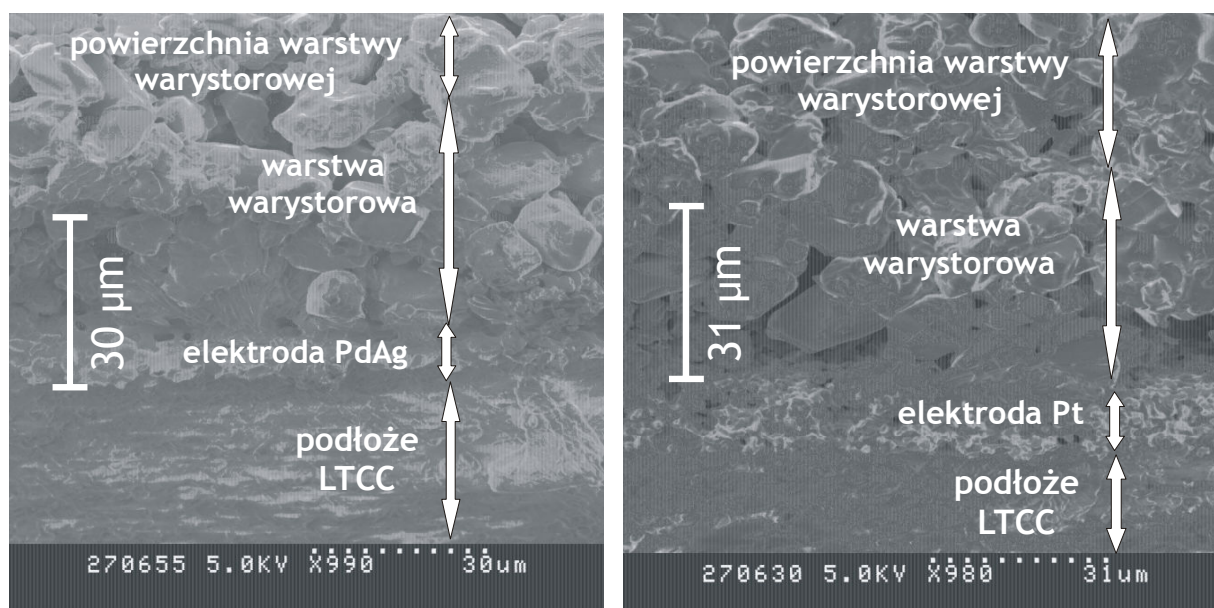
Rys. 5.8. Warstwa warystorowa na podłożu alundowym wypalana w 850°C (a) i w 950°C (b), powiększenie 1000x



a)

b)

Rys. 5.9. Warstwa warystorowa na podłożu LTCC wypalana w 850°C (a) i w 950°C (b), powiększenie 1000x



a)

b)

Rys. 5.10. Warstwa warystorowa z elektrodą PdAg (a) i elektrodą Pt (b) na podłożu LTCC, wypalana w 950°C, powiększenie 1000x

Wszystkie badane warstwy warystorowe wykazywały budowę gruboziarnistą. Ziarna tej ceramiki charakteryzowały się nieregularnym kształtem. Ich wymiary wahały się w granicach 10÷20 μm. Były to zatem wartości znaczne w porównaniu z grubością warstwy warystorowej. Spieczenie poszczególnych ziaren było jedynie częściowe, warstwy były silnie porowate. Nie zaobserwowano obszarów przejściowych na granicy materiału warystorowego i podłoża czy

elektrody. Przy stosowanych powiększeniach nie dało się też zauważyć różnic w strukturze warstwy w zależności od wariantu technologicznego.

5.4. Parametry elektryczne

Charakterystyki prądowo-napięciowe warystorów testowych zmierzono przy użyciu generatora SPEB-1 pracującego w trybie impulsowym. Stosowano impulsy o długości 0,1 ms podawane co 1 s. Prąd warystora mierzono w czasie trwania kolejnych impulsów o narastającej amplitudzie. Zmierzone charakterystyki aproksymowano zał. (5.1). Następnie wyznaczano wartości współczynnika nieliniowości α i napięcia charakterystycznego przy prądzie 1 mA - U_{1mA} (rys. 5.11). Obliczone parametry zebrano w tabelach 5.2-5.4. Natomiast zmierzone charakterystyki pokazano na rys. 5.12-5.15.

$$I = kU^\alpha \quad (5.1)$$

gdzie α - współczynnik nieliniowości, k - stała

Właściwości elektryczne warystorów silnie zależą od wariantu technologicznego. Największe znaczenie ma materiał elektrod [178,179]. Przy zastosowaniu pasty przewodzącej opartej na Pt współczynnik nieliniowości przekraczał wartość 20, co jest znaczącą wartością jak na warystory grubowarstwowe [35,180]. Zastosowanie elektrod złotych lub palladowo-srebrnych skutkowało znacznie mniejszą nieliniowością charakterystyki prądowo-napięciowej - α osiągało wartości 3÷11 dla elektrod Au i 3÷7 dla elektrod PdAg. Większe wartości α dotyczą warystorów wykonanych na podłożu LTCC; szczególnie wyraźne zmiany były widoczne dla elementów z elektrodami platynowymi. Tylko te struktury wykazywały zmianę współczynnika nieliniowości α ze zmianą temperatury wypalania - wraz ze wzrostem T_w α wzrastało (z wyjątkiem warystorów planarnych na LTCC, gdzie obserwowano jego spadek). Współczynnik nieliniowości warystorów z elektrodami Au lub PdAg wykazywał jedynie nieznaczną zależność od temperatury wypalania. Odstępstwem było zachowanie się struktur wypalanych w temperaturze 1050°C, które posiadały bardzo małe wartości α rzędu 2÷3 (niezależnie od metalurgii kontaktów) oraz małe napięcia charakterystyczne U_{1mA} . Podkreślić należy, że choć dla warystorów grubowarstwowych osiągnano już wyższe wartości α , stosowano jednak znacznie wyższą temperaturę wypalania [36,179] lub dodatek szkła ułatwiającego spiekanie warstwy warystorowej [181].

Konstrukcja warystora także wpływała na jego właściwości. Stosując elektrody Pt większe wartości α uzyskano dla struktur kanapkowych. Natomiast przy elektrodach na bazie Au lepsze pod tym względem były elementy planarne. W przypadku elektrod PdAg nie

stwierdzono istotnych różnic. Warystory planarne były niezaprzeczalnie lepsze pod jednym względem - rozrzut statystyczny współczynnika nieliniowości wynosił dla nich ok. 10% podczas gdy dla kanapkowych ok. 25%. Wymiary struktur kanapkowych wpływały w pewnym stopniu na wartości współczynnika α (aczkolwiek brak tutaj określonej reguły). Grubość warstwy warystorowej również była istotna. Warystory w strukturze kondensatorowej z warstwą drukowaną trzykrotnie wykazywały znacznie słabszą nieliniowość charakterystyki niż drukowane sześciokrotnie. Ponadto przebieg charakterystyki prądowo-napięciowej w skali podwójnie logarytmicznej często odchyłał się od linii prostej. Znacznie częściej dochodziło także w ich przypadku do zwarć między elektrodami.

Tab. 5.2. Parametry warystorów w układzie kondensatorowym na podłożu LTCC

		wymiary [mm ²]	temperatura wypalania			
			850°C		950°C	
			α	U_{1mA} [V]	α	U_{1mA} [V]
elektrody	Au	0,5×0,5	6,6	70	6,9	54
		1×1	6,5	58	6,1	43
		2×2	5,2	69	7,6	52
		3×3	7,6	64	8,6	54
	PdAg	0,5×0,5	5,7	214	5,7	211
		1×1	5,0	163	5,7	202
		2×2	5,1	145	4,5	204
		3×3	7,2	155	5,1	190
	Pt	0,5×0,5	12,3	105	15,9	132
		1×1	13,5	96	21,0	110
		2×2	8,8	78	22,7	92
		3×3	10,9	70	15,2	150

Napięcie charakterystyczne U_{1mA} zmieniało się w bardzo szerokim zakresie [179,181]. Zmierzono wartości od 10 do 200 V dla warystorów kanapkowych i od 100 do 460 V dla planarnych. W przeciwieństwie do współczynnika nieliniowości większy rozrzut U_{1mA} stwierdzono dla warystorów planarnych, co zapewne jest związane z większym wpływem fluktuacji grubości elementu planarnego na napięcie charakterystyczne. Brakuje przy tym wyraźnej korelacji między α i U_{1mA} . Wartości napięcia charakterystycznego różniły się znacznie dla poszczególnych wariantów realizacji struktur testowych. Najsilniejszy był wpływ elektrod - zmiana pasty przewodzącej skutkowała w niektórych przypadkach nawet kilkukrotnym wzrostem bądź spadkiem napięcia. Użycie podłoża alundowego powodowało spadek U_{1mA} o 50÷80% w porównaniu z wartościami dla struktur LTCC (jednak tylko dla warystorów kanapkowych, w przypadku warystorów planarnych taka zależność nie występowała). Duże znaczenie miała również temperatura wypalania - jej wpływ był jednak

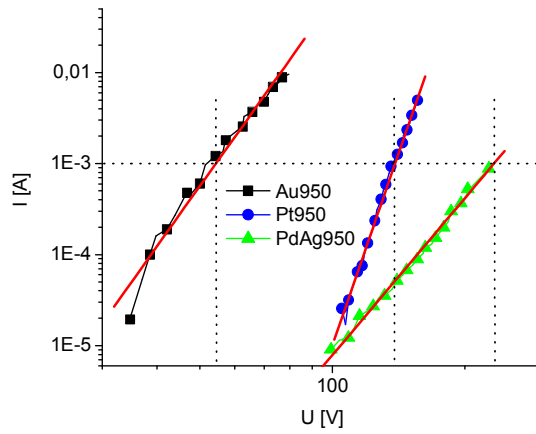
niejednoznaczny. Wypalanie w wyższej temperaturze prowadziło zarówno do wzrostu, jak i do obniżenia napięcia charakterystycznego, zależnie od wariantu technologicznego. Szczególnie dużą czułość na temperaturę wypalania przejawiały warystory planarne z elektrodami PdAg i Au. Zachodziła też oczywista zależność między wartością napięcia a grubością warystora - elementy drukowane trzykrotnie posiadały w przybliżeniu o połowę mniejsze napięcie charakterystyczne niż drukowane sześć razy (oznacza to mniej więcej stałą wartość charakterystyczną natężenia pola elektrycznego).

Tab. 5.3. Parametry warystorów kanapkowych na podłożu alundowym

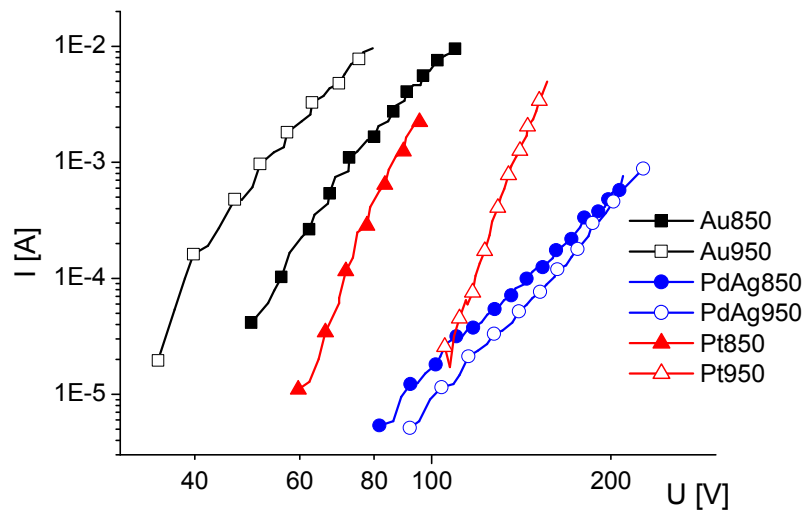
		wymiary [mm ²]	temperatura wypalania				
			850°C		950°C		
			α	U_{1mA} [V]	α	U_{1mA} [V]	
elektrody	PdAg	druk x3	0,5x0,5	-	-	3,3	28
			1x1	-	-	3,9	22
			2x2	-	-	2,4	23
			3x3	-	-	-	-
		druk x6	0,5x0,5	4,9	96	4,2	51
			1x1	5,8	61	4,8	46
	2x2		4,2	47	5,0	41	
	3x3		3,2	20	-	-	
	Pt	druk x3	0,5x0,5	5,5	11	3,9	7,5
			1x1	4,3	7	6,9	10
			2x2	7,8	14	5,1	7
			3x3	4,5	7	-	-
druk x6		0,5x0,5	8,8	20	11,7	20	
		1x1	8,0	14	13,0	23	
		2x2	6,6	11	9,4	16	
		3x3	6,0	11	5,9	8	

Tab. 5.4. Parametry warystorów planarnych

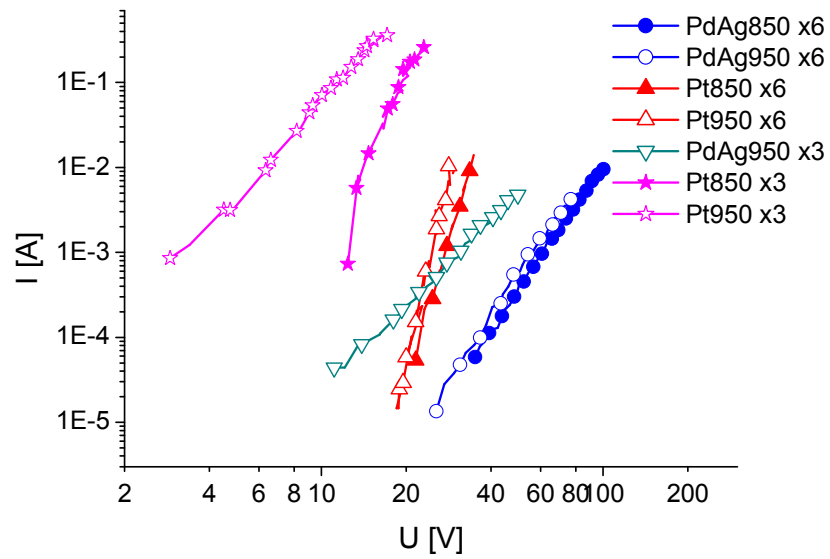
		temperatura wypalania						
		850°C		950°C		1050°C		
		α	U_{1mA} [V]	α	U_{1mA} [V]	α	U_{1mA} [V]	
elektrody	Au	alund	6,0	310	5,8	185	3,2	55
	PdAg		5,5	170	5,0	140	2,8	70
	Pt		6,2	165	9,5	100	2,7	18
	Au	LTCC	11,1	112	10,1	101	-	-
	PdAg		7,4	232	6,1	461	-	-
	Pt		16,9	138	11,9	127	-	-



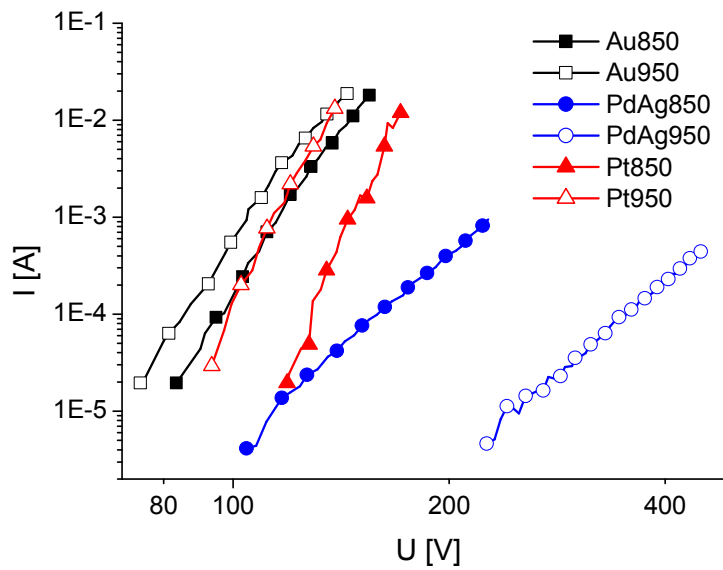
Rys. 5.11. Aproksymacja charakterystyk prądowo-napięciowych warystorów zależnością (5.1)



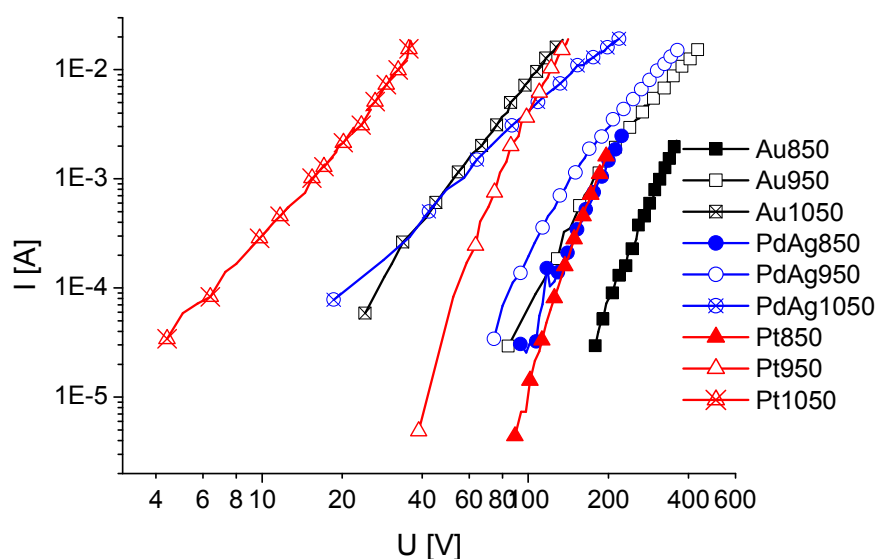
Rys. 5.12. Charakterystyki prądowo-napięciowe warystorów kanapkowych $0,5 \times 0,5 \text{ mm}^2$ na podłożu LTCC



Rys. 5.13. Charakterystyki prądowo-napięciowe warystorów kanapkowych $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$ na podłożu alundowym



Rys. 5.14. Charakterystyki prądowo-napięciowe warystorów planarnych na podłożu LTCC



Rys. 5.15. Charakterystyki prądowo-napięciowe warystorów planarnych na podłożu alundowym

Obie konstrukcje - planarna i kanapkowa - umożliwiają wytworzenie warystora o satysfakcjonujących parametrach. Większe wartości współczynnika nieliniowości osiągnięto dla elementów kanapkowych. Z drugiej strony konstrukcja planarna umożliwia znacznie łatwiejszą kontrolę napięcia charakterystycznego przez zmianę odległości elektrod warystora. W przypadku struktury kanapkowej jest to znacznie trudniejsze. Ponadto konfiguracja ta jest bardziej zawodna. W części warystorów kanapkowych, szczególnie drukowanych trzykrotnie, wystąpiły zwarcia pomiędzy elektrodami spowodowane najwyraźniej niedostateczną gęstością warstwy warystorowej.

5.5. Stabilność długoczasowa właściwości elektrycznych

Chociaż w literaturze można znaleźć informacje o warystorach grubowarstwowych, brak jednak danych dotyczących stabilności takich elementów. Przeprowadzono zatem takie badania w stosunku do struktur testowych. Warystory poddano starzeniu termicznemu w temperaturze 150°C przez 250 h. Zmierzono i porównano ich charakterystyki prądowo-napięciowe przed i po starzeniu. Określono również zmiany parametrów α i U_{1mA} , obliczonych na podstawie charakterystyk. Tabele 5.5-5.6 zawierają wartości tych parametrów, natomiast zmiany charakterystyk elementów wywołane starzeniem widoczne są na rys. 5.16-5.21.

Tab. 5.5. Wyniki starzenia termicznego warystorów kanapkowych

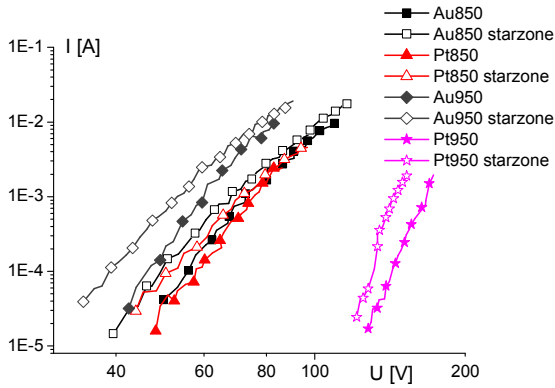
		T_w	α		U_{1mA} [V]		
			przed	po	przed	po	
elektrody	Au	850°C	6,9	6,3	73	67	LTCC
		950°C	8,3	6,4	60	53	
	Pt	850°C	8,4	6,4	77	71	
		950°C	15,3	13,9	168	145	
	PdAg	850°C	4,6	4,3	133	124	alund
		950°C	4,6	4,2	52	49	
	Pt	850°C	11,9	10,1	21,9	21,9	
		950°C	9,4	7,1	14,6	13,8	

Tab. 5.6. Wyniki starzenia termicznego warystorów planarnych

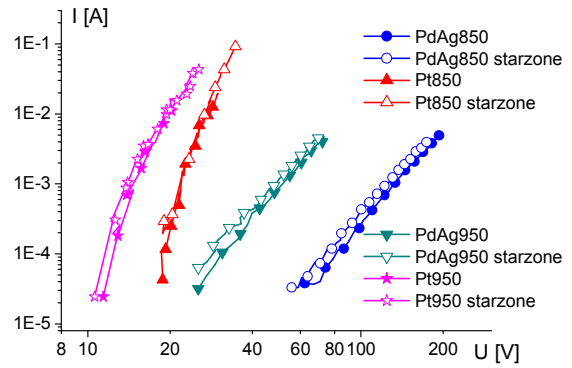
		T_w	α		U_{1mA} [V]		
			przed	po	przed	po	
elektrody	Au	850°C	10,4	7,7	107	94	LTCC
		950°C	9,6	8,4	100	91	
	PdAg	850°C	7,2	6,0	233	222	
		950°C	6,5	5,5	500	431	
	Pt	850°C	16,8	9,7	141	118	
		950°C	13,9	10,7	126	109	
	Au	850°C	5,7	4,8	327	306	alund
		950°C	5,8	4,5	175	151	
	PdAg	850°C	5,3	4,4	187	169	
		950°C	4,5	3,9	129	106	
	Pt	850°C	7,6	5,6	180	150	
		950°C	8,2	7,2	96	84	

Generalnie starzenie nie powodowało istotnego pogorszenia właściwości warystorów. Wyjątkiem były kanapkowe struktury z elektrodami PdAg, w których pojawiły się zwarcia między elektrodami. We wszystkich przypadkach następowało niewielkie zmniejszenie współczynnika nieliniowości. Wyjątkiem były warystory planarne na podłożu LTCC z elektrodami z pasty platynowej, dla których spadek ten był wyraźny. Mimo to α nadal pozostawało w tym przypadku znacznie większe niż przy innych materiałach elektrod. Napięcie charakterystyczne U_{1mA} we wszystkich przypadkach zmniejszyło się o 10%÷15%. Rodzaj podłoża, materiał elektrod i temperatura wypalania nie wpływały w sposób jednoznaczny na stabilność badanych warystorów. Trudno tutaj wyróżnić najlepszy bądź najgorszy wariant technologiczny. Również konstrukcja warystora nie była zbyt istotnym czynnikiem. Praktycznie nie wpływała ona na zmiany α . Miała jedynie pewne znaczenie dla

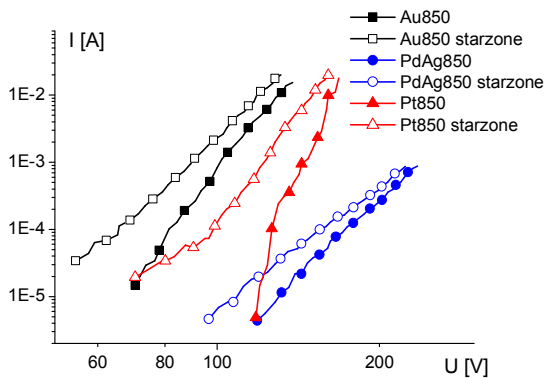
stabilności napięcia charakterystycznego. Nieco mniejsze jego zmiany zaobserwowano dla struktur kanapkowych, w szczególności dla warystorów z elektrodami Pt na alundzie, gdzie napięcie to pozostało prawie niezmiennione.



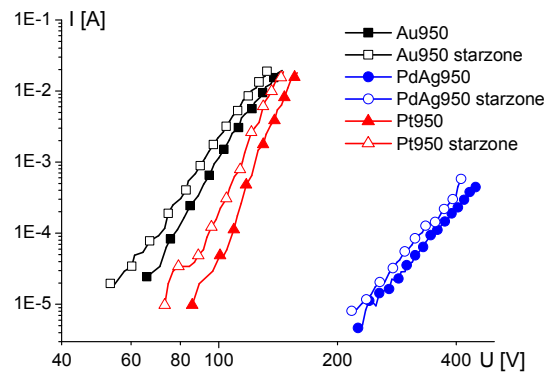
Rys. 5.16. Charakterystyki $I-U$ warystorów kanapkowych na podłożu LTCC przed i po starzeniu termicznym



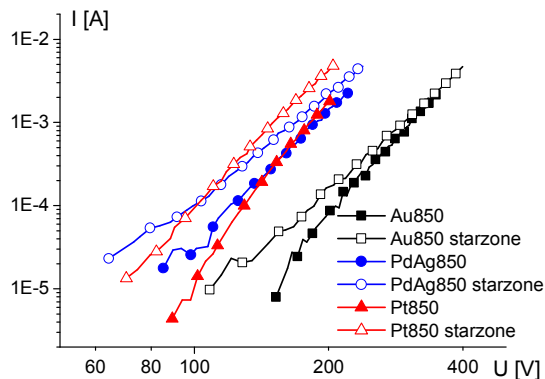
Rys. 5.17. Charakterystyki $I-U$ warystorów kanapkowych na podłożu alundowym przed i po starzeniu termicznym



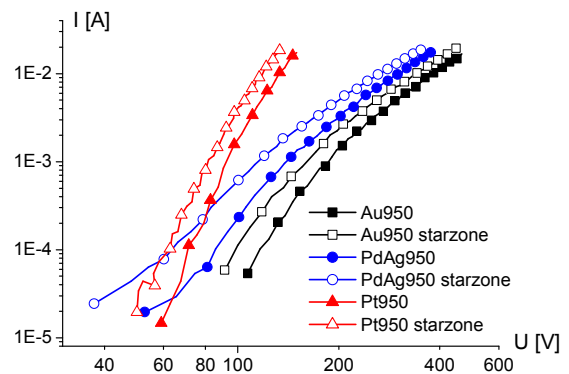
Rys. 5.18. Charakterystyki $I-U$ warystorów planarnych na podłożu LTCC, wypalanych w 850°C, przed i po starzeniu termicznym



Rys. 5.19. Charakterystyki $I-U$ warystorów planarnych na podłożu LTCC, wypalanych w 950°C, przed i po starzeniu termicznym



Rys. 5.20. Charakterystyki $I-U$ warystorów planarnych na podłożu alundowym, wypalanych w 850°C, przed i po starzeniu termicznym

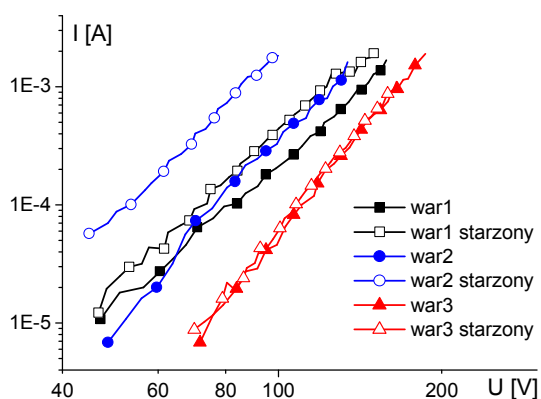


Rys. 5.21. Charakterystyki $I-U$ warystorów planarnych na podłożu alundowym, wypalanych w 950°C, przed i po starzeniu termicznym

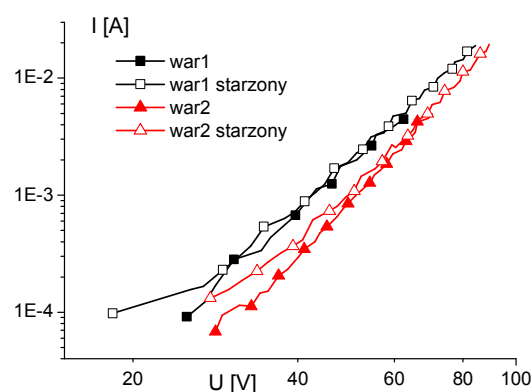
5.6. Obciążenie elektryczne

Zwykle w obwodzie warystor cały czas jest obciążony, ale wartościami napięcia niższymi niż napięcie charakterystyczne. Dlatego dla wykonanych elementów zbadano wpływ długotrwałego stałego obciążenia elektrycznego na ich parametry elektryczne. Do pomiarów wybrano elementy kanapkowe o wymiarach $2 \times 2 \text{ mm}^2$ z elektrodami palladowo-srebrnymi z powodu ich dobrej lutowności. Warystory poddano działaniu prądu stałego $I = 100 \mu\text{A}$ przez okres 250 h w temperaturze pokojowej. Zmiany ich parametrów pokazano w tabeli 5.7. Natomiast wpływ obciążenia na kształt charakterystyk prądowo-napięciowych prezentują wykresy 5.22 i 5.23.

Niezależnie od użytego podłoża współczynnik nieliniowości zmienił się w bardzo niewielkim stopniu. Zasadniczo nieznacznie się on zmniejszał, chociaż w jednym przypadku odnotowano wzrost wartości α . Wpływ podłoża uwidocznił się w stosunku do napięcia charakterystycznego U_{ImA} . Warystory wykonane na alundzie nie wykazywały zmian tego parametru. Natomiast napięcia charakterystyczne elementów na LTCC zmniejszało się. Wielkość tego spadku wahała się jednak znacznie dla poszczególnych elementów.



Rys. 5.22. Charakterystyki $I-U$ warystorów z elektrodami PdAg na podłożu LTCC, struktury $2 \times 2 \text{ mm}^2$



Rys. 5.23. Charakterystyki $I-U$ warystorów z elektrodami PdAg na podłożu alundowym, struktury $2 \times 2 \text{ mm}^2$

Tab. 5.7. Zmiany parametrów warystorów kanapkowych z elektrodami PdAg poddanych obciążeniu elektrycznemu

		α		U_{1mA} [V]		
		przed	po	przed	po	
PdAg, 850°C	struktura					
	1	4,1	4,2	144	121	LTCC
	2	5,1	4,6	126	85	
	3	5,8	5,7	166	163	
	1	4,3	4,2	42,2	42,2	alund
2	5,0	4,8	51,1	49,8		

5.7. Narażenia impulsowe

Warystor ma chronić układ przed różnego rodzaju przepięciami. Dlatego przebadano odporność warystorów na serie impulsów napięciowych. Struktury testowe poddawano działaniu serii 1000 impulsów o amplitudzie 10 mA, czasie trwania 5 ms każdy i interwale 0,5 s. Badania prowadzono w temperaturze pokojowej. Mierzono charakterystyki $I-U$ warystorów przed i po narażeniach. Zmiany parametrów warystorów zamieszczono w tabelach 5.8 i 5.9. Natomiast wpływ narażeń na charakterystyki $I-U$ prezentują rys. 5.24-5.27.

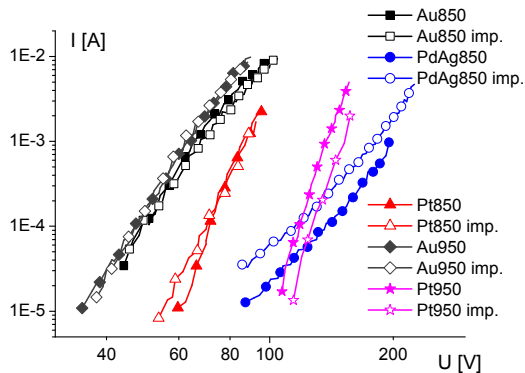
Zasadniczo badane warystory charakteryzowały się dobrą odpornością impulsową. Jedynie elementy w strukturze kondensatorowej z elektrodami PdAg na LTCC oraz struktury planarne z elektrodami Pt wypalane w 850°C uległy uszkodzeniu podczas testu. Należy jednak zauważyć, że w tym drugim przypadku przy wypalaniu w 950°C uzyskano pozytywne rezultaty. Obserwowano zwykle nieznaczny spadek współczynnika nieliniowości (jakkolwiek dla elementów o dużych wartościach α zmiany były większe) i napięcia charakterystycznego. Dla niektórych struktur, np. kanapkowych z elektrodami Pt, nieliniowość nie zmieniała się bądź nawet nieco rosła. Napięcie charakterystyczne wszystkich struktur w przybliżeniu było stałe (niekiedy zauważono jego niewielki wzrost, w innych przypadkach - spadek). Wyraźniejsze różnice ujawniły się jedynie dla struktur na podłożach LTCC - kanapkowych z elektrodami Pt wypalanych w 950°C oraz planarnych z elektrodami PdAg wypalanych w 850°C. Najlepszą odpornością wykazywały się warystory z elektrodami na bazie Au, niezależnie od wariantu technologicznego. Odporność impulsowa warystorów z elektrodami platynowymi, charakteryzujących się najwyższą wartością α , była nieco gorsza (ale w dalszym ciągu akceptowalna).

Tab. 5.8. Wpływ narażeń impulsowych na parametry warystorów kanapkowych

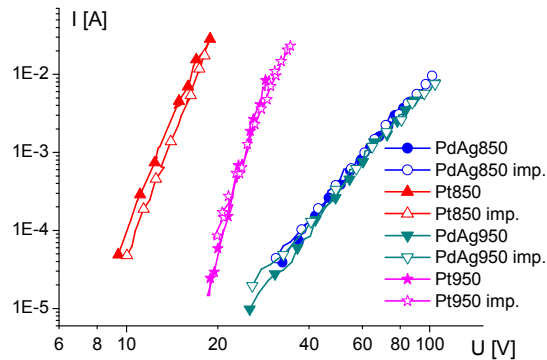
		T_w	α		U_{1mA} [V]		
			przed	po	przed	po	
elektrody	Au	850°C	6,5	6,2	65,6	68,8	LTCC
		950°C	7,4	7,5	63,1	63,1	
	PdAg	850°C	5,3	5,1	195,6	183,7	
		950°C	-	-	-	-	
	Pt	850°C	12,3	9,7	86,4	87,8	
		950°C	14,5	14,5	137,4	152,2	
	PdAg	850°C	4,8	4,5	62,2	61,2	alund
		950°C	4,9	4,4	62,1	63,2	
	Pt	850°C	9,2	9,9	12,6	14,1	
		950°C	14,1	10,1	24,7	24,7	

Tab. 5.9. Wpływ narażeń impulsowych na parametry warystorów planarnych

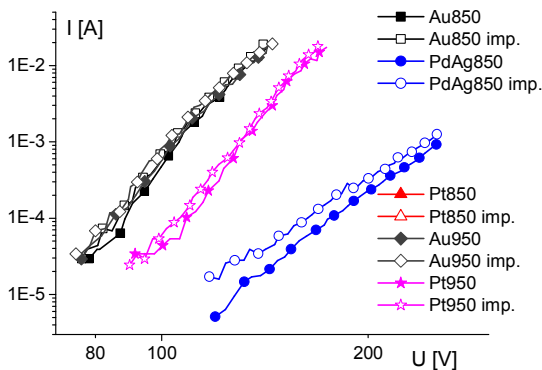
		T_w	α		U_{1mA} [V]		
			przed	po	przed	po	
elektrody	Au	850°C	10,6	10,6	106	104	LTCC
		950°C	10,4	9,9	104	102	
	PdAg	850°C	6,8	6,1	234	245	
		950°C	-	-	-	-	
	Pt	850°C	-	-	-	-	
		950°C	11,9	11,9	122	124	
	Au	850°C	5,8	5,7	306	306	alund
		950°C	5,1	4,7	200	197	
	PdAg	850°C	-	-	-	-	
		950°C	4,3	4,1	142	145	
	Pt	850°C	-	-	-	-	
		950°C	7,7	7,8	88	87	



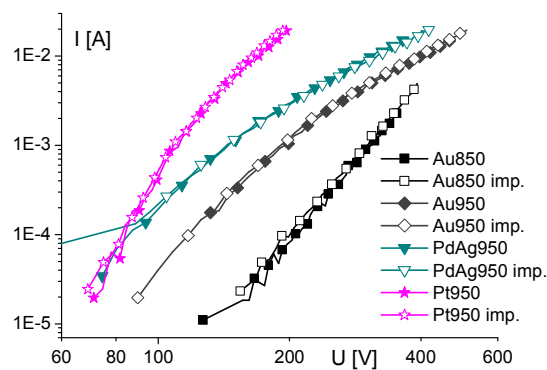
Rys. 5.24. Charakterystyki $I-U$ warystorów kanapkowych $0,5 \times 0,5 \text{ mm}^2$ na podłożu LTCC przed i po narażeniach impulsowych



Rys. 5.25. Charakterystyki $I-U$ warystorów kanapkowych $0,5 \times 0,5 \text{ mm}^2$ na podłożu alundowym przed i po narażeniach impulsowych



Rys. 5.26. Charakterystyki $I-U$ warystorów planarnych na podłożu LTCC przed i po narażeniach impulsowych



Rys. 5.27. Charakterystyki $I-U$ warystorów planarnych na podłożu alundowym przed i po narażeniach impulsowych

5.8. Analiza wyników

Pastę warystorową wykonano na bazie typowej ceramiki warystorowej, proszku Bi_2O_3 , użytego jako czynnik obniżający temperaturę wypalania i standardowego lepiszcza organicznego. Zastosowano różne warianty technologiczne wytwarzania struktur. Na elektrody zastosowano trzy pasty przewodzącej oparte na złocie, platynie i stopie palladu i srebra. Użyto standardowych podłoży alundowych i ceramiki LTCC. Uwzględniono również wpływ temperatury wypalania. Ponadto przebadano dwa rozwiązania konstrukcyjne elementów - struktury kanapkowe oraz planarne. Zmierzono charakterystyki prądowo-napięciowe warystorów oraz wyznaczono ich podstawowe parametry - współczynnik nieliniowości α i napięcie charakterystyczne U_{1mA} . Określono stabilność długoczasową

wytworzonych warystorów oraz ich odporność na obciążenie elektryczne i narażenia impulsowe.

Celem badań było przede wszystkim uzyskanie warystorów o jak największych wartościach współczynnika nieliniowości α (porównywalnych z warystorami dyskretnymi) przy wypalaniu w zakresie temperatury typowym dla techniki grubowarstwowej. Cel osiągnięto dzięki zastosowaniu elektrod z pasty opartej na platynie. Dla elementów o strukturze kondensatorowej, wykonanych na podłożu LTCC uzyskano wartości α na poziomie 15÷22. Jeżeli idzie o warystory grubowarstwowe jest to jeden z lepszych wyników, który można znaleźć w literaturze przedmiotu. Warystory kanapkowe na alundzie wykazywały α w zakresie 11÷13. Natomiast struktury planarne o tej samej metalurgii elektrod charakteryzują się współczynnikiem α z zakresu 12÷17. Warystory o dużej nieliniowości mogą być zatem wytwarzane na obu rodzajach podłoża. Użycie innego materiału na elektrody skutkowało wyraźnie słabszą nieliniowością charakterystyki $I-U$. Zadowalające wyniki - α w granicach 10÷11 - uzyskano także dla planarnych warystorów z elektrodami na bazie Au. Charakteryzowały się one najlepszą odpornością impulsową. Należy podkreślić, że można otrzymać warystor grubowarstwowy z elektrodami Pt o wysokiej nieliniowości i satysfakcjonującej odporności impulsowej. Stabilność temperaturowa była zadowalająca dla wszystkich rodzajów struktur, za wyjątkiem warystorów kanapkowych PdAg.

Ważna jest także możliwość doboru napięcia charakterystycznego W w trakcie badań uzyskano wartości U_{ImA} z bardzo szerokiego zakresu, od około 10 V aż do 500 V, w zależności od sposobu wykonania elementu. Jakkolwiek można to napięcie kontrolować właśnie przez dobór technologii, zdecydowanie łatwiej zadanie takie zrealizować przez zmianę wymiarów warystora, czyli w praktyce odległości elektrod. Dla struktur kanapkowych jest to grubość warstwy i jej precyzyjny dobór jest dość kłopotliwy. Dogodniej tego dokonać przy konstrukcji planarnej. Biorąc pod uwagę zadowalające właściwości warystorów wykonanych w obu tych konfiguracjach, możliwa jest tutaj duża swoboda przy wyborze odpowiedniego podejścia.

Badanie mikrostruktury warstw warystorowych ujawniły ich znaczną porowatość i stosunkowo mały stopień spiecenia poszczególnych ziaren ceramiki warystorowej. Jest to ogólną przyczyną mniejszej wartości współczynnika α warystorów grubowarstwowych w porównaniu z ceramicznymi. Można zatem sądzić, że dalsze zwiększenie gęstości i spistości warstwy, osiągnięte przez modyfikacje właściwości past grubowarstwowych, pozwoli na zwiększenie nieliniowości charakterystyk prądowo-napięciowych. Szczegółowa

analiza wpływu poszczególnych faz krystalicznych obecnych w warstwie na finalne właściwości warystora nie została przeprowadzona. Niemniej dyfraktogramy pokazują różnice w składzie warstwy w funkcji rodzaju podłoża czy temperatury wypalania. W szczególności widoczny jest wpływ materiału elektrod na strukturę warstwy warystorowej, co widać porównując dyfraktogramy próbek naniesionych i wypalonych odpowiednio na warstwie platynowej lub palladowo-srebrowej.

6. Kondensatory

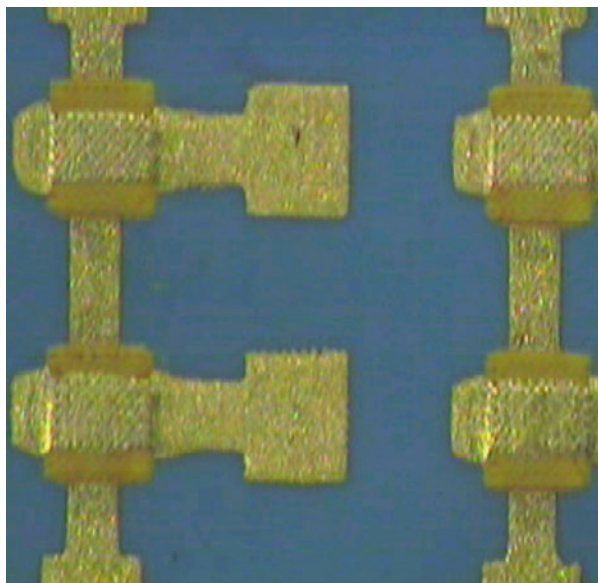
6.1. Wstęp

Technika grubowarstwowa umożliwia wytwarzanie kondensatorów o małych i średnich pojemnościach. Od znajdują one lat szerokie zastosowanie w obwodach i systemach elektronicznych. Miniaturyzacja kondensatorów grubowarstwowych napotyka jednak na pewne bariery. Minimalna grubość warstwy nanoszonej typowymi metodami wynosi $15\div 25\ \mu\text{m}$. Ponadto z uwagi na możliwość wystąpienia zwarc między elektrodami zwykle warstwę dielektryka nanosi się dwukrotnie. Wynikiem tego jest stosunkowo mała pojemność jednostkowa, co w przypadku kondensatorów miniatury składować będzie bardzo małymi pojemnościami. Zastosowanie struktur wielowarstwowych LTCC pozwala na zwiększenie gęstości upakowania elementów. Wiadomo jednak, że proces technologiczny wytwarzania układu LTCC różni się istotnie od standardowego procesu grubowarstwowego. Współwypalanie z surowym podłożem znacząco zmienia właściwości otrzymanych elementów. Do wytwarzania kondensatorów w układach LTCC muszą być zatem używane specjalne kompozycje dielektryczne. W przeciwieństwie do standardowych kondensatorów grubowarstwowych, których właściwości są dobrze poznane [38-41,127,128,182,183], w literaturze można znaleźć niewiele informacji na temat kondensatorów LTCC [42,43,47,184,185]. Dlatego w ramach badań własnych autor podjął się wykonania kondensatorów LTCC z wykorzystaniem różnych past dielektrycznych i ich charakteryzacji strukturalnej, elektrycznej oraz określenia ich stabilności długoczasowej. Część prezentowanych poniżej wyników była przedstawiona wcześniej w [98,186].

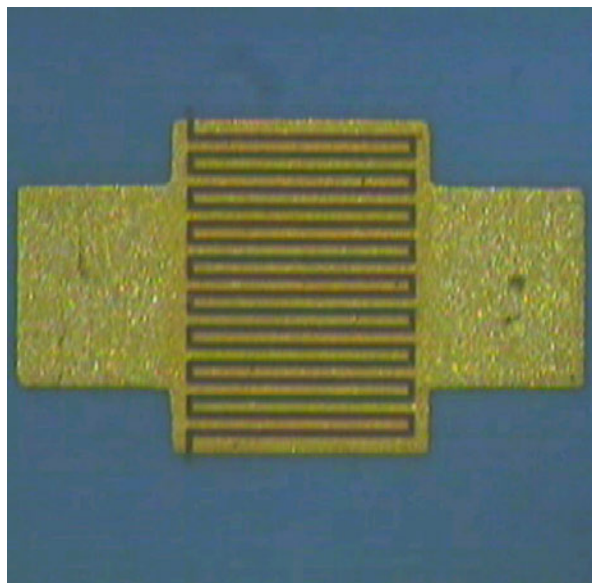
6.2. Wytwarzanie struktur testowych

Kondensatory testowe wykonano w kilku wariantach technologicznych. Jako podłoża zastosowano standardową ceramikę alundową oraz folię LTCC DP951 firmy DuPont. Wykonano elementy zagrzebane, współwypalane z podłożem LTCC, jak i elementy powierzchniowe, wytworzone na alundzie i wypalanej ceramice LTCC. Zasadniczo zastosowano dwie kombinacje pasty dielektrycznej oraz materiału elektrod. W pierwszej wykorzystano kompozycję dielektryczną ESL4164 o nominalnej względnej przenikalności elektrycznej $\epsilon_r = 250\pm 50\%$ oraz pastę przewodzącą palladowo-srebrową ESL963 - obie z firmy Electroscience Laboratories [187]. W drugiej zastosowano pasty firmy DuPont: dielektryczną DP5674 o $\epsilon_r = 50\div 80$ oraz przewodzącą DP6146, również opartą na stopie

pallad-srebro [188]. Ponadto dla obu past kondensatorowych przebadano ich kompatybilność z elektrodami Ag z pasty ESL9912-A (z wyjątkiem struktur współwypalanych).



Rys. 6.1. Kondensatory kanapkowe $0,5 \times 0,5 \text{ mm}^2$



Rys. 6.2. Elektrody palczaste kondensatora planarnego

Zaprojektowano dwie topologie kondensatorów - typowe struktury kanapkowe o wymiarach $0,5 \times 0,5$ i $2 \times 2 \text{ mm}^2$ oraz strukturę planarną z elektrodami palczastymi (grzebieniomymi), której obszar aktywny miał wymiar $2,5 \times 2,5 \text{ mm}^2$ (rys. 6.1 i 6.2). Wartości pojemności obliczano przy użyciu zal. (2.1) - kondensator kanapkowy i (2.2)-(2.4) - kondensator palczasty planarny.

Struktury kanapkowe wykonywano standardowo - na podłoże kolejno drukowano elektrodę, następnie dwukrotnie warstwę dielektryczną i górną elektrodę. W przypadku kondensatorów planarnych metoda postępowania była identyczna, z tym, że dla części struktur zastosowano tylko jednokrotny nadruk dielektryka. Elektrody palczaste kondensatorów planarnych znajdowały się zatem pod dielektrykiem. Każda warstwa elementów powierzchniowych była wypalana w typowym profilu $850^\circ\text{C}/60 \text{ min.}$, elementy zagrzebane wypalano w profilu dwugodzinnym z temperaturą szczytową 875°C .

Elektrody kondensatorów planarnych formowano przez cięcie laserem naniesionej warstwy przewodzącej. W przypadku struktur zagrzebanych nacinano warstwy wysuszone, natomiast przy powierzchniowych większość elektrod nacinano już po wypaleniu. Wybrano następujące wartości szerokości palca elektrody i odstęp między elektrodami: $120/80 \text{ }\mu\text{m}$ dla cięcia warstw niewypalonych, $75/75 \text{ }\mu\text{m}$ i $50/50 \text{ }\mu\text{m}$ dla wypalonych. Cięcia $120/80 \text{ }\mu\text{m}$

wykonano za pomocą standardowego lasera Nd:YAG w Laboratorium Mikrosystemów Grubowarstwowych WEMIF (częstotliwość kluczenia $f = 300$ Hz, prędkość przesuwu wiązki $v = 1,5 \div 2$ mm/s), zaś pozostałe laserem Nd:YAG (system Microline 350L) wykorzystującym trzecią harmoniczną podstawowej częstotliwości promieniowania ($\lambda = 355$ nm) dzięki współpracy z dr J. Kitą z Uniwersytetu w Bayreuth (Niemcy) ($f = 23$ kHz, $v = 150$ mm/s) [186].

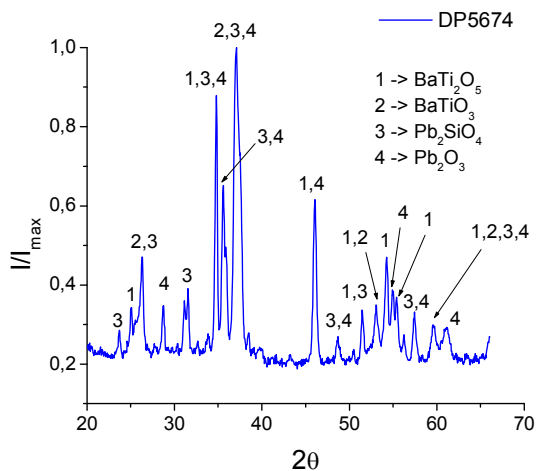
Powyższe wymiary struktur odnoszą się do struktur współwypalanych. Wymiary liniowe kondensatorów powierzchniowych, wykonanych na podłożach wypalonych LTCC i ceramice alundowej, z uwagi na brak skurczu były o ok. 14,5% większe, co tym samym oznacza powierzchnię większą o około 31%.

6.3. Właściwości mikrostrukturalne

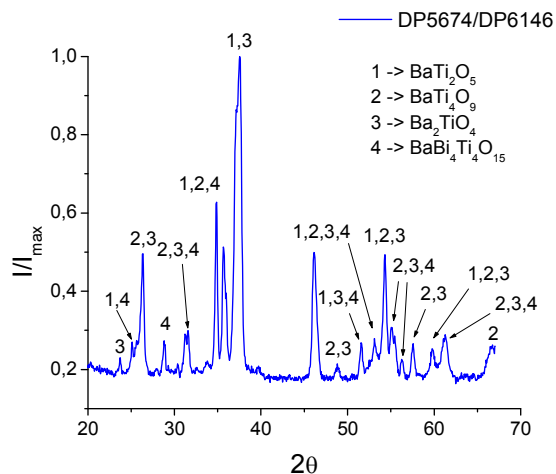
Badania mikrostruktury kondensatorów prowadzono podobnie jak w przypadku pozostałych mikroelementów. Struktury testowe wykonano na wypalonych foliach LTCC. Odpowiadało elementom powierzchniowym. Warstwę dielektryczną wypalono bezpośrednio na podłożu (jak w kondensatorach palczastych) lub na wcześniej wypalonej elektrodzie (jak ma to miejsce w kondensatorach kanapkowych). Dyfraktogramy struktur pokazano na rysunkach 6.3-6.6, natomiast zdjęcia mikroskopowe na rysunkach 6.7-6.8.

Analiza rentgenowska wykazała, że obie pasty bazują na związkach tlenków tytanu i baru, które są typowymi materiałami aktywnymi w grubowarstwowych pastach kondensatorowych [38,39,182]. Znacznie więcej maksimumów krzywej dyfrakcyjnej i tym samym więcej faz krystalicznych zidentyfikowano w warstwie DP5674. Dla niej też wystąpiły wyraźne różnice, związane z wypalaniem warstwy na materiale przewodzącym. Nastąpiła zmiana względnej wysokości maksimumów, zwłaszcza w zakresie kątów 35° - 45° , a także ich przesunięcie. Ponadto pojawiły się nowe związki tlenków tytanu i baru.

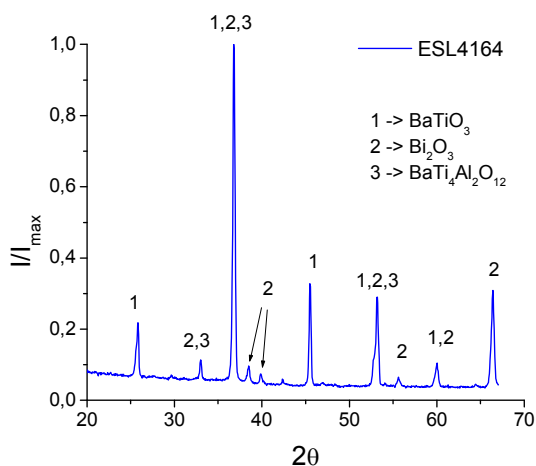
W przypadku warstwy ESL4164 dyfraktogramy obu wariantów struktury testowej były niemal identyczne. Stwierdzono jedynie obecność dodatkowego związku $\text{BaTi}_4\text{Al}_2\text{O}_{12}$ w warstwie leżącej bezpośrednio na podłożu LTCC. Podobnie jak w przypadku warstwy DP5674 pojawienie się dodatkowych faz krystalicznych wydaje się być związane z oddziaływaniem z podłożem, które nie zachodzi lub jest znacznie osłabiona przez warstwę przewodzącą. Jednak w badanych warstwach dielektrycznych nie znaleziono faz zidentyfikowanych wcześniej w podłożu LTCC, wypalonym w zbliżonej temperaturze 875°C (rys. 3.3).



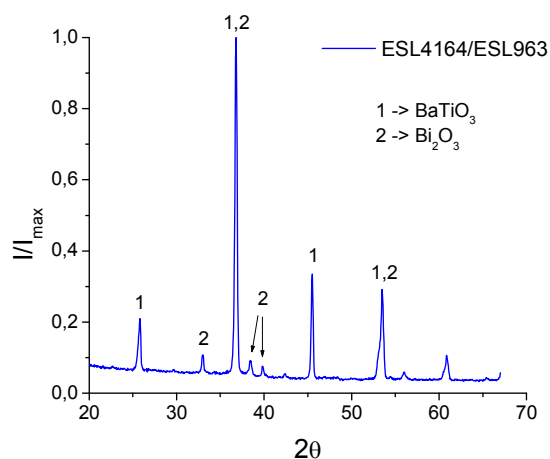
Rys. 6.3. Krzywa dyfrakcyjna warstwy dielektrycznej DP5674 wypalanej bezpośrednio na podłożu LTCC



Rys. 6.4. Krzywa dyfrakcyjna warstwy dielektrycznej DP5674 wypalanej w układzie LTCC/PdAg/DP5674

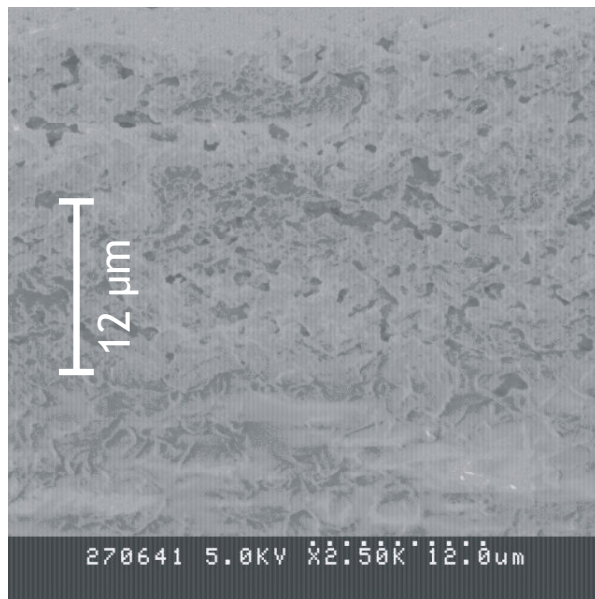


Rys. 6.5. Krzywa dyfrakcyjna warstwy dielektrycznej ESL4164 wypalanej bezpośrednio na podłożu LTCC

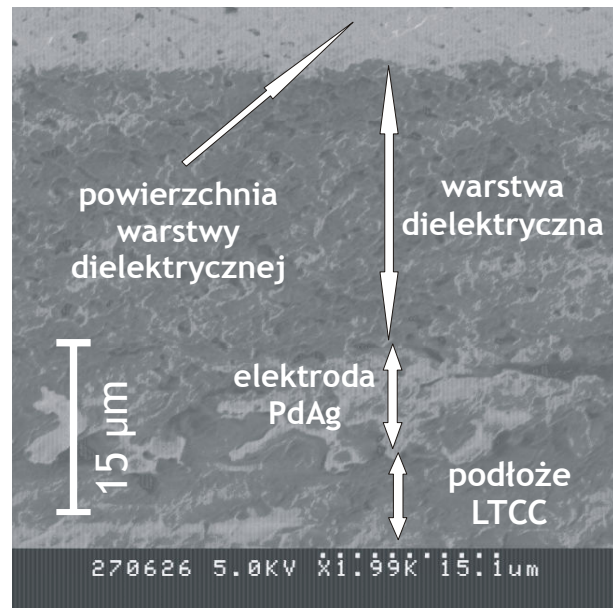


Rys. 6.6. Krzywa dyfrakcyjna warstwy dielektrycznej ESL4164 wypalanej w układzie LTCC/PdAg/ESL4164

Obie pasty kondensatorowe charakteryzowały się zwartą strukturą zwartą i pozbawioną defektów (choć stwierdzono pewną ich porowatość, szczególnie dla pasty DP5674). Obecność warstwy przewodzącej nie wpływała w widoczny sposób na strukturę dielektryka. Granice między poszczególnymi warstwami oraz podłożem były wyraźnie zarysowane, przy zastosowanych powiększeniach nie zauważono istnienia obszarów przejściowych.

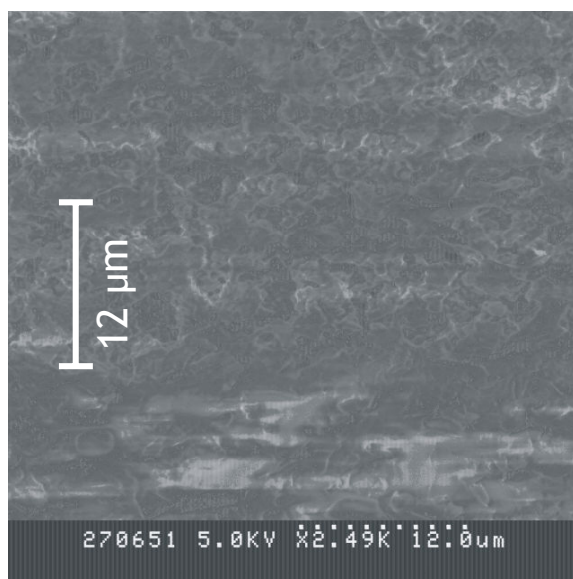


a)

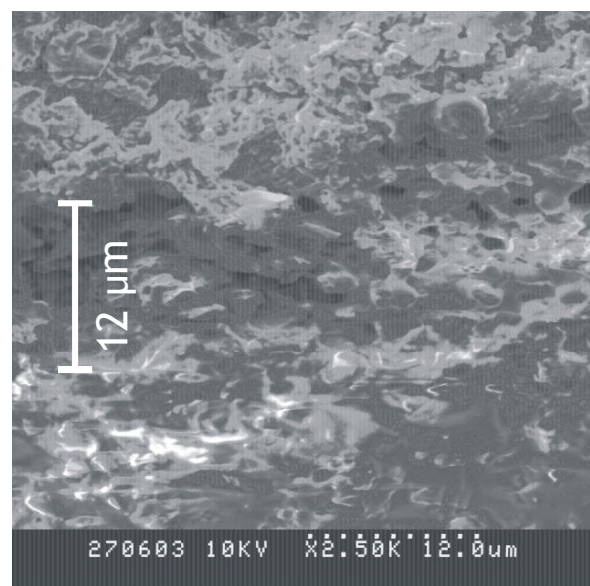


b)

Rys. 6.7. Warstwa dielektryczna DP5674 na podłożu LTCC (a) oraz na warstwie przewodzącej PdAg i podłożu LTCC (b) (powiększenie 2500x i 2000x)



a)

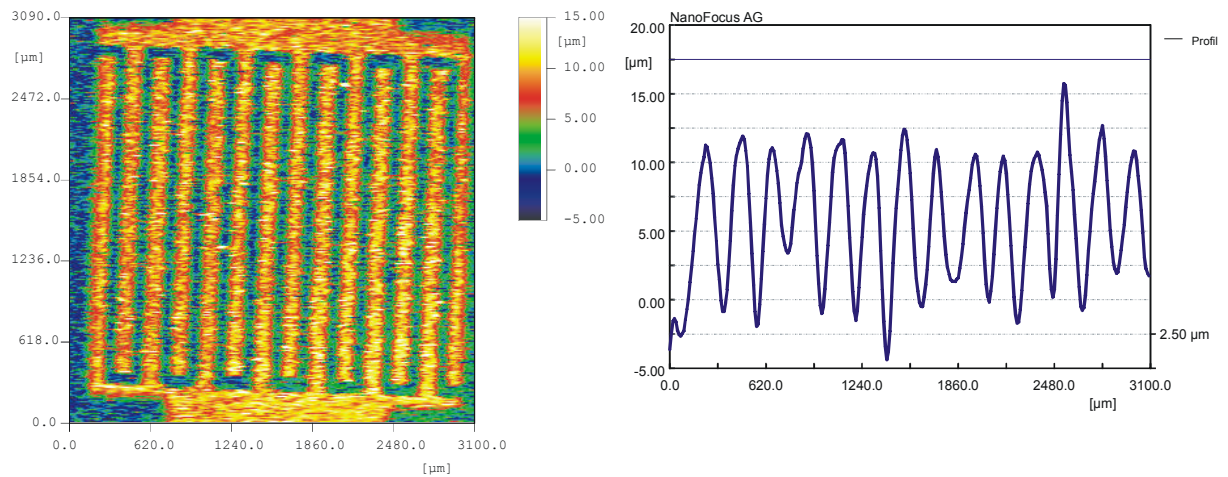


b)

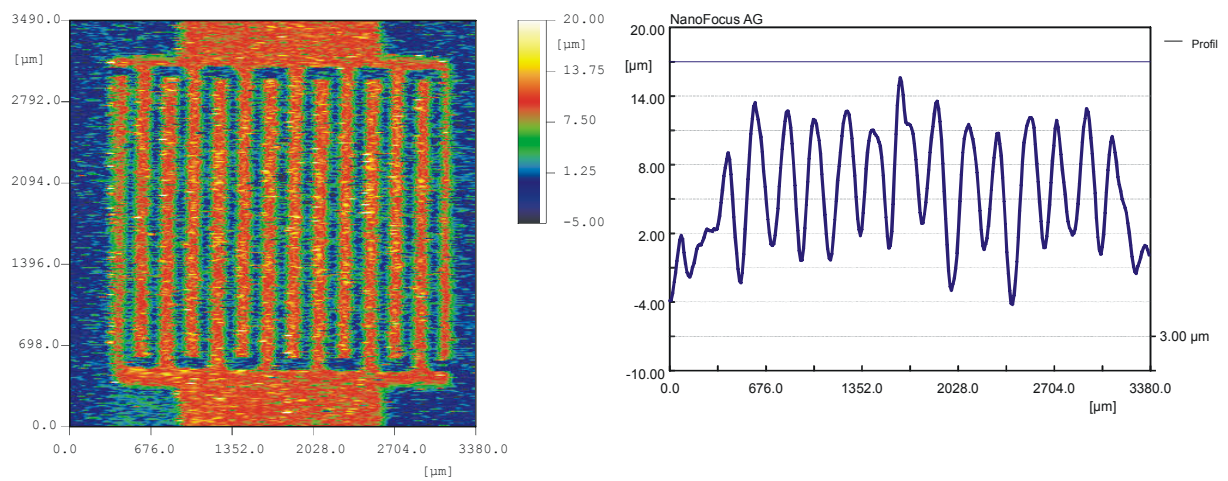
Rys. 6.8. Warstwa dielektryczna ESL4164 na podłożu LTCC (a) oraz na warstwie przewodzącej PdAg i podłożu LTCC (b) (powiększenie 2500x)

6.4. Właściwości geometryczne

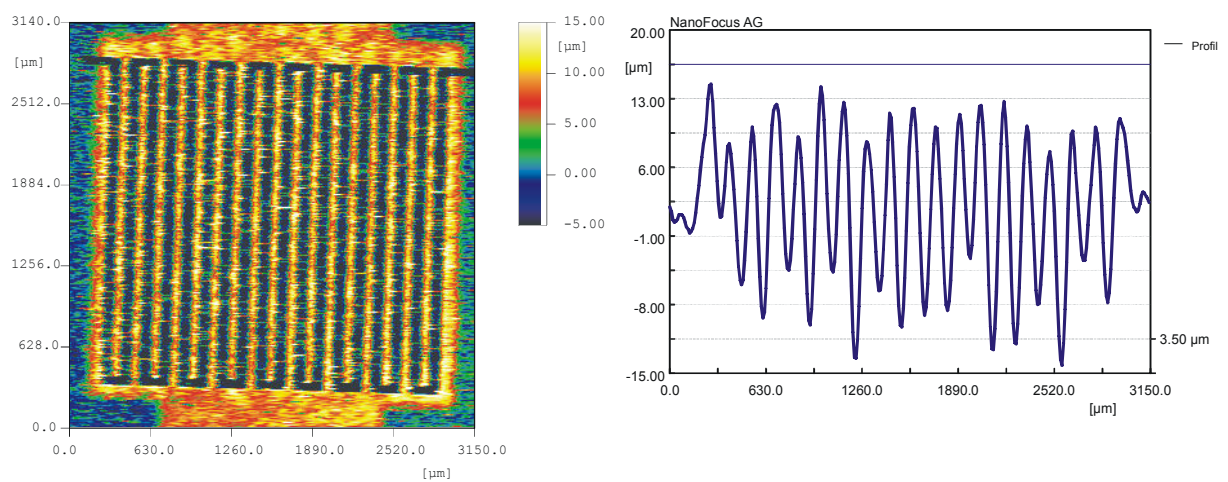
Bardzo istotną sprawą jest określenie jakości wytwarzania elektrod kondensatorów planarnych metodą nacinania niewypalanej lub wypalanej warstwy przewodzącej laserem Nd:YAG. Określono to na podstawie dwuwymiarowych rozkładów grubości i profili przekrojów poprzecznych, pokazanych na rys. 6.9-6.14.



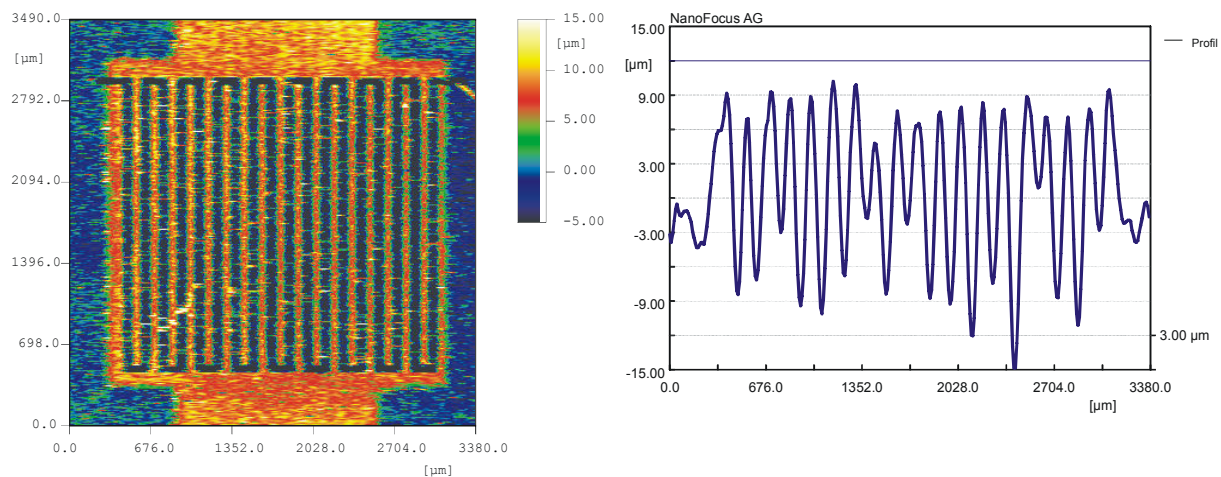
Rys. 6.9. Elektrody palczaste 120/80 μm na podłożu alundowym



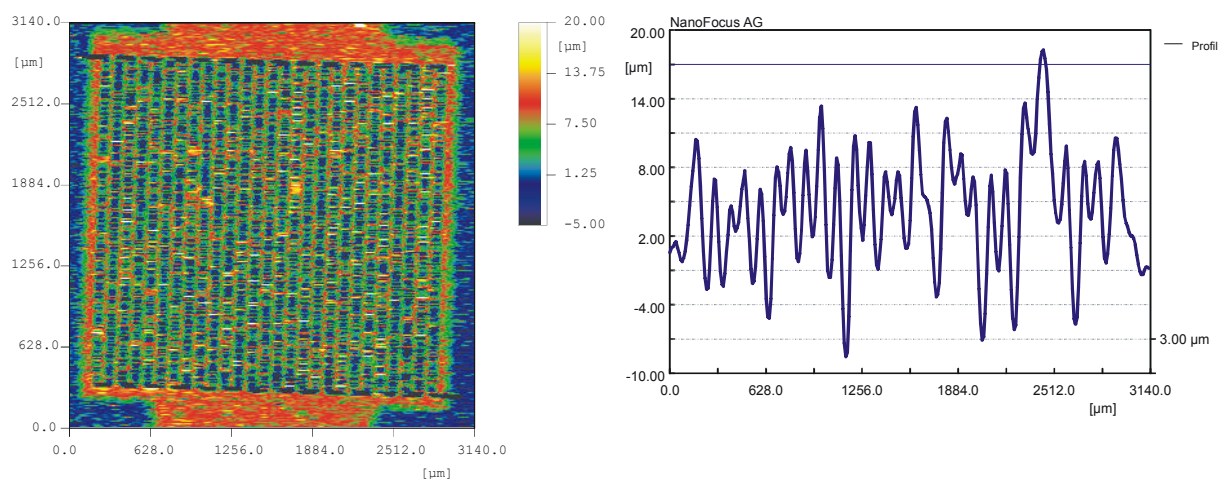
Rys. 6.10. Elektrody palczaste 120/80 μm na podłożu LTCC



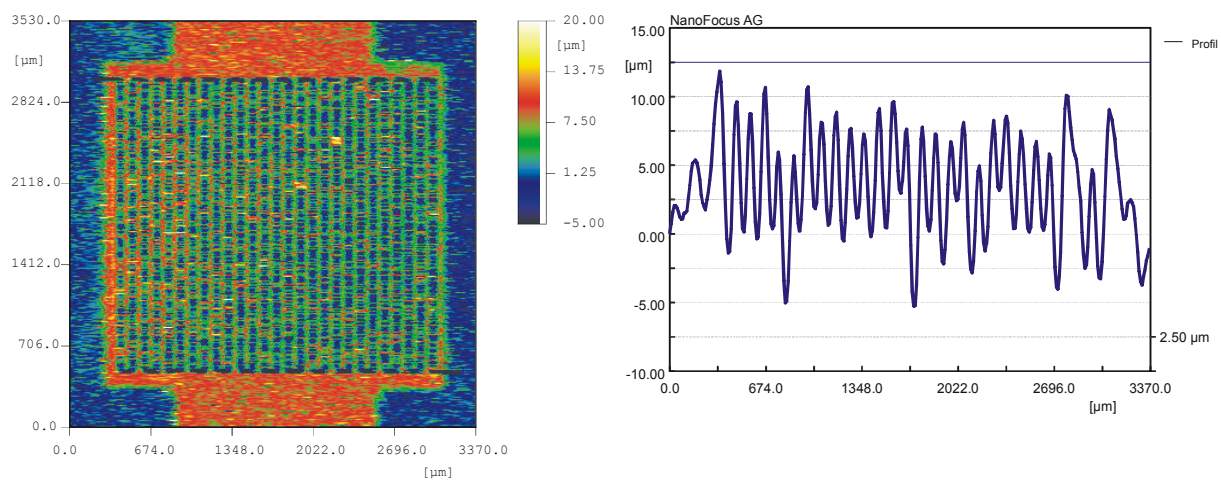
Rys. 6.11. Elektrody palczaste 75/75 μm na podłożu alundowym



Rys. 6.12. Elektrody palczaste 75/75 μm na podłożu LTCC



Rys. 6.13. Elektrody palczaste 50/50 μm na podłożu alundowym



Rys. 6.14. Elektrody palczaste 50/50 μm na podłożu LTCC

Pomiary wykazały bardzo dużą zgodność geometrii wytworzonych elektrod z projektem. Dokładniejsze rozważania, dotyczące zastosowania lasera do precyzyjnego formowania mikrostruktur, zamieścił autor omawiając planarne rezystory dwuelektrodowe nacinane wiązką laserową. Ale w przypadku kondensatorów palczastych pojawiają się specyficzne problemy. Przy tej samej powierzchni wartości ich pojemności są wyraźnie mniejsze niż w tradycyjnym kondensatorze kanapkowym. W celu uzyskania jej akceptowalnych wartości należy wytworzyć elektrody o wielu długich palcach, wykonanych w niewielkim odstępnie. Zwiększa to ryzyko zwarć między elektrodami przy niewystarczającym cięciu lub też odcięciu palca elektrody przy nadmiernym przecinaniu. Przy realizacji niniejszej rozprawy autor miał do czynienia z pierwszą sytuacją, szczególnie w przypadku struktur zagrzebanych, gdzie nacinano warstwę wysuszoną.

6.5. Parametry elektryczne

Charakterystyki elektryczne kondensatorów mierzono w zakresie 1 kHz÷30 MHz metodą spektroskopii impedancyjnej [112,160,189]. Wykorzystano analizator impedancji Agilent 4292A. Pomiary prowadzono w temperaturach z zakresu 25°C÷145°C. Na podstawie zmierzonych widm wyznaczono pojemność C_p i stratność $tg\delta$ elementów testowych przy zastosowaniu równoległego modelu zastępczego. Obliczono również temperaturowy współczynnik pojemności TWC (wzór 6.1). Parametry te zamieszczono w tabelach 6.1-6.4. Natomiast charakterystyki częstotliwościowe przedstawiono na rysunkach 6.15-6.26 (przyjęto oznaczenia: LTCC-C – struktury współwypalane, LTCC-P – wypalane oddzielnie).

$$TWC = \frac{C_p(125^\circ C) - C_p(25^\circ C)}{C_p(25^\circ C) \times 100} \times 10^6 \text{ [ppm/}^\circ\text{C]} \quad (6.1)$$

Właściwości elektryczne kondensatorów są wyraźnie powiązane z technologią wykonania. Stosunek pojemności elementów wykonanych z pasty ESL4164 do pojemności identycznych struktur z dielektrykiem DP5674 waha się w zakresie 1,5÷3. Odpowiada to w przybliżeniu stosunkowi nominalnych przenikalności elektrycznych obu past. W przybliżeniu zachowana jest także relacja wartości pojemności kondensatorów kanapkowych o różnych wymiarach. Czysty efekt geometryczny powinien skutkować szesnaście razy większą pojemnością elementów 2×2 mm² w porównaniu z kondensatorami 0,5×0,5 mm². W rzeczywistości uzyskiwano wartości z zakresu 10÷13. Można to powiązać z relatywnie większym wpływem rozplywu pasty podczas sitodruku na wymiary mniejszego elementu. Jak pokazano w rozdz. 3, rzeczywiste wymiary struktury nanoszonej sitodrukiem są większe niż wzoru na

sicie. Wzrost efektywnej powierzchni kondensatora będzie zatem większy przy jego mniejszych rozmiarach.

Tab. 6.1. Pojemność i stratność kondensatorów kanapkowych

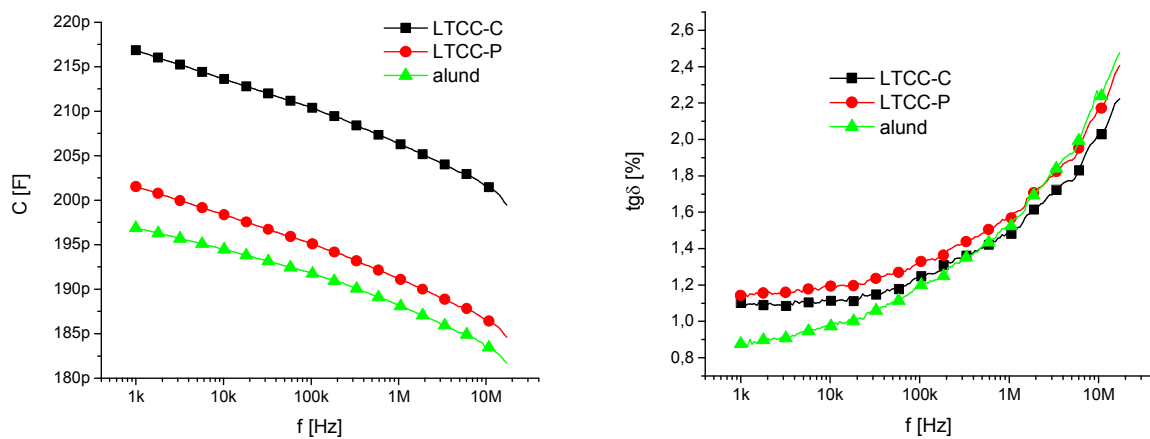
		f = 1 kHz			f = 10 MHz					
		LTCC współ- wypalane	LTCC wypalane oddzielnie	Al ₂ O ₃	LTCC współ- wypalane	LTCC wypalane oddzielnie	Al ₂ O ₃			
mm ²	0,5×0,5	C _p [pF]	16,8	16,9	18,0	15,6	15,6	16,8	963/4164	
		tgδ [%]	0,9	1,3	1,0	2,0	2,1	2,2		
	2×2	C _p [pF]	216	198	198	200	183	185		
		tgδ [%]	1,1	1,1	0,9	2,0	2,2	2,3		
	0,5×0,5	C _p [pF]	12,0	12,7	8,5	11,4	12,1	8,0		6146/5674
		tgδ [%]	3,5	0,7	1,0	0,9	1,2	1,5		
	2×2	C _p [pF]	121	137	97	115	131	92		
		tgδ [%]	3,6	0,6	1,4	0,8	1,2	1,4		
	0,5×0,5	C _p [pF]	-	20,9	22,4	-	19,2	20,6	9912/4164	
		tgδ [%]	-	1,1	0,9	-	2,8	2,8		
	2×2	C _p [pF]	-	244	249	-	225	228		
		tgδ [%]	-	0,8	0,8	-	2,8	3,3		
0,5×0,5	C _p [pF]	-	5,9	6,3	-	5,7	6,1	9912/5674		
	tgδ [%]	-	1,1	1,3	-	0,9	1,0			
2×2	C _p [pF]	-	71	72	-	69	69			
	tgδ [%]	-	0,7	0,9	-	0,9	0,9			

Tab. 6.2. Zmiany parametrów kondensatorów kanapkowych 2×2 mm² w funkcji temperatury

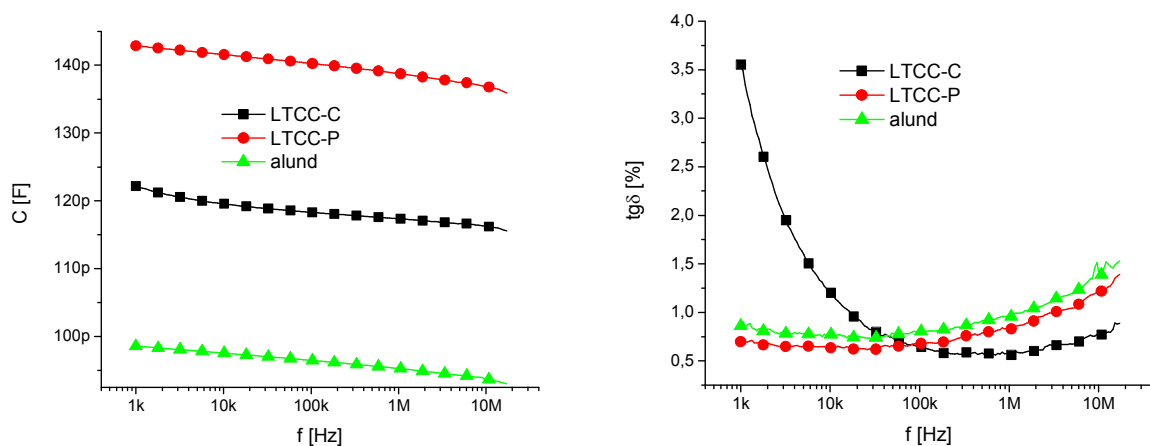
		f = 1 kHz			f = 10 MHz			
		LTCC współ- wypalane	LTCC wypalane oddzielnie	Al ₂ O ₃	LTCC współ- wypalane	LTCC wypalane oddzielnie	Al ₂ O ₃	
C _p (25°C)	[pF]	222	192	197	206	178	183	963/4164
TWC	[ppm/°C]	870	690	540	1100	1260	1040	
tgδ (25°C)	[%]	1,1	1,1	0,9	2,0	2,1	2,2	
tgδ (125°C)	[%]	0,8	0,4	0,5	1,4	0,9	1,4	
C _p (25°C)	[pF]	113	142	100	108	136	94	6146/5674
TWC	[ppm/°C]	400	470	1100	20	530	970	
tgδ (25°C)	[%]	3,0	0,6	1,0	0,8	1,2	1,4	
tgδ (125°C)	[%]	10,5	1,0	2,9	0,7	1,0	1,2	

Kombinacja pasty dielektrycznej i przewodzącej oraz wariant konstrukcyjny kondensatora w różny sposób wpływały na jego właściwości. Elementy planarne charakteryzowały się znacznie mniejszymi pojemnościami w porównaniu ze strukturami kanapkowymi, 5÷10 razy

przy powierzchni większej o około 50% (z porównania elementów kanapkowych $2 \times 2 \text{ mm}^2$ i planarnych $2,5 \times 2,5 \text{ mm}^2$). W przypadku konstrukcji kanapkowej największe pojemności uzyskano dla struktur zagrzebanych w LTCC. Pojemności elementów powierzchniowych na wypalonym podłożu LTCC i na alundzie były praktycznie takie same w przypadku pasty dielektrycznej ESL4164. Natomiast pojemności kondensatorów z dielektrykiem DP5674 były większe w przypadku podłoża alundowego. Użycie elektrod z pasty srebrowej ESL9912A powodowało wzrost pojemności kondensatorów z dielektrykiem ESL4164 i spadek dla struktur z dielektrykiem DP5674. W obu przypadkach zastosowanie elektrod srebrowych zmniejszało wpływ rodzaju podłoża na charakterystyki częstotliwościowe kondensatorów kanapkowych.



Rys. 6.15. Charakterystyki częstotliwościowe kondensatorów kanapkowych $2 \times 2 \text{ mm}^2$ - dielektryk ESL4164, elektrody ESL963



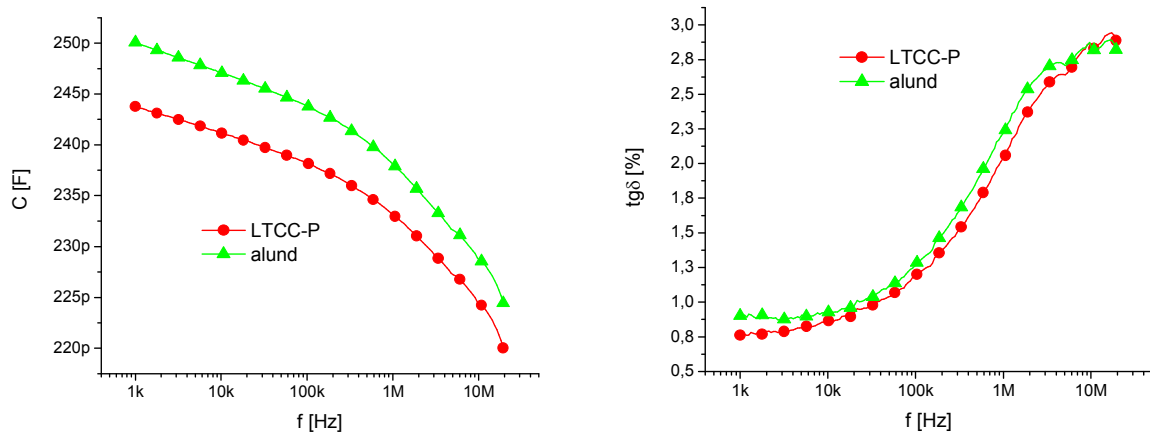
Rys. 6.16. Charakterystyki częstotliwościowe kondensatorów kanapkowych $2 \times 2 \text{ mm}^2$ - dielektryk DP5674, elektrody DP6146

Nieco inaczej zachowywały się kondensatory planarne (palczaste). Rodzaj podłoża silniej oddziaływał na właściwości elementów z dielektrykiem ESL4164, odwrotnie niż poprzednio. Ponadto na parametry tych struktur wyraźniejszy wpływ miał materiał elektrod. Charakteryzujące się najwyższymi pojemnościami struktury na wypalonym podłożu LTCC wykazywały wyraźny spadek ich wartości przy zamianie elektrod PdAg na czyste Ag. W przypadku pasty kondensatorowej DP5674 materiał elektrod i rodzaj podłoża miał mniejsze znaczenie. Większa grubość dielektryka - podwójny nadruk wobec pojedynczego - skutkowałą oczywistym wzrostem pojemności, rzędu 20%÷50%. Szczególnie małe zmiany stwierdzono dla struktur DP5674 z elektrodami DP6146, co można tłumaczyć wzrostem przenikalności obszarów dielektryka między palcami elektrod, przez które głównie zamykają się linie pola. Wkład górnej części warstwy byłby wtedy minimalizowany.

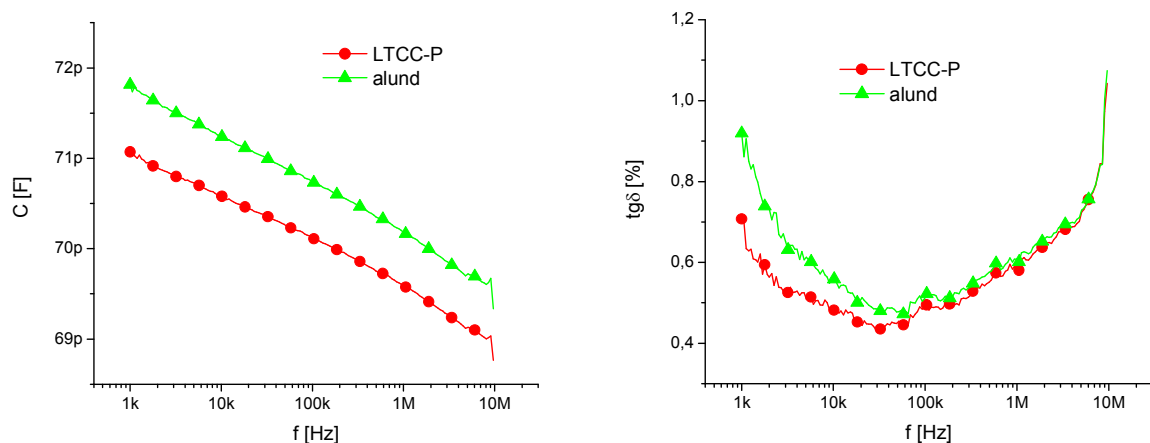
Wpływ podłoża wyraźniej uwidaczniał się dla pasty ESL4164. Przy elektrodach PdAg ceramika LTCC pozwalała na uzyskanie wyższych pojemności, zaś użycie elektrod Ag prowadziło do większych pojemności struktur na alundzie. Kondensatory z dielektrykiem DP5674 osiągały bardzo zbliżone wartości pojemności na obu podłożach.

Stratność kondensatorów testowych, pomijając struktury zdefektowane, mieściła się w zakresie 0,3%÷3,6%, co zgadza się z wartościami katalogowymi [181,182]. Mniejsze wartości zmierzono dla pasty DP5674, zwłaszcza dla kondensatorów kanapkowych. Dla tej konfiguracji głównym czynnikiem wpływającym na stratność był dielektryk. Z wyjątkiem struktur DP5674/DP6146, gdzie elementy zagrzebane wykazywały wyraźnie większą stratność niż struktury na wypalonym LTCC i alundzie, podłoże nieznacznie zmieniało współczynnik strat. Elektrody srebrowe powodowały dość znaczący wzrost strat dla kondensatorów ESL4164 i niewielki spadek dla elementów wykonanych przy użyciu drugiej pasty dielektrycznej.

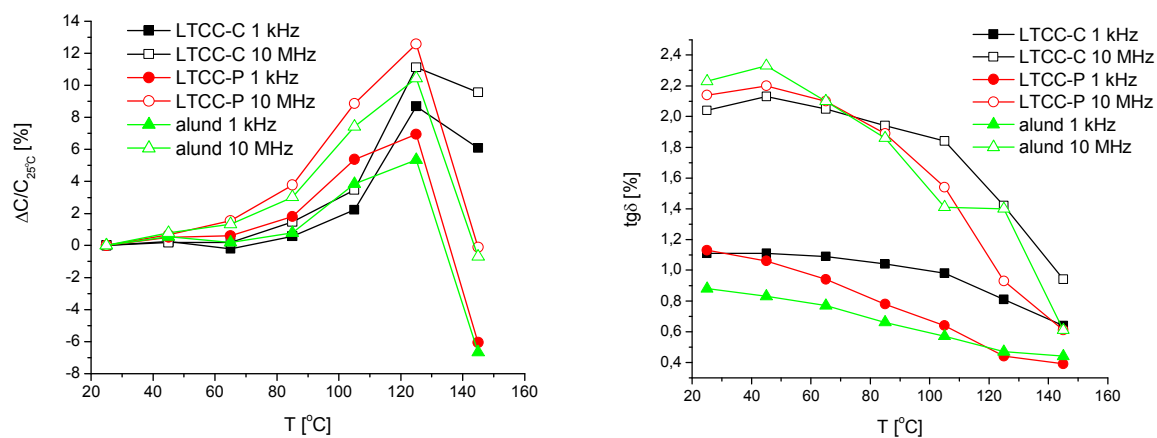
Kondensatory planarne wykazywały większą dobroć niż kanapkowe, szczególnie dla pasty ESL4164. Wpływ podłoża oraz elektrod był tutaj niejednoznaczny. Dla różnych wariantów technologicznych obserwowano zarówno wzrost jak i spadek stratności. Także grubość warstwy nie decydowała o jakości kondensatora - w pewnych przypadkach elementy z dielektrykiem drukowanym dwukrotnie były lepsze, w innych gorsze, bądź też nie widać było różnicy.



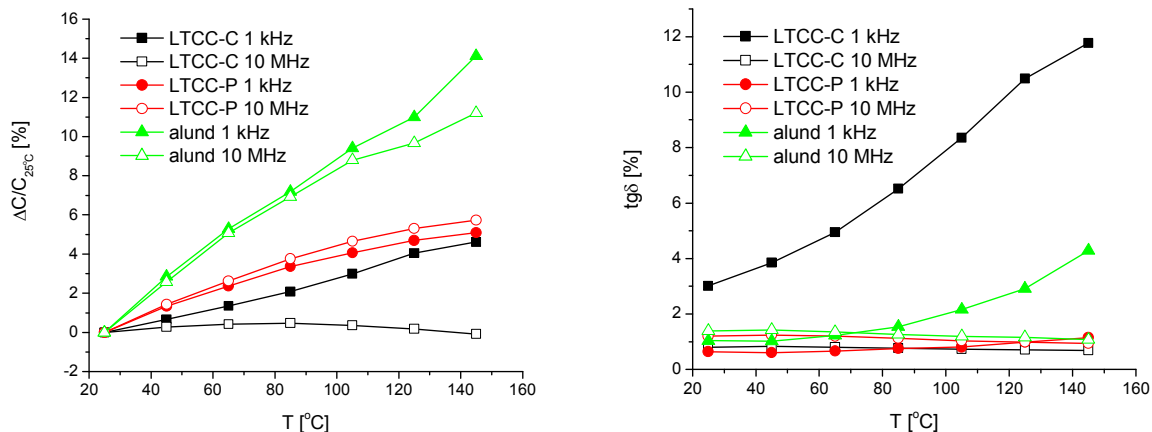
Rys. 6.17. Charakterystyki częstotliwościowe kondensatorów kanapkowych 2×2 mm²- dielektryk ESL4164, elektrody ESL9912A



Rys. 6.18. Charakterystyki częstotliwościowe kondensatorów kanapkowych 2×2 mm²- dielektryk DP5674, elektrody ESL9912A



Rys. 6.19. Charakterystyki temperaturowe kondensatorów kanapkowych 2×2 mm² - dielektryk ESL4164, elektrody ESL963



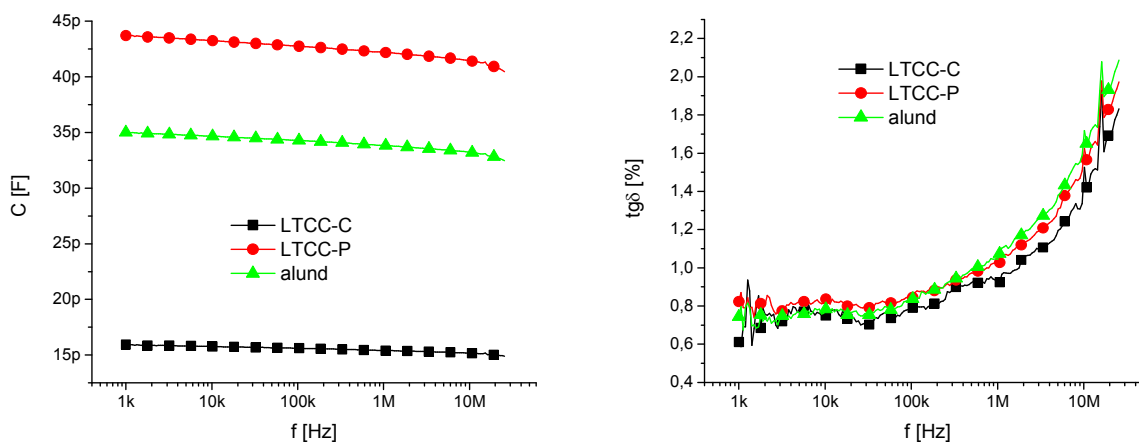
Rys. 6.20. Charakterystyki temperaturowe kondensatorów kanapkowych 2×2 mm² - dielektryk DP5674, elektrody DP6146

Tab. 6.3. Parametry kondensatorów planarnych 50/50 μm (struktury zagrzebane 120/80μm)

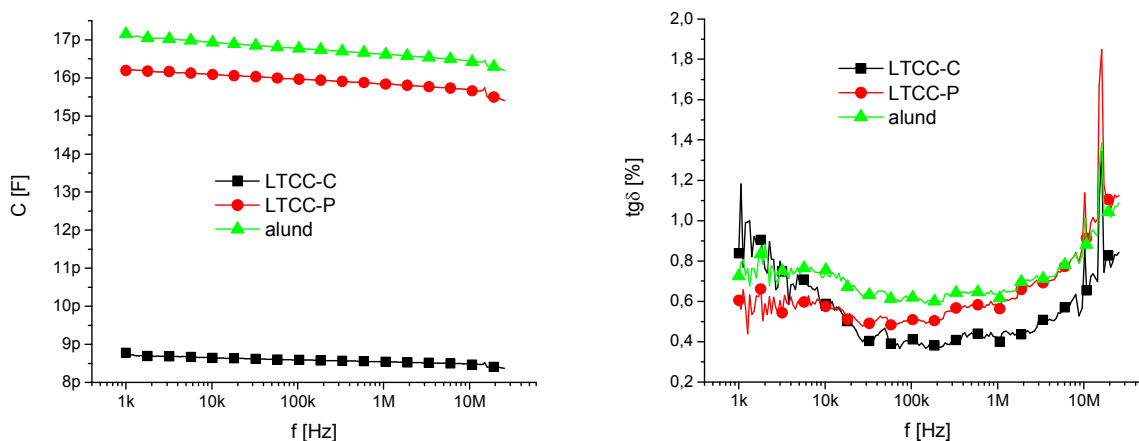
		f = 1 kHz			f = 10 MHz				
		LTCC współ- wypalane	LTCC wypalane oddzielnie	Al ₂ O ₃	LTCC współ- wypalane	LTCC wypalane oddzielnie	Al ₂ O ₃		
krotność nadruku	2x	C _p [pF]	-	44,1	33,8	-	41,8	32,0	963/4164
		tgδ [%]	-	0,8	0,7	-	1,6	1,7	
	1x	C _p [pF]	16,0	29,5	33,8	15,2	28,3	26,3	6146/5674
		tgδ [%]	0,7	0,9	1,4	1,5	1,3	1,4	
	2x	C _p [pF]	-	16,3	17,0	-	15,7	16,4	9912/4164
		tgδ [%]	-	0,6	0,7	-	1,1	1,0	
	1x	C _p [pF]	9,0	14,1	17,0	8,7	13,5	12,3	9912/5674
		tgδ [%]	0,9	1,1	1,1	0,9	1,3	1,1	
	2x	C _p [pF]	-	29,1	34,0	-	27,8	31,9	9912/4164
		tgδ [%]	-	0,6	0,8	-	1,5	2,2	
	1x	C _p [pF]	-	20,6	26,5	-	19,7	24,9	9912/5674
		tgδ [%]	-	0,7	0,7	-	1,4	2,2	
	2x	C _p [pF]	-	16,9	18,8	-	16,2	18,1	9912/5674
		tgδ [%]	-	1,0	0,8	-	0,9	0,9	
	1x	C _p [pF]	-	12,4	12,8	-	12,1	12,4	9912/5674
		tgδ [%]	-	0,3	0,6	-	0,8	1,0	

Tab. 6.4. Zmiany parametrów kondensatorów planarnych drukowanych dwukrotnie 50/50 μm (struktury współwypalane 120/80 μm drukowane jednokrotnie) w funkcji temperatury

	f = 1 kHz			f = 10 MHz			
	LTCC współwypalane	LTCC wypalane oddzielnie	Al ₂ O ₃	LTCC współwypalane	LTCC wypalane oddzielnie	Al ₂ O ₃	
C _p (25°C) [pF]	15,3	43,7	35,0	14,5	41,4	33,2	963/4164
TWC [ppm/°C]	610	660	860	790	830	1100	
tgδ (25°C) [%]	0,7	0,6	0,9	1,5	1,5	1,6	
tgδ (125°C) [%]	0,4	0,6	0,5	1,1	1,1	0,7	6146/5674
C _p (25°C) [pF]	8,7	16,1	16,9	8,4	15,6	16,2	
TWC [ppm/°C]	-50	460	1160	-10	510	1050	
tgδ (25°C) [%]	1,0	0,6	0,8	0,9	1,1	1,0	9912/4164
tgδ (125°C) [%]	1,2	0,5	1,7	0,8	1,0	0,9	
C _p (25°C) [pF]	-	28,6	-	-	27,3	-	
TWC [ppm/°C]	-	650	-	-	840	-	
tgδ (25°C) [%]	-	0,7	-	-	1,5	-	
tgδ (125°C) [%]	-	0,7	-	-	0,7	-	



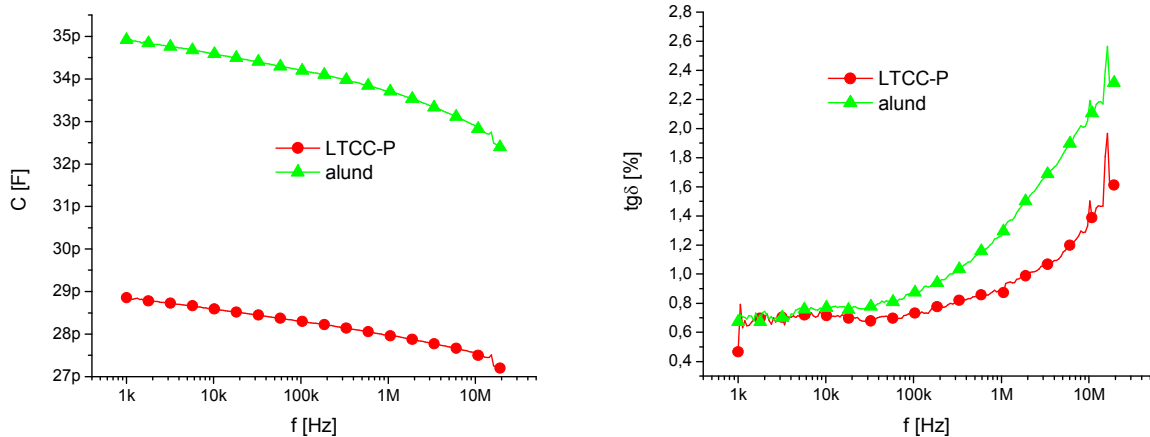
Rys. 6.21. Charakterystyki częstotliwościowe kondensatorów planarnych 50/50 μm - dielektryk ESL4164, elektrody ESL963



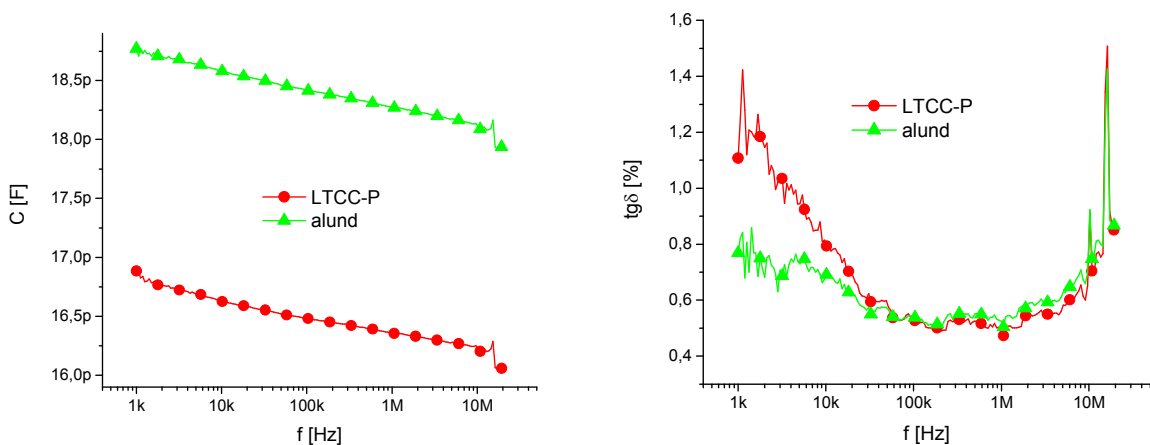
Rys. 6.22. Charakterystyki częstotliwościowe kondensatorów planarnych 50/50 μm - dielektryk DP5674, elektrody DP6146

We wszystkich wariantach technologicznych obserwowano nieznaczny spadek pojemności w funkcji częstotliwości (rzędu 3%÷8%) przy wzroście częstotliwości od 1 kHz do 10 MHz. Mniejsze zmiany wystąpiły dla dielektryka DP5674. Konstrukcja planarna również powodowała zmniejszanie zależności pojemności w funkcji częstotliwości. Przebieg zmian współczynnika strat od częstotliwości zasadniczo był zależny od dielektryka. Stratność elementów otrzymanych na bazie pasty ESL4164 rosła niemal monotonicznie wraz z częstotliwością. Natomiast krzywa uzyskana dla kondensatorów z dielektrykiem DP5674 posiadała wyraźne minimum w zakresie 100 kHz÷1 MHz. Rodzaj podłoża tylko w pewnym stopniu wpływał na przebieg charakterystyk. Wyjątkiem były struktury zagrzebane DP5674/DP6146, dla których zakres i kierunek zmian stratności wyraźnie odbiegał od krzywych uzyskanych dla pozostałych dwóch rodzajów podłoża. Metalurgia elektrod miała większe znaczenie w przypadku kondensatorów kanapkowych, gdzie zmiany kształtu charakterystyk był znaczący; efekt ten był znacznie słabszy dla elementów planarnych.

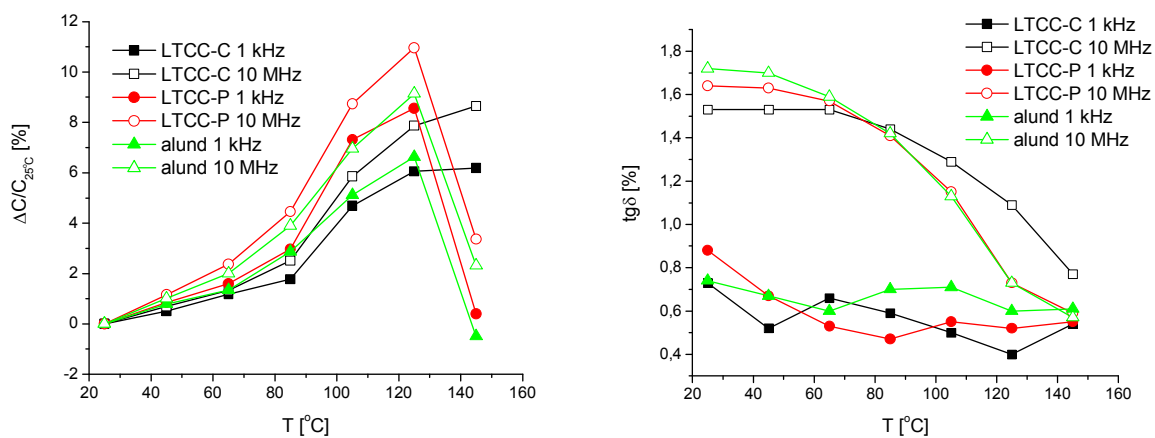
Określono także zależność parametrów kondensatorów od temperatury w zakresie od 25°C do 145°C (rys. 6.25 i 6.26). Zmiany pojemności były duże, obliczone wartości temperaturowego współczynnika pojemności TWC mieściły się zasadniczo w granicach 400÷1200 ppm/°C, z wyjątkiem współwypalanych elementów DP5674/DP6146. Osiągnięto tam TWC o wartościach zaledwie 20÷50 ppm/°C. Uzyskane wartości zgodne są z danymi katalogowymi past [187,188]. Generalnie pasta DP5674 charakteryzowała się mniejszymi wartościami TWC niż ESL4164. Ponadto w jej przypadku mniejszy był wpływ konstrukcji elementu, chociaż i dla drugiej pasty nie było on znaczny.



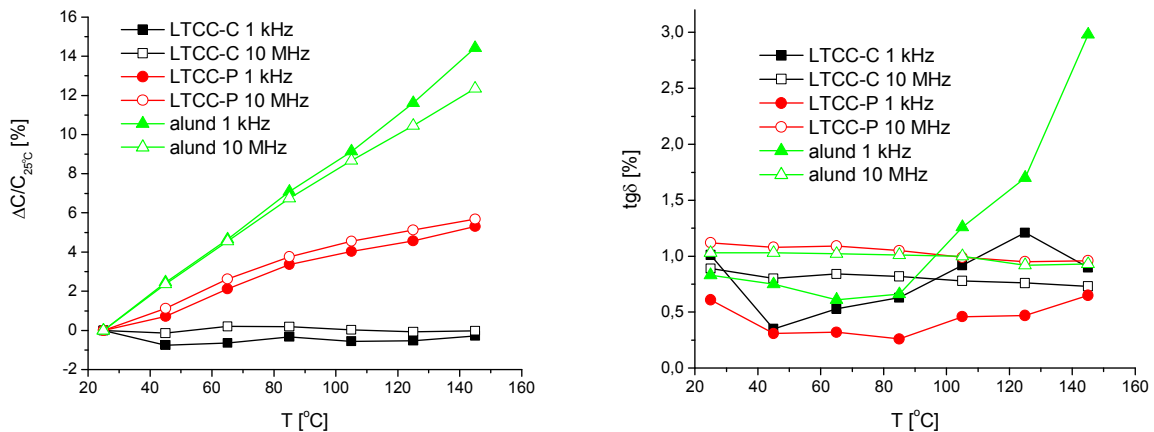
Rys. 6.23. Charakterystyki częstotliwościowe kondensatorów planarnych 50/50 μm - dielektryk ESL4164, elektrody ESL9912A



Rys. 6.24. Charakterystyki częstotliwościowe kondensatorów planarnych 50/50 μm - dielektryk DP5674, elektrody ESL9921A



Rys. 6.25. Charakterystyki temperaturowe kondensatorów planarnych 50/50 μm - dielektryk ESL4164, elektrody ESL963



Rys. 6.26. Charakterystyki temperaturowe kondensatorów planarnych 50/50 μm - dielektryk DP5674, elektrody DP6146

Kształt krzywej zależności pojemności od temperatury zależał bezpośrednio od rodzaju dielektryka. Przenikalność kompozycji ESL4164 rosła aż do temperatury około 125°C, po czym następował jej raptowny spadek, co było związane z osiągnięciem punktu Curie, kiedy to następuje przejście materiału ze stanu ferroelektrycznego w paraelektryczny. Dla pasty DP5674 był to wzrost w przybliżeniu liniowy w badanym zakresie temperatur. Ponadto dla tej pasty niewielki był wpływ częstotliwości sygnału pomiarowego, natomiast silny - podłoża (najlepsze właściwości uzyskano dla ceramiki alundowej, najlepsze dla współwypalanych struktur LTCC). Dla pasty ESL4164 oba te czynniki miały mniej więcej jednakową wagę. Przy wyższych częstotliwościach TWC zwiększał się niezależnie od pozostałych czynników. Zastosowanie podłoża alundowego skutkowało najwyższymi wartościami TWC spośród wszystkich elementów, odstępstwem były tu struktury kanapkowe, gdzie w zakresie niższych częstotliwości TWC osiągał wartości najmniejsze.

Stratność kondensatorów z dielektrykiem ESL4164 zmniejszała się w funkcji temperatury we wszystkich przypadkach, dla dielektryka DP5674 przy wyższych częstotliwościach również następował jej spadek, jakkolwiek mniejszy. Dla odmiany, w dolnym zakresie częstotliwości stratność rosła z temperaturą, zwłaszcza dla podłoża alundowego oraz LTCC w wariantcie współwypalania. Największy wzrost, z 3% do 12% odnotowano dla struktur kanapkowych na podłożu LTCC. Konstrukcja elementu zasadniczo nie wpływała na charakterystyki temperaturowe.

6.6. Stabilność długoczasowa właściwości elektrycznych

Podobnie jak w przypadku innych elementów również tu zbadano stabilność długoczasową. Starzenie termiczne prowadzono w dwóch temperaturach - 150°C oraz 250°C, w obu przypadkach przez 275 godzin. Następnie porównano charakterystyki częstotliwościowe elementów przed i po starzeniu. Obliczone zmiany parametrów kondensatorów zamieszczono w tabelach 6.5-6.8.

Niemal wszystkie testowane elementy przeszły pomyślnie starzenie. Jedyne w nielicznych przypadkach nastąpiło uszkodzenie kondensatora objawiające się znacznym wzrostem stratności. Testu w wyższej temperaturze starzenia nie przeszły m.in. kondensatory DP5674/DP9912A w obu wersjach - kanapkowej i planarnej. Zmiany pojemności w większości mieściły się w zakresie $\pm 3\%$ (i praktycznie wszystkie wyniki w nieco szerszym przedziale $\pm 4,5\%$). Nieco lepszą stabilność wykazywały kondensatory kanapkowe z dielektrykiem ESL4164 oraz planarne z DP5674. Odnotowano głównie przypadki zmniejszania się pojemności. Jednak zachodziły również zmiany przeciwne, zwykle dla kondensatorów kanapkowych. W przypadku współczynnika strat pojawiał się zarówno wzrost jak i spadek (zwykle niewielki) w zależności od wariantu wykonania struktury testowej.

Tab. 6.5. Zmiana parametrów kondensatorów kanapkowych 2×2 mm² po starzeniu termicznym - pasta dielektryczna ESL4164

		f	150°C				250°C			
			C _p [pF]	$\Delta C_p/C_p$ [%]	tg δ [%]	tg δ' [%]	C _p [pF]	$\Delta C_p/C_p$ [%]	tg δ [%]	tg δ' [%]
963/4164	LTCC współ- wypalane	1 kHz	214	0,7	1,1	1,0	217	0,7	1,1	1,0
		10 MHz	198	1,2	2,0	2,1	202	1,2	2,0	2,1
	LTCC wypalane oddzielnie	1 kHz	207	-1,1	1,2	1,1	192	-2,0	1,1	1,3
		10 MHz	192	-0,6	2,2	2,2	178	-0,8	2,2	2,0
	Al ₂ O ₃	1 kHz	211	-0,9	0,9	0,9	192	-4,1	0,9	0,9
		10 MHz	196	-0,7	2,3	2,2	179	-2,8	2,9	1,9
9912/4164	LTCC wypalane oddzielnie	1 kHz	245	-1,2	0,8	0,8	244	0,0	0,8	2,5
		10 MHz	225	-1,0	2,8	3,2	225	0,3	2,8	2,7
	Al ₂ O ₃	1 kHz	250	-0,9	0,8	0,8	249	-0,3	0,8	0,9
		10 MHz	229	-1,0	3,4	4,8	228	0,3	3,1	3,1

Tab. 6.6. Zmiana parametrów kondensatorów kanapkowych 2×2 mm² po starzeniu termicznym - pasta dielektryczna DP5674

		f	150°C				250°C			
			C _p [pF]	ΔC _p /C _p [%]	tgδ [%]	tgδ' [%]	C _p [pF]	ΔC _p /C _p [%]	tgδ [%]	tgδ' [%]
6146/5674	LTCC współ- wypalane	1 kHz	128	-0,3	4,2	4,4	115	-0,2	3,2	3,3
		10 MHz	121	0,0	0,8	0,9	109	0,1	0,8	0,8
	LTCC wypalane oddzielnie	1 kHz	137	-2,1	0,6	0,9	137	0,7	0,6	3,8
		10 MHz	132	-2,7	1,2	1,1	131	-1,0	1,2	1,2
	Al ₂ O ₃	1 kHz	99	-2,5	1,4	1,4	96	3,5	1,0	6,9
		10 MHz	94	-2,6	1,5	1,2	91	0,0	1,4	1,4
9912/5674	LTCC wypalane oddzielnie	1 kHz	71	2,4	0,6	0,7	71	3,9	0,7	7,3
		10 MHz	69	2,2	0,9	0,8	69	1,4	0,9	0,8
	Al ₂ O ₃	1 kHz	72	-0,2	1,0	0,7	71	6,3	0,8	14,3
		10 MHz	70	-0,5	0,9	1,1	69	-0,3	0,9	0,9

Tab. 6.7. Zmiana parametrów kondensatorów planarnych 120/80 μm (LTCC współwypalane) i 50/50 μm (pozostałe) po starzeniu termicznym - pasta dielektryczna ESL4164

		f	150°C				250°C			
			C _p [pF]	ΔC _p /C _p [%]	tgδ [%]	tgδ' [%]	C _p [pF]	ΔC _p /C _p [%]	tgδ [%]	tgδ' [%]
963/4164	LTCC współ- wypalane	1 kHz	16,9	-1,2	0,6	0,7	15,6	-0,5	0,7	0,8
		10 MHz	16,1	-0,6	1,5	1,4	14,8	-0,2	1,5	1,4
	LTCC wypalane oddzielnie	1 kHz	44,9	-4,1	0,7	0,8	43,7	-3,7	0,9	0,7
		10 MHz	42,5	-3,4	1,6	1,4	41,4	-2,7	1,6	1,3
	Al ₂ O ₃	1 kHz	29,7	-2,0	0,6	0,8	35,8	-4,3	0,7	0,7
		10 MHz	28,1	-1,6	1,7	1,5	34,0	-3,3	1,7	1,3
9912/4164	LTCC wypalane oddzielnie	1 kHz	29,9	-2,7	0,6	0,7	28,7	-3,5	0,6	0,8
		10 MHz	28,5	-1,9	1,6	1,3	27,4	-2,7	1,5	1,2
	Al ₂ O ₃	1 kHz	31,1	-2,2	0,6	0,8	35,4	-4,2	0,8	0,8
		10 MHz	29,3	-1,3	2,1	1,9	33,2	-3,2	2,2	1,8

Tab. 6.8. Zmiana parametrów kondensatorów planarnych 120/80 μm (LTCC współwypalane) i 50/50 μm (pozostałe) po starzeniu termicznym - pasta dielektryczna DP5674

		f	150°C				250°C			
			C_p [pF]	$\Delta C_p/C_p$ [%]	$\text{tg}\delta$ [%]	$\text{tg}\delta'$ [%]	C_p [pF]	$\Delta C_p/C_p$ [%]	$\text{tg}\delta$ [%]	$\text{tg}\delta'$ [%]
6146/5674	LTCC współwypalane	1 kHz	9,5	-1,4	1,0	1,7	8,7	-2,0	1,0	0,6
		10 MHz	9,2	-0,2	0,8	0,6	8,4	-0,7	0,9	0,6
	LTCC wypalane oddzielnie	1 kHz	16,4	-0,9	0,5	0,7	16,2	-1,7	0,6	0,6
		10 MHz	15,9	-0,9	1,1	0,8	15,6	-1,4	1,1	0,8
	Al_2O_3	1 kHz	17,0	-0,5	0,6	0,9	17,0	2,5	0,8	3,9
		10 MHz	16,4	-0,9	1,0	0,7	16,3	0,6	1,0	0,9
9912/5674	LTCC wypalane oddzielnie	1 kHz	17,5	-7,4	3,2	0,7	16,6	-4,8	1,0	1,2
		10 MHz	16,7	-5,5	0,9	0,5	16,0	-3,8	0,9	0,6
	Al_2O_3	1 kHz	-	-	-	-	18,8	22,9	0,8	17,0
		10 MHz	-	-	-	-	18,1	0,6	0,9	0,9

6.7. Model zastępczy kondensatora

Na podstawie analizy charakterystyk częstotliwościowych mikrocondensatorów grubowarstwowych i LTCC zaproponowano elektryczny model zastępczy (równoważny) badanych struktur, przedstawiony na rys. 6.27. W modelu tym występują następujące elementy:

R_s - rezystancja szeregową warstw przewodzących,

R_1, CPE_1 - parametry warstwy przejściowej między dielektrykiem i elektrodami,

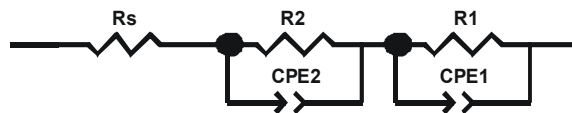
R_2, CPE_2 - parametry objętościowe warstwy dielektrycznej,

gdzie R - rezystancja, CPE - element stałofazowy o admitancji Y opisanej równaniem:

$$Y = Q(j\omega)^n \quad (6.2)$$

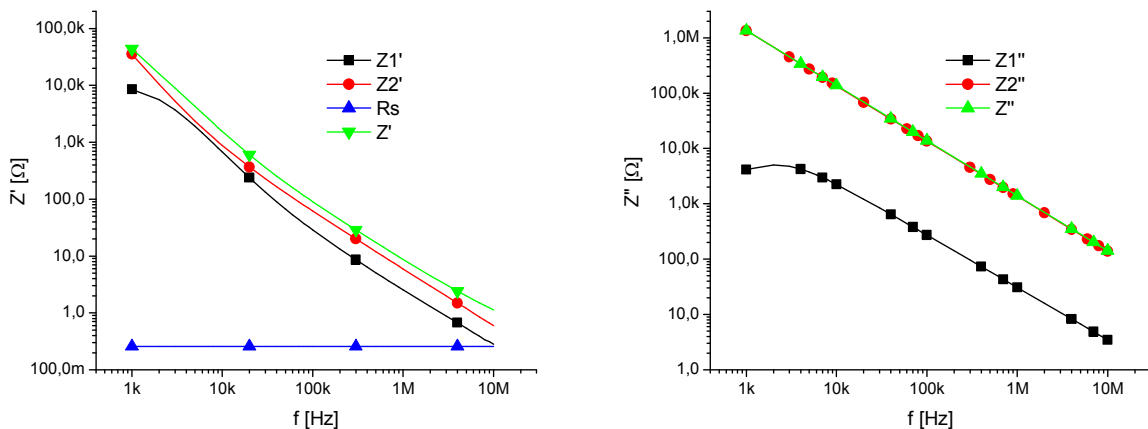
gdzie ω - pulsacja, j - jednostka urojona, Q, n - stałe [189,190].

Stosując ten model równoważny i oprogramowanie ZView autor na podstawie charakterystyk częstotliwościowych wyznaczył parametry modelu dla różnych wariantów wykonania kondensatorów (tab. 6.9). Przeanalizował przy tym wpływ poszczególnych składowych modelu na widma impedancyjne Z' i Z'' . Przykłady takiej analizy dla struktur kanpkowych pokazują rys. 6.28 i 6.29.

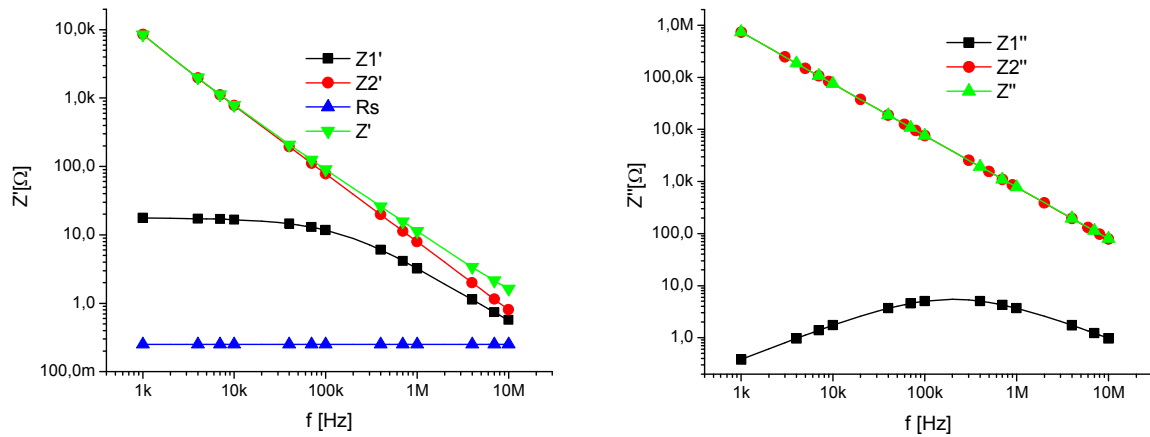


Rys. 6.27. Ogólny model zastępczy badanych kondensatorów

Jak widać, w zakresie małych częstotliwości wpływ rezystancji szeregowej jest pomijalnie mały. Znaczący staje się dopiero przy częstotliwościach zbliżonych do 10 MHz, kiedy wartość R_s staje się porównywalna z impedancjami Z_1 i Z_2 członów modelu reprezentujących dielektryk. W obu przedstawionych powyżej przypadkach o części urojonej impedancji praktycznie decyduje tylko drugi człon modelu. Wkład wnoszony przez pierwszy z nich jest co najmniej dwa rzędy mniejszy, szczególnie dla struktur wykonanych przy pomocy pasty ESL4164. Dla kondensatora DP5674 część rzeczywista impedancji elementu jest wypadkową części rzeczywistych obu składowych Z_1 i Z_2 , które są mniej więcej tego samego rzędu. Odmienna sytuacja ma miejsce dla drugiej pasty dielektrycznej - tutaj dominuje drugi człon, pierwszy zaczyna odgrywać rolę dopiero przy wyższych częstotliwościach. Zasadniczo różnice dotyczą w tym przypadku zachowania się składowej Z_1 , reprezentującej międzypowierzchnię dielektryk-elektroda. Dla struktury DP5674 wykładniki n obu członów modelu są zbliżone do 1 (zwłaszcza dla Z_2). Zatem Z_2 jest praktycznie "czystą" pojemnością. W przypadku pasty ESL4164 n_1 przyjmuje wartość ok. 0,7, równocześnie Q_1 rośnie o dwa rzędy wielkości. Skutkuje to zmniejszeniem impedancji Z_1 oraz odmiennym jej zachowaniem w funkcji częstotliwości niż Z_2 .



Rys. 6.28. Wpływ poszczególnych składowych modelu zastępczego na jego charakterystyki częstotliwościowe, struktura kanapkowa DP5674/DP6146, podłoże LTCC, współwypalanie



Rys. 6.29. Wpływ poszczególnych składowych modelu zastępczego na jego charakterystyki częstotliwościowe, struktura kanapkowa ESL4164/ESL963, podłoże LTCC, współwypalanie

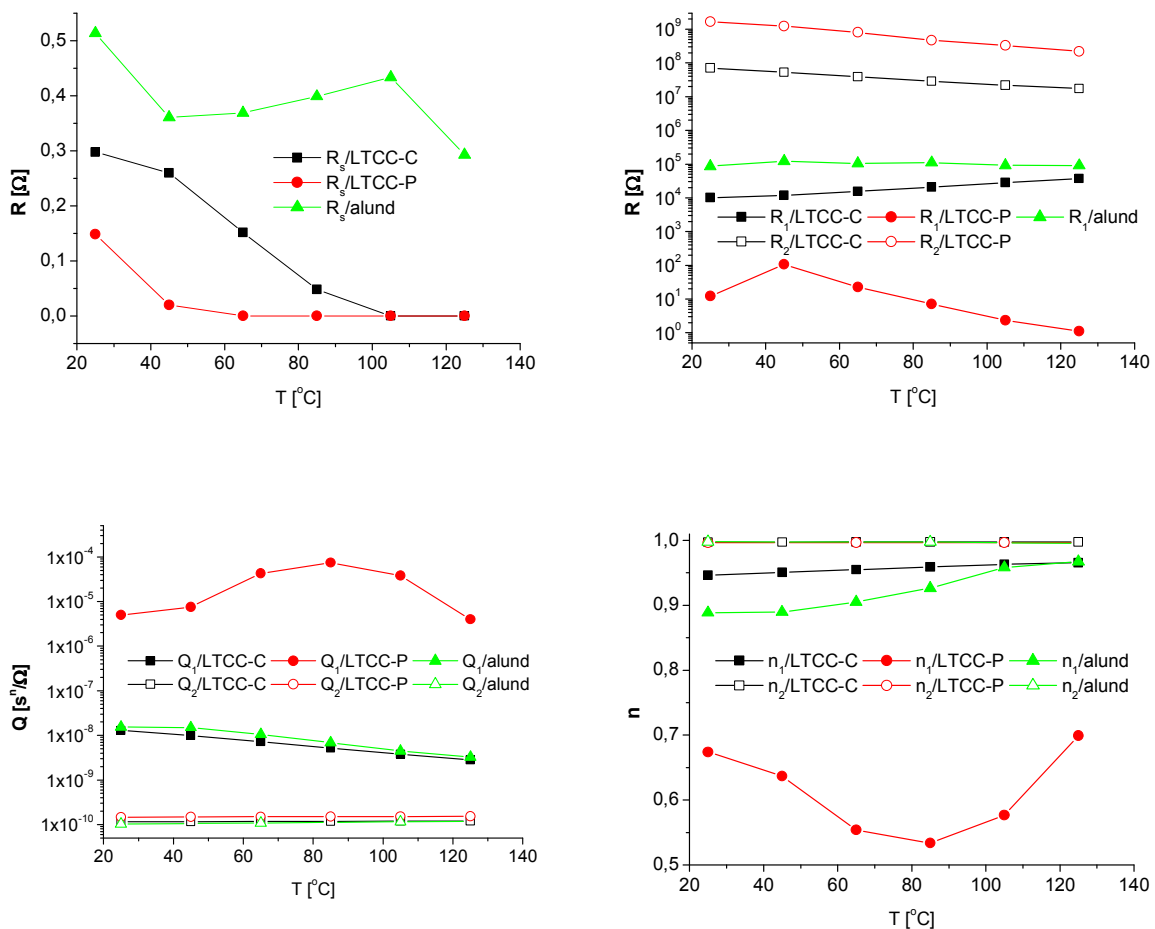
Tab. 6.9. Parametry modelu zastępczego kondensatora dla różnych wariantów technologii (LTCC-C - struktury LTCC współwypalane, LTCC-P - wypalane osobno)

		R_s [Ω]	R_1 [Ω]	Q_1 [s ⁿ¹ /Ω]	n_1	R_2 [Ω]	Q_2 [s ⁿ² /Ω]	n_2	
kanapkowe	LTCC-C	0,26	1,10E+04	1,15E-08	0,949	6,11E+07	1,21E-10	0,997	6146/5674
	LTCC-P	0,10	1,46E+01	6,01E-06	0,660	1,72E+09	1,41E-10	0,996	
	alund	0,56	1,36E+05	1,08E-08	0,906	-	1,00E-10	0,998	
	LTCC-C	0,25	1,78E+01	3,11E-06	0,698	5,87E+08	2,28E-10	0,993	963/4164
	LTCC-P	-	4,64E+01	1,00E-05	0,614	6,77E+08	2,11E-10	0,993	
	alund	-	5,24E+01	6,05E-06	0,628	-	2,11E-10	0,994	
planarne	LTCC-P	0,57	7,11E+03	8,53E-08	0,779	2,00E+09	4,53E-11	0,997	963/4164
	alund	0,57	9,25E+03	7,16E-08	0,766	2,08E+09	3,45E-11	0,997	

Analiza danych z tab. 6.9 potwierdza spostrzeżenie, że impedancja Z_1 odpowiada efektem kontaktowym, natomiast Z_2 reprezentuje właściwości samej warstwy dielektrycznej. Wartości n_2 dla wszystkich struktur zawierają się w przedziale 0,993÷0,997. Zatem element CPE_2 praktycznie można zastąpić kondensatorem. Ponadto warto zauważyć, że Q_2 jest 2 do 5 rzędów mniejsze od Q_1 i przyjmuje wartości odpowiadające zmierzonym pojemnościom C_p kondensatorów (tab. 6.1 i 6.3). Element ten decyduje zatem o zachowaniu części urojonej impedancji kondensatora. Sekcja składająca się z rezystora R_1 i CPE_1 może być natomiast

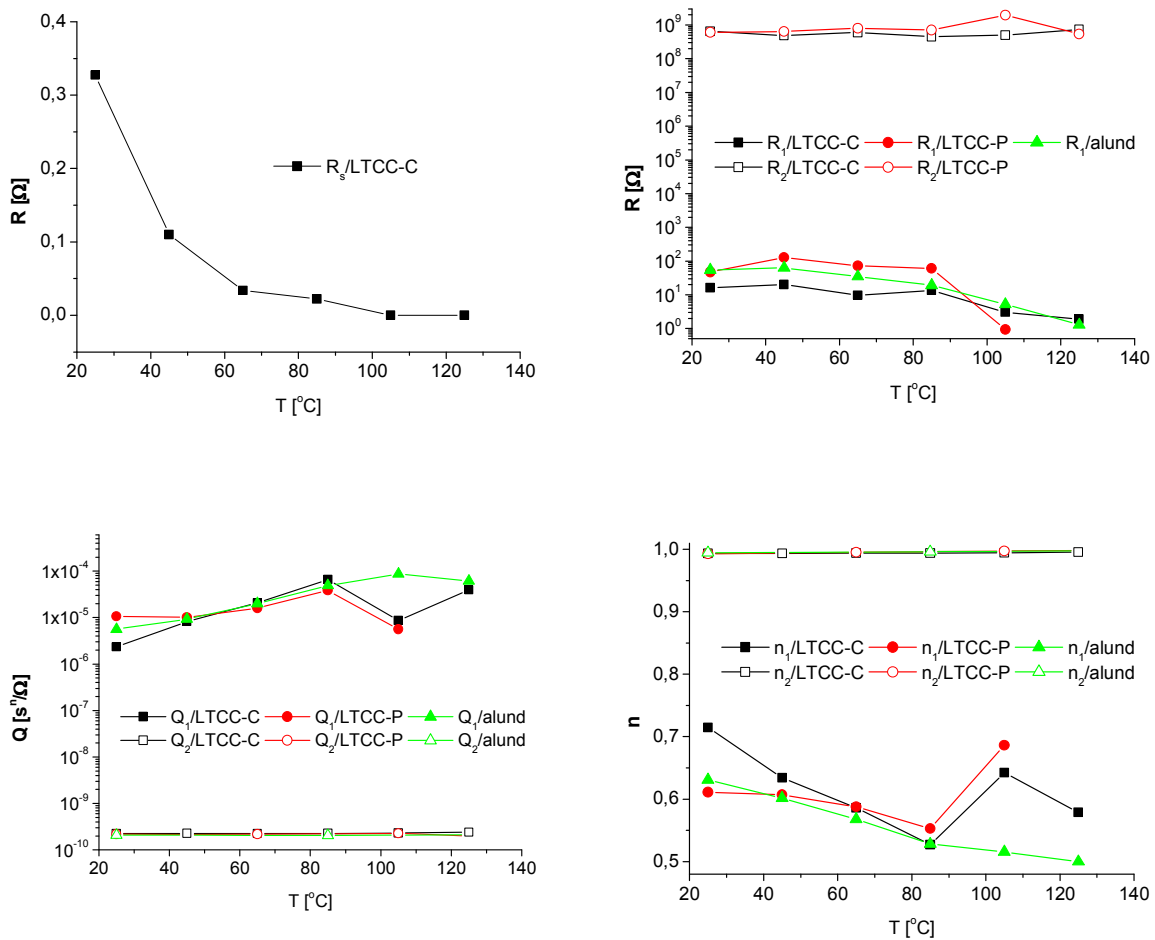
traktowana jako odpowiednik warstwy przejściowej dielektryk-elektroda i ma głównie wpływ na część rzeczywistą impedancji całkowitej. Wykładnik n_1 w większości przypadków przyjmuje wartości od 0,61 do 0,78. Jedynie dla struktur z dielektrykiem DP5674 na alundzie i na współwypalonym LTCC osiąga on odpowiednio wartości 0,91 i 0,95. Mniejszym wartościom tego wykładnika towarzyszy wzrost Q_1 . Oba efekty są obecne przede wszystkim w przypadku dielektryka ESL4164, przy czym w mniejszym stopniu dla konstrukcji planarnej kondensatora. Konsekwencją tego jest zależność pojemności zastępczej i stratności modelowanego tym członem obszaru od częstotliwości.

Zbadano również zmiany parametrów modelu w funkcji temperatury. Wyniki pokazano na rys. 6.30-6.32. Generalnie temperatura ma wpływ głównie na parametry składowej Z_1 . Względne zmiany wartości składowych Z_2 są znacznie mniejsze - odpowiadające im na powyższych wykresach linie w porównaniu z parametrami dotyczącymi pierwszego członu są praktycznie poziome w całym zakresie temperatur.

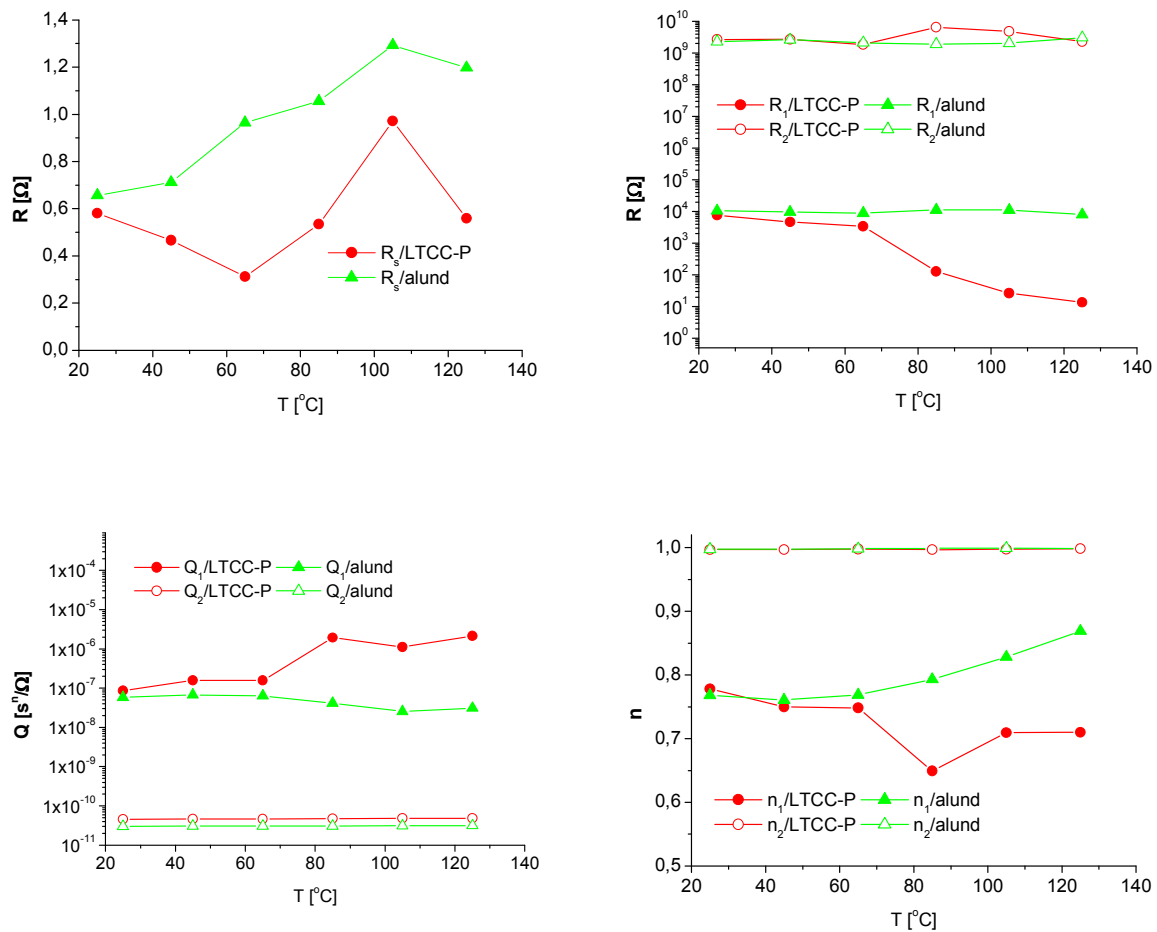


Rys. 6.30. Wpływ temperatury na parametry modelu zastępczego - struktura kanapkowa DP5674/DP6146 (LTCC-C - struktury LTCC współwypalane, LTCC-P - wypalane osobno)

Jednak należy pamiętać należy, że na impedancję całkowitą elementu, szczególnie na jego pojemność zastępczą, wpływa głównie Z_2 . Z_1 w większym stopniu decyduje o części rzeczywistej impedancji niż o urojonej, oddziałując tym samym głównie na stratność elementu. Większa zmienność parametrów tej składowej koreluje z większymi względnymi zmianami $tg\delta$ w porównaniu ze zmiennością C_p . Jest to szczególnie widoczne w przypadku parametrów Q i n , parametry R_2 charakteryzują się już większą zmiennością, aczkolwiek generalnie nie tak dużą jak R_1 .



Rys. 6.31. Wpływ temperatury na parametry modelu zastępczego - struktura kanapkowa ESL4164/ESL963 (LTCC-C - struktury LTCC współwypalane, LTCC-P - wypalane osobno)



Rys. 6.32. Wpływ temperatury na parametry modelu zastępczego - struktura planarna ESL4164/ESL963 (LTCC-P - struktury LTCC wypalane osobno)

Rezystancja R_1 zarówno rosła, jak i malała po starzeniu. Stosunkowo najmniejsze zmiany tego parametru wykazywały struktury kanapkowe z pasty ESL4164, w pozostałych przypadkach zdarzały się nawet zmiany o kilka rzędów wielkości. Podobnie zachowywał się parametr Q_1 .

Po starzeniu termicznym nadal jednak dominował wpływ członu $Q_2 - R_2$. Efekty starzenia były tutaj znacznie słabsze i dotyczyły głównie rezystancji R_2 . Dla kompozycji dielektrycznej ESL4164 obserwowano zasadniczo wzrost tego parametru dla kondensatorów kanapkowych. Natomiast dla elementów planarnych oraz struktur z pasty DP5674 wystąpiły zmiany w obu kierunkach. Ponadto w tym drugim przypadku rezystancja R_2 musiała być wprowadzona do modelu struktury, choć przed starzeniem w nim nie występowała. Można to traktować jako zmniejszenie się rezystancji z nieskończoności do wartości skończonej, co oznacza wzrost stratności. Dla wszystkich badanych struktur Q_2 zmieniało się w nieznacznym stopniu, nieco

wyraźniejsze różnice wystąpiły tylko dla kondensatorów planarnych, jakkolwiek wciąż były małe. Współczynnik n_2 pozostawał natomiast praktycznie stały.

Tab. 6.10. Wpływ starzenia termicznego na parametry modelu zastępczego - struktury kanapkowe DP5674/DP6146 (LTCC-C - struktury LTCC współwypalane, LTCC-P - wypalane osobno)

	R_s [Ω]	R_1 [Ω]	Q_1 [s^{n_1}/Ω]	n_1	R_2 [Ω]	Q_2 [s^{n_2}/Ω]	n_2		
LTCC-C	0,19	1,21E+04	9,82E-09	0,952	4,17E+07	1,34E-10	0,997	przed	150°C
	0,29	1,16E+04	8,85E-09	0,961	4,05E+07	1,33E-10	0,997	po	
	0,30	1,01E+04	1,29E-08	0,946	7,06E+07	1,16E-10	0,997	przed	250°C
	0,28	9,22E+03	1,17E-08	0,959	6,90E+07	1,16E-10	0,997	po	
LTCC-P	0,06	5,69E+03	1,94E-07	0,798	8,35E+08	1,48E-10	0,998	przed	150°C
	0,38	5,75E+01	1,83E-07	0,973	9,39E+08	1,49E-10	0,995	po	
	0,09	6,43E+03	2,22E-07	0,794	1,07E+09	1,45E-10	0,998	przed	250°C
	0,49	8,93E+03	1,68E-08	0,949	5,87E+07	1,48E-10	0,996	po	
alund	0,58	2,27E+05	6,84E-09	0,911	-	9,42E-11	0,999	przed	150°C
	0,40	7,87E+02	3,13E-08	0,967	3,65E+08	9,47E-11	0,994	po	
	0,51	8,67E+04	1,53E-08	0,889	-	1,03E-10	0,998	przed	250°C
	0,52	2,03E+04	6,19E-09	0,954	3,93E+07	1,07E-10	0,995	po	

Tab. 6.11. Wpływ starzenia termicznego na parametry modelu zastępczego - struktury kanapkowe ESL4164/ESL963 (LTCC-C - struktury LTCC współwypalane, LTCC-P - wypalane osobno)

	R_s [Ω]	R_1 [Ω]	Q_1 [s^{n_1}/Ω]	n_1	R_2 [Ω]	Q_2 [s^{n_2}/Ω]	n_2		
LTCC-C	0,33	1,63E+01	2,34E-06	0,715	6,48E+08	2,26E-10	0,994	przed	150°C
	0,49	1,45E+01	1,02E-06	0,767	9,06E+08	2,27E-10	0,994	po	
	0,28	1,68E+01	2,58E-06	0,709	5,75E+08	2,35E-10	0,993	przed	250°C
	0,52	1,48E+01	9,86E-07	0,769	8,88E+08	2,36E-10	0,994	po	
LTCC-P	-	4,75E+01	1,06E-05	0,611	6,06E+08	2,17E-10	0,993	przed	150°C
	-	5,58E+01	3,34E-05	0,557	1,56E+09	2,14E-10	0,993	po	
	-	4,49E+01	9,66E-06	0,615	7,53E+08	2,04E-10	0,993	przed	250°C
	-	4,32E+01	9,04E-05	0,504	2,24E+08	1,99E-10	0,994	po	
alund	-	4,70E+01	6,03E-06	0,630	-	2,22E-10	0,994	przed	150°C
	-	6,95E+01	1,75E-05	0,583	-	2,21E-10	0,994	po	
	-	5,44E+01	5,63E-06	0,631	-	2,07E-10	0,994	przed	250°C
	-	3,58E+01	2,31E-05	0,568	-	1,97E-10	0,995	po	

Tab. 6.12. Wpływ starzenia termicznego na parametry modelu zastępczego - struktury planarne ESL4164/ESL963 (LTCC-P - struktury LTCC wypalane osobno)

	R_s [Ω]	R_1 [Ω]	Q_1 [s^{n_1}/Ω]	n_1	R_2 [Ω]	Q_2 [s^{n_2}/Ω]	n_2		
LTCC-P	0,58	7,66E+03	8,66E-08	0,778	2,67E+09	4,61E-11	0,997	przed	150°C
	0,81	3,42E+03	1,23E-07	0,775	2,02E+09	4,44E-11	0,997	po	
	0,56	6,80E+03	8,26E-08	0,779	1,47E+09	4,49E-11	0,997	przed	250°C
	0,89	3,25E+03	1,33E-07	0,774	2,19E+09	4,30E-11	0,997	po	
alund	0,66	1,07E+04	5,81E-08	0,768	2,29E+09	3,03E-11	0,997	przed	150°C
	1,47	4,53E+03	8,42E-08	0,773	2,02E+09	2,99E-11	0,997	po	
	0,57	8,37E+03	8,74E-08	0,759	2,03E+09	3,59E-11	0,997	przed	250°C
	1,45	8,60E+03	4,90E-08	0,806	1,77E+09	3,43E-11	0,998	po	

6.8. Analiza wyników

Zaprojektowano i wykonano kondensatory testowe przy wykorzystaniu dwóch past dielektrycznych rekomendowanych do układów LTCC. Określono mikrostrukturę warstw dielektrycznych oraz ich skład fazowy. Zbadano wpływ rodzaju podłoża, materiału elektrod oraz konstrukcji na właściwości elementów w zakresie częstotliwości 1 kHz÷30 MHz. Zmierzono również charakterystyki temperaturowe kondensatorów. Wreszcie określono ich stabilność długoczasową.

Zasadniczym celem prac było określenie możliwości wytworzenia i praktycznego zastosowania kondensatorów zagrzebanych w układzie wielowarstwowym LTCC. Wykonane kondensatory charakteryzowały się pojemnościami z szerokiego zakresu od kilku do 250 pF. Współczynnik strat elementów testowych nie przekraczał 2%÷3%, co jest wartością typową dla kompozycji kondensatorowych o tym zakresie przenikalności elektrycznych [38,40,42,43,185]. Parametry te były zachowywane w całym badanym zakresie częstotliwości. Pewną wadą obu past była silna zależność parametrów od temperatury. W przedziale temperatur 25°C÷145°C zmiany pojemności osiągały wartości rzędu 13%, co odpowiada specyfikacji X7R [191]. Ogranicza to pole zastosowań badanych past dielektrycznych do aplikacji nie wymagających wysokiej stabilności termicznej. Kondensatory wykazywały się dobrą stabilnością długoczasową, w przeważającej większości długotrwałe narażenia termiczne nie spowodowały znaczących zmian parametrów struktur.

Jak wskazują wyniki powyższych badań, przez odpowiedni dobór technologii wykonania możliwe jest uzyskanie kondensatora LTCC o zadanych parametrach. Warto podkreślić, że

choć obie pasty dielektryczne zasadniczo są przeznaczone do wytwarzania zagrzebanych współwypalanych elementów LTCC, to pozytywne rezultaty osiągnięto także dla wariantu z elementami powierzchniowymi na podłożu wypalonym i na ceramice alundowej.

Na podstawie charakterystyk częstotliwościowych opracowano elektryczny model równoważny struktur testowych. Niezależnie od wariantu technologicznego kondensatory z powodzeniem zamodelowano obwodem zastępczym o tej samej strukturze. Składał się on z dwóch zasadniczych "ogniw", tworzonych przez równoległe połączenie rezystora i elementu stałofazowego oraz rezystancji szeregowej. Reprezentowały one odpowiednio obszar przyelektrodowy oraz objętościową część dielektryka. Zasadnicza różnica między nimi polegała na charakterze elementu stałofazowego, związanego z wykładnikiem n . Wartość n dla części objętościowej osiągała praktycznie wartość 1, co oznaczało, że jest to w zasadzie idealna pojemność. Natomiast dla części modelu odpowiadającej obszarowi przyelektrodowemu wykładnik n przyjmował wartości z zakresu $0,50 \div 0,80$ dla kondensatorów z pasty ESL4164 i $0,79 \div 0,97$ dla pasty DP5674. Równocześnie parametr Q był o 2÷5 rzędów mniejszy niż dla elementu objętościowego. Sprawiało to, że wpływ tego "ogniwa" modelu widoczny był dopiero przy częstotliwościach zbliżonych do 1 MHz. Parametry opisujące obszar przyelektrodowy były również silniej zależne od temperatury i podlegały większym zmianom w trakcie starzenia termicznego. Rezystancja szeregową przyjmowała niewielkie wartości nie przekraczające $0,6 \Omega$. Dlatego jej wpływ na spektra impedancyjne staje się istotny dopiero przy częstotliwościach powyżej 10 MHz.

7. Podsumowanie

Miniaturyzacja to jeden z podstawowych i wszechobecnych trendów w mikroelektronice. Dotychczas projektując typowy układ grubowarstwowy lub LTCC (realizowany techniką sitodruku) należy zakładać minimalne wymiary na poziomie [1,2,192]:

- szerokość ścieżek: 125 μm ,
- odstęp ścieżek: 125 μm ,
- minimalna długość i szerokość rezystora: 500/250 μm ,
- minimalny odstęp między elementami: 500 μm .

Oczywiście autorzy wielu publikacji pokazują możliwości zmniejszenia tych wymiarów w odniesieniu do różnych struktur. Niemniej jednak autorowi niniejszej rozprawy nie są znane kompleksowe prace, które dokładnie omawiają możliwości miniaturyzacji różnych komponentów biernych realizowanych w technice grubowarstwowej i LTCC. Dlatego autor szczegółowo zajął się tym problemem. W rozprawie pokazano, że miniaturyzację można osiągnąć nie tylko przez czysto geometryczne zmniejszanie wymiarów elementów ale i przez odpowiednie podejście konstrukcyjno-projektowe pozwalające zastąpić wiele elementów jednym elementem równoważnym pod względem funkcjonalnym.

Podczas realizacji rozprawy zbadano możliwości miniaturyzacji klasycznych rezystorów dwuelektrodowych, rezystorów wieloelektrodowych, warystorów i kondensatorów. Jeżeli idzie o rezystory dwuelektrodowe to zastosowanie past światłoczułych oraz metody fotolitograficznej do formowania rezystorów pozwoliło na wytworzenie w sposób powtarzalny elementów o minimalnym wymiarze 50 μm , czyli leżącym znacznie poniżej granicy osiąganey dotychczasowymi technikami. Wykonane tą metodą struktury charakteryzowały się znacznie lepszymi właściwościami geometrycznymi - definicją krawędzi i jednorodnością grubości - w porównaniu z uzyskanymi sitodrukiem. Zbadano również właściwości rezystorów wycinanych wiązką laserową. Do wytworzenia elektrod rezystorów wykorzystano tu światłoczułe pasty przewodzące. Natomiast warstwę rezystywną nanoszono przy pomocy standardowego sitodruku. Pozwala to ominąć problem braku komercyjnych fotoformowalnych past rezystywnych. Długość rezystora jest zdeterminowana przez proces fotoformowania elektrod, zaś szerokość - przez precyzję cięcia. Wiązka laserowa po zogniskowaniu może posiadać średnicę kilkunastu μm i być pozycjonowana z dokładnością do 1 μm . Pozwoliło to na wytworzenie mikrorezystorów o minimalnych wymiarach $200 \times 200 \mu\text{m}^2$, charakteryzujących się krawędziami porównywalnymi

z uzyskiwanymi przy fotoformowaniu. Zdecydowanie zmniejszone zostały równocześnie marginesy technologiczne - rezystory wykonano w odstępie równym szerokości nacięcia.

Rezystory posiadały również akceptowalne parametry elektryczne. Redukcja rozmiarów rezystorów skutkowałą wprowadzeniem się silnych efektów rozmiarowych (czyli zależności parametrów elementu od jego wymiarów) - rezystancja powierzchniowa rezystorów o długości 50 μm zmniejszyła się 2÷4 razy w stosunku do wartości nominalnej. Nie stanowią one jednak przeszkody w praktycznym zastosowaniu mikrorezystorów - można je uwzględnić w fazie projektowania i otrzymać element o żądanych parametrach. Wartość temperaturowego współczynnika rezystancji również wzrastała ze zmniejszaniem rozmiarów rezystora, nie przekraczając jednak zakresu ± 300 ppm/ $^{\circ}\text{C}$. Należy wziąć pod uwagę, że użyto dostępnej przewodzącej pasty światłoczułej na bazie srebra, które jest znane ze swej skłonności do migracji. Można sądzić, że zastosowanie pasty światłoczułej o innej metalurgii powinno zmniejszyć efekt rozmiarowy. Wytworzone mikrorezystory wykazywały bardzo dobrą odporność na działanie impulsów wysokonapięciowych - zmiany rezystancji pojawiały się dopiero przy amplitudach impulsów rzędu 200÷750 V/mm, co wyraźnie przekracza wyniki uzyskiwane dla elementów nieminiaturowych. Niezadowolające rezultaty otrzymano jedynie w przypadku stabilności długoczasowej rezystorów wykonanych z pasty światłoczułej. Wydaje się to być jednak związane z eksperymentalnym charakterem użytej pasty rezystywnej i wciąż jej nieoptymalnymi właściwościami, nie zaś z samą miniaturyzacją. W przypadku mikrorezystorów wycinanych laserem stwierdzono wyższy poziom szumów nadmiarowych w porównaniu z elementami o wymiarach standardowych. Jest on jednak wciąż akceptowalny.

Opierając się na znanej od kilkadziesiąt lat, lecz szerzej do tej pory nie rozwijanej koncepcji elementów wielokontaktowych autor zaproponował odmienne podejście do problemu miniaturyzacji. Polegało ono na zastąpieniu sieci mikrorezystorów pojedynczym elementem wielokontaktowy, równoważnym sieci pod względem funkcjonalnym. Redukcję wymiarów osiągnięto przez integrację układu, bez konieczności zmniejszania rozmiarów samego rezystora. Umożliwiło to zastosowanie standardowych past rezystywnych i sitodruku do ich naniesienia. Wykonano struktury trójkontaktowe o minimalnych wymiarach $600 \times 200 \mu\text{m}^2$ równoważne symetrycznym trójkątom rezystancyjnym oraz sześciokontaktowe rezystory realizujące funkcje sumatorów prądów lub napięć o najmniejszych wymiarach $2 \times 1 \text{ mm}^2$. Na potrzeby badań opracowano algorytm szybkiego projektowania i określono praktycznie realizowalne typy topologii struktur wielokontaktowych. Przeanalizowano także algorytm korekcji rezystora wieloelektrodowego.

Wytworzone rezystory poddano wszechstronnym badaniom. Ich parametry elektryczne i stabilność były porównywalne z uzyskanymi dla rezystorów dwukontaktowych. Niestandardowa konstrukcja rezystora nie wpływała na nie ujemnie i nie powodowała ograniczenia jego funkcjonalności. Znaczące efekty kontaktowe skutkowały co prawda wyraźnym odchyleniem uzyskanych rezystancji międzykontaktowych elementu od wartości planowanych, jednak zmiany te były współbieżne. Predestynuje to rezystory wielokontaktowe do zastosowania w układach, w których istotne są stosunki, a nie wartości bezwzględna rezystancji. Ponadto zastąpienie w przyszłości światłoczułej pasty srebrowej kompozycją o innej metalurgii powinno ograniczyć efekty rozmiarowe.

W celu uwzględnienia powyższych efektów kontaktowych oraz niedoskonałości procesu nanoszenia warstw autor stworzył oryginalny model dwuwymiarowy rezystora trójkontaktowego, który wykorzystał do symulacji numerycznych, służących do wyznaczenia parametrów struktury testowej. Mimo jego prostoty w większości przypadków uzyskał wyniki porównywalne z rezultatami eksperymentu.

Autor przeprowadził również badania warystorów grubowarstwowych i LTCC. Elementy te pełnią kluczową rolę w ochronie układu elektronicznego przed przepięciami. Dotychczas problemem było wykonanie warystora o wysokim współczynniku nieliniowości α w typowych procesach techniki warstw grubych. Cel ten został w ramach niniejszej pracy osiągnięty. Zastosowanie dodatku do pasty warystorowej w postaci 1% wagowego trójtlenku bizmutu Bi_2O_3 oraz elektrod z pasty przewodzącej bazującej na platynie pozwoliło na wytworzenie warystorów o współczynniku α osiągającym wartość $20\div 22$. Jest to bardzo dobry wynik w porównaniu z dotychczasowymi osiągnięciami dla takich elementów. Rezultat ten dotyczy warystora w konfiguracji kondensatorowej. Badano również konstrukcję planarną palczastą warystora i uzyskano nieznacznie mniejsze wartości α z zakresu $12\div 17$. W trakcie badań wytworzono elementy o napięciu charakterystycznym U_{ImA} w bardzo szerokim zakresie - od kilku do prawie 500 V, w zależności od wariantu technologicznego. Przeprowadzono również badania stabilności długoczasowej przy narażeniach termicznych i elektrycznych oraz odporności impulsowej warystorów, uzyskując satysfakcjonujące wyniki. Należy podkreślić, że autor nie spotkał się z danymi literaturowymi dotyczącymi takich testów odnośnie warystorów grubowarstwowych i LTCC.

Podjęto również badania nad właściwościami kondensatorów w układach LTCC. Dwie pasty kondensatorowe o średniej względnej przenikalności elektrycznej $50\div 80$ i 250 , przeznaczone do zagrzebanych elementów LTCC, zostały użyte do wytworzenia struktur testowych w konfiguracji kanapkowej (o wymiarach $0,5\times 0,5$ i 2×2 mm²) oraz stosowanej

często w technice mikrofalowej konfiguracji planarnej palczastej. Do precyzyjnego formowania elektrod tej ostatniej wykorzystano laser Nd:YAG pracujący przy trzeciej harmonicznej częstotliwości podstawowej ($\lambda = 355 \text{ nm}$). Umożliwiło to wykonanie w sposób powtarzalny elektrod palczastych o szerokości i odstępach 50 μm . Wytworzone kondensatory zbadano metodą spektroskopii impedancyjnej w szerokim zakresie częstotliwości i temperatury. Określono również ich stabilność długoczasową przy narażeniach termicznych.

Uzyskane kondensatory charakteryzowały się satysfakcjonującymi parametrami. W zależności od konstrukcji i doboru materiału dielektryka i elektrod otrzymano pojemności od kilku do 250 pF i współczynnika strat mieszczącym się w granicach $2\% \div 3\%$. Pod względem właściwości temperaturowych spełniały one wymagania standardu X7R. Wykazywały też dobrą stabilność długoczasową. Rezultaty te osiągnięto także dla kondensatorów wykonanych na podłożu alundowym i wypalanej ceramice LTCC. Dowodzi to możliwości wykonania kondensatora o zadanych parametrach.

Na podstawie zmierzonych charakterystyk częstotliwościowych autor opracował stosunkowo prosty lecz uniwersalny elektryczny model równoważny wykonanych kondensatorów, uwzględniający zjawiska zachodzące na elektrodach elementów pojemnościowych.

Autor ma świadomość, że przeprowadzone przez niego prace nie wyczerpują wszystkich możliwości badań i analizy właściwości wytworzonych w trakcie realizacji rozprawy mikrokomponentów biernych. Ze względu jednak pod uwagę bardzo szeroki zakres badań, obejmujących rezystory dwu- i wielokontaktowe, warystory i kondensatory, 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. Oczywiście nie oznacza to, że nie będą już prowadzone badania umożliwiające dalszą miniaturyzację elementów i struktur przy wykorzystaniu tej stosunkowo prostej i taniej technologii.

8. Literatura

1. A. Dziedzic, L.J. Golonka, B. Licznarski, B. Morten, M. Prudenziati, *Technika grubowarstwowa i jej zastosowania*, Wyd. Monada, 1998
2. L.J. Golonka, *Zastosowanie ceramiki LTCC w mikroelektronice*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001
3. H. Teterycz, J. Kita, R. Bauer, L.J. Golonka, B.W. Licznarski, K. Nitsch, K. Wiśniewski, *New design of an SnO₂ gas sensor on low temperature cofiring ceramics*, Sensors and Actuators B, 47 (1998) 100-103
4. S. Tankiewicz, B. Morten, M. Prudenziati, L.J. Golonka, *New thick-film material for piezoresistive sensors*, Sensors and Actuators A, 95 (2001), s.39-45
5. M.G.H. Meijerink, E. Nieuwkoop, E.P. Veninga, M.H.H. Meuwissen, M.W.W.J. Tjink, *Capacitive pressure sensor in post-processing on LTCC substrates*, Sensors and Actuators A, 123-124 (2005), s.234-239
6. H. Birol, T. Maeder, I. Nadzeyka, M. Boers, P. Ryser, *Fabrication of a millinewton force sensor using low temperature co-fired ceramic (LTCC) technology*, Sensors and Actuators A, 134 (2007), s.334-338
7. L.J. Golonka, K.-J. Walter, A. Dziedzic, J. Kita, L. Rebenklau, *Embedded passive components for MCM*, Proc. 24th Int. Spring Seminar on Electronics Technology, Calimanesti-Caciulata (Rumunia), 2001, s.73-77
8. C.R. Needes, M.F. Barker, P.T. Ollivier, K.W. Hang, K.E. Souders, C.B. Wang, M.A. Smith, *Constrained-sintered, low-temperature co-fired ceramic for IC packaging applications*, Proc. 53rd Electronic Components and Technology Conference, New Orleans, 2003, s.30-35
9. L.J. Golonka, *New application of LTCC technology*, Proc. 28th Int. Spring Seminar on Electronics Technology, Wiener Neustadt, 2005, s.148-152
10. L.J. Golonka, *Technology and applications of low temperature cofired ceramic (LTCC) based sensors and microsystems*, Bull. of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, 54 (2006), s.221-231
11. L. Rebenklau, K.-J. Wolter, S. Howitz, *Realization of hybrid microfluidic systems using standard LTCC process*, Proc. 50th Electronic Components and Technology Conf., Las Vegas, 2000, s.1696-1700
12. P.K. Khanna, B. Hornbostel, R. Grimme, W. Schäfer, J. Dorner, *Miniature pressure sensor and micromachined actuator structure based on low-temperature-cofired ceramics and piezoelectric material*, Materials Chemistry and Physics, 87 (2004), s.173-178
13. A. Dziedzic, J. Nijs, J. Szlufcik, *Thick-film fine-line fabrication techniques - application to front metallisation of solar cells*, Hybrid Circuits, no 30 (1993), s.18-23
14. A. Dziedzic, E. Miś, L. Rebenklau, K.-J. Wolter, *Correlation between geometry and electrical properties of LTCC and thick-film microresistors*, Proc. 27th Int. Conf. IMAPS-Poland, Podlesice, 2003, s.134-139
15. A. Dziedzic, E. Miś, L. Rebenklau, K.-J. Wolter, *LTCC and thick-film microresistors*, Proc. 54th Electronic Components and Technology Conf., Las Vegas, 2004, s.1885-1890 (także w Proc. 18th Eur. Passive Components Conf., Nice (France), 2004, s.135-140)
16. A. Dziedzic, E. Miś, L. Rebenklau, K.-J. Wolter, *Geometrical and electrical properties of LTCC and thick-film microresistors*, Microelectronics Int., 22/1 (2005), s.26-33
17. J.S. Shah, W.C. Hahn, *Material characterization of thick film-resistor pastes*, IEEE Trans. on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, CHMT-1 (1978), s.383-392

18. M. Hrovat, Z. Samardzija, J. Holc, D. Belavič, *Microstructural, XRD and electrical characterization of some thick film resistors*, J. Mater. Sci.: Mater. Electron., 11 (2000), s.199-208
19. M. Hrovat, D. Belavic, Z. Samardzija, J. Holc, *An investigation of thick-film resistor, fired at different temperatures, for strain sensors*, Proc. 24th Int. Spring Seminar on Electronics Technology, 2001, Calimanesti-Caciulata (Rumunia), s.32-36
20. M.G. Busana, M. Prudenziati, J. Hormadaly, *Microstructure development and electrical properties of RuO₂-based lead-free thick film resistors*, J. Mater. Sci.: Mater. Electron., 17 (2006), s.951-962
21. S. Muckett, J. Minalgene, *Hibridas' photoimageable thick film process and materials for microwave and sensor component applications*, Proc. 2nd IEMT/IMC Symposium, Tokio, 1998, s.154-160
22. B. Dziurdzia, S. Nowak, *FODEL(R) photoimageable technology in microwave applications*, Proc. 12th Int. Conf. Microwave and Radar, Kraków 1998, s.445-450
23. A. Dziedzic, L. Rebenklau, L.J. Golonka, K.-J. Wolter, *Fodel microresistors - processing and basic electrical properties*, Micr. Reliability, 43 (2003), s.377-383
24. A. Pietriková, S. Slosarčík, M. Bujaloboková, P. Cabúk, I. Vehec, *Chosen electrical and reliability properties of thick film photoimageable components*, Proc. 28th Int. Spring Seminar on Electronics Technology, Wiener Neustadt, 2005, s.396-398
25. J.S. Shah, L. Berrin, *Mechanism and control of post-trim drift of laser-trimmed thick-film resistors*, IEEE Trans. on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, CHMT-1 (1978), s.130-136
26. Y. Kurihara, S. Takahashi, K. Yamada, K. Kanai, T. Endoh, *Laser trimming of thick film resistors on aluminum nitride substrates*, IEEE Trans. on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 13 (1990), s.596-602
27. T.B. Narayana, K. Ramkumar, M. Satyam, *Downward laser trimming of thick film resistors*, IEEE Trans. on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 14 (1991), s.894-899
28. S. Kamiński, E. Miś, M. Szymendera, A. Dziedzic, *New trim configurations for laser trimmed thick-film resistors - experimental verification*, IMAPS J. Microelectronics and Electronic Packaging, 2 (2005), s.19-24 (także Proc. 28th Int. Conf. IMAPS-Poland, Wrocław, 2004, s.281-286)
29. M. Wroński, S. Kamiński, E. Miś, A. Dziedzic, *New trim configurations for laser trimmed thick-film resistors - theoretical analysis, numerical simulation and experimental verification*, Micr. Reliability, 45 (2005), s.1941-1948
30. R. Dow, *Synthesis of multiple resistance network from single resistive films*, IEEE Trans. on Component Parts, 10 (1963), s.147-155
31. M. Wroński, *Analysis, synthesis and optimization of multicontact distributed resistive network*, Proc. 12th ECCTD Conf., Istanbul (Turcja), 1995, vol. 2, s.925-928
32. J. Fitt, *Multiple resistor networks from single resistive sheet, manufacturing and fabrication*, Elektronika, 24 (1983), nr 11-12, s.30-32
33. J. Fitt, *Trimming of multielectrode film resistors*, Elektronika, 27 (1986), nr 4, s.13-15
34. A. Dziedzic, L.J. Golonka, W. Mielcarek, *New configuration of LTCC passive components*, Proc. 12th Europ. Microelectronic and Packaging Conf., Harrogate (UK), 1999, s.3-9
35. A. Dziedzic, W. Mielcarek, *Varistors in LTCC structures*, Proc. 38th Int. Conf. on Microelectronics, Devices and Materials, Lipica (Słowenia), 2002, s.253-58

36. M.P. Martin, H. Hebeda-Hickel, C. Lucat, F. Menil, P. Tardy, *Performances of high voltage screen-printed ZnO varistors*, Proc. 36th IMAPS-USA Conf., Boston, 2003
37. H. Hebeda-Hickel, C. Lucat, F. Menil, *Influences of the densification parameters on screen-printed component properties*, J. Eur. Ceramic Soc., 25 (2005), s.2115-2119
38. B.D. Stojanovic, C.R. Foschini, V.B. Pavlovic, V.M. Pavlovic, V. Pejovic, J.A. Varela, *Barium titanate screen-printed thick films*, Ceramics Int., 28 (2002), s.293-298
39. B.D. Stojanovic, C.R. Foschini, V.Z. Pejovic, V.B. Pavlovic, J.A. Varela, *Electrical properties of screen printed BaTiO₃ thick films*, J. Eur. Ceramic Soc., 24 (2004), s.1467-1471
40. D. Szwagierczak, J. Kulawik, *Thick film capacitors with relaxor dielectrics*, J. Eur. Ceramic Soc., 24 (2004), s.1979-1985
41. P.J. Bolton, R. Velasquez, R.C. Masont, *Construction, characterization, and reliability of BaTiO₃-based buried thick film capacitor materials sets 1200<K<1600*, Proc. Int. Conf. on Multichip Modules and High Density Packaging, Denver (USA), 1998, s.484-489
42. K. Delaney, J. Barrett, J. Barton, R. Doyle, *Characterization and performance prediction for integral capacitors in low temperature co-fired ceramic technology*, IEEE Trans. on Advanced Packaging, 22 (1999), s.68-77
43. M.R. Ehlert, S. Branchevsky, *Embedded high K ceramic capacitors in LTCC for wireless communication applications*, Proc. IMAPS-USA Conf., Chicago, 1999
44. M. Hrovat, J. Holc, S. Dmovsek, D. Belavič, J. Bemard, M. Kosec, L. Golonka, A. Dziedzic, J. Kita, *Ferroelectric thick films on LTCC substrates - preliminary results*, Proc. 26th Int. Spring Seminar on Electronics Technology, Stara Lesna (Słowacja), 2003, s.179-183
45. P. Balaban, *Calculation of the capacitance coefficients of planar conductors on a dielectric surface*, IEEE Trans. on Circuit Theory, CT-20 (1973), s.725-731
46. R. Igrēja, C.J. Dias, *Analytical evaluation of the interdigital electrodes capacitance for a multi-layered structure*, Sensors and Actuators A, 112 (2004), s.291-301
47. K. Kim, M.S. Ahn, J.H. Kang, I. Yun, *Circuit modeling of interdigitated capacitors fabricated by high-k LTCC sheets*, ETRI Journal, 28 (2006), s.182-190
48. W. Qu, A. Haeusler, J.-U. Meyer, W. Wlodarski, *Thick-film gas and humidity sensing array based on semiconducting metal oxides*, Proc. Conf. on Optoelectronic and Microelectronic Materials Devices, Perth (Australia), 1998, s.384-387
49. B.W. Licznarski, K. Nitsch, H. Teterycz, T. Sobański, K. Wiśniewski, *Characterisation of electrical parameters for multilayer SnO₂ gas sensors*, Sensors and Actuators B, 103 (2004), s.69-75
50. S. Gebhardt, L. Seffner, F. Schlenkrich, A. Schönecker, *PZT thick films for sensor and actuator applications*, J. Eur. Ceramic Soc., 27 (2007), s.4177-4180
51. R. Kužel, J. Broukal, *Resistors screen printed on ceramic-coated steel substrates*, IEEE Trans. on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, 4 (1989), s.235-239
52. Y. Kurihara, S. Takahashi, K. Yamada, T. Endoh, *Ag-Pd thick film conductor for AlN ceramics*, IEEE Trans. on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 13 (1990), s.306-312
53. T. Wada, R. Humphries, R. Tait, S.J. Stein, M.A. Stein, M. Heinz, R. Wahlers, *Low temperature ceramic tape (LTCT) coated metal substrates*, Proc. 18th Japan Int. Electronic Manufacturing Technology, Saitama (Japonia), 1995, s.89-92
54. M.L. Hsieh, L.S. Chen, *The electrical properties of oxides-added thick-film resistors on aluminum nitride substrates*, Proc. 4th Int. Symp. on Electronic Materials and Packaging, Kaohsiung (Tajwan), 2002, s.468-471

55. DuPont Green Tape™ Material System Design and Layout Guidelines, http://www2.dupont.com/MCM/en_US/
56. L. Rebenklau, K.-J. Wolter, G. Hagen, *Realization of μ -vias in LTCC tape*, Proc. 29th Int. Spring Seminar on Electronics Technology, St. Marienthal (Niemcy), 2006, s.55-63
57. G. Wang, E.C. Folk, F. Barlow, A. Elshabini, *Fabrication of microvias for multilayer LTCC substrates*, IEEE Trans. on Electronics Packaging Manufacturing, 29 (2006), s.32-41
58. T. Rabe, W.A. Schiller, T. Hochheimer, C. Modes, A. Kipka, *Zero shrinkage of LTCC by self-constrained sintering*, Int. J. Appl. Ceram. Technol., 2 (2005), s.374-382
59. K. Delaney, J. Barrett, J. Barton, R. Doyle, *Characterization and performance prediction for integral resistors in low temperature co-fired ceramic technology*, IEEE Trans. on Advanced Packaging, 22 (1999), s.78-85
60. A. Dzedzic, L.J. Golonka, J. Kita, H. Thust, K.-H. Drue, R. Bauer, L. Rebenklau, K.-J. Wolter, *Electrical and stability properties and ultrasonic microscope characterisation of low temperature co-fired ceramics resistors*, Micr. Reliability, 41 (2001), s.669-676
61. H. Birol, T. Maeder, C. Jacq, P. Ryser, *Investigation of interactions between co-fired LTCC components*, J. Eur. Ceramic Soc., 25 (2005), s.2065-2069
62. C.S. Hsi, F.M. Hsieh, H.P. Chen, *Characteristics of thick film resistors embedded in low temperature co-fired ceramic (LTCC) substrates*, J. Eur. Ceramic Soc. 27 (2007), s.2779-2784
63. B. Dziurdzia, S. Nowak, M. Cież, W. Gregorczyk, H. Thust, E. Polzer, *Low cost high performance microwave structures fabricated by advanced thick film techniques*, Microelectronics Int., 16/3 (1999), s.46-53
64. C.Y. Ng, M. Chongcheawchamnan, M.S. Aftanasar, I.D. Robertson, J. Minalgiene, *X-band microstrip bandpass filter using photoimageable thick-film materials*, Proc. IEEE MTT-S Int. Symp. Digest, Seattle (USA), 2002, vol. 3, s.2209-2212
65. K.K. Samanta, I.D. Robertson, *Advanced multilayer thick-film technology for cost-effective millimetre-wave multi-chip modules*, 10th High Frequency Postgraduate Student Colloquium, Leeds (UK), 2005, s.11-14
66. B. Dziurdzia, S. Nowak, W. Gregorczyk, M. Cież, *Photo patterned thick-film resonators*, Proc. 14th Int. Conf. on Microwave, Radar and Wireless Communications, Gdańsk, 2002, vol. 2, s.467-471
67. I. Born, D. Detemmerman, M. Vrana, J. De Baets, A. Van Calster, *Low cost high-density multilayer circuits for MCM-C*, Microelectronics Int., 16/2 (1999), s.55-58
68. K.K. Samanta, I.D. Robertson, *High performance CPW embedded passive components using photoimageable thick film technology*, Proc. 35th Europ. Microwave Conf., Paryż, 2005, vol. 1
69. M.S. Aftanasar, I.D. Robertson, P.R.Young, S. Lucyszyn, *Fabrication of dielectric-filled rectangular waveguide using thick-film processing*, 6th High Frequency Postgraduate Student Colloquium, Cardiff (UK), 2001, s.82-87
70. C.Y. Ng, M. Chongcheawchamnan, M.S. Aftanasar, I.D. Robertson, P.R.Young, J. Minalgiene, *Characterisation of TFMS lines fabricated using photoimageable thick-film technology*, IEE Proc. Microwave Antennas Propag., 150 (2003), s.125-130
71. B. Dziurdzia, J. Kral, Z. Magoński, M. Cież, W. Gregorczyk, *Multilayer photoimageable thick-films in microwave frequencies*, Proc. 15th Int. Conf. on Microwave, Radar and Wireless Communications, Gdańsk, 2004, vol. 1, s.122-127
72. D. Stephens, P.R. Young, I.D. Robertson, *Design and characterization of 180 GHz filters in photoimageable thick-film technology*, Proc. IEEE MTT-S Int. Symp. Digest, Long Beach (USA), 2005, s.451-454

73. D. Stephens, P.R. Young, I.D. Robertson, *Millimeter-wave substrate integrated waveguides and filters in photoimageable thick-film technology*, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 53 (2005), s.3832-3838
74. K.K. Samanta, D. Stephens, I.D. Robertson, *Ultrawideband characterisation of photoimageable thick film materials for microwave and millimeter-wave design*, Proc. IEEE MTT-S Int. Symp. Digest, Long Beach (USA), 2005, s.2159-2162
75. K.K. Samanta, I.D. Robertson, *Characterisation of TFMS and CPW lines and interconnections up to 100 GHz in multilayer photoimageable thick film technology*, Proc. 36th Eur. Microwave Conf., Manchester (UK), 2006, s.376-379
76. D. Dimos, B.H. King, P. Yang, *Direct-write fabrication of integrated, multilayer passive components*, Proc. Int. Symp. on Advanced Packaging Materials, 1999, s.186-190
77. B.H. King, D. Dimos, P. Yang, S.L. Morissette, *Direct-write fabrication of integrated, multilayer ceramic components*, J. Electroceramics, (1999), s.173-178
78. V. Tohver, S.L. Morissette, J.A. Lewis, B.A. Tuttle, J.A. Voigt, D.B. Dimos, *Direct-write fabrication of zinc oxide varistors*, J. Am. Ceramic Soc., 85 (2002), s.123-128
79. www.ohmcraft.com
80. K.F. Teng, R. W. Vest, *Liquid ink jet printing with MOD inks for hybrid microcircuits*, IEEE Trans. on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, CHMT-12 (1987), s.545-549
81. J.B. Szczech, C.M. Megaridis, D.R. Gamota, J. Zhang, *Fine-line conductor manufacturing using drop-on-demand PZT printing technology*, IEEE Trans. on Electronics Packaging Manufacturing, 25 (2002), s.26-33
82. V. Golovanov, J.L. Solis, V. Lantto, S. Leppävuori, *Different thick-film methods in printing of one-electrode semiconductor gas sensors*, Sensors and Actuators B, 34 (1996), s.401-406
83. M. Lahti, S. Leppävuori, V. Lantto, *Gravure-offset-printing technique for the fabrication of solid films*, Applied Surface Science, 142 (1999), s.367-370
84. P.M. Harrey, P.S.A. Evans, B.J. Ramsey, D. Harrison, *A novel manufacturing process for capacitors using offset lithography*, Proc. 1st Int. Symp. on Environmental Conscious Design and Inverse Manufacturing, Tokio, 1999, s.842-846
85. J. Hagberg, M. Pudas, S. Leppävuori, K. Elsey, A. Logan, *Gravure offset printing development for fine line thick film circuits*, Microelectronics Int., 18/3 (2001), s.32-35
86. M. Lahti, V. Lantto, *Passive RF band-pass filters in an LTCC module made by fine-line thick-film pastes*, J. Eur. Ceramic Soc., 21 (2001), s.1997-2000
87. L. Mooring, N.G. Karousos, C. Livingstone, J. Davis, G.G. Wildgoose, S.J. Wilkins, R.G. Compton, *Evaluation of a novel pad printing technique for the fabrication of disposable electrode assemblies*, Sensors and Actuators B, 107 (2005), s.491-496
88. M. Kittilä, J. Hagberg, E. Jakku, S. Leppävuori, *Direct gravure printing (DGP) method for printing fine-line electrical circuits on ceramics*, IEEE Trans. on Electronics Packaging Manufacturing, 27 (2004), s.109-114
89. N. S. Leyland, J.R.G. Evans, D.J. Harrison, *Lithographic printing of ceramics*, J. Eur. Ceramic Soc., 22 (2002), s.1-13
90. S. Elsayad, F. Morsy, S. El-Sherbiny, E. Abdou, *Some factors affecting ink transfer in gravure printing*, Pigment and Resin Technology, 31 (2002), s.234-240
91. M. Pudas, J. Hagberg, S. Leppävuori, *Printing parameters and ink components affecting ultra-fine-line gravure-offset printing for electronics applications*, J. Eur. Ceramic Soc., 24 (2004), s.2943-2950

92. C.D.E. Lakeman, P.F. Fleig, *High-resolution integration of passives using micro-contact printing (μ CP)*, *Microelectronics Int.*, 20/1 (2003), s.52-55
93. R. Parashkov, E. Becker, T. Riedl, H.-H. Johannes, W. Kowalsky, *Large area electronics using printing methods*, *Proc. of the IEEE*, 93 (2005), s.1321-1329
94. V. Kripesh, W. Gust, S.K. Bhatnagar, H. Osterwinter, *Effect of NdYAG laser micromachining on gold conductor printed over ceramic substrates*, *Materials Letters*, 44 (2000), s.347-351
95. J. Kita, A. Dziedzic, L.J. Golonka, A. Bochenek, *Properties of laser cut LTCC heaters*, *Micr. Reliability*, 40 (2000), s.1005-1010
96. Z. Kantor, *Sub-picosecond excimer laser machining of a thick film circuit material*, *Thin Solid Films*, 453-454 (2004), s.350-352
97. E. Miś, M. Borucki, A. Dziedzic, S. Kamiński, L. Rebenklau, K.-J. Wolter, F. Sonntag, *Laser-shaped thick-film and LTCC microresistors*, *Proc. 1st Electronics Systemintegration Technology Conf.*, Drezno (Niemcy), 2006, s. 954-960
98. E. Miś, A. Dziedzic, T. Piasecki, J. Kita, R. Moos, *Thick-film and LTCC microcapacitors*, *Proc. 31th Int. Conf. IMAPS-Poland*, Krasiczyn, 2007, s.401-404
99. E. Gollner, J. Kita, R. Moos, *Frequency-trippled Nd:YAG-lasers in thick-film and LTCC applications*, *Proc. 30th Int. Conf. IMAPS-Poland*, Kraków, 2006, s.147-150
100. T. Podprocky, B. Vandecasteele, J. De Baets, A. Van Calster, *Integration of thick film resistors in a multilayer structure*, *Proc. 26th Int. Spring Seminar on Electronics Technology*, Stara Lesna (Słowacja), 2003, s.137-140
101. A. Dziedzic, *Modern micropassives fabrication and electrical properties*, *Bull. of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, 54 (2006), s.9-18
102. P.F. Carcia, A. Suna, W.D. Childers, *Electrical conduction and strain sensitivity in RuO₂ thick film resistors*, *J. Applied Physics*, 54 (1983), s.6002-6008
103. R.W. Vest, *A model for sheet resistivity of RuO₂ thick film resistors*, *IEEE Trans. on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 14 (1991), s.396-406
104. Y. Ma, J. Chen, M. Li, *Bi₂Ru₂O₇ conductive phase and its effects on the gauge factor of Ru-based thick-film resistors*, *Proc. Int. Conf. on Information Acquisition*, Weihai, Shandong (Chiny), 2006, s.245-248
105. S. Tankiewicz, B. Morten, M. Prudenziati, L.J. Golonka, *IrO₂-based thick-film resistors*, *J. Applied Physics*, 91 (2002), s.4261-4266
106. H. Moriwaki, A. Suzuki, Y. Watanabe, M. Ishiwata, T. Kamata, K. Adachi, *Interactions between thick film resistors and alumina substrate*, *Proc. Japan Int. Electronics Manufacturing Technology Symp.*, Kanazawa (Japonia), 1993, s.46-49
107. R.C. Sutterlin, G.O. Dayton, J.V. Biggers, *Thick-film resistor/dielectric interactions in a low temperature co-fired ceramic package*, *IEEE Trans. on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology - Part B*, 18 (1995), s.346-352
108. C.J. Ting, C.S. Hsi, H.Y. Lu, *Interactions between ruthenia-based resistors and cordierite-glass substrates in low-temperature co-fired ceramics*, *J. Am. Ceramic Soc.*, 83 (2000), s.2945-53
109. S. Kardos, M. Somora, S. Gabani, V. Pavlik, K. Flachbart, J. Trpcevska, *Low temperature properties of RuO₂-based resistors prepared under various technology conditions*, *Proc. 26th Int. Spring Seminar on Electronics Technology*, Stara Lesna (Słowacja), 2003, s.482-484
110. M. Hrovat, M. Belavič, J. Holc, J. Cilenšek, L. Golonka, A. Dziedzic, *Thick-film resistors with high negative TCR on alumina and LTCC substrates*, *Proc. 27th Int. Spring Seminar on Electronics Technology*, Sofia, 2004, s.79-84

111. T. Yamaguchi, M. Kageyama, *Effect of RuO₂ on the behavior of silver at thick-film terminations*, IEEE Trans. on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 11 (1988), s.134-136
112. A. Dziedzic, L.J. Golonka, A. Kolek, P. Mach, K. Nitsch, *DC and AC electrical properties and long-term stability of LTCC resistors*, Proc. 24th Int. Spring Seminar on Electronics Technology, Calimanesti-Caciulata (Rumunia), 2001, s.137-141
113. Z. Stanimirovič, M.M. Jevtič, I. Stanimirovič, *Computer simulation of thick-film resistors based on 3D planar RRN model*, Proc. Eurocon 2005, Belgrad (Serbia), 2005, s.1687-1690
114. P. Mach, P. Svasta, *Influence of trimming of resistive thick films on nonlinearity of their current vs. voltage characteristics*, Proc. 27th Int. Spring Seminar on Electronics Technology, Sofia, 2004, vol. 2, s.309-312
115. A. Dziedzic, A. Kolek, W. Ehrhardt, H. Thust, *Advanced electrical and stability characterization of untrimmed and variously trimmed thick-film and LTCC resistors*, Micr. Reliability, 46 (2006), s.352-359
116. T. Tobita, H. Takasago, *New trimming technology for a thick film resistor by the pulse voltage method*, IEEE Trans. on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 14 (1991), s.613-617
117. J. Mueller *et al.*, *Trimming of buried resistors in LTCC circuits*, Proc. 36th IMAPS Nordic Conf., Helsingor (Dania), 1996, s.166-173
118. W. Ehrhardt, H. Thust, *Trimming of thick-film resistors by energy of high voltage pulses and its influence on microstructure*, Proc. 13th Eur. Microelectronics and Packaging Conf., Strasbourg (Francja), 2001, s.403-407
119. A. Dziedzic, *Trimming and stability of thick-film resistors with reduced dimensions*, Proc. 25th IMAPS-Poland Conf., Polańczyk, 2001, s.163-166
120. I. Mrak, M.M. Jevtič, Z. Stanimirovič, *Low-frequency noise in thick-film structures caused by traps in glass barriers*, Proc. 21th Int. Conf. Microelectronics (MIEL'97), Niš (Jugosławia), 1997, vol. 1, s.413-416
121. M.M. Jevtič, Z. Stanimirovič, I. Mrak, *Low-frequency noise in thick-film resistors due to two-step tunneling process in insulator layer of elemental MIM cell*, IEEE Trans. on Components and Packaging Technology, 22 (1999), s.120-125
122. I. Hajdu, Z. Kincses, *Noise study on thick film resistors*, Proc. 24th Int. Spring Seminar on Electronics Technology, Calimanesti-Caciulata (Rumunia), 2001, s.175-177
123. A. Kolek, *Szumy niskoczęstotliwościowe – metody badań eksperymentalnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2006
124. **E. Miś**, A. Dziedzic, M. Wroński, S. Kamiński, L. Rebenklau, K.-J. Wolter, *Thick-film and LTCC multicontact resistors – preliminary results*, Proc. 29th Int. Conf. IMAPS-Poland, Darłówko, 2005, s.393-396
125. **E. Miś**, A. Dziedzic, *Simulation of contact effects in multiterminal thick-film and LTCC microresistors*, Proc. 29th Int. Spring Seminar on Electronics Technology, St. Marienthal (Niemcy), 2006, s.516-520
126. **E. Miś**, A. Dziedzic, *Multiterminal thick-film and LTCC microresistors - contact effects simulation and trimming procedure considerations*, Elektronika 47 (2006), nr 12, s.16-18 (także Proc. 30th Int. Conf. IMAPS-Poland, Kraków, 2006, s.357-360)
127. B. Rząsa, *Technologia grubowarstwowych kondensatorów rutowych*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1980
128. A. Arshak, K. Arshak, D. Morris, O. Korostynska, E. Jafer, *Investigation of TiO₂ thick film capacitors for use as strain gauge sensors*, Sensors and Actuators A, 122 (2005), s.242-249

129. S. O'Reilly *et al.*, *A comparative analysis of interconnection technologies for integrated multilayer inductors*, *Microelectronics Int.*, 15/1 (1998), s.6-10
130. W.G. Hurley, M.C. Duffy, S. O'Reilly, S.C. O'Mathuna, *Impedance formulas for planar magnetic structures with spiral windings*, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 46 (1999), s.271-278
131. V.D. Desnica, L.D. Zivanov, O.S. Aleksic, M.D. Lukovic, M.D. Nimrihter, *Comparative characteristics of thick-film integrated LC filters*, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 51 (2002), s.570-576
132. J.R. Bray, K.T. Kautio, L. Roy, *Characterization of an experimental ferrite LTCC tape system for microwave and millimeter-wave applications*, *IEEE Trans. on Advanced Packaging*, 27 (2004), s.558-565
133. G. Stojanovič, L. Živanov, M. Damjanovič, *Novel efficient methods for inductance calculation of meander inductor*, *Int. J. Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 25 (2006), s.916-928
134. J. Vanek, I. Szendiuch, J. Hladik, *Optimization of properties of planar spiral inductors*, *Proc. 30th Int. Spring Seminar on Electronics Technology*, Cluj-Napoca (Rumunia), 2007, s.235-238
135. A. Dziedzic, E. Miś, W. Mielcarek, *Microvaristors for thick-film and LTCC microcircuits*, *Proc. 1st Electronics Systemintegration Technology Conf.*, Drezno (Niemcy), 2006, s.961-965
136. M.A. de la Rubia, M. Peiteado, J. de Frutos, F. Rubio-Marcos, J.F. Fernandez, A.C. Caballero, *Improved non-linear behaviour of ZnO-based varistor thick films prepared by tape casting and screen printing*, *J. Europ. Ceramic Soc.*, 27 (2007), s.3887-3891
137. E. Miś, A. Dziedzic, W. Mielcarek, *Thick-film and LTCC microvaristors*, *Proc. 30th Int. Spring Seminar on Electronics Technology*, Cluj-Napoca (Rumunia), 2007, s.53-58
138. D. Belavič, M. Hrovat, J. Kita, J. Holc, J. Cilenšek, L. Golonka, A. Dziedzic, *Evaluation of compatibility of thick-film PTC thermistors and LTCC structures*, *Micr. Reliability*, 45 (2005), s.1924-1929
139. D. Belavič, M. Hrovat, J. Kita, J. Holc, J. Cilenšek, L. Golonka, A. Dziedzic, *Thick-film PTC thermistors and LTCC structures: The dependence of the electrical and microstructural characteristics on the firing temperature*, *J. Eur. Ceramic Soc.*, 27 (2007), s. 2237-2243
140. R.K. Kamat, G.M. Naik, *Thermistors – in search of new applications, manufacturers cultivate advanced NTC techniques*, *Sensor Review*, 22 (2002), s.334-340
141. M.A.L. Nobre, S. Lanfredi, *Grain boundary electric characterization of Zn₇Sb₂O₁₂ semiconducting ceramic A negative temperature coefficient thermistor*, *J. Applied Physics*, 93 (2003), s.5576-5582
142. M. Hrovat, J. Holc, D. Belavič, J. Cilenšek, *The evolution of spinel-based conductive phase in thick-film NTC thermistors*, *Proc. 29th Int. Spring Seminar on Electronics Technology*, St. Marienthal (Niemcy), 2006, s.143-148
143. S. Jagtap, S. Rane, U. Mulik, D. Amalnerkar, *Thick film NTC thermistor for wide range of temperature sensing*, *Microelectronics Int.*, 24/4 (2007), s.7-13
144. A. Dziedzic, K. Młynarczyk, E. Prociów, *Thermal insulation sensor with thick/thin film thermopile*, *Proc. 26th Int. Spring Seminar on Electronics Technology*, Stara Lesna (Słowacja), 2003, s.57-62
145. S. Duby, B. Ramsey, D. Harrison, G. Hay, *Printed thermocouple devices*, *Proc. IEEE Conf. on Sensors*, Wiedeń, 2004, vol. 3, s.1098-1101
146. P. Markowski, A. Dziedzic, *Experimental characterization of thermoelectric properties of thick film composites*, *IMAPS J. Microelectronics and Electronic Packaging*, 3 (2006), s.95-99

147. P. Markowski, W. Pinczakowski, L. Straszewski, A. Dziedzic, *Thick-film thermoelectric microgenerators based on nickel-, silver- and PdAg-based compositions*, Proc. 30th Int. Spring Seminar on Electronics Technology, Cluj-Napoca (Rumunia), 2007, s.223-228
148. P. Markowski, A. Dziedzic., E. Prociow, *Thermoelectric microgenerators made in mixed thick/thin film technology*, Elektronika, 47 (2006), nr 12, s.7-8
149. J.M. Lopera, M.J. Prieto, A.M. Pernia, M. de Graaf, W. Waanders, L. Alvarez, *Design of integrated magnetic elements using thick-film technology*, Proc. Applied Power Electronics Conf. and Exposition, Anaheim (USA), 1998, vol. 1, s.407-413
150. P.G. Barnwell, T.J. Jackson, *Low profile high frequency power supplies using thick film planar transformers*, Proc. 5th Europ. Conf. on Power Electronics and Applications, Brighton (UK), 1993, vol. 3, s.93-97
151. K.I. Arshak, B. Almukhtar, *The design and development of a novel flyback planar transformer for high frequency switch mode DC-DC converter applications*, Microelectronics J., 31 (2000), s.929-935
152. M.J. Prieto, A.M. Pernia, J.M. Lopera, J.A. Martin, F. Nuno, *Turn-coupling in thick-film integrated magnetic components for power converters*, Proc. IEEE Industry Applications Conf., Pittsburgh (USA), 2002, vol. 3, s.1766-1773
153. D.H. Yun et al., *Highly sensitive and selective ammonia gas sensor*, Proc. Int. Conf. on Solid State Sensors and Actuators, Chicago, 1997, s.959-962
154. Dane katalogowe past rezystywnych firmy DuPont z serii 2000
www2.dupont.com/MCM/en_US/PDF/datasheets/2000.pdf
155. L.J. Golonka, *Effect of thick film resistor dimension on sheet resistivity*, Int. J. Hybrid Microelectronics, 4 (1981), no. 2, s.405-407
156. D. Ročak, D. Belavič, M. Hrovat, J. Sikula, P. Koktavy, J. Pavelka, V. Sedlakova, *Low-frequency noise of thick-film resistors as quality and reliability indicator*, Micr. Reliability, 41 (2001), s.531-542
157. V. Sedlakova, *Quality and reliability indicators of thick film resistors based on the experimental evaluation of noise and non-linearity*, praca doktorska, Brno Univeristy of Technology, Brno (Czechy), 2005
158. F.N. Hooge, *1/f noise is no surface effect*, Physical Letters A, 29 (1969), s.139-140
159. A.L. McWorther, *Semiconductor surface physics*, edited by R.H. Kingston, Pennsylvania University Press, 1957, Pennsylvania
160. A. Dziedzic, K.-H. Drue, J. Kita, A. Kolek, P. Ptak, *High frequency behaviour and low frequency noise of LTCC resistors*, Proc. 26th IMAPS-Poland Conf., Warszawa, 2002, s.61-65
161. A. Kolek, P. Ptak, A. Dziedzic, *Noise versus burying a resistor in low-temperature co-fired ceramics*, J. Phys. D: Appl. Phys., 36 (2003), s.1009-1017
162. A. Pietrikova, J. Urbančik, S. Slosarčik, M. Bujalobokova, J. Potencki, A. Kolek, *Stability and reliability of thick film resistors constructed by different techniques*, Proc. 27th Int. Spring Seminar on Electronics Technology, Sofia, 2004, vol. 2, s.296-300
163. A. Dziedzic, L. Golonka, J. Kita, H. Roguszczak, T. Żdanowicz, *Some remarks about "short" pulse behaviour of LTCC and thick-film microresistors*, Proc. 1st Eur. Microelectronics and Packaging Symp., Praga, 2000, s.194-199
164. J. Constantin, M. Molin, J. Ranger, Y. Garnier, *Effect of surge voltage on thin and thick film resistors*, Proc. 2nd Int. Microelectronics Conf., ISHM-Japan, 1982, s.51-55
165. B.A. Fuks, B.W. Szabat, *Funkcje zmiennej zespolonej i niektóre ich zastosowania*, PWN, Warszawa, 1954

166. F. Leja, *Funkcje zespolone: wstep do teorii funkcji analitycznych wielu zmiennych*, PWN, Warszawa, 1979
167. M. Wroński, *Optymalne projektowanie podukładów rezystywnych hybrydowych układów scalonych*, Elektronika 27 (1986), nr 6, s.17-23
168. E.P. Vandamme, L.K.J. Vandamme, *Current crowding and its effect on 1/f noise and third harmonic distortion - a case study for quality assessment of resistors*, Micr. Reliability, 40 (2000), s.1847-1853
169. K. Mleczo, Z. Zawisłak, A. Stadler, A. Kolek, P. Szałański, *Evaluation of the conductive to resistive layer interaction*, Proc. 31st IMAPS-Poland Conf., Krasiczyn, 2007, s.179182
170. D. Belavič, D. Ročak, J. Sikula, P. Koktavy, J. Pavelka, M. Hrovat, *The influence of the dimensions of thick-film resistors on long-term stability, nonlinearity, and noise*, Proc. 22th Int. Spring Seminar on Electronics Technology, Drezno (Niemcy), 1999, s.87-92
171. www.ansys.com
172. E. Beyne, J. Roggen, R. Govaerts, *Thick film resistor model*, Proc. 6th Eur. Microelectronics Conf., Bournemouth (UK), 1987, s.403-409
173. L.K.J. Vandamme, W.M.G. van Bokhoven, *Conductance noise investigations with four arbitrary shaped and placed electrodes*, Applied Physics, 14 (1977), s.205-15
174. W. Mielcarek, *Uwarunkowania technologiczne warystorów tlenkowych*, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 212, 2002
175. E. Olsson, G.L. Dunlop, *The effect of Bi₂O₃ content on the microstructure and electrical properties of ZnO varistor materials*, J. Applied Physics, 66 (1998), s. 4317-4325
176. M. Peiteado, J.F. Fernandez, A.C. Caballero, *Processing strategies to control grain growth in ZnO-based varistors*, J. Eur. Ceramic Soc., 25 (2005), s.2999-3003
177. S. Gouverneur, C. Lucat, F. Menil, J.-L. Aucoeur, *New densification process of thick films*, IEEE Trans. on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 16 (1993), s.505-510
178. F. Menil, H. Debeda, C. Lucat, *Screen-printed thick-films: from materials to functional devices*, J. Eur. Ceramic Soc., 25 (2005), s.2105-2113
179. C. Lucat, M.P. Martin, H. Debeda-Hickel, F. Menil, A. Largeteau, *Screen-printed varistors: New strategy for high non-linear coefficient*, J. Eur. Ceramic Soc., 27 (2007), s.3883-3886
180. K. Majewska, L.J. Golonka, J. Honkamo, H. Jantunen, W. Mielcarek, *ZnO LTCC varistors*, Proc. 27th Int. Conf. IMAPS-Poland, Podlesice-Gliwice, 2003, s.158-161
181. J. Honkamo, J. Hannu, H. Jantunen, M. Moilanen, W. Mielcarek, *Microstructural and electrical properties of multicomponent varistor ceramics with PbO-ZnO-B₂O₃ glass addition*, J. Electroceramics, 18 (2007), s.175-181
182. K.Yao, W. Zhu, X. Yao, *Development of Ba-Ti-B glass-ceramic thick-film capacitors by sol-gel technology*, IEEE Trans. on Components, Packaging, and Manufacturing Technology - Part C, 21 (1998), s.20-25
183. D. Szwagierczak, J. Kulawik, B. Gröger, *Preparation and characterization of lead iron tantalate thick films*, J. Eur. Ceramic Soc., 25 (2005), s.2133-2136
184. D.H. Dychala, P.W. Bless, R.L. Wahlers, S.J. Stein, *High K thick film and tape material*, Proc. 43rd Electronic Components and Technology Conf., Orlando (USA), 1993, s.883-887
185. J. Müller, D. Josip, *Integrated capacitors using LTCC*, Proc. MicroTech2002, Manchester (UK), 2002
186. **E. Miś**, A. Dziedzic, T. Piasecki, J. Kita, R. Moos, *Geometrical, electrical and stability properties of thick-film and LTCC microcapacitors*, Microelectronics Int., 2008, w druku

187. Dane katalogowe pasty ESL4164, www.electroscience.com
188. Dane katalogowe pasty dielektrycznej DP5674, www2.dupont.com/MCM/en_US
189. K. Nitsch, *Zastosowanie spektroskopii impedancyjnej w badaniach materiałów elektronicznych*, Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1999
190. K. Nitsch, B.W. Licznerski, H. Teterycz, L.J. Golonka, K. Wiśniewski, *AC equivalent circuits of thick film humidity sensors*, *Vacuum*, 50 (1998), s.131-137
191. Standard EIA-198-1-F Electronic Industries Alliance (EIA)
192. *Ceramic interconnect technology handbook*, edited by F.D. Barlow, A. Elshabini, CRC Press, 2007