

BADANIE MATERIAŁÓW DO STRUKTUR GRUBOWARSTWOWYCH TYPU REZYSTOR NA DIELEKTRYKU

Małgorzata Jakubowska¹

W układach wielowarstwowych wykonanych technologią grubowarstwową istnieje problem z wprowadzaniem rezystorów. Najczęściej wprowadza się je nadrukowując rezystor na ostatnią warstwę dielektryka. Jednakże wymaga to stosowania materiałów rezystywnych o specjalnych własnościach. W artykule omówiono problemy związane z rezystorami nanoszonymi na warstwę dielektryczną oraz podano przykłady opracowanych materiałów do tych struktur.

1. WSTĘP

Dążenie do miniaturyzacji układów elektronicznych jest realizowane w mikroukładach wielowarstwowych poprzez zwiększanie w nich gęstości upakowania elementów. Można to osiągnąć poprzez stosowanie coraz węższych ścieżek i mniejszych odstępów między nimi, mniejszych okienek itp. i/lub poprzez zwiększenie liczby warstw nadrukowanych na płytce podłożowej.

Szerokość ścieżek w tradycyjnych mikroukładach wielowarstwowych wynosi zazwyczaj 100-200 μm , a odstęp między nimi 150-200 μm [1]. Obecnie istnieją materiały grubowarstwowe pozwalające na otrzymywanie ścieżek o szerokości 20-50 μm . Są to tzw. pasty światłoczułe, które nanosi się na podłoże stosując połączenie tradycyjnej technologii grubowarstwowej i fotolitografii. Technologia ta różni się w stosunku do tradycyjnej technologii grubowarstwowej wprowadzeniem dodatkowych operacji naświetlania nadrukowanej i wysuszonej warstwy przez fotomaszkę, oraz procesu wymywania nie naświetlonej części warstwy [2]. Innym sposobem na zwiększenie gęstości upakowania jest zwiększenie poziomów (warstw) w mikroukładzie. Liczba poziomów warstw w tradycyjnej strukturze wielowarstwowej otrzymanej technologią grubowarstwową dochodzi nawet do kilkunastu.

¹⁾ Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, 01-919 Warszawa, ul. Wólczyńska 133
e-mail: maljakub@sp.itme.edu.pl

W ostatnich latach opracowano technologię zwaną (*LTCC*) *Low Temperature Co-fired Ceramics* polegającą na nanoszeniu sitodrukiem warstw na niewypaloną folię ceramiczną, sprasowaniu pakietu składającego się z wielu warstw, a następnie wypaleniu całego elementu [3].

Jednakże obie opisane technologie, technologia stosująca pasty światłoczułe, a zwłaszcza technologia *LTCC*, wymagają specjalnego, kosztownego oprzyrządowania oraz często wydłużają proces technologiczny. W związku z tym wielu producentów, głównie ze względów ekonomicznych, w dalszym ciągu wykorzystuje tradycyjną technologię grubowarstwową. Jednakże, w tym przypadku problemem staje się wprowadzanie do mikroukładu rezystorów.

Rezystory mogą być wprowadzane do tradycyjnej struktury [4, 5, 6] grubowarstwowej następującymi sposobami:

- a) wykorzystywanie obu stron płytki; to znaczy na jednej stronie umieszcza się strukturę wielowarstwową, na drugiej rezystory;
- b) domontowanie na powierzchni mikroukładu rezystorów chipowych,
- c) podział płytki podłożowej na pole dla rezystorów i pola dla struktury wielowarstwowej składającej się ze ścieżek przewodzących przedzielonych warstwami izolacyjnymi,
- d) naniesienie rezystorów na ostatnią (górną) warstwę dielektryka,
- e) naniesienie rezystorów na podłoża alundowe lub warstwę dielektryka i przykrycie ich strukturą wielowarstwową (*buried resistors*).

Płytkę podłożową, obustronnie zadrukowaną jest dobrym i wygodnym sposobem na zwiększenie powierzchni mikroukładu. Na jednej stronie drukowany jest układ wielowarstwowy, składający się z warstw przewodzących i dielektrycznych, na drugiej zaś rezystory. Jednakże w obszarach blisko krawędzi płytki trudno jest osiągnąć dobrą niezawodność połączeń. Jeśli podłoża są wypalane, leżąc płasko na taśmie to struktura wielowarstwowa lub rezystory mogą zachowywać się w sposób niekontrolowany, będąc umieszczonymi w pozycji "do góry nogami". Ponadto, potrzebne są także specjalne uchwyty, aby zapobiec kontaktowi stopionej warstwy dielektrycznej i przewodzącej z taśmą w piecu, podczas procesu wypalania. Takie rozwiązania są czasem stosowane w przemyśle, zwłaszcza przy produkcji układów o wysokiej gęstości upakowania [7].

Dodatkowy montaż do powierzchni struktury wielowarstwowej rezystorów chipowych stosuje się zwykle w przypadkach, gdy wymagana jest ściśle określona wartość rezystancji lub gdy potrzebny jest rezystor o podwyższonej precyzji. Rezystory te mogą być domontowywane metodą lutowania lub mikromontażu drutowego termo- lub ultrakompresji. Sposób ten jest używany w przypadkach, gdy produkowane są krótkie serie mikroukładów [8].

Podział płytki podłożowej na sektor rezystorów i sektor struktury wielowarstwowej warstw przewodzących i dielektrycznych wygląda z pozoru bardzo atrakcyjnie. Jednakże w procesie sitodruku pojawiają się problemy przy zmianie poziomu drukowania w czasie przechodzenia z jednego sektora do drugiego. Różnice poziomów mogą wynosić

nawet do kilkuset mikronów. Niedogodnością może być także ugięcie ścieżek łączących oba obszary płytki.

Wszystkie te sposoby nie znalazły powszechnego zastosowania w technologii grubowarstwowej ze względu na liczne ich wady.

Najprostszym sposobem wprowadzenia rezystorów do struktury wielowarstwowej jest nadrukowanie i wypalenie ich na górnej warstwie dielektryka gotowego już układu wielowarstwowego. Ogranicza to liczbę wypalów rezystora do jednego i eliminuje duże zmiany poziomów w strukturze. Konieczne jest oczywiście znalezienie dużych, płaskich powierzchni pokrytych warstwą dielektryka, ale nie ogranicza to pola, na którym rezystory mogą być nadrukowane. Konfiguracja ta pozwala na zastosowanie trimmingu laserowego. Jednak i ta metoda nie jest pozbawiona wad. Istnieją problemy z doбором odpowiednich materiałów do tej struktury. Wiele dielektryków wykazuje po wypaleniu nierówności będące pozostałością po pojedynczych drutach siatki, przez którą wykonano proces sitodruku. Warstwa dielektryczna może powodować ugięcie płytki podłożowej z powodu niezgodności we współczynnikach rozszerzalności termicznej podłoża i dielektryka. Należy również brać pod uwagę reakcje pomiędzy warstwą rezystywną a warstwą dielektryczną. Vest [9] opisuje wpływ efektu rozpuszczania płytki alundowej przez warstwę rezystywną, na własności rezystora. Należy spodziewać się, że efekt interakcji pomiędzy warstwą dielektryka i rezystora będzie jeszcze silniejszy [10-15]. Jednak to właśnie ten sposób wprowadzania rezystora do mikroukładu jest dosyć często stosowany.

W układach wielowarstwowych, rezystory umiejscawia się także pod warstwą dielektryczną lub nawet na dwóch poziomach, tzn. pierwsza warstwa rezystorów jest oddzielona od drugiej warstwą izolacyjną [16-20]. Rezystory przykryte warstwą dielektryczną nazywają się rezystorami zagrzebanymi *burried resistors*.

Umieszczenie rezystorów na warstwie dielektrycznej jak i przykrycie ich warstwą dielektryczną wymaga zastosowania specjalnie opracowanych do tego celu materiałów grubowarstwowych.

Materiały grubowarstwowe, a zwłaszcza pasty rezystywne są zwykle tak projektowane, aby nakładać je na podłoża alundowe 96% Al_2O_3 . Podczas wypalania takiej warstwy na podłożu alundowym, szkliwo zawarte w paście mięknie i topi się, zwilżając oraz wchodząc w reakcje chemiczną z ziarnami fazy przewodzącej (np. dwutlenku rutenu). Reaguje ono także z tlenkiem glinu zawartym w podłożu oraz w niewielkim stopniu z innymi składnikami podłoża. Obie te reakcje mają wpływ na właściwości wytworzonego rezystora.

W przypadku kiedy podłożo alundowe zostanie zamienione warstwą dielektryczną sytuacja jest zupełnie inna [21]. Trójtlenek glinu, nawet jeśli obecny, jest zwykle składnikiem szkliwa lub pełni rolę wypełniacza w warstwie dielektrycznej. Jego wpływ na rezystancję tworzącego się rezystora będzie zredukowany i ostateczna wartość rezystancji będzie inna niż dla rezystora znajdującego się na alundzie. Inne składniki warstwy dielektrycznej będą reagowały ze szkliwem znajdującym się w rezystorze lub będą

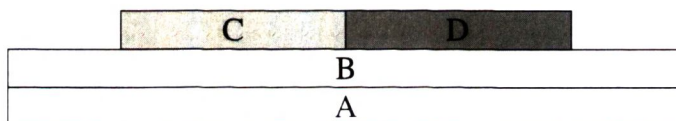
absorbowane do jego struktury. W niektórych przypadkach efekt ten może być niezauważalny, w innych może mieć wpływ na całą strukturę rezystora.

Dlatego bardzo ważne jest znalezienie takich zestawów past rezystywnych i dielektrycznych, aby dobrze ze sobą współpracowały, tzn. efekt wzajemnego działania powodujący zaburzenia w strukturach obu warstw był jak najmniejszy.

2. STRUKTURA MODELOWA - (REZYSTOR NA WARSTWIE DIELEKTRYCZNEJ)

Najprostszą strukturą typu (R-D) rezystor na dielektryku, rozpatrywaną w niniejszym artykule jako struktura modelowa, jest mikroukład, w którym rezystor jest umiejscowiony na warstwie dielektrycznej leżącej bezpośrednio na podłożu. Strukturę tę otrzymuje się poprzez nadrukowanie na podłoże alundowe (96% Al_2O_3), wysuszenie i wypalenie w odpowiedniej atmosferze i temperaturze past w następującej kolejności:

- pasty dielektrycznej,
- pasty przewodzącej na kontakty (wyprowadzenia) rezystora,
- pasty rezystywnej.



Schemat idealowy tej struktury przedstawiono na Rys.1.

- a - podłoże,
- b - warstwa dielektryczna,
- c - wyprowadzenie rezystora,
- d - warstwa rezystywna.

Rys. 1. Schemat najprostszej struktury typu R-D (*rezystor na dielektryku*).

Fig. 1. The scheme of simple structure resistor on dielectric. a- the substrate, b - dielectric layer, c - terminations of resistor, d - resistor.

Dlatego mówiąc o doborze materiałów do takiej struktury należy brać pod uwagę zestaw materiałów składający się z:

- pasty lub past dielektrycznych na której leży rezystor lub przykrywa ona rezystor (w przypadku rezystorów zagrzebanych),
- pasty przewodzącej, z której wykonane są wyprowadzenia (kontakty) rezystora,
- pasty (rodziny past) rezystywnej, z której jest wykonany rezystor,
- ewentualnie pasty zabezpieczającej rezystor i umożliwiającej korekcję laserową rezystora.

3. KOMPATYBILNOŚĆ PAST I WARSTW ORAZ KRYTERIA DOBORU PAST DO STRUKTURY MODELWEJ TYPU REZYSTOR NA WARSTWIE DIELEKTRYCZNEJ

Dwie pasty uważa się za technologicznie zgodne jeśli spełniają następujące warunki [22]:

- ich procesy aplikacyjne są tak dobrane, że możliwe jest zastosowanie ich na jednym podłożu,
- warstwy powstałe z tych past, po nałożeniu jedna na drugą i wypaleniu, nie zmieniają wzajemnie swoich właściwości lub zmieniają je w stopniu, który nie ogranicza możliwości zastosowania ich zgodnie z przeznaczeniem.

Zagadnienie to jest szczególnie ważne dla past przeznaczonych do grubowarstwowych mikroukładów wielowarstwowych, w tym dla omawianych struktur *R-D*, gdzie na jednej płytce mogą stykać się ze sobą wszystkie rodzaje warstw: przewodzące, dielektryczne, rezystywne, zabezpieczające. Najbardziej krytycznymi pod tym względem punktami mikroukładu, są obszary kontaktu warstwy rezystywnej z warstwą przewodzącą i dielektryczną. Szymański et al. [22] stwierdzili, że wszystkie parametry rezystorów zależą od właściwego doboru współpracujących ze sobą warstw. Wykonanie oceny zgodności technologicznej past jest często bardzo trudne, bowiem oprócz właściwości samych past duże znaczenie mają: rodzaj zastosowanego podłoża oraz warunki prowadzenia procesu technologicznego.

Sprawdzenie kompatybilności, niezależnie od charakteru badanych past, wymaga:

- oceny wyglądu zewnętrznego,
- pomiaru rezystancji powierzchniowej nakładki dwu warstw lub obszaru styku warstw,
- wyznaczenia wpływu nakładki lub obszaru styku dwóch warstw na parametry układu.

Najczęściej widocznymi, przy ocenie wyglądu zewnętrznego, objawami niekompatybilności kontaktu warstw są pęcherze, kratery, pęknięcia w miejscu kontaktowania się warstw, wyraźna zmiana koloru nakładki i złuszczenie się warstwy. Wykonanie badań mikroskopowych struktur jest bardzo ważne, bowiem często obserwowanym wadom struktury warstwy nie towarzyszy pogorszenie się podstawowych parametrów elektrycznych struktury. Mimo to, defekty takie należy uznać za dyskwalifikujące pod względem kompatybilności, gdyż stanowią one potencjalne punkty uszkodzeń podzespołu podczas eksploatacji.

W wyniku reakcji jaka zachodzi w warstwach i pomiędzy nimi podczas procesu wypalania ulegają zmianie ich podstawowe parametry elektryczne. W przypadku struktury modelowej *rezystor na warstwie dielektrycznej* należy brać pod uwagę stosunek rezystancji rezystora na warstwie dielektrycznej do rezystancji rezystora osadzonego na alundzie. Im jest on bliższy jedności, tym mniejsza wzajemna interakcja warstw. Zaobserwować można dyfuzję szkliwa z rezystora do warstwy na której leży rezystor, jak

również dyfuzję jonów z warstwy dielektryka do wnętrza rezystora. Obszar zetknięcia dwóch warstw o różnych właściwościach dobrze współpracujących ze sobą, charakteryzuje bardzo wąski obszar przejściowy i szybka zmiana właściwości warstw w tym obszarze. W idealnym przypadku wartość tych parametrów zmieniałaby się w sposób skokowy. Im warstwy lepiej ze sobą współpracują, tym wielkość obszaru przejściowego jest mniejsza. Tak więc, szerokość obszaru przejściowego można przyjąć za jedno z kryteriów dobrej współpracy warstw.

W rzeczywistości pomiar szerokości tego obszaru jest bardzo trudny, a często nawet niemożliwy. Natomiast w praktyce, bardzo często określenie wpływu tego obszaru na parametry struktury dokonuje się w sposób pośredni. Na przykład, w przypadku rezystora, charakter zmian parametru np. rezystancji na kwadrat w funkcji długości rezystora określa w sposób pośredni wielkość obszaru przejściowego oraz wpływu obszaru na styku rezystora z wyprowadzeniami wykonanymi z warstwy przewodzącej. W tym ostatnim przypadku najczęściej obserwuje się dyfuzję jonów zwłaszcza srebrowych z warstwy przewodzącej do wnętrza rezystora, powodując tym samym zmniejszenie jego rezystancji [23]. Na Rys. 2. przedstawiono schemat zmian rezystancji powierzchniowej rezystorów wraz z jego długością. Rezystory wykonano wg wzoru testowego przedstawionego na Rys. 2a z pasty rezystywnej na bazie dwutlenku rutenu i szklawie ołowiowo-bismutowo-borokrzemowym o rezystancji $1 \text{ k}\Omega/\square$ i naniesionych zarówno na podłoże alundowe, jak i na dwie warstwy dielektryczne D-421 (ITME) i D-304 (ITME). Szerokość wszystkich rezystorów wynosiła 1 mm, a długość od 1 - 9 mm. Wpływ obszaru przejściowego na rezystancję uwidacznia się w odchyleniu charakterystyki od linii prostej dla rezystorów o mniejszej długości. Im dyfuzja ta jest większa tym efekt staje się bardziej widoczny.



a.



b.

Rys. 2. a - Wzór testowy do badania rezystorów na warstwie dielektrycznej; b - Zależność rezystancji od długości rezystora dla rezystorów wykonanych z pasty R-RuO_2 i naniesionych na warstwy dielektryczne D-421 i D-304 oraz bezpośrednio na podłoże alundowe.

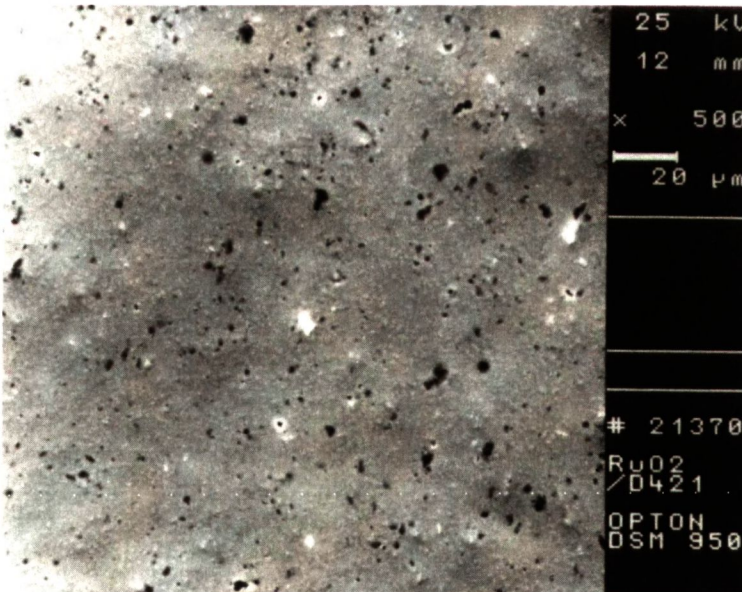
Fig.2. a - Test pattern for investigations resistors on dielectrics; b- Resistivity versus resistors length for resistors on dielectrics D-421, D-304 and on bare alumina substrate.

Ostatecznie uznanie dwóch past za kompatybilne musi być poprzedzone sprawdzeniem wszystkich podstawowych parametrów struktury, a w szczególności stałości ich w czasie różnorodnych narażeń [24-25].

Przy doborze materiałów do struktury typu *rezystor na warstwie dielektrycznej* trzeba przede wszystkim brać pod uwagę: np. rozdzielczość druku, osiąganą rezystancję, adhezję, podatność na lutowanie i mikromontaż oraz migrację w przypadku warstw przewodzących, leżących na warstwie dielektrycznej. Zjawisko migracji jest szczególnie dotkliwe w przypadku past przewodzących zawierających srebro. Zwłaszcza pod wpływem wilgoci jony srebra migrują w kierunku ujemnego potencjału, tworząc dendryty, które w krańcowym przypadku mogą powodować zwarcia. W przypadku past rezystywnych nakładanych na warstwę dielektryczną należy zbadać: osiąganą rezystancję i (*TWR*) *temperaturowy współczynnik rezystancji* rezystorów, powtarzalność parametrów rezystorów, wpływ interakcji pomiędzy warstwą rezystywną a warstwami dielektryczną i przewodzącą, istnienie fluktuacji w grubości rezystorów, a zwłaszcza wpływ narażeń termicznych.

4. MIKROSTRUKTURA TYPU REZYSTOR NA WARSTWIE DIELEKTRYCZNEJ

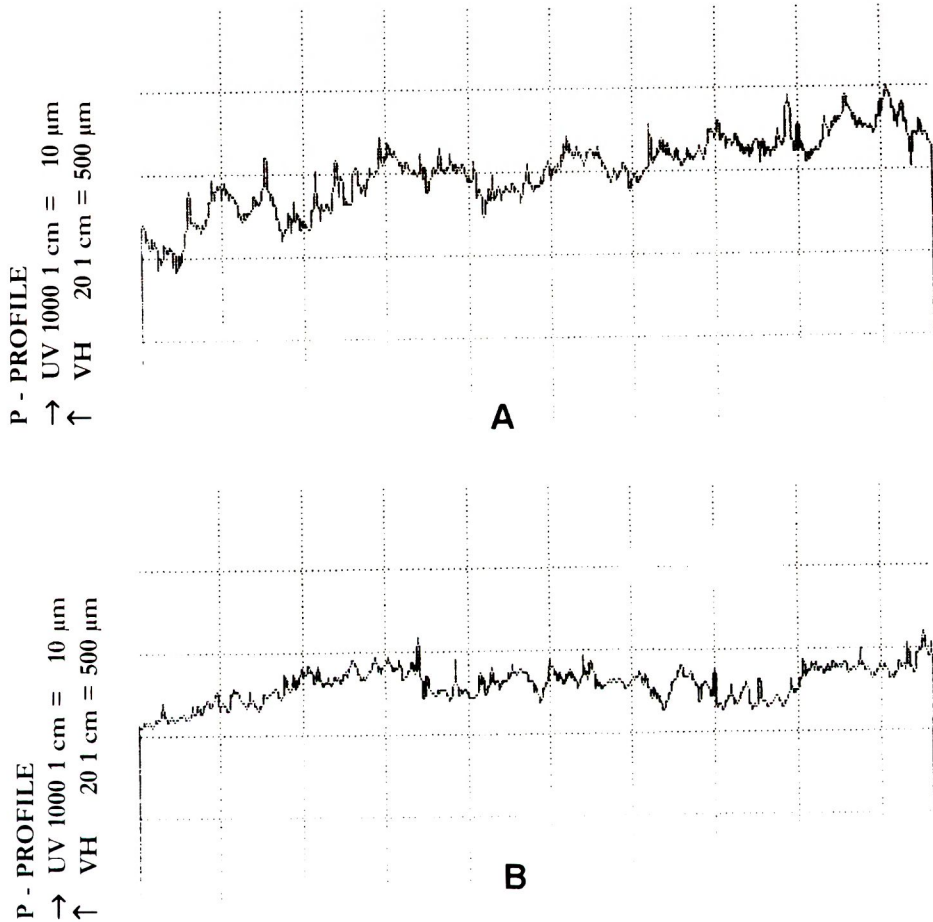
Na Rys. 3 przedstawiono mikrostrukturę warstwy rezystywnej ("widok z góry") wykonanej z pasty składającej się z 37% dwutlenku rutenu i 43% szkliva ołowiuo-wkrzemowo-aluminiowego i leżącą na warstwie dielektrycznej D-421. Struktura ta jest jednorodna, jednak widoczne są pewne nierówności pochodzące z warstwy dielektrycznej.



Rys.3. Mikrostruktura warstwy rezystywnej leżącej na warstwie dielektrycznej, "widok z góry". Powiększenie 500 x.

Fig.3. Microstructure of resistive layer on dielectric. The top view. Magnification 500x.

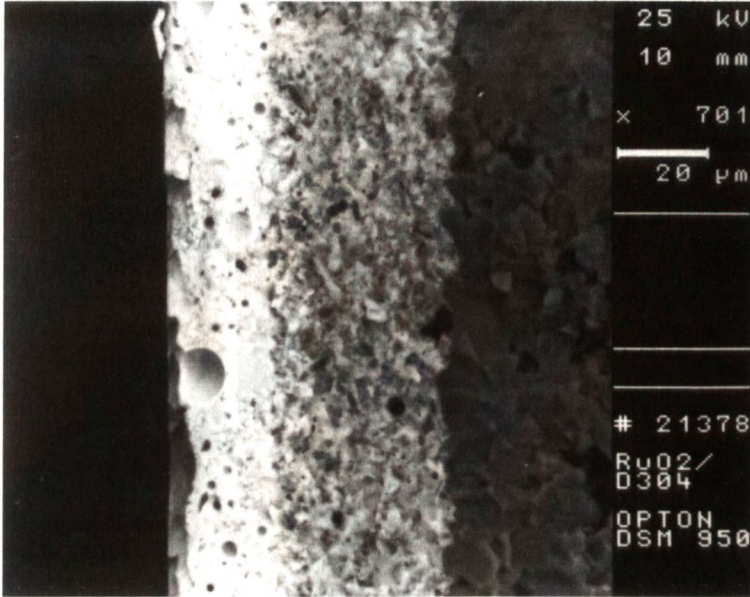
Potwierdzają to profilogramy obu warstw pokazane na Rys. 4 oraz pomiar chropowatości. R_a dla warstwy dielektrycznej wynosi $1.2 \mu\text{m}$, a dla warstwy rezystywnej naniesionej na warstwę dielektryczną wynosi $0.8 \mu\text{m}$, podczas gdy w przypadku rezystorów naniesionych na płytkę alundową wartości te wynoszą odpowiednio dla płytki alundowej $0.2 \mu\text{m}$ i dla warstwy rezystywnej $0.4 \mu\text{m}$. W tej strukturze nierówności warstw nie wpływają zasadniczo na jakość struktury, jednakże w przypadku wystąpienia większych nierówności może to mieć niekorzystny wpływ na parametry samego rezystora.



Rys.4 . Profilogramy warstwy rezystywnej (A) i warstwy dielektrycznej (B) w strukturze typu rezystor na dielektryku.

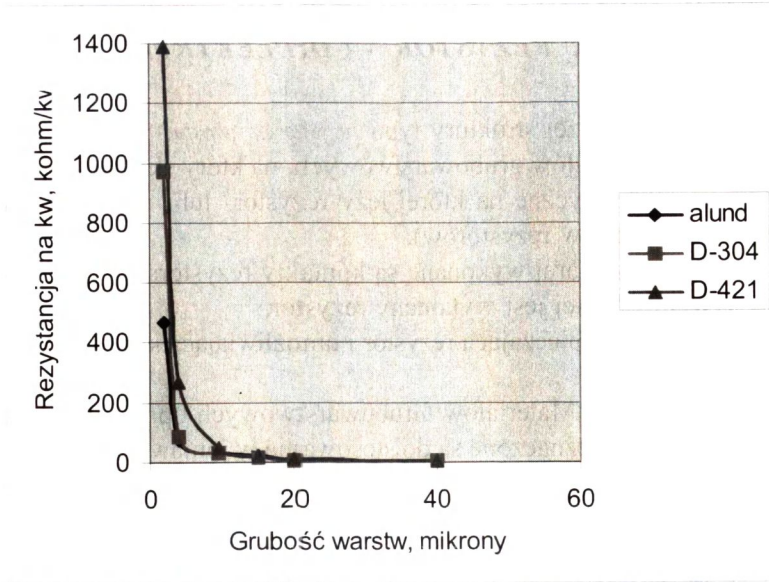
Fig.4. The profile of resistive layer (A) and dielectric layer (B) in resistor on dielectric structure.

Na Rys. 5 przedstawiono przekrój poprzeczny struktury rezystora wykonanego z opisanej wyżej pasty i leżącego na warstwie dielektrycznej wykonanej z pasty D-304 (ITME). Na przekroju wyraźnie widoczna jest warstwa pośrednia powstała między warstwą dielektryczną a rezystywną o szerokości $\sim 7 \mu\text{m}$.

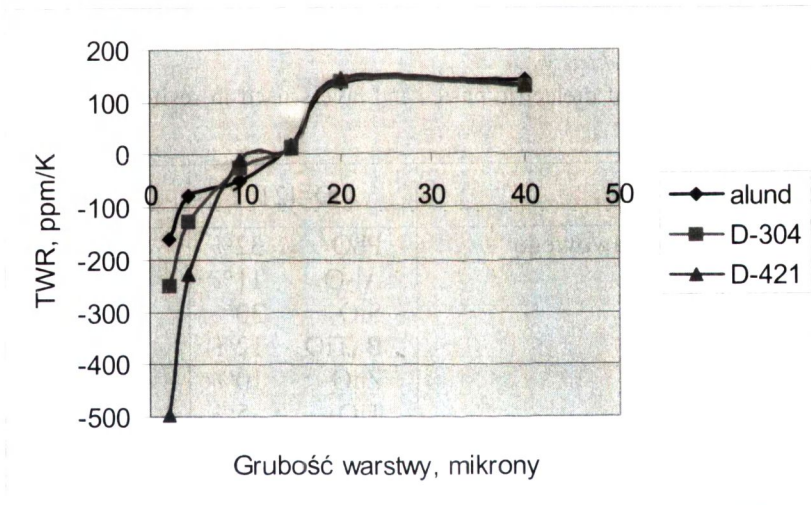


Rys.5. Przekrój poprzeczny warstwy rezystywnej z RuO_2 leżącej na warstwie D-304.
Fig. 5. Cross-section of resistive layer (RuO_2) on dielectric layer D-304.

Aby pokazać wpływ warstwy pośredniej na przewodnictwo rezystora leżącego na warstwie dielektrycznej, zbadano rezystancję i temperaturowy współczynnik rezystancji rezystorów o zmieniającej się grubości. Na podstawie obrazów mikroskopowych stwierdzono, że szerokość obszaru przejściowego nie zmieniała się w sposób znaczący. Na Rys. 6 i 7 przedstawiono zależność rezystancji od grubości rezystorów leżących na warstwach dielektrycznych D-421 i D-304 oraz dla porównania na płytce alundowej. Stwierdzono, że istnieje wpływ warstwy pośredniej powstałej z reakcji warstwy rezystywnej z warstwą dielektryczną na przewodnictwo rezystora. Świadczy o tym również zmiana temperaturowego współczynnika rezystancji z dodatniego na ujemny.



Rys. 6. Zależność rezystancji rezystorów leżących na warstwach dielektrycznych D-304 i D-421 oraz na alundzie od grubości rezystorów.
Fig. 6. Dependence of resistivity of resistors on dielectrics D-304, D-421 and bare alumina from the resistors thickness.



Rys. 7. Zależność temperaturowego współczynnika rezystancji rezystorów leżących na warstwach dielektrycznych D-304 i D-421 oraz na alundzie od grubości rezystorów.
Fig. 7. Dependence of temperature coefficient of resistance of resistors on dielectrics D-304, D-421 and bare alumina from the resistors thickness.

5. PRZYKŁADY MATERIAŁÓW GRUBOWARSTWOWYCH W STRUKTURACH TYPU *REZYSTOR NA DIELEKTRYKU*

Jak wspomniano powyżej struktury typu *rezystor na warstwie dielektrycznej* wymagają stosowania zestawu materiałów grubowarstwowych, na który składają się:

- pasta lub pasty dielektryczne na której leży rezystor lub przykrywa rezystor (w przypadku dwóch warstw rezystorów),
- pasta przewodząca, z której wykonane są kontakty rezystora,
- pasta rezystywna, z której jest wykonany rezystor,
- ewentualnie pasta zabezpieczająca rezystor i umożliwiająca korekcję laserową rezystora.

W ITME, w Zakładzie Materiałów Grubowarstwowych opracowano szereg zestawów materiałów, które przeznaczone są do stosowania w omawianych strukturach. W niniejszym artykule przedstawiono jedynie przykłady materiałów oraz podano ich najbardziej charakterystyczne właściwości.

5.1. Pasty dielektryczne

W omawianych strukturach typu *rezystor na warstwie dielektrycznej* zastosowano pasty dielektryczne D-421[26] i D-304, opracowane w ITME, obie wypalano w standardowej temperaturze 850°C. Są to tzw. dielektryki krystalizujące z dodatkiem wypełniacza, którym jest tlenek glinu, krzemu itp. Podstawowe właściwości tych past oraz wykonanych z nich warstw są zawarte w Tab. 1.

Tabela 1. Podstawowe właściwości past i warstw dielektrycznych stosowanych w strukturach typu *rezystor na warstwie dielektrycznej*.

Table 1. Main parameters of dielectric pastes and layers used in resistor on dielectric structures.

Właściwość warstwy	D-421	D-304
Skład szkliva podstawowego	PbO 32%	SiO ₂ 25%
	Al ₂ O ₃ 11%	ZnO ₂ 30%
	SiO ₂ 30%	BaO 23%
	BaTiO ₃ 12%	B ₂ O ₃ 5%
	ZnO 10%	Al ₂ O ₃ 8%
	TiO ₂ 5%	TiO ₂ 2%
		ZrO ₂ 3%
	CdO 3%	
	PbO 1%	
Współczynnik rozszerzalności szkliva podstawowego 10 ⁻⁶ 1/°C	α _{200 C} = 4,57	α ₃₀₀ = 5,2
	α _{300 C} = 5,02	α ₄₀₀ = 5,28
	α _{25-400 C} = 5,52	α ₅₀₀ = 5,40

c.d. Tabeli 1

Właściwość warstwy	D-421	D-304
Gęstość szkliva, g/cm ³	3,65	4,27
DTM	720 °C	730 °C
T _g	590 °C	510 °C
Skład pasty	Szklivo 90,7% Al ₂ O ₃ 4,8% Pigment 4,5%	Szklivo 95% α-Al ₂ O ₃ 2,5% Si O ₂ 2,5%
Temperatura wypału	850 °C	850 °C
Grubość warstwy przy trzykrotnym nadruku	66 μm	72 μm
Względna przenikalność dielektryczna	4,0	5,2
Współczynnik strat dielektrycznych	66 x 10 ⁻⁴	86 x 10 ⁻⁴
Napięcie przebicia	> 800 V	>1000V

5.2. Pasty przewodzące

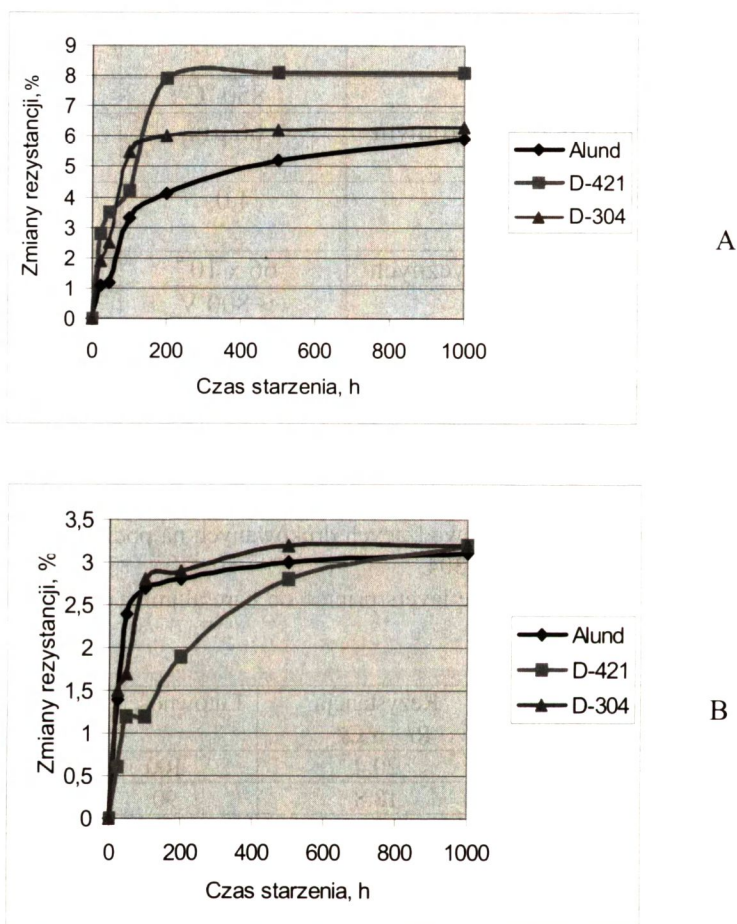
W tabeli 1 podano podstawowe parametry warstw przewodzących naniesionych na warstwy dielektryczne

Tabela 2. Rezystancja warstw przewodzących drukowanych na podłożu alundowym i na warstwach dielektrycznych D-421 i D-304.

Table 2. Resistivity of conductive layers printed on bare alumina and dielectrics D-421 and D-304.

Symbol pasty	Rodzaj podłoża	Rezystancja R/ ,mΩ/	Lutowność , %	Adhezja, N/4mm ²
Pd/Ag (P-202,ITME)	Al ₂ O ₃	20.4	100	19
	S-304	18.8	90	17
	D-421	23.1	90	18
Ag (P-120, ITME)	Al ₂ O ₃	2.2	100	18
	S-304	2.5	95	19
	D-421	3.1	95	16
Ni+B (P-727, ITME)	Al ₂ O ₃	47.8	70	10
	S-304	54.1	60	9
	D-421	53.5	50	9
Ni ₃ B76	Al ₂ O ₃	75.3	60	8
	S-304	79.8	40	8
	D-421	80.1	40	8

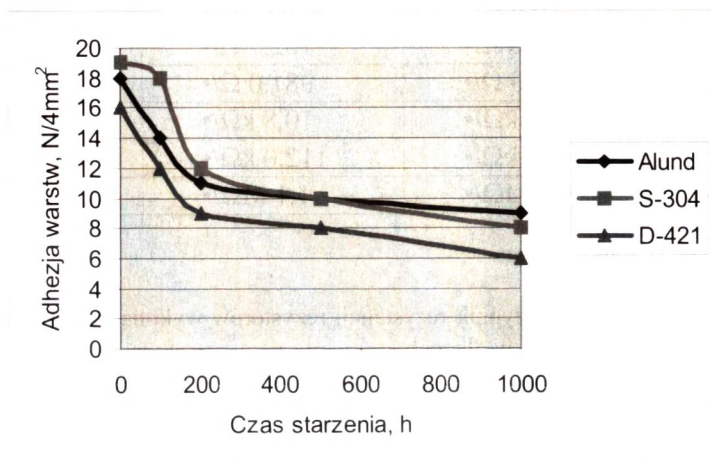
Warstwy te poddano również starzeniu termicznemu. Na Rys. 8 przedstawiono wyniki zmian rezystancji warstw palladowo-srebrowych i niklowych starzonych w temperaturze 125 °C. W obu przypadkach obserwuje się szybkie zmiany rezystancji w ciągu pierwszych 48 godzin narażenia, a następnie następuje stabilizacja parametrów w ciągu dalszych godzin starzenia. Zmiany rezystancji warstw przewodzących na warstwach dielektrycznych są większe niż warstw leżących na alundzie. Jest to spowodowane ułatwionym tworzeniem warstwy pośredniej pomiędzy warstwą przewodzącą i dielektryczną. Zmiany rezystancji warstw palladowo-srebrowych są większe niż warstw niklowych, co jest spowodowane dyfuzją srebra do warstwy dielektrycznej [27].



Rys. 8. Zmiany rezystancji warstw palladowo-srebrowych (A) oraz warstw niklowych (B) nadrukowanych na warstwy D-421 i D-304 oraz na podłoże alundowe w czasie starzenia w temperaturze 125 °C.

Fig. 8. Resistance changes of palladium silver (A) and nickel (B) layers printed on D-421, D-304 and bare alumina during thermal ageing at 125 °C.

Na Rys. 9 przedstawiono spadek adhezji warstwy srebrowej umiejscowionej na alundzie i na warstwach dielektrycznych w czasie starzenia termicznego w 125 °C. W tym przypadku również adhezja spada gwałtownie w ciągu pierwszych 48 godzin, a dalej spadek ten jest mniejszy. W przypadku past palladowo-srebrowych adhezja po początkowym spadku, po 500 godzinach zaczyna wzrastać, co jest spowodowane powstawaniem związków intermetalicznych między lutownikiem, a srebrem [27].



Rys. 9. Zmiana adhezji warstw srebrowych nadrukowanych na warstwy D-421 i D-304 oraz na podłoże alundowe podczas starzenia termicznego w temperaturze 125 °C.

Fig. 9. Adhesion changes of silver layers printed on D-421, D-304 and bare alumina during thermal ageing at 125 °C.

5.3. Pasty rezystywne

W niniejszym artykule zostanie przedstawione zachowanie się rezystorów wykonanych z jednej rodziny past rezystywnych opracowanych w ITME [28]. Pasty te są oparte na dwutlenku rutenu oraz rutenianie ołowiu, w szczególności do past o wyższej rezystancji. W Tab. 3 i 4 podano podstawowe parametry rezystorów wykonanych z opracowanej rodziny past R-350 i umiejscowionych na podłożach z warstwy dielektrycznej oraz dla porównania na podłożu alundowym. Uzyskane dane wskazują, że istnieje interakcja warstwy rezystywnej z warstwą dielektryczną, jednakże nie wpływa ona w zasadniczy sposób na jakość rezystorów, również podczas starzenia termicznego.

Tabela 3. Rezystancja powierzchniowa rezystorów wykonanych z past serii R-350 (ITME) usytuowanych na różnych podłożach.

Table 3. Resistivity of resistors made from paste series R-350 (ITME) placed on different substrates.

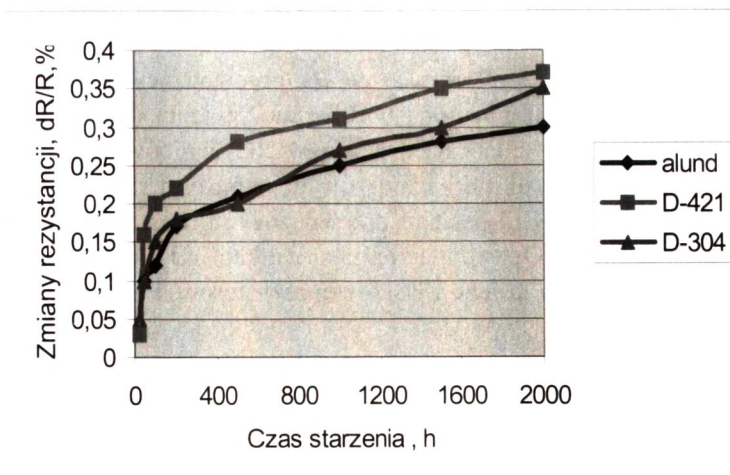
Symbol pasty	Rodzaj podłoża		
	96% Al ₂ O ₃	D-421	D-304
R-351	10,8 Ω/•	10,2 Ω/•	9,9 Ω/•
R-352	102,0 Ω/•	102,7 Ω/•	97,7 Ω/•
R-353	927,0 Ω/•	981,0 Ω/•	985,0 Ω/•
R-354	9,2 kΩ/•	10,8 kΩ/•	10,6 kΩ/•
R-355	107,0 kΩ/•	112,0 kΩ/•	114,0 kΩ/•
R-356	9,8 MΩ/•	1,1 MΩ/•	1,2 MΩ/•

Tabela 4. Temperaturowy współczynnik rezystancji rezystorów wykonanych z past serii R-350 (ITME) usytuowanych na różnych podłożach.

Table 4. Temperature coefficient of resistance of resistors made from paste series R-350 (ITME) placed on different substrates.

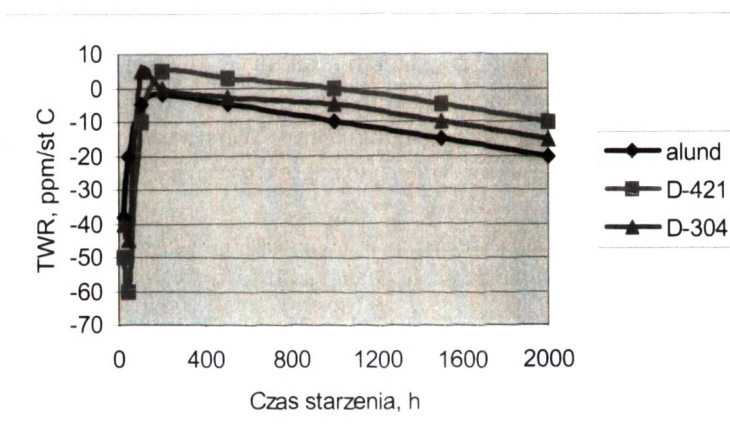
Symbol pasty	Rodzaj podłoża		
	96 % Al ₂ O ₃	D-421	D-304
R-351	66 ppm/°C	108 ppm/°C	122 ppm/°C
R-352	45 ppm/°C	98 ppm/°C	121 ppm/°C
R-353	-30 ppm/°C	-35 ppm/°C	-16 ppm/°C
R-354	29 ppm/°C	27 ppm/°C	47 ppm/°C
R-355	13 ppm/°C	26 ppm/°C	12 ppm/°C
R-356	-89 ppm/°C	-27 ppm/°C	-35 ppm/°C

Na Rys. 10 i 11 przedstawiono wyniki starzenia rezystorów wykonanych z pasty R-353 z kontaktami palladowo-srebrowymi w temperaturze 125 °C. Rezystory zostały usytuowane na warstwach dielektrycznych i podłożu alundowym. Zmiany rezystancji jak również temperaturowego współczynnika rezystancji w czasie starzenia nie są zbyt duże w porównaniu z rezystorami umieszczonymi bezpośrednio na podłożu alundowym, co świadczy, że rezystory dobrze współpracują z obiema rodzajami warstw dielektrycznych.



Rys. 10. Zmiany rezystancji rezystorów wykonanych z pasty R-353 (ITME) z kontaktami palladowo-srebrowymi w czasie starzenia w temperaturze 125 °C. Rezystory usytuowane zostały w warstwach dielektrycznych i podłożu alundowym.

Fig. 10. Resistivity changes of resistors made from paste R-353 (ITME) placed on dielectrics and bare alumina substrates during thermal ageing at 125 °C.



Rys. 11. Zmiany temperaturowego współczynnika rezystancji rezystorów wykonanych z pasty R-353 z kontaktami palladowo-srebrowymi w czasie starzenia w temperaturze 125 °C. Rezystory zostały usytuowane na warstwach dielektrycznych i podłożu alundowym.

Fig. 11. Temperature coefficient of resistance changes of resistors made from paste R-353 (ITME) placed on dielectrics and bare alumina substrates during thermal ageing at 125 °C.

5.4. Pasta zabezpieczająca

W celu zabezpieczenia rezystorów i ścieżek przewodzących przed szkodliwym działaniem czynników zewnętrznych oraz w celu umożliwienia korekcji laserowej rezystorów stosuje się pastę zabezpieczającą. Pasta D-202 opracowana w ITME, bardzo dobrze współpracuje ze wszystkimi badanymi rodzinami past rezystywnych, jak również z opisanymi w punkcie 5.2 pastami przewodzącymi. Pasta D-202 oparta jest na szklawie $\text{PbO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ z dodatkiem barwnika $\text{CrO}_2 - \text{B}_2\text{O}_3$ nadającym jej zielony kolor konieczny przy korekcji laserowej rezystorów. Pasta ta wypalana jest w temperaturze 570 °C.

6. PODSUMOWANIE

W niniejszym artykule starano się zarysować problemy związane z wytwarzaniem tradycyjnych struktur grubowarstwowych (rezystor usytuowany na warstwie dielektrycznej). Struktury te są stosowane, nie tylko w mikroukładach, np. do drukarek laserowych, różnego rodzaju czujnikach, mikroukładach w samochodach, ale również bardzo często występują w zastosowaniach poza elektronicznymi np. jako podgrzewacze w sprzęcie powszechnego użytku. W tych dwóch ostatnich przypadkach warstwa izolacyjna jest nakładana na podłoże metalowe (stalowe), a na nią nakładany jest rezystor. Oczywiście wtedy wymagany jest zupełnie inny zestaw past, jednakże problemy związane z interakcją warstw dielektrycznych i rezystywnych są podobne.

Innym, bardzo interesującym, przykładem struktury typu *rezystor na warstwie dielektrycznej* jest osadzenie rezystora mocy na warstwie dielektrycznej dobrze przewodzącej ciepło, wykonanej na bazie kubicznego azotku boru. Warstwy te są obecnie przedmiotem badań w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Van Gorp A., Van Mourik J.: Development of a multilayer/overglaze system. Proc. of 5th European Hybrid Microelectronics Conference, 1985, Stresa, Italy, .2-9
- [2] Vrana M., et al.: Photoimageable thick films for multichip modules . Proc. of Int. Conf on Microelectronic Technologies, June 1994, Windsor , England, 41-44
- [3] Mistler R.E, Twiname E.R.: Tape casting theory and practice. The America Ceramic Society, 2000
- [4] David J., Buehler M.: A numerical analysis of various cross sheet resistor test structures, Solid State Electronics 20, 1977, 539-543
- [5] Sugishita N., et al.: Processing considerations of thick film devices with multilayered resistors. Electrocomp. Sci. and Techn., 9, 1981, 1, 59-65

- [6] Strecher G.: Thick film resistors not only on ceramics: how to obtain suitable layout parameters. *Hybrid Circuits*, 1988, 17, 24-27
- [7] Pitt K.E.G.: Thick film resistor on dielectrics. M.Phil. Thesis, Middlesex Polytechnic, 1987
- [8] Pitt K.E.G.: Introduction to thick film technology. Macintosh, 1981
- [9] Vest R.W.: Conduction mechanism in thick film microcircuits. Final Report, DAHC-15-70-97, 1975
- [10] Adie G., Hołodnik B., Pitt K.: SEM/EDX analyses of some interactions between thick film resistors and dielectrics. *Microelectronics J.*, 15,1984, 2, 38-43
- [11] Bober B., Pitt K. E.G.: Further studies of the interaction between thick film resistors and dielectric, *Microelectronics J.*, 18, 1987, 1, .35-43
- [12] Bober B., Pitt K.E.G., Licznernski B.W., Bober Z.: The effect of constituent exchange on the conduction mechanisms of thick film resistors on dielectrics, *Mat. Sci.*, 1987, 3-4, 193-198
- [13] Cattaneo A., Pirozzi L., Morten B., Prudenziatti M.: Influence of the substrate on electrical properties of thick film resistors. *Electrocomp. Sci. and Techn.*, 6,1980.,247-251
- [14] Cattaneo A., Pirozzi L., Morten B., Prudenziatti M.: Influence of the substrate on electrical properties of thick film resistors. *IEEE trans. on CHMT*, 3, 1980, 1, .181-186
- [15] Coleman M.V., Ageing mechanism and stability in thick film resistors. *Hybrid Circuits*, 4, 1984, 36-41
- [16] Hrovat M., et al., Characteristic of thick film resistors fired under dielectric layer. *J. Mat. Sc.Lett.*, .19, 17, Sept.2000, . 1551-5
- [17] Kanda H., et al.: Burried resistors and capacitors for multilayer hybrids. *Proc. of SPIE-Int. Soc. Opt. Eng. Proc. of Spie.*, . 2649. 1995, .47-52
- [18] Hrovat M., Belavic D.: Thick film multilayer circuits with buried resistors - resistors under multilayer dielectric. *Proc. of 6th European Microel. Conf.*, 1987, London, 305-312
- [19] Mason R.C., Bolton P.J.: Thick film screen-printable buried resistors. *Proc. of SPIE-Int. Soc. Opt. Eng. Proc. of Spie.*, . 3582, 1999, .467-472
- [20] Kanda H. et al.: Burried resistors and capacitors for multilayer hybrids. *Proc. of 9th Int. Microel. Conf.*, Japan, 1996, 248-251
- [21] Pitt K.E.G., Chemical constitution and conduction mechanisms in thick film resistors. *J. Mater.Sc.: Mater.Electron.* 7 (1996), 187-190
- [22] Szymański D., Szczytko B.: Metody pomiaru parametrów aplikacyjnych past i warstw grubych. *Prace ITME cz.II*, 1982, z. 5
- [23] Achmatowicz S., Jakubowska M. et al.: The influence of occurrence at resistor-conductor interface on thick film resistor behavior. *Prace Naukowe ITE P.Wr.*, Wrocław 1989, 37, .67-70
- [24] Haskard M., Pitt K.: Thick film technolgy and applications. *Electrochemical Publications Ltd.*, 1997
- [25] Sinnadurai F.N., Spencer P.E., Wilson K.J.: Some observations on the accelerated aging of thick-film resistors. *Electrocomponent Science and Technology.* 6, 1980, 241-246

- [26] Achmatowicz S., Jakubowska M., Zwierkowska E., Szczytko B., Szymański D.: Pasta izolacyjna, Nr pat. 162992
- [27] Court D., Jakubowska M., Pitt K., Spears J.: The effect of thermal aging on the adhesion of thick film copper conductors. Proceedings of International Conference on Electronics Technologies, 6-8 June 1994, Windsor, England, 33-40
- [28] Achmatowicz S., Jakubowska M., Marczak A., Tebeńko I.: Investigation on ruthenium based resistors fired at low temperature. Proc. of 19th Conference of the ISHM Poland, Kozubnik, Sept. 1995, s. 49-52

INVESTIGATIONS OF MATERIALS FOR THICK FILM STRUCTURES RESISTORS ON DIELECTRICS

SUMMARY

Introduction of resistors in thick film multilayer structures always causes some problems. Often they are printed on the top layer of dielectric. This solution needs resistive materials of special parameters. The problems with resistors on dielectrics are discussed in this paper. The examples of elaborated materials are given.