

INSTYTUT
TECHNOLOGII
MATERIAŁÓW
ELEKTRONICZNYCH

PRACE ITME

METODY POMIARU PARAMETRÓW APLIKACYJNYCH PAST I WARSTW GRUBYCH

Część II

1982

Zeszyt 5

**INSTYTUT TECHNOLOGII
MATERIAŁÓW ELEKTRONICZNYCH**

**Dariusz SZYMAŃSKI
Barbara SZCZYTKO**

**METODY POMIARU
PARAMETRÓW APLIKACYJNYCH
PAST I WARSTW GRUBYCH**

Część II

Wydawnictwa Przemysłu Maszynowego WEMA

<http://rcin.org.pl>

Opiniodawca: doc. dr inż. Stanisław NOWAK
Redaktor naczelny PRAC ITME: dr inż. Mieczysław FRĄCKI
Redaktor działowy zeszytu: dr inż. Jan BEKISZ

Sekretarz redakcji: dr inż. Łukasz KACZYŃSKI
Redaktor techniczny: mgr inż. Leszek KRÓL

Adres redakcji:
02-673 Warszawa, ul. Konstruktorska 6
tel. 43-74-61

PL ISSN 0208-0066

6. PARAMETRY WARSTW DIELEKTRYCZNYCH

Miernictwo materiałów dielektrycznych stanowi dzisiaj odrębną i obszerną dziedzinę wiedzy. Dlatego też, biorąc pod uwagę zakres tego opracowania, przedstawione poniżej parametry i metody ich pomiaru stanowią tylko drobny fragment tego zagadnienia.

Rozróżnia się trzy grupy metod pomiarowych przyjmując za kryterium podziału zakres częstotliwości pomiarowych:

- 1) pomiary w zakresie bardzo małych częstotliwości (poniżej 1 Hz),
- 2) pomiary w paśmie mikrofalowym,
- 3) pomiary w zakresie 50 Hz ÷ 100 MHz.

Metody pierwszej grupy stosowane są prawie wyłącznie w badaniach podstawowych materiałów dielektrycznych. Znajomość zmian właściwości dielektryka dla niskich częstotliwości pozwala wyjaśnić wiele zjawisk zachodzących w dielektryku takich jak: mechanizm polaryzacji czy budowę strukturalną. Pomiary takie wymagają wysoce specjalistycznej aparatury. Parametrów tych nie podaje się w katalogach jako charakteryzujących warstwy dielektryczne.

Pomiary w mikrofalowym paśmie częstotliwości wchodzą w zakres miernictwa mikrofalowego. Warstwy dielektryczne, których parametry omawia niniejsze opracowanie, stosunkowo rzadko poddawane są tego rodzaju pomiarom. Wynika to z niewielkiego zastosowania tych materiałów w zakresie mikrofal. Jeśli zaistnieje taka potrzeba, pomiary przeprowadza się najczęściej posługując się rezonatorami wnękowymi. Pomiar warstwy dielektrycznej narażona jest na wiele kłopotów, ponieważ specyfika warstw grubych uniemożliwia oddzielenie badanej warstwy od podłoża, na którym jest ona nałożona. W efekcie pomiarom poddawany jest układ dwu warstw dielektrycznych: ceramicznej (płytki podłożowej) i badanej. Należy to uwzględnić przy pomiarach i przy interpretacji wyników.

Pomiary w zakresie częstotliwości 50 Hz ÷ 100 MHz są wykonywane powszechnie. Wynika to z faktu, że warstwy dielektryczne, o których tu mowa, znajdują zastosowanie w podzespołach elektronicznych pracujących przede wszystkim w tym zakresie częstotliwości. Jednocześnie same pomiary są stosunkowo proste i przeprowadzane na ogólnie dostępnej aparaturze. Opisane poniżej parametry i metody ich pomiarów zalicza się do tej grupy metod pomiarowych. Pasty i warstwy dielektryczne zależnie od ich przeznaczenia dzieli się na trzy grupy:

1. Dielektryki kondensatorowe stosowane jako warstwy dielektryczne w kondensatorach grubowarstwowych.
2. Warstwy izolacyjne stosowane w mikroukładach grubowarstwowych do rozdzielania krzyżujących się ścieżek przewodzących.
3. Warstwy zabezpieczające stosowane do zabezpieczania innych warstw przed wpływami atmosferycznymi i narażeniami mechanicznymi.

Dla wszystkich rodzajów warstw dielektrycznych, niezależnie od grupy, do której są zaliczone, określa się te same podstawowe parametry aplikacyjne. O tym, który z parametrów uznaje się za podstawowy a który za drugorzędny decyduje przeznaczenie warstwy.

6.1. Przenikalność elektryczna i współczynnik stratności

Przenikalność elektryczna charakteryzuje zdolność dielektryka do polaryzacji i magazynowania energii w polu elektrycznym. Natomiast współczynnik stratności jest miarą strat energii w dielektryku umieszczonym w sinusoidalnie zmiennym polu elektrycznym. Pomiar tych parametrów wykonuje się na ogół jednocześnie. Sposób przeprowadzenia pomiaru opisany został szczegółowo w normie PN-69/E-04403 [41, 19]. Norma ta jednak dotyczy pomiaru dielektryków stałych, z których można uformować odpowiedniego kształtu próbki pomiarowe. W przypadku warstw grubych, gdzie warstwa badana jest nierozzerwalnie związana z podłożem, należy więcej uwagi poświęcić przygotowaniu próbek pomiarowych.

Przygotowanie próbek pomiarowych

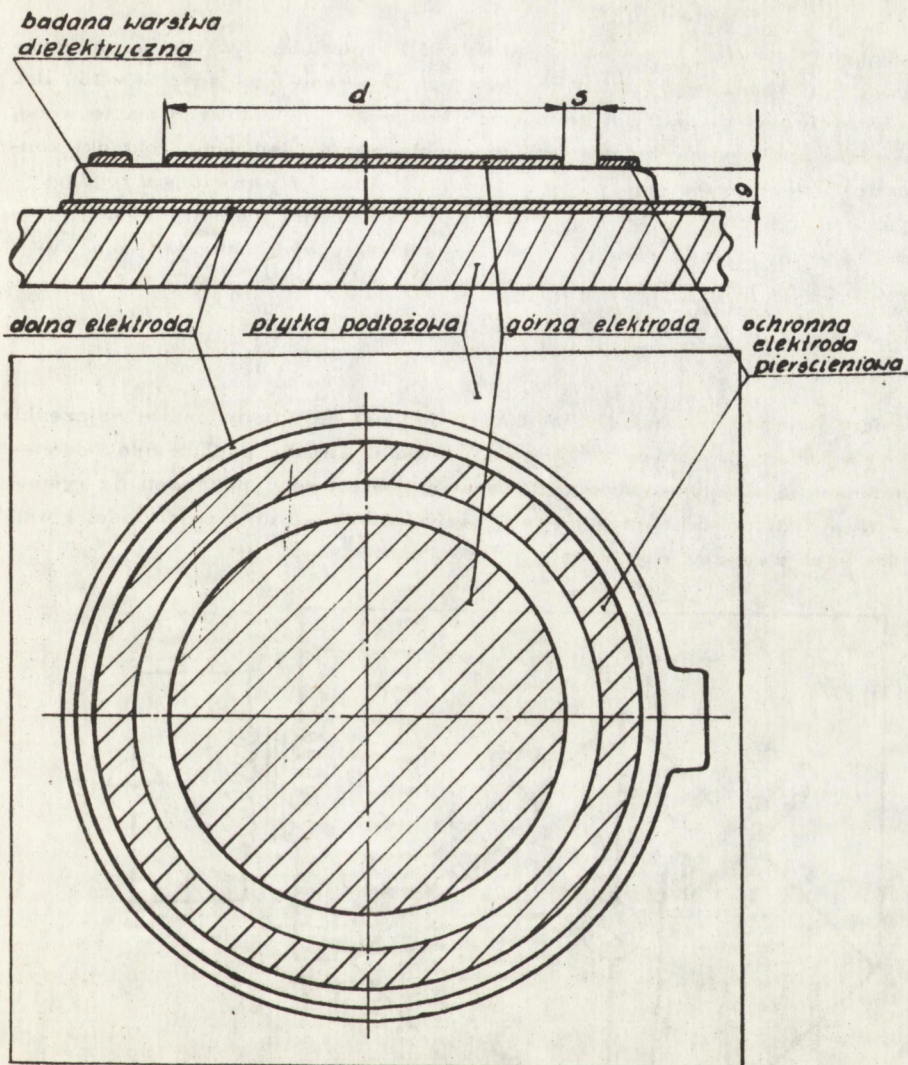
Określanie parametrów warstwy dielektrycznej wykonuje się przez pomiar kondensatora warstwowego z dielektrykiem wykonanym z badanej warstwy. W tym celu płytkę podłożową należy pokryć kolejno warstwami: przewodzącą (dolna okładka kondensatora), dielektryczną (warstwa badana), przewodzącą (górną okładka kondensatora).

Mając na względzie wyeliminowanie wpływu szkodliwych pojemności rozproszonych na krawędziach kondensatora, które zwiększają błąd pomiaru, zaleca się wykonanie kondensatora w wersji trójelektrodowej. Układ warstw i topologię takiego kondensatora pokazano na rysunku 61. Ustalając rozmiary kondensatora testowego należy kierować się następującymi wskazówkami:

przenikalność względna dielektryka	średnica elektrody czynnej mm
nie większa niż 10	25 ÷ 150
powyżej 10	nie większa niż 50

Pojemność kondensatora powinna być optymalna dla stosowanego zakresu pomiarowego

- dla częstotliwości do 100 kHz pojemność próbki powinna być większa od 50 pF,
- dla częstotliwości 5 ÷ 200 MHz pojemność powinna być w granicach 20÷50 pF.



Rys. 61. Sposób wykonania kondensatora trójelektrodowego w wersji grubo-
warstwowej.

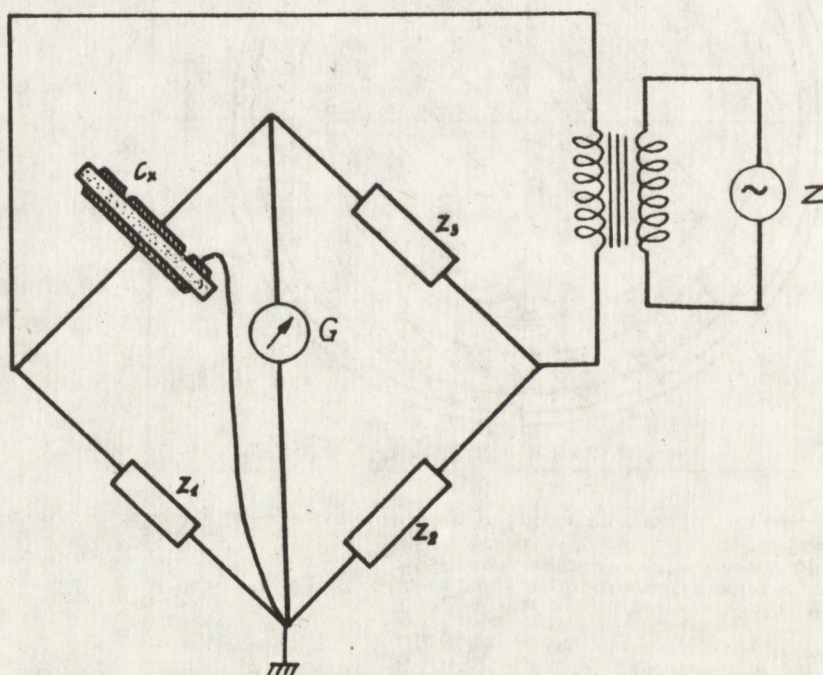
Pojemność mierzona zawarta jest pomiędzy elektrodą dolną i górną. Elektroda
ochronna zwiększa jednorodność pola elektrycznego w obszarze kondensatora
badanego

Badana warstwa dielektryczna powinna mieć możliwie największą grubość.
Dlatego należy nałożyć bezpośrednio na siebie 2 ÷ 3 warstwy uzyskując w ten
sposób grubość 50 ÷ 80 μm . Przerwa między elektrodą kołową a ochronną

elektrodą pierścieniową (na rys. 61 odległość s) powinna być jak najmniejsza. Dla dobrych past przewodzących możliwe jest uzyskanie odległości $s \sim 150 \mu\text{m}$. Pomiar właściwości dielektryka za pomocą kondensatora testowego ma tę wadę, że na wynik pomiaru oprócz materiału badanego mogą mieć wpływ okładki kondensatora. Dlatego dobierając pastę przewodzącą należy zwrócić szczególną uwagę na jej zgodność technologiczną z badaną warstwą dielektryczną. Warstwa ta powinna mieć również małą rezystancję powierzchniową i nie wykazywać migracji jonów metalicznych.

Pomiary

Do pomiaru pojemności i współczynnika strat badanego kondensatora najczęściej stosuje się metody mostkowe lub mierniki dobroci. Zasadę podłączenia badanego kondensatora trójelektrodowego do mostka pomiarowego pokazano na rysunku 62. W wyniku pomiaru uzyskuje się bezpośrednio wartość pojemności i współczynnika strat dielektrycznych.



Rys. 62. Zasada podłączenia kondensatora trójelektrodowego do mostka pomiarowego. C_x - kondensator badany, Z_1 , Z_2 , Z_3 - impedancja w ramionach mostka, G - wskaźnik zera, Z - zasilacz napięcia zmiennego

Wyznaczenie przenikalności elektrycznej względnej warstwy dielektrycznej opiera się na definicji tego parametru.

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_o}$$

gdzie C_x - zmierzona pojemność kondensatora z dielektrykiem badanym

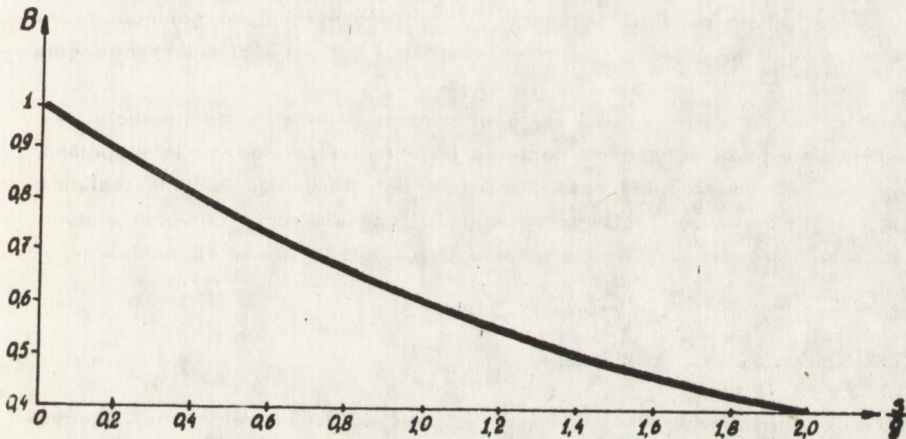
C_o - pojemność kondensatora próżniowego o identycznych rozmiarach jak kondensator.

W przypadku kondensatora grubowarstwowego pojemność C_o należy obliczyć ze wzoru

$$C_o \text{ [pF]} = \frac{0,0695 (d + B)^2}{g}$$

d, g - jak na rysunku 61

B - wg rysunku 63.



Rys. 63. Zależność stałej B od rozmiarów kondensatora trójelektrodowego

Napięcie pomiarowe należy tak dobrać, aby natężenie pola elektrycznego w próbce nie przekroczyło $1000 \frac{V}{mm}$. Co dla typowych grubości warstw dielektrycznych daje wartość napięcia pomiarowego poniżej 30 V.

Do wyznaczenia przenikalności elektrycznej niezbędny jest dokładny pomiar grubości warstwy dielektrycznej. Zaleca się następujący sposób wykonania pomiaru grubości:

1. Zdjąć profil podłoża z nałożoną dolną okładką kondensatora.
2. Po wydrukowaniu i wypaleniu warstwy dielektrycznej zmierzyć profil takiego układu warstw.
3. Nałożyć obydwie profile na siebie i określić grubość warstwy dielektrycznej.

6.2. Wytrzymałość dielektryczna

Wytrzymałość dielektryczna jest określana natężeniem pola elektrycznego, przy którym występuje przebicie dielektryka. [42].

Metody badania wytrzymałości dielektrycznej rozróżnia się ze względu na rodzaj napięcia probierczego i sposobu jego przyłożenia do próbki. Stosowane są następujące napięcia probiercze:

- 1) napięcie stałe,
- 2) napięcie przemienne o częstotliwości 50 Hz,
- 3) napięcie udarowe (uzyskane z rozładowania kondensatora),
- 4) napięcie przemienne o dużej częstotliwości od kilku kHz do 10 MHz.

W zależności od sposobu przykładania napięcia probierczego rozróżnia się wytrzymałość dielektryczną doraźną i wytrzymałość stopniową. Wytrzymałość doraźną wyznacza się zwiększając napięcie probiercze od 0 do napięcia przebicia, które powinno być osiągnięte w okresie $10 \div 20$ s od chwili rozpoczęcia pomiaru.

Wytrzymałość stopniową wyznacza się doprowadzając do elektrod napięcie równe $\sim 50\%$ wartości doraźnego napięcia przebicia i podnosząc je stopniami, utrzymując na każdym stopniu przez 20 sekund lub 1 minutę. Badanie techniczne wytrzymałości dielektrycznej wykonuje się najczęściej przy napięciu stałym postępując się fabrycznymi miernikami izolacji np. P-435 produkcji zakładów Meratronik.

6.3. Rezystancja warstwy dielektrycznej

Dla materiałów dielektrycznych przyjmuje się dwie wielkości rezystancji. Rezystancję skrośną R_v definiuje się jako stosunek napięcia stałego przyłożonego na elektrody do wartości ustalonej natężenia prądu płynącego między elektrodami na wśkroś próbki z wyłączeniem tej części prądu, która płynie po powierzchni próbki.

Rezystancję powierzchniową R_s definiuje się jako stosunek napięcia stałego przyłożonego na elektrody do wartości ustalonej natężenia prądu płynącego przez warstewkę zaadsorbowanej na powierzchni próbki wilgoci i innych przewodzących zanieczyszczeń oraz częściowo przez wnętrze próbki.

Znajomość tych dwóch rezystancji dla próbki dielektryka o ustalonych rozmiarach pozwala wyznaczyć dwie stałe materiałowe charakteryzujące materiał dielektryczny:

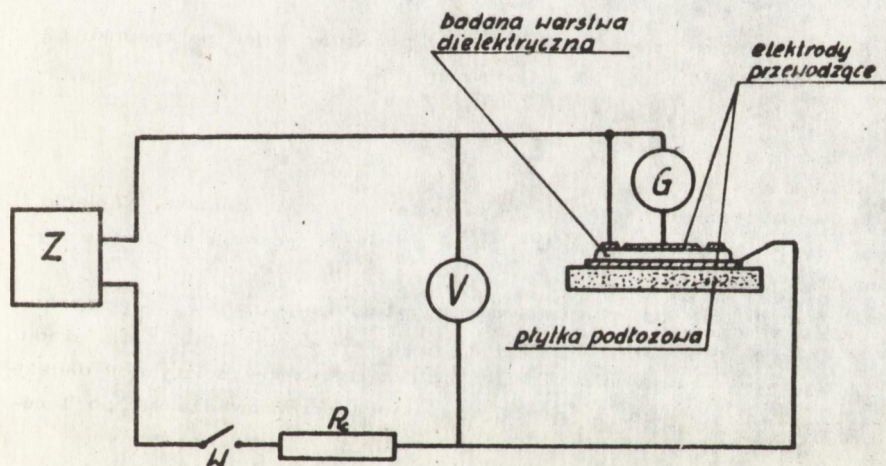
- ρ_v - rezystancję właściwą skrośną,
- ρ_s - rezystancję właściwą powierzchniową.

Metody pomiaru tych parametrów opisane zostały w normie PN-71/E-04405. [43].

Specyfika warstw grubych sprawia, że niektóre z metod proponowanych w tej normie wymagają pewnej modyfikacji. Dotyczy to szczególnie pomiaru ρ_s i przygotowania próbek pomiarowych. Czasami dla warstw dielektrycznych określa się jeszcze jeden parametr - rezystancję izolacji, którą definiuje się jako stosunek napięcia stałego przyłożonego na elektrody do wartości ustalonej natężenia prądu płynącego po powierzchni i przez wnętrze próbki. Parametr ten zawiera w sobie obydwie rezystancje R_V i R_S i praktycznie nie wnosi nowych informacji o materiale dielektrycznym. Dlatego też rezystancję izolacji najczęściej określa się dla gotowych podzespołów, rzadziej dla scharakteryzowania materiału dielektrycznego.

Pomiar rezystancji właściwej skośnej

Próbkę badaną należy wykonać w wersji kondensatora trój elektrodowego (rysunek 61). Sposób podłączenia próbki do układu pomiarowego pokazano na rysunku 64.



Rys. 64. Sposób pomiaru rezystancji właściwej skośnej warstwy dielektrycznej metodą techniczną. Z - źródło napięcia stałego, W - wyłącznik, R_C - rezystor ograniczający prąd, V - woltomierz, G - galwanometr, R_V - mierzona próbka

Po zmierzeniu rezystancji skośnej próbki R_V można obliczyć rezystancję właściwą ρ_V z poniższego wzoru:

$$\rho_V = \frac{\pi \cdot (d+s)}{4g} \cdot R_V$$

gdzie R_V - zmierzona wartość rezystancji próbki;

d, s, g - wymiary kondensatora jak na rysunku 61.

Pomiar rezystancji właściwej powierzchniowej (rezystancji na kwadrat)

Pojęcie rezystancji na kwadrat, w przypadku warstwy dielektrycznej, ma nieco inny charakter niż dla warstwy rezystywnej, gdzie parametr ten charakteryzuje rezystancję warstwy o określonej grubości g . W tym przypadku określa się rezystancję warstewki powierzchniowej dielektryka o grubości bliskiej zero. Dlatego też kształt próbki pomiarowej odbiega od kształtu prostokąta stosowanego dla warstw rezystywnych. Do pomiaru tego parametru dla warstw dielektrycznych zaleca się stosowanie elektrod paskowych z dzielonym ekranem (rysunek 65). Taka konstrukcja próbki pomiarowej przy odpowiednio małym stosunku $\frac{a_2}{a_1}$ zapewnia taki rozkład pola elektrycznego w obszarze między elektrodami, przy którym prąd mierzony płynący po powierzchni warstwy tylko minimalnie wnika w głąb próbki.

Rezystancję właściwą powierzchniową wyznacza się ze wzoru

$$\rho_s = \frac{U \cdot b}{J \cdot a_1} = R_s \frac{b}{a_1} [\frac{\Omega}{\square}]$$

gdzie R_s - rezystancja zmierzona w układzie pomiarowym jak na rysunku 62
b - a_1 - wymiary próbki jak na rysunku 65.

Ustalenie warunków pomiaru

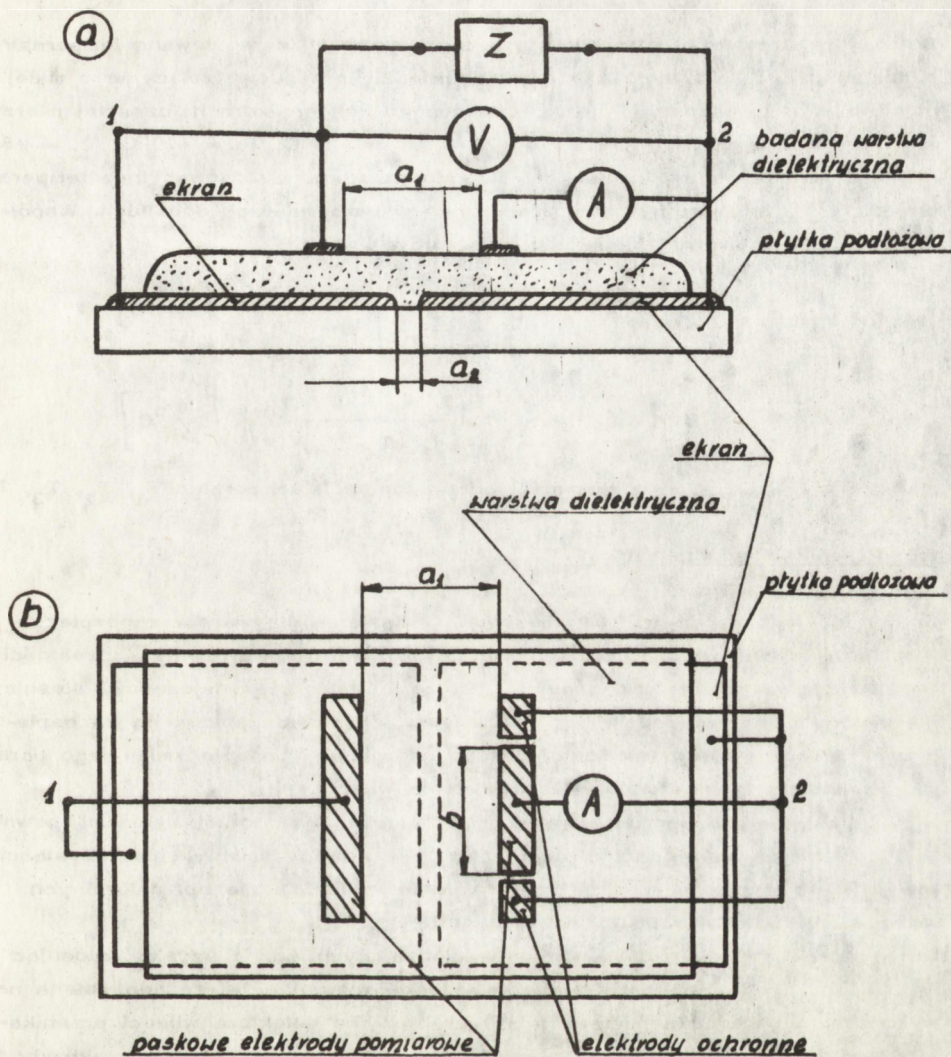
Pomiar rezystancji przeprowadza się najczęściej metodą techniczną. Napięcie pomiarowe należy dobrać tak, aby natężenie pola elektrycznego w próbce wynosiło nie więcej niż $1000 \frac{V}{mm}$.

Większość dielektryków wykazuje spadek prądu upływu w czasie od momentu spolaryzowania napięciem próbki. Czas, po którym następuje stabilizacja prądu jest różny dla różnych materiałów i zależy od mechanizmów polaryzacji dielektryka. Przyjmuje się umownie, że pomiar rezystancji przeprowadza się po 1 minucie od chwili włączenia napięcia pomiarowego.

6.4. Temperaturowy współczynnik przenikalności elektrycznej (TW_ϵ)

Jest to parametr, który charakteryzuje zmiany właściwości materiału dielektrycznego w funkcji temperatury. Pomiar TW_ϵ przeprowadza się na grubowarstwowym kondensatorze testowym, którego dielektryk wykonany jest z badanego materiału. Należy więc postużyć się kondensatorem o konstrukcji trójelektrodowej dokładnie omówionym w punkcie 6.1. Współczynnik ten zdefiniowany jest następująco

$$TW_\epsilon = TWC - \alpha_d$$



Rys. 65. Układ elektrod paskowych z dzielonym ekranem do pomiaru rezystancji właściwej powierzchniowej oraz sposób połączenia z układem pomiarowym
 a) przekrój przez próbkę; b) widok topologii warstw

gdzie: TW_{ϵ} - współczynnik temperaturowy materiału dielektrycznego

TWC - współczynnik temperaturowy kondensatora badanego

α_d - współczynnik rozszerzalności liniowej dielektryka.

W praktyce kiedy α_d bardzo małe przyjmuje się $TW_{\epsilon} = TWC$.

Pomiary przeprowadza się w komorze temperaturowej z regulowaną temperaturą o dokładności $\pm 2^{\circ}\text{C}$, wyposażoną w odpowiednie przepusty izolacyjne o małej pojemności rozproszonej. Pojemność badanego kondensatora najczęściej mierzy się kolejno w temperaturach: $T_1 = +20^{\circ}\text{C}$, $T_2 = -25^{\circ}\text{C}$, $T_3 = +20^{\circ}\text{C}$, $T_4 = +85^{\circ}\text{C}$ stosując metodę podaną w punkcie 6.1. Można również stosować inne temperatury T_2 i T_4 lub wykonywać pomiary tylko w temperaturach dodatnich. Współczynnik temperaturowy oblicza się ze wzorów:

$$TW_{\xi} \text{ "zimny"} = \frac{C_1 - C_2}{C_1 (T_1 - T_2)} 10^{-6} \left[1/^{\circ}\text{C} \right]$$

$$TW_{\xi} \text{ "gorący"} = \frac{C_4 - C_3}{C_3 (T_4 - T_3)} 10^{-6} \left[1/^{\circ}\text{C} \right]$$

gdzie: C_1, C_2, C_3, C_4 - pojemności odpowiednio dla temperatur T_1, T_2, T_3, T_4 .

6.5. Przenikalność dla wilgoci

Znajomość tego parametru jest niezbędna zwłaszcza dla warstw zabezpieczających. Wybrana metoda badania powinna umożliwiać sprawdzenie szczelności warstwy nierozdzielnie związanej z podłożem. Dlatego też najczęściej stosuje się metody oceny pośredniej tego parametru. Ich zasada polega na zabezpieczeniu badaną warstwą elementu czułego na wilgoć i badanie zmian jego parametrów pod wpływem długotrwałego działania wilgoci.

Analizując wyniki pomiarów wykonanych omówionymi wyżej metodami, pewne trudności może następczą ustalenie czy obserwowane zmiany (np. rezystancja warstwy) są wynikiem rzeczywiście działania wilgoci, a nie np. naturalnych zmian starzeniowych warstwy rezystywnej.

Dobłą ocenę szczelności warstw zabezpieczających można uzyskać stosując metodę zaproponowaną przez autorów tego opracowania. Jej zasada polega na wykorzystaniu zjawiska migracji jonów srebra jako detektora wilgoci przenikającej przez warstwę. W tym celu na płytkę podłożową nakłada się elektrody z pasty srebrowej uformowane wg testu pokazanego na rysunku 75 i opisanego w punkcie 4.4. Na przygotowaną płytkę nakłada się badaną warstwę zabezpieczającą, tak aby pozostały nie zakryte końcówki elektrod. Próbkę należy umieścić pod mikroskopem o powiększeniu do 100x, podłączyć do układu pomiarowego jak na rysunku 39 i położyć na powierzchni badanej warstwy, bezpośrednio nad elektrodami, kilka kropli wody destylowanej. Pomiar szczelności polega na zmierzeniu napięcia i czasu migracji jonów srebra między elektrodami przez badaną warstwę. Pomiar należy przeprowadzić wg opisu w pkt. 4.4. Jeżeli badana warstwa jest nieszczelna, posiada mikropęknięcia lub niecałkowicie pokrywa pod-

toże, to w czasie badania obserwuje się następujące zjawiska. Po przyłożeniu do elektrod napięcia stałego w zakresie 20 ± 50 V obserwuje się pęcherzyki powietrza wypieranego przez wodę, która wnika w głąb mikroszczelin warstwy, wciągana siłami przyciągania elektrostatycznego. Po podniesieniu napięcia do poziomu 100 ± 150 V i po upływie 1+2 minut następuje zwarcie pomiędzy elektrodami. W przypadku warstwy szczelnej, pozbawionej defektów nie obserwuje się podobnych zjawisk podnosząc napięcie skokami do 1000 ± 1500 V. Przy tych napięciach następuje przebicie elektryczne warstwy zabezpieczającej. Wartość napięcia przebicia zależy od grubości warstwy zabezpieczającej.

7. ZGODNOŚĆ TECHNOLOGICZNA PAST I WARSTW

Dwie pasty uważa się za zgodne technologicznie, jeżeli spełniają następujące warunki:

1) posiadają tak ustawione procesy aplikacyjne, że jest możliwe zastosowanie ich na wspólnym podłożu,

2) warstwy wykonane z takich 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.

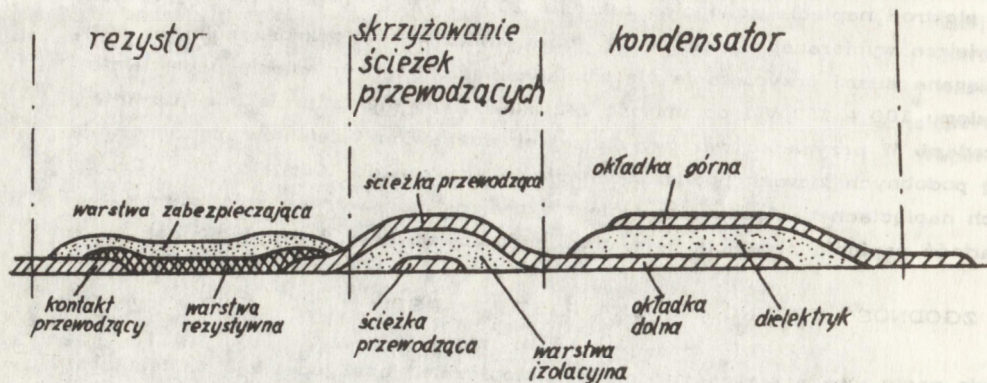
Zagadnienie zgodności technologicznej występuje szczególnie wyraźnie w pastach przeznaczonych do mikroukładów grubowarstwowych, gdzie na jednej płytce mogą kontaktować się ze sobą praktycznie wszystkie rodzaje past: przewodzące, rezystywne, dielektryczne, izolacyjne i zabezpieczające. Najbardziej krytycznymi, pod tym względem punktami układu, są obszary kontaktowania się warstwy rezystywnej i przewodzącej oraz kondensatory warstwowe. Można przyjąć, że wszystkie parametry elektryczne rezystorów i kondensatorów zależą od właściwego doboru współpracujących ze sobą warstw.

Wykonanie oceny zgodności technologicznej past jest niejednokrotnie bardzo trudne, ponieważ oprócz właściwości samych past duże znaczenie mają także czynniki jak: rodzaj zastosowanego podłoża czy warunki przeprowadzenia procesu technologicznego. Często okazuje się, że pasty zgodne na jednym typie podłoża ceramicznego wykazują całkowitą niezgodność na innej ceramice.

Sprawdzenie zgodności technologicznej, niezależnie od charakteru badanych past, wymaga przeprowadzenia następujących prób:

- 1) Oceny wyglądu zewnętrznego.
- 2) Pomiaru rezystancji powierzchniowej obszaru nakładki, dwu warstw.
- 3) Wyznaczenia wpływu obszaru nakładki na parametry podzespółu.

Rysunek 66 ilustruje przekrój przez typowy układ warstw prostego mikroukładu grubowarstwowego. Widać na nim, które z warstw stykają się bezpośrednio i mogą mieć wzajemny wpływ na swoje parametry charakterystyczne.



Rys. 66. Układ warstw prostego mikroukładu grubowarstwowego. Na rysunku widać które z warstw stykają się bezpośrednio i mogą mieć wzajemny wpływ na swoje parametry charakterystyczne

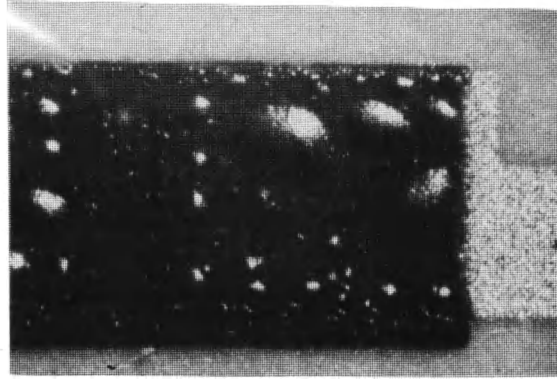
Ocena wyglądu zewnętrznego obszaru nakładki dwu warstw

Najczęściej obserwowanymi objawami niezgodności kontaktujących się warstw są: pęcherze, kratery, pęknięcia warstw na krawędzi nakładki, wyraźna zmiana koloru obszaru nakładki, złuszczenie się warstwy. Często obserwowanym wadom struktury warstwy nie towarzyszy wyraźne pogorszenie podstawowych parametrów elektrycznych. Mimo to defekty takie należy uznać za dyskwalifikujące warstwy pod względem zgodności, ponieważ stanowią one potencjalne punkty uszkodzeń podzespołu podczas eksploatacji. Ocenę wyglądu zewnętrznego nakładki należy wykonać pod mikroskopem stereoskopowym o powiększeniu do 100 x w świetle przechodzącym i odbitym. Na rysunku 67; 68; 69 pokazano fotografie kilku typowych defektów dla warstw niezgodnych.

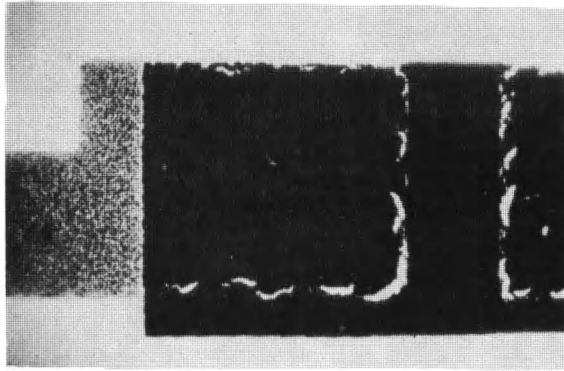
Pomiar rezystancji powierzchniowej obszaru nakładki

W wyniku reakcji chemicznej, jaka zachodzi podczas wypalania, pomiędzy składnikami dwóch stykających się warstw, ulegają zmianie ich podstawowe parametry elektryczne. Szczególnie zmiana rezystancji w takim obszarze ma niekorzystny wpływ na parametry podzespołu.

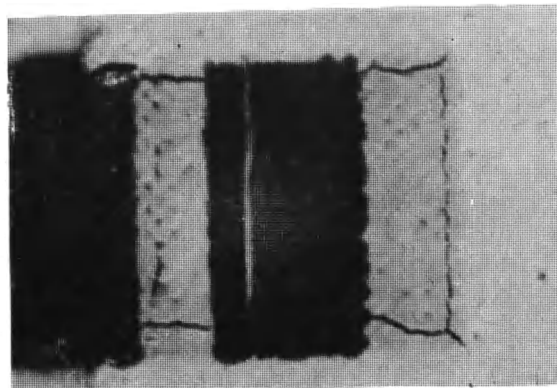
W przypadku kondensatora grubowarstwowego lub skrzyżowania dwóch ścieżek przewodzących najczęściej następuje wzrost rezystancji powierzchniowej okładek kondensatora i ścieżek przewodzących. Dzieje się tak na skutek wzbogacenia warstwy przewodzącej materiałem izolacyjnym i "zatapiania się" warstwy przewodzącej w warstwie izolacyjnej, jakie zachodzi podczas wypalania. Wzrost rezystancji ma bezpośredni wpływ na wartość pojemności i współczynnika strat



Rys. 67. Fragment rezystora wykonanego z pasty na bazie PdAg, kontakty przewodzące z pasty na bazie Ag. Warstwy rezystywna i przewodząca niezgodne ze sobą. Cały obszar nakładki warstw pokryty pęcherzykami. Fot. w świetle odbitym, powiększenie 15x



Rys. 68. Fragment rezystora wykonanego z pasty na bazie PdAg, kontakty przewodzące z pasty na bazie Ag. Warstwy niezgodne ze sobą. Warstwa rezystywna popękana na krawędzi nakładki. Fot. w świetle przechodzącym, powiększenie 15x

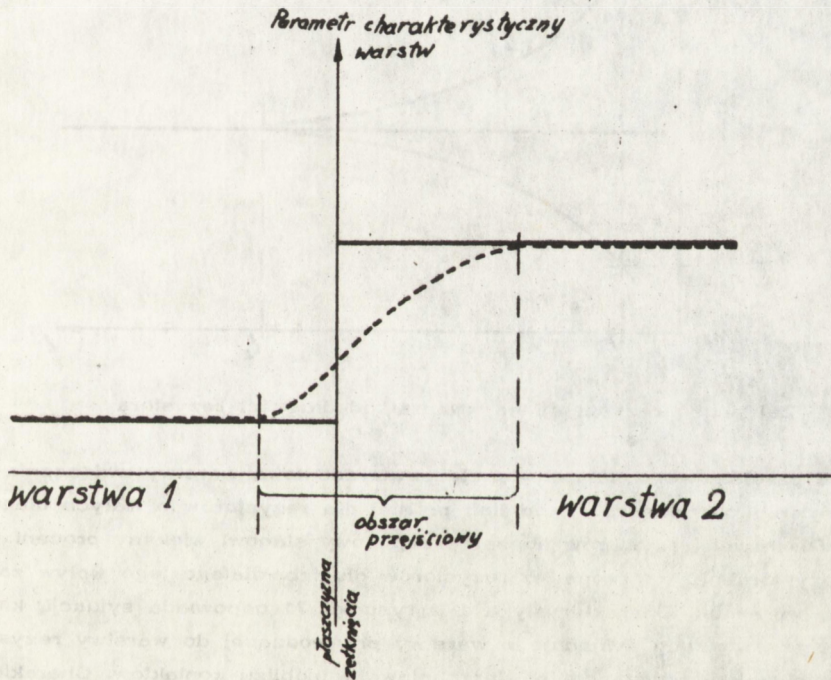


Rys. 69. Fragment układu 3-warstwowego. Warstwy: przewodząca-izolacyjna-przewodząca. Warstwy niezgodne pod względem procesu aplikacji. Podczas wypału górnej warstwy przewodzącej nastąpiło popękanie warstwy izolacyjnej

kondensatora. Ocenę rezystancji obszaru nakładki przeprowadza się porównując rezystancję powierzchniową warstwy pojedynczej położonej bezpośrednio na płycie podłożowej z rezystancją układu warstw.

Wpływ obszaru nakładki warstw na parametry podzespołu [7, 26, 30]

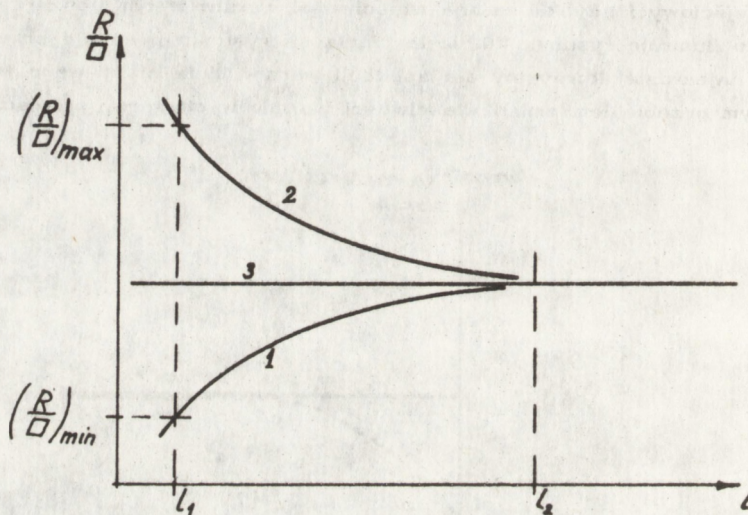
Obszar zetknięcia dwóch warstw o różnych właściwościach, prawidłowo dobranych pod względem zgodności technologicznej, charakteryzuje bardzo wąski obszar przejściowy i szybka zmiana właściwości warstw w tym obszarze. Zagadnienie to ilustruje rysunek 70. Linia ciągła na rysunku pokazuje przebieg optymalny, najbardziej korzystny dla aplikacji warstw, linia przerywana jest rzeczywistym przebiegiem zmian właściwości warstw w obszarze przejściowym.



Rys. 70. Charakter zmian właściwości warstwy w obszarze zetknięcia dwóch współpracujących warstw

Im warstwy są gorzej dobrane pod względem zgodności, tym reakcje zachodzące między nimi są silniejsze a ich zasięg większy. Tak więc szerokość obszaru przejściowego można przyjąć za jeden z parametrów charakteryzujących zgodność technologiczną warstw. W rzeczywistości dokładny pomiar szerokości tego obszaru

jest bardzo trudny, a często niemożliwy do wykonania. Natomiast znacznie ważniejsze w praktyce jest określenie jego wpływu na parametry charakterystyczne podzespołu. W przypadku rezystora charakterystyka zmian dowolnego z parametrów w funkcji długości rezystora może mieć jeden z przebiegów pokazanych na rysunku 71. Na rysunku przedstawiono trzy charakterystyki rezystancji powierzchniowej, jakie mogą zaistnieć dla grupy rezystorów wykonanych z tych samych past (przewodzącej i rezystywnej), a różniących się długością. Wpływ



Rys. 71. Zależność rezystancji na kwadrat od długości rezystora

obszaru przejściowego na rezystancję powierzchniową warstwy uwidacznia się w odchyleniu charakterystyki od linii prostej dla rezystorów o małych długościach. Dla takich rezystorów obszar przejściowy stanowi większy procent całego rezystora niż w przypadku rezystorów długich, dlatego jego wpływ zaznacza się wyraźniej. Charakterystyka 1 z rysunku 71 odpowiada sytuacji, kiedy materiał przewodzący dyfunduje z warstwy przewodzącej do warstwy rezystywnej zmniejszając rezystancję powierzchniową w pobliżu kontaktów. Charakterystyka 2 ma miejsce wówczas, gdy materiał przewodzący z warstwy rezystywnej dyfunduje w kierunku kontaktu przewodzącego zubożając warstwę rezystywną a tym samym zwiększając jej rezystancję powierzchniową w pobliżu kontaktu przewodzącego. Charakterystyka 3 opisuje przypadek braku wzajemnego oddziaływania pomiędzy warstwami. Jest to sytuacja bardzo korzystna, ułatwiająca projektowanie rezystorów. Dla zdjęcia takiej charakterystyki rezystora należy posłużyć się jednym z testów pokazanych na rysunku 76. Jak wynika z doświadczeń dla zgodnych technologicznie warstw rezystywnej i przewodzącej punkty cha-

rakterystyczne zaznaczone na rysunku 71 powinny mieć następujące wartości. Długość l_2 , przy której charakterystyka przechodzi asymptotycznie w przebieg poziomy nie powinna być większa od 4 mm. Różnica pomiędzy rezystancjami dla punktów $l_1 = 1$ mm i $l_2 = 4$ mm nie powinna być większa niż:

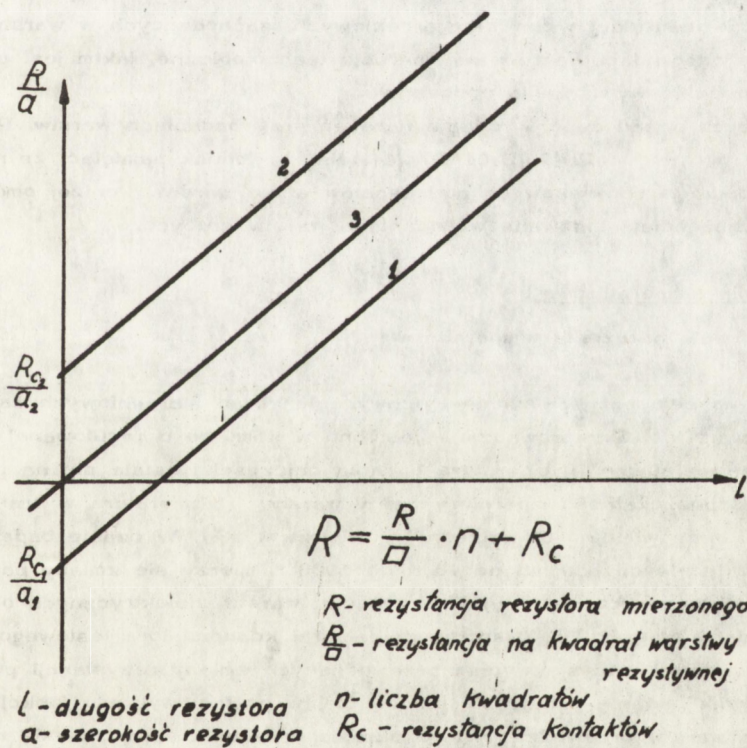
dla przebiegu 1

$$\frac{R(l_2) - R(l_1)}{R(l_2)} < 70\%$$

dla przebiegu 2

$$\frac{R(l_1) - R(l_2)}{R(l_2)} < 40\%$$

W wielu przypadkach przy projektowaniu rezystorów interesująca jest znajomość rezystancji skrośnej obszaru przejściowego. Rezystancję taką łatwo wyznaczyć postępując się charakterystyką przedstawioną na rysunku 72.



Rys. 72. Sposób wyznaczenia rezystancji kontaktu R_c
 Proste 1, 2, 3 odpowiadają krzywym 1, 2, 3 z rysunku 68

Dla jej zdjęcia można posłużyć się tym samym testem, omówionym powyżej. Zależność rezystancji od długości rezystora jest linią prostą, przecinającą oś rzędnych w punkcie, który określa sumę rezystancji obydwu kontaktów rezystora. Aby możliwe było porównanie charakterystyk dla różnych rezystorów, na osi należy odłożyć wartość rezystancji na jednostkę szerokości rezystora. Zależnie od rodzaju współpracujących warstw, rezystancja kontaktu może przyjmować wartości od ujemnych do dodatnich przechodząc przez zero. Im rezystancja ta ma wartość bliższą 0, tym zgodność past jest lepsza. Ostateczne uznanie dwóch past za zgodne technologicznie musi być poprzedzone sprawdzeniem wszystkich podstawowych parametrów podzespołu, a szczególnie stałości w czasie pod obciążeniem elektrycznym.

8. NARAŻENIA STOSOWANE W BADANIACH WARSTW

W badaniach warstw grubych stosuje się narażenia, których zadaniem jest przyspieszenie naturalnych zjawisk starzeniowych, zachodzących w warstwie lub zbadanie odporności warstwy na operacje technologiczne, jakim jest poddawana w procesie wytwarzania podzespołu.

Nie ma ścisłych zasad doboru rodzaju narażeń przy badaniach warstw. Pomocną może być norma PN-73/E-04550. [44]. Należy jednak pamiętać, że norma ta dotyczy badań środowiskowych podzespołów a nie warstw. Poniżej omówiono narażenia najczęściej stosowane w badaniach warstw grubych.

8.1. Narażenia temperaturowe

8.1.1. Długotrwałe narażenia temperaturowe

Badanie ma na celu przyspieszenie i uchwycenie zmian starzeniowych zachodzących w warstwie. Przeprowadzane jest ono w komorze o regulowanej i stabilizowanej temperaturze. Temperaturę badania najczęściej ustala się na poziomie górnej, dopuszczalnej temperatury pracy warstwy (temperatura w granicach $150 \div 200^{\circ}\text{C}$ przy wilgotności względnej powietrza $< 5\%$). W czasie badania trwającego zależnie od potrzeb od 48 h do 1000 h mierzy się zmiany parametrów charakterystycznych warstwy. W przypadku warstw dielektrycznych obserwuje się zmiany pojemności i współczynnika strat kondensatora testowego natomiast w warstwach rezystywnych i przewodzących zmiany rezystancji powierzchniowej. Wynik badania podaje się najczęściej w postaci wykresu funkcji stabilności. Dla warstw przewodzących po okresie narażenia sprawdza się również lutowność i montaż mikroelektroniczny (wg pkt 4.2.; 4.5.; 4.6.).

8.1.2. Krótkotrwałe narażenia temperaturowe

Narażenia takie najczęściej przeprowadza się w postaci szoków termicznych. W warstwach grubych, które zbudowane są ze spieków proszków metali, tlenków i szklivi, badania tego rodzaju pozwalają ocenić prawidłowość: budowy strukturalnej warstwy, procesu formowania warstwy, doboru współpracujących warstw i materiału podłoża. Zmiany parametrów pojawiające się w wyniku badania są spowodowane powstawaniem naprężeń i defektów w warstwie. Badanie przeprowadza się w dwóch komorach temperaturowych. Jedna komora ustawiona jest na temperaturę dolną próby, druga na górną. Przykładowe warunki badania wykonywanego w firmie Du Pont dla past rezystywnych rodziny 1500 przedstawione są następująco. Płytki wkłada się do komory nastawionej na -55°C na okres 20 minut. Następnie przenosi się je do komory nastawionej na temperaturę $+125^{\circ}\text{C}$ na okres 20 minut. Czas przełożenia próbek z jednej komory do drugiej powinien być krótszy od 10 sekund. Cykl taki powtarza się 5 razy. W badaniu tym zależnie od potrzeby można stosować inne temperatury i czasy. Wynik badania podaje się jako względną zmianę podstawowych parametrów charakterystycznych, jaką nastąpi po narażeniu.

8.2. Narażenia temperaturowo-prądowe.

8.2.1. Długotrwałe narażenia temperaturowo-prądowe

Badanie ma na celu określenie zmian parametrów warstwy w warunkach eksploatacyjnych. Przeprowadzane jest w komorze temperaturowej pod obciążeniem elektrycznym napięciem stałym. Temperaturę badania ustala się najczęściej na poziomie $+70^{\circ}\text{C}$. Dla warstw rezystywnych obciążenie elektryczne powinno być ustalone na maksymalnym poziomie dla danego typu warstwy (punkt 5.5.) przy jednoczesnym nieprzekroczeniu dopuszczalnej gęstości mocy na płycie podłożowej. Dla warstw dielektrycznych stałe napięcie polaryzujące dobiera się na poziomie napięcia znamionowego dla kondensatora testowego. Badanie najczęściej trwa od 250 do 10000 h. Wynik podaje się w postaci wykresu funkcji stabilności.

8.2.2. Krótkotrwałe narażenia temperaturowo-prądowe

Badanie takie przeprowadza się na warstwach rezystywnych i polega ono na narażeniu warstwy na kilkusekundowe (~ 5 s) przeciążenia elektryczne. Napięcie próby powinno być dobrane na poziomie 2,5 raza większe od napięcia znamionowego rezystora testowego. Badanie należy przeprowadzić na rezystorach o małych rozmiarach (1 x 1 mm). Wynik podaje się jako względną zmianę rezystancji po narażeniu.

8.3. Narażenia temperaturowe z uwzględnieniem wilgoci

Narażeniom takim poddawane są najczęściej warstwy rezystywne i przewodzące przeznaczone do wykonywania rezystorów zmiennych. Jest to uzasadnione warunkami pracy takich rezystorów, w których warstwy pozostają przez cały czas eksploatacji podzespołu praktycznie nie zabezpieczone przed wpływami atmosferycznymi. Przy ustalaniu narażeń dla tego typu próby pomocna może być norma PN-73/E-04550. [44]. Firma Du Pont w badaniach tego rodzaju stosuje następujące warunki:

temperatura $+ 25 \pm +100^{\circ}\text{C}$

wilgotność względna $50 \pm 95\%$

czas narażenia $24 \pm 1000 \text{ h}$

8.4. Narażenia technologiczne [20]

8.4.1. Powtórny wypał warstwy

W procesie wykonywania podzespołów elektronicznych, a szczególnie mikroukładów grubowarstwowych, warstwy poddawane są bardzo często tego rodzaju narażeniom. Zarówno temperatura powtórnego wypału, jak również ich liczba powinny być ustalone indywidualnie zależnie od przeznaczenia badanej warstwy. W przypadku warstw rezystywnych i dielektrycznych mierzy się zmianę parametrów podstawowych po narażeniu. Dla warstw przewodzących sprawdza się lutowność i adhezję.

8.4.2. Grzanie warstwy na gorącej płytce

Badanie to wykonywane jest wyłącznie na warstwach rezystywnych przeznaczonych do pracy w grubowarstwowych mikroukładach hybrydowych. W układach takich dość często wykonuje się montaż eutektyczny, który wymaga podgrzania płytki z rezystorami do temperatury $+400^{\circ}\text{C}$ na okres kilku minut. Badanie wykonuje się na płytce metalowej nagrzonej do temperatury $+425^{\circ}\text{C}$, na którą kładzie się na okres $5 \pm 10 \text{ min.}$ płytkę z rezystorami, następnie zdejmuje i studzi w temperaturze pokojowej. Wynik badania podaje się jako względną zmianę rezystancji po narażeniu.

8.4.3. Zanurzenie warstw w roztopionym lutowiu

Badanie takie odpowiada rzeczywistym narażeniom, jakich doznaje warstwa rezystywna podczas montażu w procesie wytwarzania podzespołu lub mikroukładu. Nawet krótkotrwałe zanurzenie rezystorów w płynnym lutowiu może

spowodować nieodwracalne zmiany w ich parametrach. Przyczyny mogą być następujące:

- 1) rozpuszczanie niektórych składników warstwy w lutowiu,
- 2) naprężenia w warstwie wywołane szokiem termicznym, jaki występuje podczas zanurzenia i wyjmowania płytki z lutowia,
- 3) zwilżenie niektórych obszarów warstwy rezystywnej przez lutowie (szczególnie dotyczy to rezystorów niskomowych).

Badanie przeprowadza się w sposób następujący. Testowaną płytkę pokrywa się topnikiem i zanurza do roztopionego lutowia na dziesięć sekund. Po wyjęciu i ostudzeniu płytkę myje się z resztek topnika i określa względną zmianę parametrów charakterystycznych badanej warstwy.

8.4.4. Starzenie w podwyższonej temperaturze warstw pokrytych lutowiem

Badanie wykonuje się dla warstw przewodzących przeznaczonych do montażu za pomocą lutów miękkich. Warstwy takie pokryte lutowiem i poddane działaniu wysokiej temperatury wykazują wyraźny spadek adhezji.

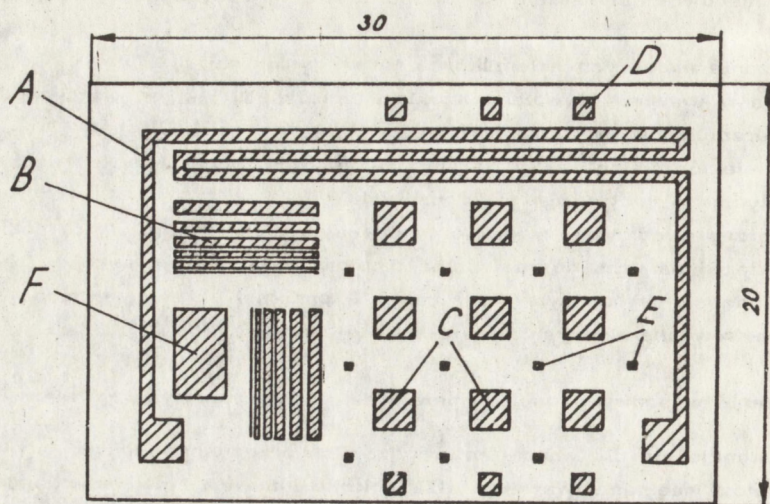
Najczęściej stosuje się następujące warunki badania. Płytki z dolutowanymi końcówkami drutowymi wkłada się do komory temperaturowej o temp. 150°C na 48 h. Po wyjęciu z komory i 16 h reklimatyzacji w temperaturze pokojowej sprawdza się adhezję warstwy porównując ją z wartościami uzyskanymi przed narażeniem.

9. PROJEKTOWANIE I WYKONANIE TESTÓW

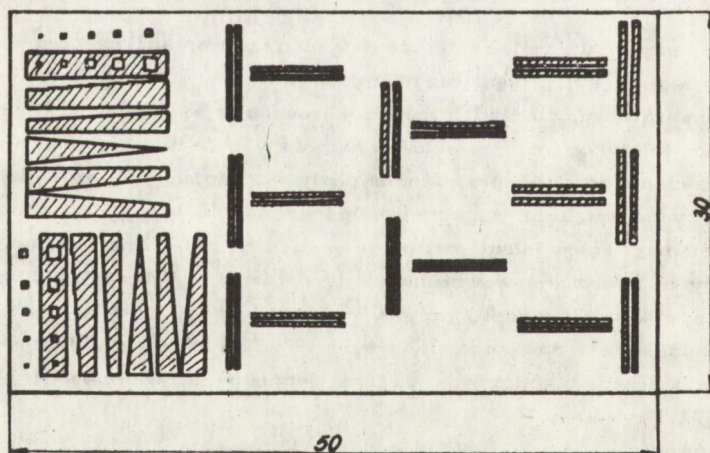
Wynik badania pasty w dużym stopniu zależy od poprawności wykonania próbki testowej, na co składa się projekt testu i przeprowadzenie operacji technologicznych: nakładania warstwy, obróbki termicznej i montażu elementów dołączanych.

Przystępując do wykonania projektu testu należy przede wszystkim ustalić czy jest on przeznaczony do sprawdzania pasty na zgodność z warunkami technicznymi, czy do możliwie wszechstronnego zbadania jednego parametru warstwy. W pierwszym przypadku wskazane jest, aby test zawierał możliwie wszystkie próby przewidziane w warunkach technicznych. Taki projekt znacznie przyspiesza wykonanie badań, wpływa na oszczędność podłoża, pasty i czasu. Tego rodzaju test pokazano na rysunku 73. Natomiast przykładem testów specjalistycznych przeznaczonych do badania jednego parametru mogą być testy: rysunek 74 i rysunek 75.

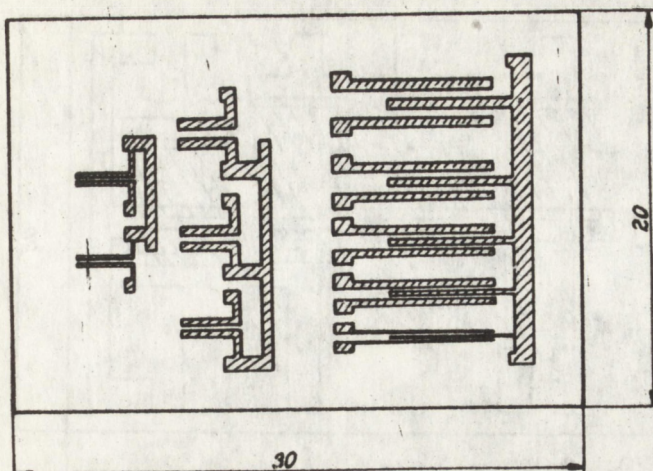
Poniżej omówiono zasady projektowania i wykonywania testów. Zwrócono uwagę na te zagadnienia i zasady, których przestrzeganie ma zasadniczy wpływ na wyniki badań. Natomiast nie omawiano szczegółowo kolejnych operacji technologicznych wykonania testu, ponieważ istnieje na ten temat dość obszerna literatura zamieszczona w bibliografii tego opracowania.



Rys. 73. Test do badania warstw przewodzących¹ (wykonany w CNPME wzorowany na teście Du Ponta). Poszczególne elementy testu przeznaczone są do następujących badań: A - pomiar rezystancji powierzchniowej warstwy, ścieżka o szerokości 0,5 mm i długości 100 mm; B - badanie rozdzielczości nakładania wzoru; C - pola o wymiarach 2 x 2 mm przeznaczone do badania adhezji; D - znaki ustawcze wyznaczające położenie dołączonej końcówki; E - znaki ustawcze wyznaczające miejsce załączenia drutu (przy metodzie oddzierania); F - pole o wymiarach 2,5 x 5 mm przeznaczone do badania lutowności i tęgowania warstwy



Rys. 74. Test do badania rozdzielczości druku warstw (wykonany w CNPME)



Rys. 75. Test do badania migracji składników metalicznych pasty (wykonany w CNPME)

9.1. Zasady projektowania testów

A. Ułożenie rysunku testu względem ruchu rakli (w metodzie sitodruku) ma wpływ na dokładność odwzorowania. Dlatego w próbach w których jest to istotne (np. badanie rozdzielczości druku) ten sam wzór testu powinien być zaprojektowany: prostopadłe i równoległe do kierunku ruchu rakli np. rysunek 74.

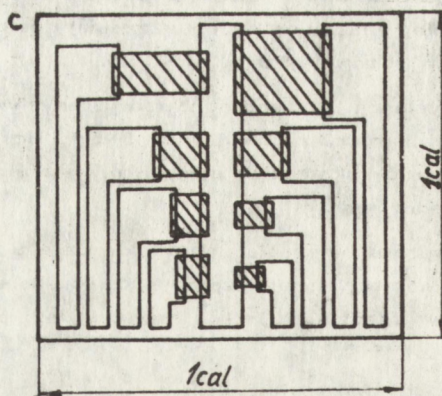
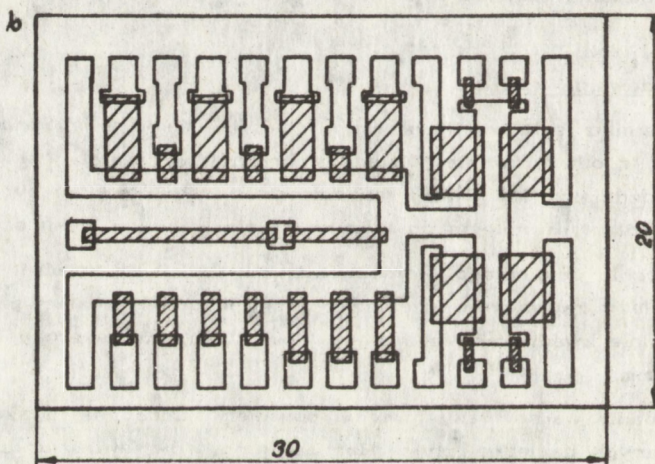
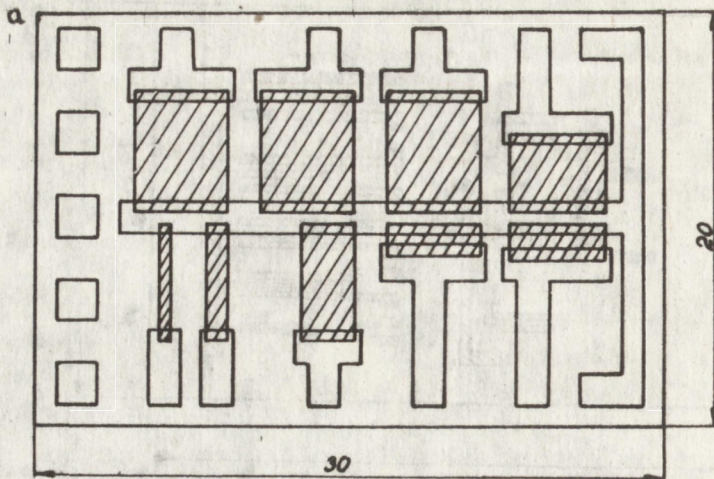
B. Dla dostatecznie dokładnego wyznaczenia rezystancji na kwadrat warstw przewodzących należy zaprojektować ścieżkę przewodzącą w postaci prostokąta lub meandra o liczbie kwadratów nie mniejszej niż 200 i przy szerokości nie mniejszej niż 0,5 mm.

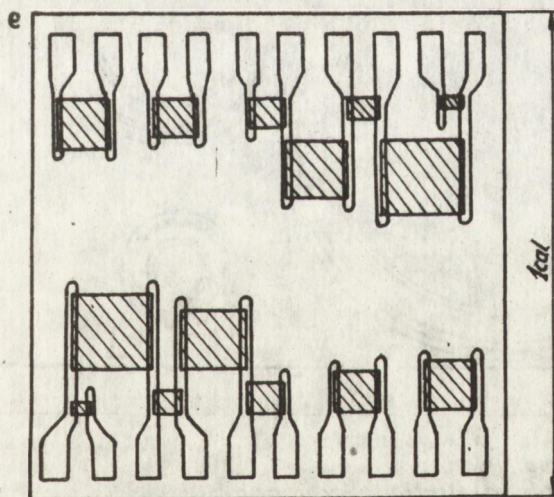
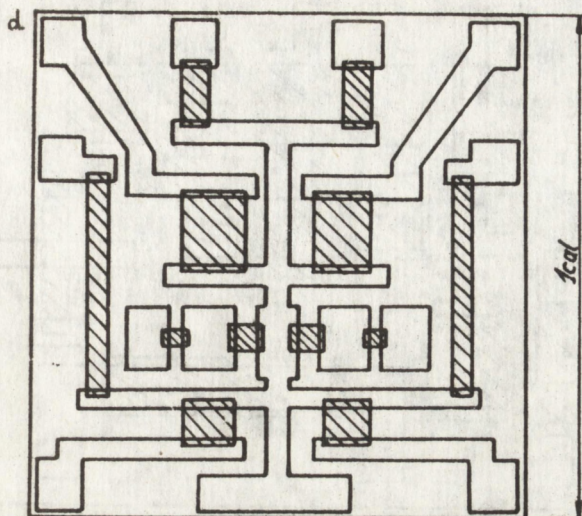
C. Test do badania warstw rezystywnych powinien składać się z szeregu rezystorów wykonanych na jednej płytce. Liczba rezystorów uwarunkowana jest wielkością płytki i mocą jaka będzie wydzielana w rezystorach podczas badania.

Ważne jest ograniczenie wynikające z dopuszczalnej gęstości mocy na płytce podłożowej (parametr p_p omówiony w punkcie 5.5.).

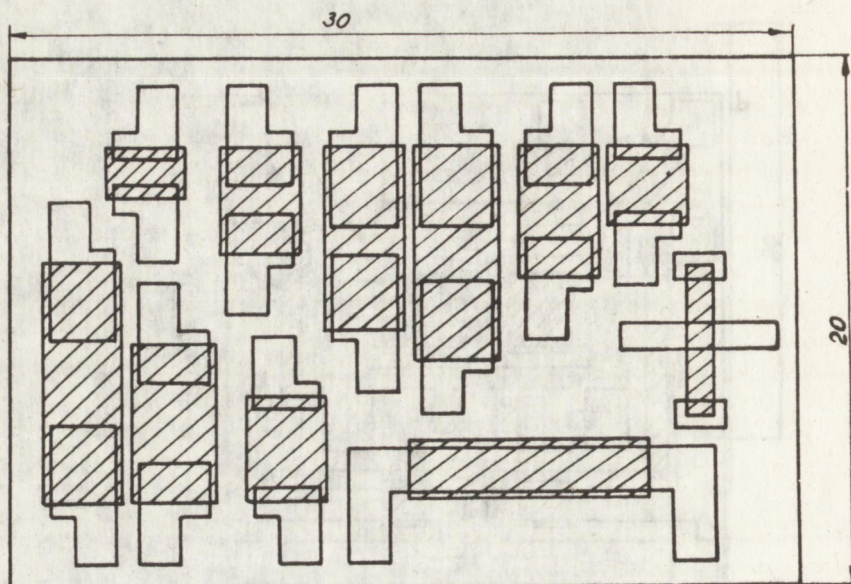
D. Dla określenia rezystancji, na kwadrat warstwy rezystywnej należy zaprojektować rezystory o dużych rozmiarach od 3 do 5 mm i liczbie kwadratów 1 do 2. Test powinien zawierać kilka takich samych rezystorów dla wyznaczenia rozrzutu rezystancji na jednej płytce.

E. W celu zbadania wpływu natężenia pola elektrycznego i obciążenia warstwy mocą na parametry warstwy, należy zaprojektować szereg rezystorów o różnych rozmiarach np. w przedziale 0,5 ÷ 5 mm. Test taki pokazano na rysunku 76b.

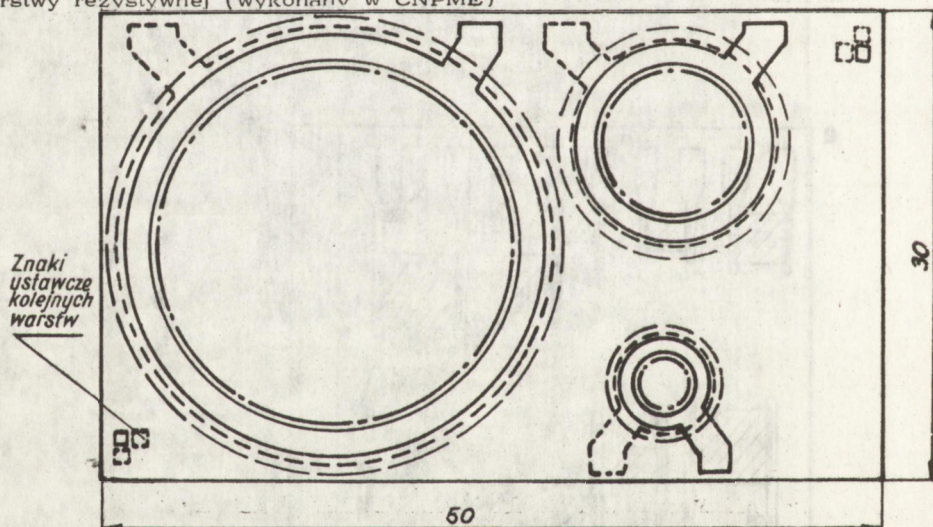




Rys. 76. Testy stosowane w różnych firmach do badania warstw rezystywnych; 76a, 76b - testy wykonane w CNPME, 76c - test wykonany w firmie Du Pont, 76d - test wykonany w Elektro Science Laboratories, 76e - test wykonany w Sperry Gyroscope Division



Rys. 77. Test do badania właściwości nakładki warstwy przewodzącej i warstwy rezystywnej (wykonany w CNPME)



Znaki
ustawcze
kolejnych
warstw

- dolna okładka kondensatora
- warstwa dielektryczna
- · - · - · - pierścieniowa elektroda ochronna
- górna okładka kondensatora

Uwaga: pierścieniowa elektroda ochronna i górna okładka wykonywane są na tym samym wzorze topologicznym i drukowane są w jednym cyklu.

Rys. 78. Test do badania warstw dielektrycznych. Przedstawia 3 kondensatory trójelektrodowe (wykonany w CNPME)

F. Dla zbadania zgodności technologicznej past przewodzących i rezystywnych należy zaprojektować szereg rezystorów o różnej długości i tej samej szerokości rysunek 76a, 76c.

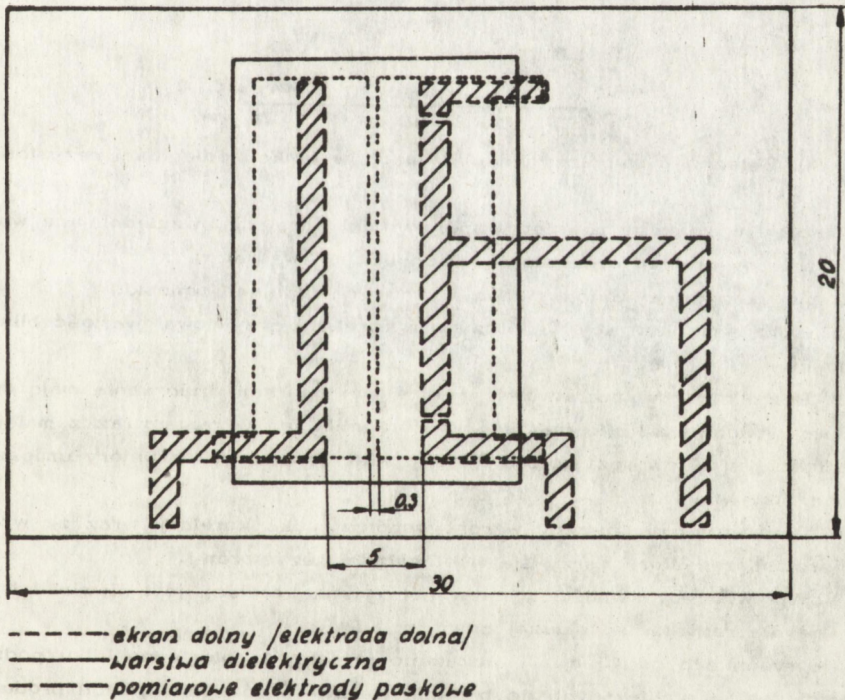
G. Doprowadzenia przewodzące do rezystorów wykonane na płytce w postaci ścieżek przewodzących powinny mieć jak najmniejszą rezystancję. Zaleca się, aby doprowadzenia były możliwie krótkie i szerokie.

H. Dla uzyskania pewnego połączenia elektrycznego, warstwa przewodząca kontaktów powinna zachodzić na rezystor nie mniej niż 0,25 mm.

I. Odległość wzoru testu od krawędzi płytki nie powinna być mniejsza niż 0,5 mm.

K. Wyprowadzenia każdego z rezystorów korzystnie jest umieścić na krawędzi płytki.

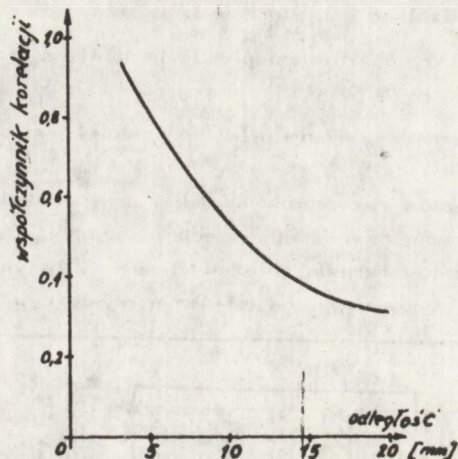
Przy projektowaniu testów rezystorowych jak i przy analizie wyników wskazane jest uwzględnienie współczynnika korelacji podanego przez A.R.Thorbiorn-sena [54]. Współczynnik ten określa zależności między rezystancją dwóch identycznych rezystorów wykonanych na tej samej płytce a ich wzajemną odległością.



Rys. 79. Test do badania rezystancji powierzchniowej warstwy dielektrycznej (wykonany w CNPME)

Współczynnik korelacji ma wartości dodatnie bliskie jedności, kiedy odległość między rezystorami jest mała i wartości mniejsze od jedności kiedy odległości pomiędzy rezystorami są większe.

Autorzy artykułu [54] dają propozycje formalnego ujęcia problemu wzajemnej korelacji wartości rezystorów leżących na jednej płytce. Na rysunku 80 pokazano zależność współczynnika korelacji w funkcji odległości rezystorów.



Rys. 80. Zależność współczynnika korelacji w funkcji odległości rezystorów

Autorzy wyznaczyli również współczynniki korelacji uwzględniające wpływ wielkości powierzchni rezystorów i ich liczbę kwadratów.

Z powyższych wywodów można wysnuć następujące wnioski:

1. Korzystnie jest aby współczynnik korelacji przyjmował wartość bliską jedności.
2. Rezystory grubowarstwowe w tej samej operacji drukowania mają dodatnią wartość współczynnika korelacji i współczynnik ten wzrasta wraz z malejącą odległością środków rezystorów. Należy więc jednakowe rezystory umieszczać jak najbliżej siebie.
3. Zauważono nieznaczny wzrost współczynnika korelacji wraz ze wzrostem powierzchni rezystora (przy stałej odległości rezystorów).
4. Wpływ liczby kwadratów na współczynnik korelacji jest niewielki i pojawia się dla rezystorów o dużej powierzchni.

Na rysunkach od 73 do 79 pokazano projekty topologiczne kilku podstawowych testów stosowanych do badania warstw w różnych firmach produkujących pasty.

9.2. Podłoża

Specyfiką techniki warstwowej jest to, że badaną warstwę rozpatruje się łącznie z podłożem na które jest nатоżona.

Właściwości warstwy w zasadniczy sposób uzależnione są od rodzaju podłoża. Na adhezję, lutowność czy rezystancję jednakowo mają wpływ cechy pasty, jak i podłoża. Wybór podłoża do badań jest więc zagadnieniem bardzo ważnym, mającym niejednokrotnie wpływ na ocenę pasty i warstwy.

Najbardziej uzasadnione jest, aby badanie pasty wykonane było na tym samym podłożu, na którym pasta będzie eksploatowana w podzespole elektronicznym. W niektórych przypadkach jest to niemożliwe, ponieważ pasta może być nakładana w końcowej fazie wykonania podzespołu. Zastosowanie takiego elementu jako podłoża do badań bardzo często jest zbyt kosztowne, a jego konstrukcja, kształt czy stan powierzchni uniemożliwiają wykonanie odpowiedniego testu.

Przykładem może być wykorzystanie pasty srebrowej na katody w kondensatorach tantalowych lub elektrod montażowych w ceramicznych kondensatorach monolitycznych. W takiej sytuacji konieczne jest sprawdzenie niektórych parametrów pasty (np. rezystancji powierzchniowej) na podłożu innym, często bardzo różniącym się od tego, na które pasta jest przeznaczona.

Podstawowym wymaganie stawianym podłożom przeznaczonym do badań jest bezwzględna zgodność z odpowiednimi warunkami technicznymi.

Jeżeli nie ma zgodności badanych parametrów podłoża z warunkami technicznymi, należy poddać podłoża szczegółowej selekcji.

W przypadku płytek podłożowych należy sprawdzić:

a) cechy fizyczne tworzywa takie jak: przenikalność elektryczną, współczynnik stratności, rezystancja skrośna, nasiąkliwość, współczynnik rozszerzalności termicznej.

b) cechy geometryczne takie jak: długość, szerokość, grubość, wypaczenie i tolerancje tych wymiarów, chropowatość i falistość powierzchni.

c) wady mechaniczne takie jak: wyszczerbione krawędzie, mikropęknięcia, rysy, kratery, wtrącenia, zabrudzona powierzchnia.

Podłoża przed nakładaniem pasty nie wymagają na ogół specjalnego przygotowania, oczywiście jeżeli przechowywane były w opakowaniu producenta w warunkach zapobiegających ich zabrudzeniu. Jeżeli jednak zachodzi potrzeba oczyszczenia płytek, to najczęściej przeprowadza się operację przepalenia płytek, oczywiście jeżeli nie spowoduje to nieodwracalnych zmian właściwości podłoża, np. w przypadku płytek alundowych można zastosować temp. $500 \pm 900^{\circ}\text{C}$ w czasie kilkunastu minut.

9.3. Przygotowanie pasty do nakładania

Od czasu wykonania pasty do jej zastosowania przez użytkownika istnieje zawsze pewien okres, w którym mogą nastąpić zmiany właściwości pasty. Można tu wymienić przede wszystkim sedimentację i ubytek rozpuszczalników w przypadku nieszczelnego opakowania. Dlatego też pierwszą czynnością przed nałożeniem pasty powinno być przywrócenie jej pierwotnych właściwości. W tym celu pastę należy ujednorodnić. Wykonuje się to najczęściej przez ręczne mieszanie bagietką lub mieszadłem laboratoryjnym. Jeżeli ujednorodnienie pasty wymaga bardzo długiego mieszania lub obroty wrzeczona mieszadła są duże, pasta wówczas ulega nagrzananiu oraz zmienia swoją charakterystykę reologiczną. W takim przypadku po zakończeniu mieszania pastę należy odstawić na kilka godzin (firma Du Pont podaje czas 12±16 godzin). Po tym czasie można dopiero wykonać kontrolę lepkości pasty.

Zdarza się, że w wyniku długotrwałego przechowywania pasty występuje tak silne rozwarstwienie, że całkowite ujednorodnienie pasty metodą mieszania może być niemożliwe (dotyczy to szczególnie roztrarcia aglomeratów). W takim przypadku homogenizacja pasty wymaga zastosowania trójwałcarki. Ponieważ użytkownik pasty najczęściej nie dysponuje takim urządzeniem, o pomoc należy zwrócić się do producenta pasty.

Jeżeli po rozmieszaniu pasta posiada zbyt dużą lepkość, należy do niej dodać firmowego rozcieńczalnika i wymieszać ją. Jeżeli korekta lepkości mieściła się w niewielkich granicach np. rzędu 20%, to bezpośrednio po dodaniu rozcieńczalnika i wymieszaniu pasty można wykonać pomiar lepkości i przystąpić do nakładania warstwy. Jeżeli zmiana lepkości była większa niż 20% to po wymieszaniu pastę należy odstawić na kilka godzin i dopiero wykonać pomiar lepkości.

Należy pamiętać o tym, że wszystkie kłopoty z ujednorodnieniem i przywracaniem lepkości past najczęściej wiążą się z niewłaściwym lub zbyt długim magazynowaniem pasty.

Przygotowanie do druku past rezystywnych obejmuje najczęściej oprócz ujednorodnienia opisanego powyżej korektę rezystancji. Polega ona na uzyskaniu pasty o wymaganej rezystancji drogą zmieszania w odpowiednich proporcjach dwóch past o różnych rezystancjach.

Aby otrzymana mieszanina past miała wystarczającą jednorodność a tym samym mały rozrzut należy przestrzegać następujących reguł mieszania:

1. Każda z mieszanych past musi być dokładnie ujednorodniona, a ich lepkości skorygowane do wartości katalogowych.

2. Przed ustaleniem proporcji mieszanych past należy wyznaczyć ich rezystancję powierzchniową.

3. Podczas mieszania należy do pąty występującej w mniejszej ilości dawać pastę o większej ilości.

4. Mieszanie należy wykonać płaską bagietką ze stali nierdzewnej na płycie szklanej (nie zaleca się mieszania past w stołku). Jeżeli mieszane są większe ilości pasty (powyżej 1 kg) można stosować miksery mechaniczne.

9.4. Nakładanie warstwy

Do nakładania past na podłoża najczęściej stosowane są następujące metody:

- 1) druk sitowy,
- 2) malowanie,
- 3) stemplowanie,
- 4) zanurzanie,
- 5) natrysk.

Wybór odpowiedniej metody nakładania pasty zależy od kształtu podłoża i nakładanego wzoru. Często wynika również z dysponowanej aparatury lub jej braku.

Wzory o precyzyjnym rysunku nakładane na podłoża płaskie wykonywane są prawie wyłącznie metodą sitodruku.

Pozostałe metody pozwalają pokrywać pastą pewne obszary o powierzchni nie płaskiej oraz kształtki nawet o dość skomplikowanej konstrukcji. Poniżej omówiono krótko poszczególne metody nakładania past.

Druk sitowy

Zasada druku sitowego polega na przecięnięciu pasty przez siatkę odpowiednio zamaskowaną na podłożu ustawione bezpośrednio pod nią. Pasty przeznaczone do nakładania tą metodą powinny mieć lepkość od kilkudziesięciu tysięcy do kilkuset tysięcy mPas.

Szczegółowy opis metody sitodruku i konstrukcji sitodrukarek znajduje czytelnik w literaturze [6, 7, 15], natomiast poniżej zostaną omówione tylko te zagadnienia, które mają zasadniczy wpływ na jakość drukowania i właściwości nałożonej warstwy.

Sita

Wybór odpowiedniego rodzaju sita i metody maskowania ma podstawowy wpływ na grubość nakładanej warstwy i ostrość krawędzi wzoru. Tym samym pośrednio decyduje o tak podstawowych parametrach warstwy jak: adhezja, odporność na ługujące działanie luźniwa, właściwości elektryczne.

W sitodruku past znajdują zastosowanie trzy rodzaje siatek: ze stali nierdzewnej, nylonowe, poliestrowe. W tablicach 2 i 3 zebrano najważniejsze cechy charakterystyczne siatek i zalecenia ich stosowania.

Tablica 2

Parametry charakterystyczne siatek [7]

Lp	Parametry charakteryst.	Nylon	Poliester	Stal	Uwagi
1	Wytrzymałość na rozciąganie	b.db.	b.db.	doskonała	Nylonowe siatki tracą 10-15% wytrzymałości na rozciąg po zamoczeniu
2	Odporność chemiczna	b.db.	b.db.	doskonała	Wszystkie siatki odporne na działanie substancji chemicznych
3	Elastyczność	doskonała	doskonała	dobra	
4	Odporność na przetarcie	b.db.	dobra	doskonała	Siatki syntetyczne mają tendencję do wycierania się na skutek szorstkiego działania składników pasty

Tablica 3

Zalecenia w stosowaniu siatek [7]

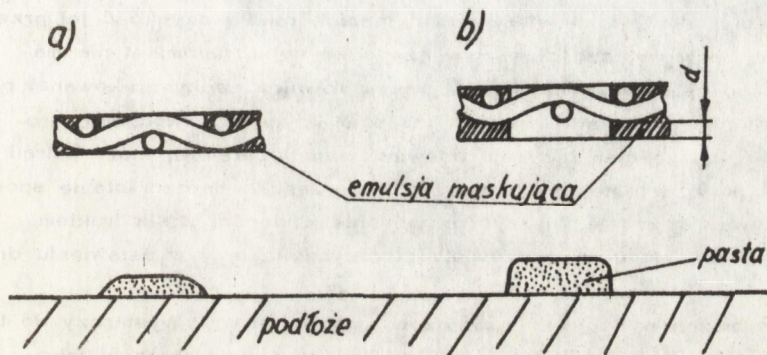
Lp	Rodzaj aplikacji	Zalecenia	
1	Drukowanie bardzo wąskich ścieżek (od 50 do 100 μm)	Siatki stalowe 325 mesh lub 400 mesh. Wzór pod kątem 45° do włókien siatki	
2	Drukowanie ścieżek długich o szerokości (125 do 250 μm)	Siatki stalowe 230, 280 lub 325 mesh. Wzór pod kątem 45° do włókien siatki	
3	Drukowanie	Rezystory	Siatki stalowe 165 i 200 mesh
		Ścieżki przewodzące	Siatki stalowe i poliestrowe 200 do 230 mesh
4	Krótkie serie: szkliva zabezpieczające, rezystory, kondensatory, dielektryki, pasty lutownicze	Siatki poliestrowe lub nylonowe od 80 do 150 mesh	
5	Długie serie: szkliva, pasty lutownicze zwykłe lub pasty z lutowi twardych	Siatki stalowe od 80 do 150 mesh	

Drugim ważnym parametrem siatki jest jej gęstość, którą najczęściej podaje się liczbą oczek na cal długości (tzw. mesh). W Europie stosuje się również określanie gęstości liczbą oczek na cm^2 .

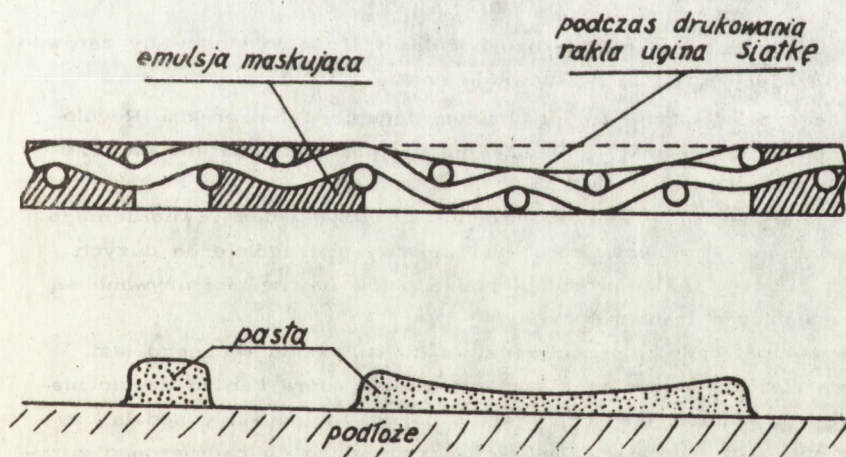
W technice grubowarstwowej używa się głównie siatki ze stali nierdzewnej o gęstości od 100 do 400 mesh, a najczęściej 200 mesh.

Do zamaskowania sita stosowane są metody fotolitograficzne, które można podzielić na dwie grupy. Maskowanie bezpośrednie stosowane w drukowaniu seryjnym i maskowanie pośrednie używane w drukowaniu układów precyzyjnych o dużej rozdzielczości wzorów. Metody te różnią się procesem technologicznym [15] i zasadą maskowania siatki, co w konsekwencji decyduje o grubości warstwy i dokładności odwzorowania.

Na rysunku 81 i 82 zilustrowano wpływ różnych metod maskowania sita na grubość drukowanej warstwy.



Rys. 81. Wpływ metody maskowania sita na grubość wydrukowanej warstwy
a) sito maskowane metodą bezpośrednią; b) sito maskowane metodą pośrednią



Rys. 82. Wpływ wielkości drukowanego wzoru na grubość warstwy. Sito maskowane metodą pośrednią

Ustawienie drukarki

Proces drukowania ograniczony jest wieloma parametrami, których właściwe dobranie decyduje o jego jakości.

Nie wdając się w głębszą analizę procesu sitodruku, którą można znaleźć w literaturze [6, 7, 15], poniżej wymieniono tylko zasadnicze parametry procesu. Tak więc przystępując do drukowania należy ustalić następujące wielkości: materiał i naciąg siatki, równoległość płaszczyzn sita i podłoża, tolerancję grubości podłoży i ich sferyczność, nacisk rakli i szybkość jej przesuwu. Parametry te w większości są powiązane ze sobą, natomiast nie ma ścisłych reguł ich ustalania. Mają na nie wpływ również cechy drukowanej pasty i sama konstrukcja drukarki. Dlatego też w praktyce o powodzeniu procesu drukowania najczęściej decyduje doświadczenie operatora, który potrafi zoptymalizować poszczególne nastawy urządzenia. Jest to bardzo istotne spostrzeżenie, ponieważ może się zdarzyć przypisanie trudności z sitodrukiem właściwościom pasty, kiedy w rzeczywistości przyczyna leży w ustawieniu drukarki.

Druk sitowy można wykonywać również w sposób ręczny. Wystarczy do tego celu ramka z naciągniętą siatką i kawałek oprawionej gumy służącej jako rakla. Zasadę działania takiej drukarki pokazano na rysunku 83.

Wiele prostych testów można zupełnie poprawnie wykonać na tak niedoskonałym urządzeniu pod warunkiem, że proces prowadzi doświadczony operator.

Malowanie

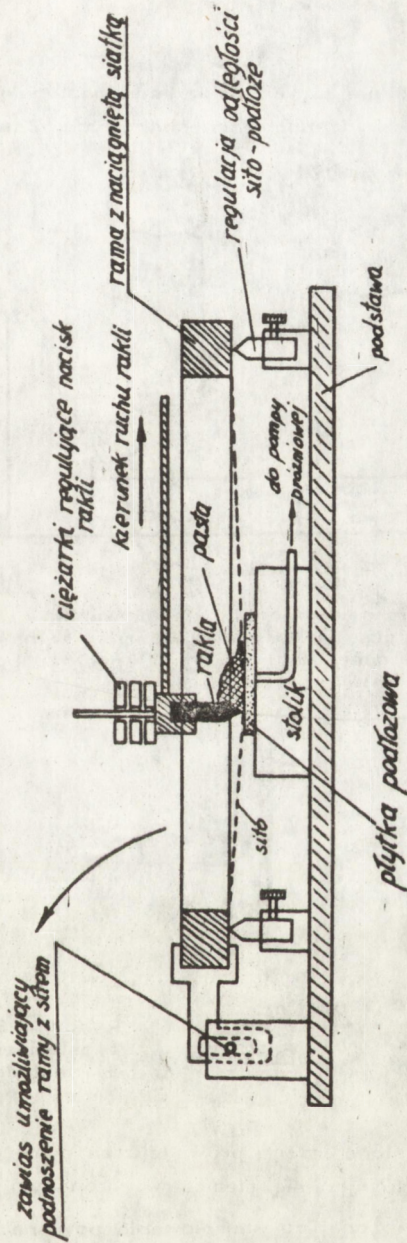
Ten sposób nakładania pasty jest bardzo popularny i często stosowany zarówno w produkcji podzespołów, jak i w testowaniu past.

Malowanie ręczne wykonuje się pędzelkiem najlepiej retuszerskim. Regulowanie grubości nakładanej pasty dokonuje się np. przez wielokrotne na przemian malowanie i suszenie warstwy.

Wadę ręcznego malowania stanowią trudności z uzyskaniem równomiernego pokrycia powierzchni i jednakowej grubości warstwy szczególnie na dużych powierzchniach. Dlatego też w produkcji podzespołów najczęściej używane są urządzenia mechaniczne i automatyczne.

Malowanie automatyczne w przeciwieństwie do malowania ręcznego jest operacją, która stawia szczególne wymagania paście, która bardzo często niedokładnie pokrywa podłożę, nie rozplywa się pozostawiając ślady pędzla czy szczotki. Wymaga to wielokrotnego malowania, prowadząc do nadmiernego zużycia pasty. Prawidłowe natożenie pasty zależy w tym przypadku podobnie jak przy sitodruku, od doświadczenia operatora, który odpowiednio dobiera lepkość pasty, ustawienie, kształt i docisk szczoteczek malujących.

Pasty przeznaczone do malowania mają lepkość w granicach od 500 mPas do 3000 mPas.

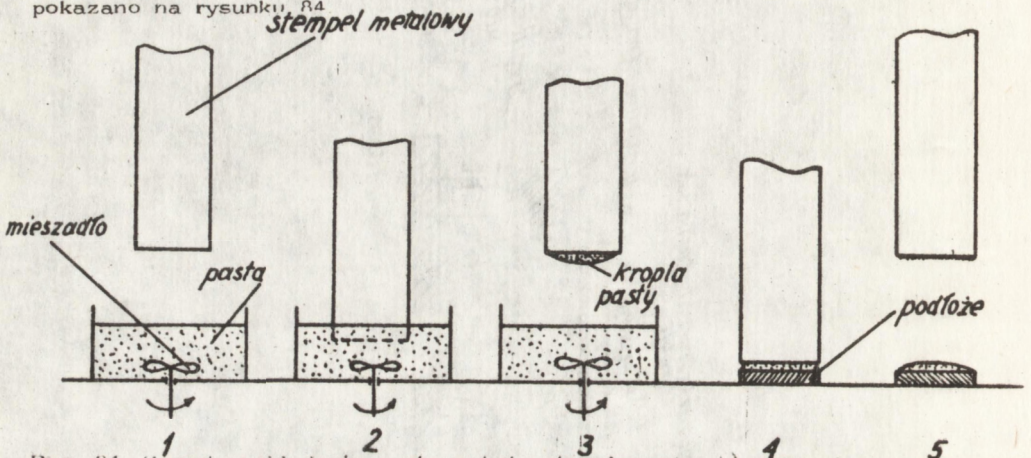


Rys. 83. Budowa i zasada pracy sitodrukarki ręcznej

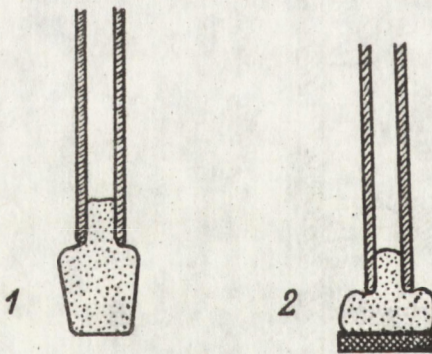
W czasie całego procesu nakładania dla zapobieżenia sedymentacji pasta powinna być bez przerwy mieszana.

Stemplowanie

Metodę tę powszechnie stosuje się do nakładania past na płaskie, niewielkie powierzchnie np. okładki w kondensatorach płytkowych. Zasadę stemplowania pokazano na rysunku 84



Rys. 84. Zasada nakładania pasty metodą stemplowania. 1) stempele przygotowywane do zanurzenia w paście; 2) stempel zanurzony w paście; 3) stempel pokryty pastą; 4) nakładanie pasty na podłoże; 5) podłoże pokryte pastą. Stempel przygotowany do powtórzenia cyklu



Rys. 85. Stemplowanie ręczne
1) stempel wykonany z gąbki
2) nakładanie pasty

Nakładanie pasty tą metodą można prowadzić za pomocą urządzeń mechanicznych lub ręcznie, posługując się stemplem wykonanym z gąbki rysunek 85.

Lepkość pasty przeznaczonej do stemplowania powinna być w granicach od 1000 mPas do 3500 mPas, z tym że użytkownik dobiera doświadczalnie taką lepkość, przy której jakość stemplowania jest najlepsza.

Zanurzanie

Zanurzanie jest najłatwiejszym sposobem nakładania pasty, polegającym na zanurzeniu kształtki podłożowej w paście.

W produkcji podzespołów elektronicznych do tego celu stosuje się najczęściej urządzenia automatyczne. Natomiast przy testowaniu past operację tę można wykonywać ręcznie.

Natryskiwanie

Metoda ta jest stosunkowo rzadko stosowana do nakładania past. Do tego celu używane są pneumatyczne pistolety lakiernicze. Metoda ta jest nieekonomiczna, ponieważ część pasty rozpylana jest poza przedmiotami pokrywanymi pastą. Stosując odpowiednie ekrany można nakładać pastę na wybrane obszary podłoża.

9.5. Obróbka termiczna

Ostateczne uformowanie warstwy o wymaganych właściwościach fizycznych elektrycznych odbywa się podczas obróbki termicznej nałożonej pasty.

Na obróbkę termiczną składa się suszenie i wypalanie warstwy.

Suszenie

W przypadku past przeznaczonych do mikroukładów grubowarstwowych suszenie warstwy należy przeprowadzić w dwóch etapach:

1) leżakowanie warstw na poziomych blachach przez 15 min w temperaturze pokojowej. W tym czasie warstwa dzięki napięciu powierzchniowemu powinna wyrównać powierzchnię (zanika struktura siatki odcisnięta na powierzchni warstwy).

2) Suszenie w temp. $120^{\circ}\pm 150^{\circ}\text{C}$ w czasie 5÷15 min ma na celu usunięcie lotnych substancji organicznych z nośnika pasty. Do tego celu można wykorzystać suszarkę komorową o dobrej wentylacji, jednak lepiej posługiwać się suszarką tunelową, która zapewnia powtarzalne warunki suszenia dla całej partii elementów.

Szczególnie dokładnego przestrzegania warunków suszenia, ustalonych przez producenta, wymaga się dla past rezystywnych i przewodzących o dużej rozdzielczości druku. Podczas suszenia, na skutek ogrzania pasty, występuje z jednej strony znaczny spadek jej lepkości, z drugiej zaś w wyniku odparowania lotnych składników organicznych zagęszczanie. Temperatura suszenia powinna być tak dobrana aby procesy te utrzymane były w równowadze. Zbyt szybkie nagrzanie pasty doprowadzić może do rozlania i zwarć między ścieżkami położonymi blisko siebie szybkie zaś usuwanie składników organicznych spowodować może powstanie pęcherzy i kraterów.

Dla wielu past o mniejszych wymaganiach warunki suszenia nie są tak krytyczne, można również pominąć okres leżakowania ograniczając się do suszenia w temp. $120^{\circ} \div 150^{\circ}\text{C}$.

Wypalanie

Wypalanie jest operacją technologiczną, która ostatecznie kształtuje wszystkie właściwości warstwy.

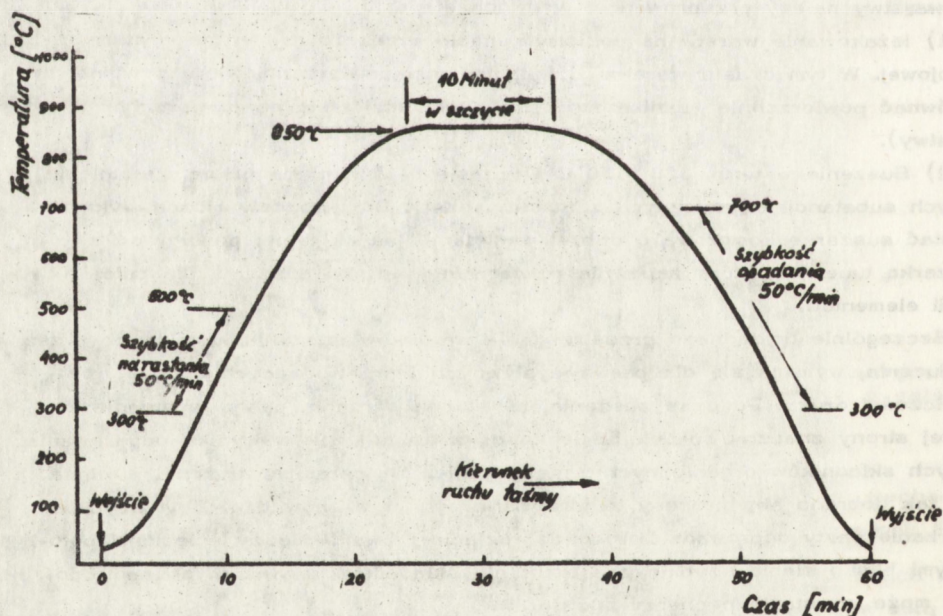
Reakcje chemiczne, jakie zachodzą podczas wypalania warstwy można podzielić na następujące zasadnicze grupy:

- reakcje zachodzące pomiędzy składnikami pasty,
- reakcje pomiędzy składnikami pasty i atmosferą w piecu,
- reakcje pomiędzy składnikami pasty i podłożem,
- reakcje pomiędzy składnikami past różnych typów stykających się ze sobą.

Aby przebieg tych reakcji zachodził w sposób kontrolowany i przewidywalny, wypał musi być prowadzony w ściśle określonych warunkach. Odnosi się to szczególnie do past rezystywnych, które mają ostro tolerowane warunki wypalania ustalone przez producenta z punktu widzenia otrzymania optymalnych parametrów elektrycznych.

Znacznie szerszy zakres temperatur wypalania mają pasty przewodzące, a szczególnie pasty srebrne o niższych wymaganiach.

Wymagane warunki wypalania najprościej można spełnić w piecu tunelowym, przesuając testy na transporterze taśmowym



Rys. 86. Zalecany profil temperatury wzdłuż pieca przy wypalaniu past rezystywnych firmy Du Pont

W technice grubowarstwowej stosowane są piece tunelowe wielostrefowe o dokładności utrzymania temperatury $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Dzięki niezależnym nastawom poszczególnych stref grzejnych możliwe jest właściwe ukształtowanie profilu w piecu.

Na rysunku 86 pokazano charakterystykę temperaturową pieca typowa dla wypalania kilku past rezystywnych firmy Du Pont.

Warunki wypalania pasty podawane przez producenta powinny zawierać następujące informacje:

- optymalną temperaturę szczytową,
- dopuszczalny zakres temperatury szczytowej,
- czas wypalania w temperaturze szczytowej,
- czas całego cyklu wypalania,
- szybkość narastania i opadania temperatury,
- atmosferę w piecu.

Ustalając profil wypalania należy zwrócić uwagę na szybkość narastania i opadania temperatury, która nie powinna być większa od ustalonej dla danej pasty przez producenta. Zbyt szybkie narastanie temperatury w piecu może spowodować niecałkowite wypalenie nośnika organicznego, jego zwęglenie i w efekcie końcowym obniżenie parametrów warstwy. Zbyt szybki spadek temperatury w piecu może spowodować naprężenia w warstwie a nawet jej popękanie.

9.6. Montaż

Wykonanie pomiarów większości parametrów wymaga dotarcia do warstwy doprowadzeń elektrycznych, najczęściej z drutu miedzianego cynowanego lub srebrzonego. Ich montażu na ogół dokonuje się lutownicą ręczną za pomocą lutów cynowo-ołowiowych. Montaż taki należy wykonać bardzo ostrożnie, aby nie narazić na szok termiczny badanej warstwy. Odnosi się to szczególnie do warstw rezystywnych. Z tego względu podczas montażu wskazane jest nagrzanie płytki podłożowej do temp. około 80°C , a używana lutownica powinna mieć moc w granicach od 15 W do 25 W.

Bardzo ważne jest prawidłowe wykonanie montażu w badaniu adhezji warstwy. Połączenie wykonywane najczęściej metodą lutowania ma na celu zabezpieczenie do warstwy siły odrywającej. Ważne jest, aby przyjęty sposób montażu nie zmieniał właściwości warstwy.

Badanie warstw przewodzących przeznaczonych do mikroukładów grubowarstwowych wymaga wykonania montażu technikami stosowanymi w mikroelektronice, a więc ultrakompresji, termokompresji, eutektyki, łączenie klejami przewodzącymi.

Omówienie metod montażu mikroelektronicznego przekracza ramy tego opracowania. Dokładne informacje na ten temat można znaleźć między innymi w następujących pozycjach bibliograficznych. [6, 7, 15].

LITERATURA

1. Szymański D. Szczytko B.: "Opracowanie metod badań aplikacyjnych past przewodzących". Sprawozdanie z pracy naukowo badawczej. Praca nr 25/80515/76 etapy OW i OT. Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych
2. Szczytko B., Szymański D.: "Opracowanie metod badań aplikacyjnych past rezystywnych" Sprawozdanie z pracy naukowo badawczej. Praca nr 25/80638/78 etapy OW i OT. Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych
3. Bistek T., Sękowski S.: "Metody badań powłok metalowych". WNT Warszawa 1973
4. Dryński T.: "Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki". PWN Warszawa 1978
5. Fortuna E., Jabłoński J.: "Przegląd czynników wpływających na jakość połączeń drutowych w układach scalonych oraz metody testowania tych połączeń". Informacje, Studia, Przyczyunki. PIE Warszawa 1976
6. Hamer D.W., Biggers J.V.: "Technologia układów scalonych grubowarstwowych" WNT Warszawa 1976
7. Harper Ch.A.: "Handbook of Thick Film Hybrid Microelectronics" Mc Grow Hill Company 1974
8. Kembłowski Z.: "Recmetria płynów nierewtonowskich". WNT Warszawa 1973
9. Kossakowski J.: "Oporniki i kondensatory radiowe". MON Warszawa 1979
10. Kowtioniuk i inni: "Pomiary parametrów materiałów półprzewodnikowych" PWN Warszawa 1973
11. Maisel L.J., Glang R.: "Handbook of Thin Film Technology" Mc Grow Hill Book Company 1970
12. Mikroelektroniczna Technika Grubowarstwowa I Sympozjum Rzeszów 1973
13. Mikroelektroniczna Technika Grubowarstwowa II Sympozjum Rzeszów 1977
14. Motchenbacher C.D., Fitchen F.C.: "Projektowanie elementów i układów elektronicznych niskoszumnych". WNT Warszawa 1977
15. Nowak S. i inni: "Układy mikroelektroniczne grubowarstwowe" WNT Warszawa 1977
16. Praca zbiorowa "Poradnik Inżyniera Elektronika" WNT Warszawa 1971
17. Praca zbiorowa "Technika warstwowa w mikroelektronice" WNT Warszawa 1973
18. Radomski T., Ciszewski A.: "Lutowanie" WNT Warszawa 1979
19. Siciński Z.: "Badanie materiałów elektroizolacyjnych" WNT Warszawa 1968
20. "The Thick Film Microcircuitry" Handbook Du Pont Electronic Products.
21. Anjard R.P.: "Leaching During Solder Immersion Thick Film Conductors" Proceeding of the Technical Programme Internepcon 1970

22. Anjard R.P.: "Thick Film Conductor Adhesion Testing". Microelectronics and Reliability 1971, Vol 10 269-275
23. Biggers J.V.: "Thick Film Glass-Ceramic Capacitors". Solid State Technology maj 1971, 63-66
24. Holmes P.J.: "The Load Life Characteristics of Thick Film Resistors". Microelectronics and Reliability 1973 Vol 12 61
25. Jacobson L.: "Testing for Adhesion of Hybrid Films" Proceedings Electronic Components Conference 1971, 474-479
26. Kuo C.Y., Blank H.G.: "Effects of Resistor Geometry on Current Noise in Thick Film Resistors". Proceedings of I.S.H.M. Symposiums 1968, 153-160
27. Kuo C.Y.: "The Contact Resistance in Thick Film Resistors". Proceedings of I.S.H.M. 1969, 263-269
28. Lougharm J.A., Sigbee R.A.: "Termination Anomalies in Thick Film Resistors" Proceedings of I.S.H.M. 1969, 271-280
29. Olivei A.: "On The Sensitivity to High Voltages of Thick Film Resistors". Proceedings 23 I.E.E.E. Electronic Components Conference 1973, 140-152
30. Rimer D.E.: "Effect of Geometry on the Characteristics of Thick Film Resistors". Proceedings Electronic Components Conference 1970, 102-108
31. Pitt K.E.G., Jansom C.J.: "Termographic Studies of Power Dissipation in Thick Film Resistors". Proceedings of the Technical and International Microelectronics 1974 s.65-78
32. Robertson J.: "Conduction Processes in High Value Thick Film Resistors" Electrocomponent Science and Technology 1977 Vol 4 s.105-109
33. Stein S.J., Huang C.: "A High Voltage, High Performance Thick Film Resistor System". Electrocomponent Science and Technology 1977, Vol 4 s.95-105
34. PN-63/C-01700 Wyroby lakierowe. Nazwy i określenia
35. PN-72/C-04809 Środki powierzchniowo czynne. Oznaczenie napięcia powierzchniowego i napięcia międzyfazowego
36. PN-75/C-81508 Wyroby lakierowe. Oznaczenie czasu wyptywu kubkami wyptywowymi
37. PN-76/C-81516 Wyroby lakierowe. Oznaczenie ścieralności powłok lakierowych
38. PN-67/C-81543 Wyroby lakierowe. Oznaczenie stopnia osadzania się pigmentów i wypętniaczy
39. PN-73/C-81547 Wyroby lakierowe. Wyznaczenie współczynnika tiksotropii

40. PN-72/E-04400 Materiały elektroizolacyjne state. Przygotowanie i badanie próbek. Znormalizowane warunki otrzeżenia
41. PN-69/E-04403 Materiały elektroizolacyjne state. Pomiar przenikalności elektrycznej i współczynnika strat dielektrycznych
42. PN-63/E-04404 Materiały elektroizolacyjne state. Pomiar wytrzymałości dielektrycznej i próby napięciowe
43. PN-71/E-04405 Materiały elektroizolacyjne state. Pomiar elektrycznej oporności
44. PN-73/E-04550 Wyroby elektrotechniczne. Próby środowiskowe
45. PN-76/E-06307 Elektroizolacyjne materiały ceramiczne. Metody badań
46. PN-73/M-04251 Struktura geometryczna powierzchni. Chropowatość powierzchni
47. PN-74/T-04601 Elementy urządzeń elektronicznych. Rezystory state. Metody prób i pomiarów
48. PN-75/T-04602 Elementy urządzeń elektronicznych. Kondensatory state. Metody prób i pomiarów
49. BN-72/6110-09 - Wyroby lakierowe. Oznaczanie stopnia rozróżnienia pigmentów i wypętniaczy przy użyciu grindometru
50. BN-64/6110-11 Wyroby lakierowe. Oznaczanie gęstości
51. BN-66/6110-16 Wyroby lakierowe. Badanie ścieralności powłok lakierowych aparatem Tabera
52. ZN-78MPV-14/ONPMP/E-011 Pasty dla elektroniki. Nazwy i określenia
53. PN-79/H-04361 Pomiar twardości metali sposobem Vickersa przy obciążeniu poniżej 9.8 N
54. Thorbjørnson A.R., Dworack M., Riad A.: "Correlation Between Thick-Film Resistance Values" IEEE Transaction on Parts, Hybrids and Packaging Vol. PHP 13, No 2 June

SPIS TREŚCI

Część I

1. Wstęp	5
2. Parametry charakteryzujące właściwości past	5
2.1. Wygląd zewnętrzny	5
2.2. Skład	6
2.3. Lepkość	7
2.4. Gęstość	11
2.5. Wielkość aglomeratów	13
2.6. Napięcie powierzchniowe	14
2.7. Sedymentacja	15
3. Parametry fizyczno-mechaniczne warstw	17
3.1. Wygląd zewnętrzny	17
3.2. Grubość	18
3.3. Adhezja	20
3.4. Rozdzielczość	29
3.5. Chropowatość powierzchni	30
3.6. Twardość	32
3.7. Ścieralność	32
4. Parametry charakterystyczne warstw przewodzących	34
4.1. Rezystancja	34
4.2. Lutowność	35
4.3. Odporność na lutowanie lutem	38
4.4. Migracja jonów metalicznych	38
4.5. Podatność do montażu mikroelektronicznego	39
4.6. Podatność do montażu struktur półprzewodnikowych	42
5. Parametry charakterystyczne warstw rezystywnych	43
5.1. Rezystancja	44
5.2. Temperaturowy współczynnik rezystancji	49
5.3. Nieliniowość rezystancji	51
5.4. Współczynnik szumów	54
5.5. Obciążalność	56
5.6. Dopuszczalne natężenie pola elektrycznego	61
Literatura	63

Część II

6. Parametry warstw dielektrycznych	3
6.1. Przenikalność elektryczna i współczynnik stratności	4
6.2. Wytrzymałość dielektryczna	8
6.3. Rezystancja	8
6.4. Temperaturowy współczynnik przenikalności elektrycznej	10
6.5. Przenikalność dla wilgoci	12
7. Zgodność technologiczna past i warstw	13
8. Narażenia stosowane w badaniach warstw	18
8.1. Narażenia temperaturowe	18
8.2. Narażenia temperaturo-prądowe	19
8.3. Narażenia temperaturowe z uwzględnieniem wilgoci	20
8.4. Narażenia technologiczne	20
9. Projektowanie i wykonanie testów	21
9.1. Zasady projektowania testów	23
9.2. Podłoża	29
9.3. Przygotowanie pasty do nakładania	30
9.4. Nakładanie warstwy	31
9.5. Obróbka termiczna	37
9.6. Montaż	39
Literatura	40

