

SŁAWOMIR KOŃCZAK

Zakład Optyki i Mechaniki Precyzyjnej

SPOSOBY WYTWARZANIA KONDENSATORÓW
METODĄ ROZPYLANIA KATODOWEGO
ORAZ METODĄ PRÓŻNIOWEGO NAPAROWYWANIA METALI

Streszczenie. Nakładając pod próżnią warstwy metalu na dielektryk, czy też warstwy metalu oraz warstwy dielektryka między nimi, otrzymuje się kondensatory o dużej pojemności właściwej lub kondensatory o dużej stałości, bardzo małej stratności i napięciu przebicia tego rzędu co wytrzymałość dielektryczna dielektryka.

Nakładanie okładzin metalicznych odbywa się albo przez napylenie katodowe, albo przez naparowywanie w wysokiej próżni. Metoda naparowania jest prostsza i wydajniejsza od metody napylenia oraz daje kondensatory najwyższej jakości. Nie można jej stosować tylko wtedy, gdy albo temperatura topnienia metali odparowywanych jest za wysoka w stosunku do temperatury topnienia grzejnika, albo gdy metal odparowywany tworzy silne stopy eutektyczne z metalem grzejnika.

Kondensatorami o małych wymiarach dużej stałości i bardzo małej stratności są kondensatory wykonane przez naparowanie na mikę metalicznych elektrod z srebra lub aluminium. Nakładane warstwy srebra posiadają własności elektryczne takie same jak metal lity. Uzyskuje się to przez szybkie nakładanie dostatecznie grubych warstw.

1. Wstęp

W współczesnych układach automatyki, maszynach liczących czy pamięciowych, wykorzystuje się kondensatory o bardzo dużej pojemności właściwej - (C/V) . Jedną z metod dających największe pojemności właściwe, jest nakładanie w próżni

elektrod i dielektryka między nimi, Równocześnie trwają poszukiwania nad wykonaniem wzorców pojemności o dostatecznie dobrej jakości elektrycznej. Tu w przeciwieństwie do uprzednio wspomnianych kondensatorów nie ma metody uniwersalnej, albowiem różnie wykonane kondensatory są w różnych warunkach pracy więcej lub mniej dokładne [13]. W zasadzie na wzorce nadają się kondensatory: a) ze stałym dielektrykiem nieorganicznym, b) ze stałym dielektrykiem organicznym, c) powietrzne [13]. Pod względem małej wartości $tg\delta$, braku absorbcji, i małej zależności $tg\delta$ od częstotliwości, najlepsze są kondensatory powietrzne. Ustępują one jednak wyraźnie kondensatorom ze stałym dielektrykiem nieorganicznym, czy organicznym, z uwagi na dużo mniejszą pojemność właściwą i wytrzymałość dielektryczną, co uniemożliwia wykonanie kondensatorów powietrznych o dużej pojemności.

Kondensatory ze stałym dielektrykiem nieorganicznym dzielimy na: szklane, szklano emaliowe, szklano ceramiczne, ceramiczne i mikowe. Pod względem pojemności właściwej i małego $tg\delta$ najlepsze są kondensatory mikowe, chociaż posiadają i one pewne wady które ograniczają ich stosowalność jako wzorca. Te wady i ograniczenia zostaną omówione w treści artykułu.

Kondensatory ze stałym dielektrykiem organicznym mają pewne zalety w stosunku do mikowych jak: możliwość stosowania ich przy prądzie stałym i częstotliwościach technicznych. $Tg\delta$ dielektryków organicznych jest tego rzędu co miki a przy częstotliwościach bardzo dużych, mniejsze od miki. Dielektryki organiczne ustępują mice dużym i niejednorodnym współczynnikiem rozszerzalności powierzchniowej oraz małą wytrzymałością mechaniczną [13].

Istnieją różne sposoby nakładania elektrod wprost na dielektryku stałym, jak: chemicznie, wprażanie srebra w podłoże przez wypalanie specjalnych past, czy też naparowywanie w wysokiej próżni okładzin metalicznych (13).

Metoda naparowania jest metodą najczystsza, dającą najbardziej lite warstwy oraz niedopuszczającą do powstawania baniek powietrza między dielektrykiem a elektrodą, co ma bardzo duży wpływ na wytrzymałość dielektryczną kondensatora oraz na wahania $tg\delta$ (8), (10). Dlatego w tym artykule zostanie omówiona metoda naparowania srebra na mice w wysokiej próżni, jako metoda nie stosowana w kraju na skalę półtechniczną.

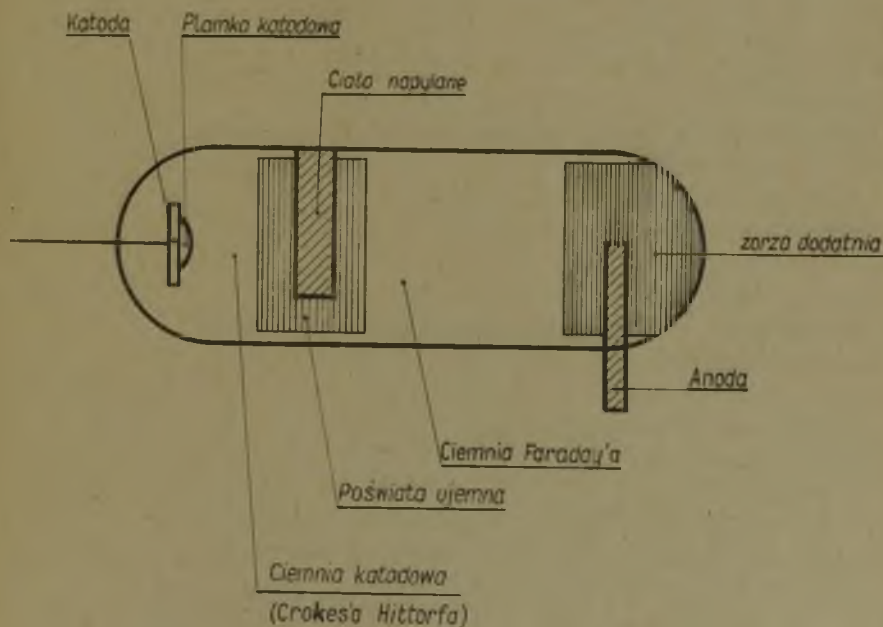
2. Napylenie katodowe metali w próżni

Wytwarzanie tego typu kondensatorów odbywa się albo metodą napylenia katodowego, albo metodą naporowywania w wysokiej próżni, na odpowiednio przygotowane podłoże, warstw metalicznych i warstwy dielektryka między nimi.

Poniżej zostanie omówiona metoda napylenia katodowego, natomiast metoda naporowania będzie omówiona w par.3.

Napylenie katodowe polega na nakładaniu okładzin metalu pochodzącego z katody rozpylanej w trakcie wyładowań elektrycznych w gazie rozrzedzonym. Napylenie katodowe może odbywać się albo przez dwustronne nałożenie na dielektryk elektrod kondensatora, albo przez nałożenie warstwy metalu jako pierwszej elektrody, następnie warstwy tlenku metalu jako dielektryka oraz znowu warstwy metalu jako drugiej elektrody.

Dla otrzymania odpowiednich warstw metalicznych czy też dielektrycznych, konieczne jest przeprowadzenie napylenia w tzw. wyładowaniach normalnych, podlegających prawu Helscha [11],[12]. Normalne wyładowania poznać po tym, że plamka



Rys.1. Schemat wyładowań w gazie rozrzedzonym, oraz ustawienia ciała napylanego, przy katodowym napyleniu

katodowa nie pokrywa całej powierzchni katody. Pod stałym ciśnieniem w danym gazie i dla katody o stałym kształcie i z danego materiału, katodowy spadek potencjału oraz gęstość prądu jonowego są wielkościami w przybliżeniu stałymi. Np. pod ciśnieniem 1 Tr. dla płaskiej katody, gęstość prądu jonowego jest rzędu 100 mA/cm^2 .

Katodowy spadek potencjału oraz gęstość prądu jonowego są mniejsze dla wykładowań w gazach szlachetnych i dla katod zrobionych z metali o małej masie atomowej, natomiast są tym większe czym bardziej elektro-ujemnym jest gaz, oraz czym większa jest masa atomowa metalu katody.

Dla uzyskania maksimum wydajności jak i warstw metalicznych najlepszej jakości, zalecane są przy napyłaniu następujące parametry, które w każdym przypadku należy eksperymentalnie dokładnie ustalić [11]:

Napięcie zasilające wykładowania stałe o wartości 1-3 kV
Ciśnienie 0,5 - 0,01 Tr

Odległość przedmiotu napylanego od powierzchni katody 10 - 50 mm przy czym przedmiot należy ustawić równolegle do powierzchni katody. Długość cienia Crookesa (katodowej) od połowy odległości między katodą a ciałem napyłanym, do pełnej odległości między nimi. Pobór mocy dla wykładowań, nie większy niż $0,3 \text{ W/cm}^2$ powierzchni katody.

Rozpylenie katody zależy od wielkości katodowego spadku potencjału, od gęstości prądu jonowego, od wielkości powierzchni katody i jej kształtu oraz od masy atomowej gazu w którym zachodzi wykładowanie elektryczne. Dlatego rozpylenie katody będzie tym większe czym cięższy i mniej szlachetny gaz będzie wypełniał aparaturę. Rozpylanie katody zachodzące w atmosferze takich gazów jak tlen, azot, chlor, w niskiej próżni, która jest potrzebna aby wykładowania w ogóle zachodziły, prowadzi do powstawania trwałych tlenków, azotków, czy chlorków z jonów gazów i jonów rozpylonego metalu katody. Łączenie się w związki chemiczne zachodzi przy, lub w katodzie, tak że na ciele napyłanym będą się osadzały wspomniane związki chemiczne a nie czyste metale. Dlatego jeżeli chcemy napyłać czystymi metalami, musimy to robić w atmosferze gazów szlachetnych. Badania eksperymentalne wykazały, że w obecności argonu zachodzi najszybsze w stosunku do innych gazów szlachetnych, rozpylanie katody [12]

Przy wykładowaniach anomalnych, tzn. takich których gęstość prądu jonowego oraz katodowy spadek potencjału zależą od przyłożonego napięcia, można łatwo stracić kontrolę nad wykładowaniem a to z kolei prowadzi do bardzo szybkiego nagrzania i rozpylenia katody bez równoczesnego osadzenia się

trwałej i jednolitej warstwy na ciele napyłanym. Wykładowania anomalne poznajemy po tym, że plamka katodowa pokrywa całą powierzchnię katody.

Rozpylanie katody jest dwojakiego rodzaju, chemiczne i termiczne. Dodatkowo jony gazu o dużej energii, bombardując katodę, mogą do niej wnikać jonizując w katodzie atomy metalu i wiązać się z tymi jonami w lotne związki bardziej lub mniej trwałe w zależności od rodzaju gazu. Dla gazów szlachetnych te lotne "związki" powstające w minimalnej ilości, rozpadają się już w poświacie ujemnej, dając tam wolne atomy metalu mogące się osadzać na zimnych obiektach. Jest to rozpylanie chemiczne.

Rozpylanie termiczne polega na oddawaniu katodzie, energii niesionej przez dodatnie jony gazu, Dzięki temu może nastąpić punktowe ogrzanie katody i wyparowanie z tego punktu atomów metalu. Duże przewodnictwo cieplne katody, jak i energia pobrana na wyparowanie atomów metalu, prowadzą do szybkiego zakończenia procesu parowania w danym punkcie, pod warunkiem że mamy do czynienia z normalnym wykładowaniem elektrycznym.

Dodatkowym czynnikiem mającym wpływ na wydajność procesu napyłania jest zjawisko dyfuzji zwrotnej. Polega ona na powracaniu do katody wyrzuconych z niej jonów metali. Zjawisko to ma większe znaczenie dla katod z płaskich i zimnych blach anodowych dla katod lekko ogrzanych i zrobionych z zwiniętych drutów. Proces dyfuzji zwrotnej można w ten sposób obniżyć z 90% do 10%. [11] [12] Tłumaczy się to zjawisko tym, że w przypadku podgrzania katody praca wyjścia jonów jest mniejsza a więc udzielana im przez jony gazu energia daje większą prędkość jonów metalu. Natomiast wykonanie katody z drutu rzadko związanego zmniejsza prawdopodobieństwo trafienia powracającego jonu w katodę.

Przeciętna wydajność napyłania katodowego waha się od 29 mg/Ah dla czystego aluminium do 740 mg/Ah dla czystego srebra, która jak łatwo wyliczyć, dla zalecanych przy napyłaniu gęstości prądu jonowego jest bardzo mała (11).

Powierzchnie napyłane są mniej lite od powierzchni naporowanych w wysokiej próżni (4). To też z powodu małej wydajności, złej jakości powierzchni, konieczności stosowania atmosfery z gazów szlachetnych, jak i konieczności doboru dla każdego przypadku wspomnianych już parametrów, napyłanie katodowe stosuje się tylko tam, gdzie nie można odparowywać metali, czy to z powodu wysokiej temperatury topnienia danego metalu np. tantal, platyna, czy też gdy roztopiony metal tworzy stopy z metalem grzejnika szybko go rozpuszcza i

niszczy. Tak zachowuje się np. nikiel na wolfranie. W przypadku jednak takich metali jak srebro, aluminium, wydajność metody naporowywania jest ok. 50 razy większa od metody napyłania.

Kondensatory o dużej pojemności właściwej wykonuje się drogą napyłania katodowego, np. jako kondensatory tantalowo aluminiumowe (5).

Podłoże, którym może być np. obwód mikrominiaturowy, napyła się w atmosferze argonu przez maskownicę warstwą tantalalu, tworząc w ten sposób jedną z elektrod kondensatora. Następnie zmieniając atmosferę argonu na tlenową, otrzymuje się przy dalszych wykładowaniach cienką warstwę tlenku tantalalu na powierzchni tantalalu. Warstwa tlenku tantalalu, jest dielektrykiem o stałej dielektrycznej $\epsilon = 25$. Na to naporowuje się drugą elektrodę z aluminium lub złota.

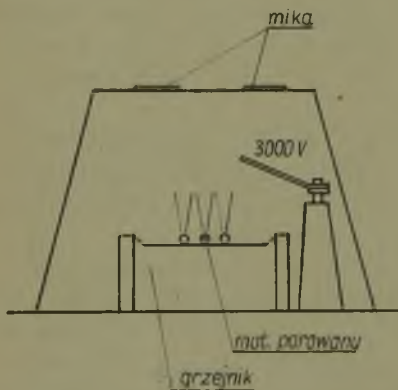
Tak wykonany kondensator posiada pojemność rzędu $1 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ a napięcie przebicia rzędu $5 \cdot 10^5 \text{V}/\text{cm}$. Napięcie pracy takiego kondensatora nie przekracza na ogół 50 V, ze względu na grubość dielektryka.

3. Naporowywanie metali w próżni

Proces naporowywania polega na odparowaniu w próżni lepsej od 10^{-3} Tr metalu, na przygotowane podłoże.

W trakcie naporowywania napotyka się na ciekawe zjawiska, które zostaną tu pokrótce omówione.

Odparowanie następuje przez nagrzanie metalu lub dielektryka, który chcemy odparować, do temperatury wrzenia, a następnie przez dalsze doprowadzanie ciepła do odparowania materiału. Cały proces odparowania musi odbywać się przy pracujących bez przerwy pompach próżniowych, ponieważ pary parującego materiału psują próżnię. Proces odparowywania jest procesem szybkim w stosunku do napyłania. Na przykład pokrycie warstwą srebra grubości jednego mikrona powierzchni 600cm^2 związane



Rys.2. Schemat urządzenia do procesu próżniowego naporowywania

jest z odparowaniem 2-ch gramów srebra. Czas potrzebny na odparowanie wynosi 5 minut przy poborze energii równej 0,04 kWh (na samo odparowanie). Dużo dłuższym jest czas potrzebny na uzyskanie odpowiedniej próżni, jednak współcześnie produkowane pompy dyfuzyjne, dużej wydajności, potrafią skrócić odpompowanie aparatury o pojemności roboczej 100 l do 20 minut przy ciśnieniu końcowym mniejszym od 10^{-4} Tr. Samo odparowanie następuje z tygli, żódek lub drutów, które są nagrzewane albo drogą przewodnictwa elektrycznego, albo prądami indukcyjnymi. Najbardziej przyjęło się odparowanie z drutów lub żódek, nagrzewanych prądem 50-200A przy napięciu 3 - 6 V. Jako grzejników używa się trudno topliwych metali jak wolfram, tantal, molibden, z których można odparować prawie wszystkie inne metale.

W celu uzyskania dobrego parowania jak i czystych warstw osadzonych, dobieramy odpowiedni metal grzejnika dla danego materiału odparowanego.

Najważniejszymi zjawiskami, na które należy przy odparowaniu zwrócić uwagę są: [11]

- 1) zdolność przylepiania metalu odparowywanego do grzejnika,
- 2) zdolność do tworzenia stopów między metalem odparowywanym a grzejnikiem,
- 3) szybkość parowania,
- 4) stosunek prężności par metalu grzejnika, do prężności par metalu odparowywanego w danej temperaturze i pod danym ciśnieniem.

ad 1) Od przylepności metalu odparowywanego do grzejnika zależy kształt grzejnika. Np. nikiel, żelazo lub aluminium można odparowywać z drutów lub spiral, bowiem w stanie płynnym lepią się one do grzejników. Do parowania srebra, złota cynku i innych używa się żódek gdyż te metale nie wykazują przylepności.

ad 2) Powstające stopy pomiędzy metalem odparowywanym a grzejnikiem prowadzą do szybkiego zniszczenia grzejnika, tym szybszego czym z cieńszego jest on zrobiony materiału i czym wyższa jest temperatura topnienia odparowywanego metalu, Prowadzi to równocześnie do zanieczyszczenia warstw nakładanych, gdzie zamiast czystego metalu osadza się mieszanina metali.

ad 3) Szybkość parowania zależy nie tylko od doprowadzonej energii cieplnej, ale i od rodzaju parującego ciała. Np. w przypadku cynku lub kadmu zwiększanie doprowadzonej energii nie przyspiesza parowania lecz powoduje podskakiwanie cynku na grzejniku. Energia doprowadzana jest do podskakującej kulki metalu skokami i w efekcie szybkość parowania maleje. Tego zjawiska nie zauważa się przy odparowywaniu srebra. Zjawisko podskakiwania metalu na grzejniku o temperaturze dużo wyższej od temperatury wrzenia metalu znane jako zjawisko Leidenfrost, spotykane na przykład przy zachowaniu się kropli wody na rozgrzanej płycie kuchennej.

ad 4) Stosunek prężności par ma wpływ na czystość osadzonej na dielektryku warstwy metalu. Np. prężność par srebra w temperaturze jego intensywnej parowania 960°C wynosi 10^{-2} Tr. Prężność par molibdenu, używanego jako grzejnika, jest w tej temperaturze 10^{-8} Tr. Pary molibdenu praktycznie nie mają wpływu na czystość warstwy srebra.

Czynnikami który należy uwzględnić przy kondensacji metali na podłożu to rodzaj podłoża, jego kształt i czystość. Na jakość powierzchni nałożonego na podłożu metalu, mają wpływ: temperatury podłoża, szybkość parowania, odległość podłoża od grzejnika.

Szybkość osadzania się par metalu na podłożu, zwana szybkością kondensacji, zależy od temperatury podłoża i jest tym większa czym niższa jest ta temperatura [4][5]. Wg teorii Frenkla (1921) popartej badaniami Dichtburna (1932), a następnie Pounda (1954), atom metalu padający na podłoże nie przykleja się do niego, lecz wykonuje na podłożu ruch bezładny, analogiczny do 2-wymiarowego ruchu cząstek gazu. Czym wyższa będzie temperatura podłoża tym ruch atomu metalu na podłoże będzie szybszy. Powyżej pewnej temperatury podłoża, energia nadawana osadzającym się atomom metalu będzie tak duża, że w ogóle nie będą się one przylepiać do podłoża, lecz od niego odbijać. Ta temperatura zwana krytyczną jest jednym z ważnych parametrów, który wyznacza się empirycznie dla każdego osadzanego metalu. Np. dla srebra wynosi ona 575°C .

Poruszający się po podłożu atom metalu może w pewnej chwili spotkać się z drugim takim samym atomem. Wtedy łączą się one i tworzą dublet, którego ruchy są dużo powolniejsze aniżeli pojedynczego atomu. Łatwość połączenia się dubletu z trzecim wolnym atomem jest większa a powstały triplet daje już trwałe skupisko na powierzchni podłoża, będące załączkiem warstwy. Badania pod mikroskopem elektronowym wykazały, że rzeczywiście warstwy powstałe na

Wędrujący na podłożu atom, jeżeli nie spotka drugiego, odrywa się w końcu od podłoża. Stąd wniosek że aby szybkość osadzania była duża, musi padać na podłoże dużo atomów, w celu zwiększenia prawdopodobieństwa spotkań między nimi. Ilość atomów padających na jednostkę powierzchni w jednostce czasu nazywa się gęstością strumienia par.

Istnieje dla każdej temperatury krytycznej najmniejsza gęstość strumienia par zwana gęstością krytyczną, przy której kondensacja jeszcze zachodzi. Związek między gęstością krytyczną a temperaturą krytyczną podaje następujący wzór [5]

$$\gamma_k = 4 \sigma_0 \mathcal{F}_0 e^{\frac{U_0 + \Delta U}{kT_c}}$$

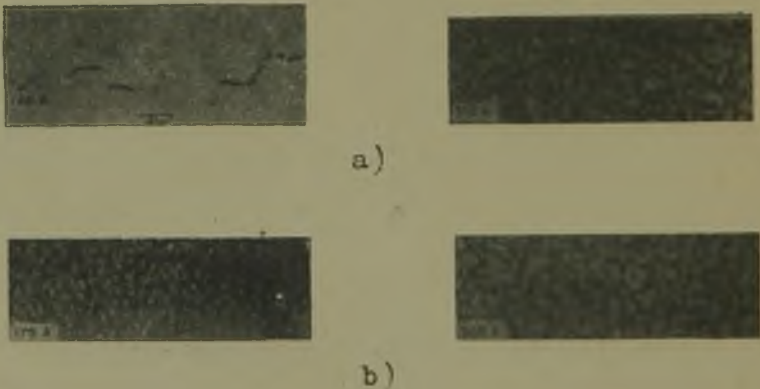
gdzie:

- γ_k - gęstość strumienia par
- σ_0 - efektywny przekrój atomu
- \mathcal{F}_0 - okres drgań osadzonego atomu
- U_0 - energia wiązania do podłoża przypadająca na 1 atom metalu
- ΔU - energia kohezji, przypadająca na jeden dublet
- k - stała Boltzmanna
- T_c - temperatura krytyczna

Poza tym istnieje dla każdej temperatury podłoża pewna gęstość strumienia par poniżej której kondensacja już nie zachodzi. Badania przy pomocy radioaktywnych atomów antymonu i kadmu dały dla podłoża o temperaturze 27°C gęstość krytyczną $3,5 \cdot 10^{15}$ atom, cm^{-2} sek.⁻¹. Dla srebra ta gęstość jest mniejsza i wynosi w temperaturze 192°C $3 \cdot 10^{11}$ atom . cm^{-2} sek.⁻¹. [5] Ta sama gęstość par aluminium wystarczy do kondensacji przy temperaturze podłoża 560°C. Energia wiązania metalu do podłoża zależy od rodzaju podłoża i jest największa dla miki. Naturalnie zwiększenie gęstości strumienia par przy stałej odległości między źródłem a podłożem, uzyskujemy zwiększając szybkość parowania. Zwiększenie szybkości parowania ma również istotny wpływ na jakość osadzonej powierzchni.

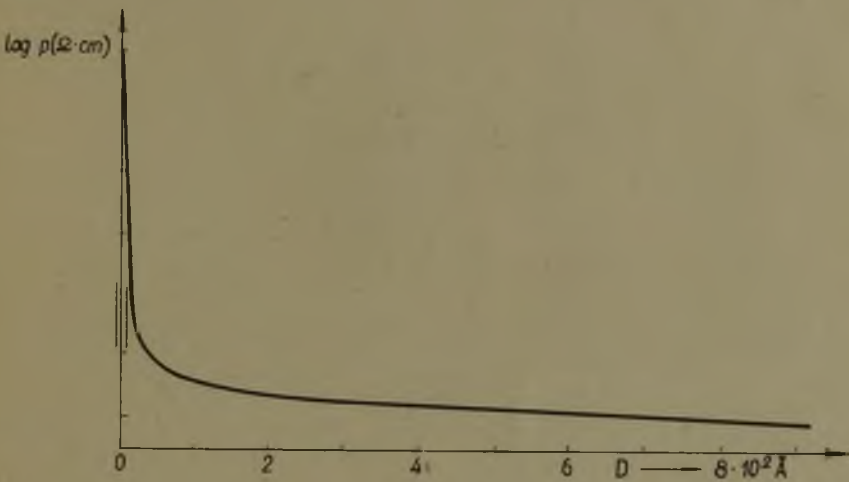


Rys.3. Zdjęcie pod mikroskopem elektronowym warstw złota grubości 20 Å, 100 Å, 150 Å, otrzymanych po 2 sek. odparowania. Powiększenie 75000 x (5)



Rys.4. a) Zdjęcie pod mikroskopem elektronowym warstw srebra o grubościach 180 Å i 110 Å otrzymanych po 2 sek. odparowania (70000 x) - b) Zdjęcie warstw srebra grubości 175 Å i 300 Å, otrzymanych po 20 min. parowania (70000 x) (9). Należy zwrócić uwagę na analogiczną skupiskowość 110 Å z "a" i 300 Å z "b"

Własności elektryczne warstw srebra na rysunku 4 są różne. Pomiary prowadzone przez Senneta i Oppenhejma, [7][9] oraz przez Mayera [6] dla metali alkalicznych, wykazały, że oporność właściwa warstw o dużej ilości małych skupisk jest większa aniżeli dla warstw mniej skupiskowych. Dla danej szybkości parowania wielkość i ilość skupisk zależy od grubości warstwa, przy czym istnieje dla każdego metalu i każdej warstwy taka grubość krytyczna poniżej której oporność właściwa warstwy metalu jest nieskończenie duża, na przykład dla srebra 60 \AA [7]. W celu otrzymania warstwy metalu o własnościach zbliżonych do materiału litego należy prowadzić szybkie parowanie i nakładać warstwy dostatecznie grube. Praktycznie przyjmuje się, że warstwy powyżej 1000 \AA są dostatecznie ciągłe.



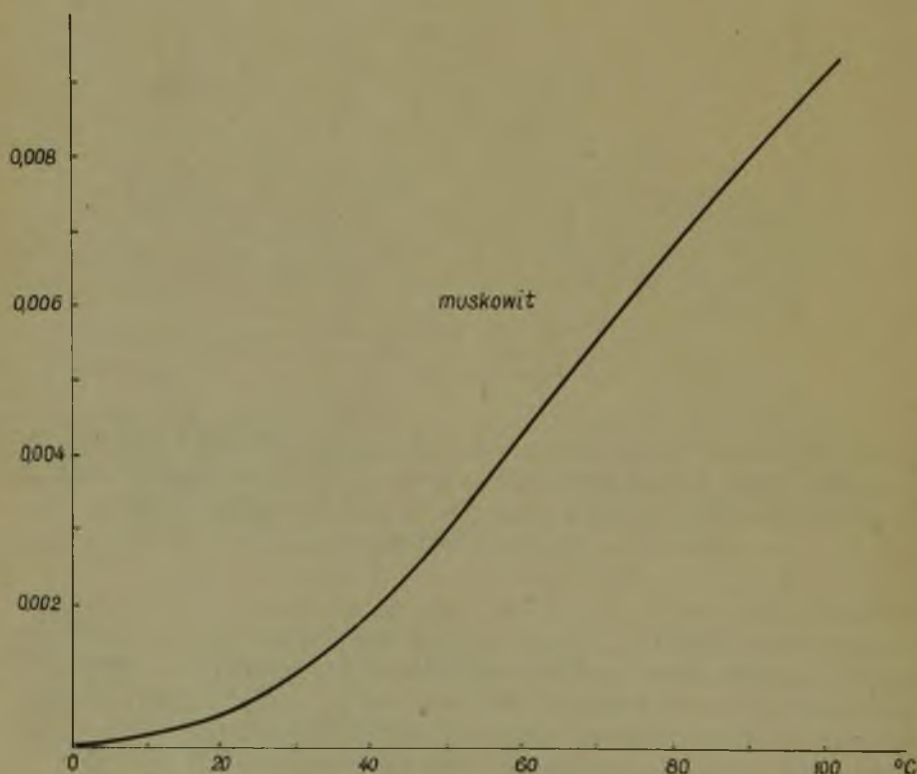
Rys.5. Zależność oporności właściwej od grubości warstw metalicznych. Dla wszystkich metali tę zależność przedstawiają krzywe o podobnym kształcie, tylko przeginając się bliżej lub dalej osi rzędnych (2), (6), (9)

Wprawdzie badania Mayera [6] dowiodły, że dużo cieńsze warstwy odpowiednio naporowanych metali mogą mieć własności elektryczne identyczne, co metale lite, jednak warstwy te otrzymywał on w bardzo wysokich próżniach rzędu 10^{-10} Tr. Wytworzenie takiej próżni w warunkach krajowych na skalę półtechniczną jest na razie niemożliwe.

Strumień par metalu rozchodzi się po liniach prostych od źródła par, stąd aby otrzymać warstwę metalu o jednakowej grubości należy ustawić podłoże dostatecznie daleko od źródła par.

4. Wytwarzanie kondensatorów mikowych

W warunkach krajowych do wzorców pojemności najlepiej nadaje się mika. Mika posiada w stosunku do dielektryków organicznych dużą wytrzymałość mechaniczną i dielektryczną, dzieli się na płatki prawie że idealnie równoległe o możliwości istnienia schodków rzędu kilku \AA (1). Mika wykazuje również bardzo dużą przylepność do siebie i ciał drugich, dużo większą od przylepności poliestrów, czy papieru: (1) (5)



Rys.6. Zależność kąta stratności od temperatury dla miki typu muskowit (13)

Najlepszym gatunkiem miki do produkcji wzorców jest mika "Muskowit" typu książkowego, gatunek ekstra, która jest segregowana z dokładnością $\pm 5\mu$, jest przezroczysta, bez rys, baniek powietrza i plam mineralnych. Jednak kondensatory mikowe stosuje się jako wzorce pojemności tylko dla częstotliwości akustycznych od 100 Hz począwszy, ponieważ mika posiada rosnące $tg\delta$ dla częstotliwości technicznych i mniejszych, Równocześnie i dla częstotliwości powyżej 50 kHz $tg\delta$ miki rośnie. W tym zakresie stosuje się na wzorce kondensatory z dielektrykiem ceramicznym. Zakres temperatur w którym mika może być używana do wzorców jest nie wielki i raczej kondensatory mikowe stosuje się od $-30^{\circ}C$ do $+40^{\circ}C$. $Tg\delta$ i wytrzymałość dielektryczna w czystej miece nie zależy od grubości [10]. Zasadniczy wpływ na zmiany $tg\delta$ i wytrzymałość dielektryczną posiadają bańki powietrza i plamy mineralne. Bańka powietrza tworzy wraz z miką kondensator uwarstwiony o nierównomiernym rozkładzie natężeń pola, co może spowodować przebicie dielektryka w tym miejscu. Równocześnie powietrze zwiększa półtora razy stratność miki. Plamy wpływają na 20%-owe zwiększenie stratności oraz na zmniejszenie wytrzymałości dielektrycznej miki [10]

Tabela własności miki czystej typu muskowit:

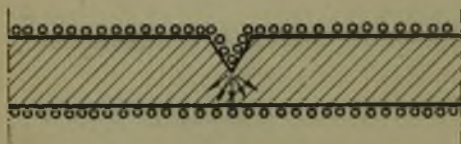
| | |
|--|---|
| Energia wiązania ze srebrem | - 20 Kcal/mol |
| Oporność właściwa | - 10^{15} - 10^{17} om cm |
| Wytrzymałość dielektryczna | - $7 \cdot 10^2$ - $2 \cdot 10^3$ kV/cm |
| Stała dielektryczna | - 6,5 - 8 |
| $tg\delta$ dla częstotliwości akustycznych | - $5 \cdot 10^{-5}$ |

Oprócz naparowywania na mikę stosuje się jeszcze kondensatory papierowe naparowane cynkiem. Należą one do grupy ze stałym dielektrykiem organicznym i stosuje się je szczególnie do prądów stałych i częstotliwości technicznych. Mała przylepność cynku do podłoża daje gorszą jakość kondensatorów pod względem mechanicznym [11] [13].

Warstwa nakładanego metalu metodą naparowania, przylega szczelnie do podłoża i w przypadku istnienia rys, wypełnia je. W przypadku przyłożenia napięcia, w rysie pojawia się działanie ostrza a to może spowodować przebicie dielektryka.

Innym ujemnym zjawiskiem jest wnikanie metalu w głąb dielektryka. Wnikanie to zachodzi po przyłożeniu napięcia. Jony metalu wędrują wtedy w głąb dielektryka w kierunku elek-

trody o potencjale ujemnym i osadzają się w głębi dielektryka, zmniejszając wytrzymałość dielektryczną kondensatora.

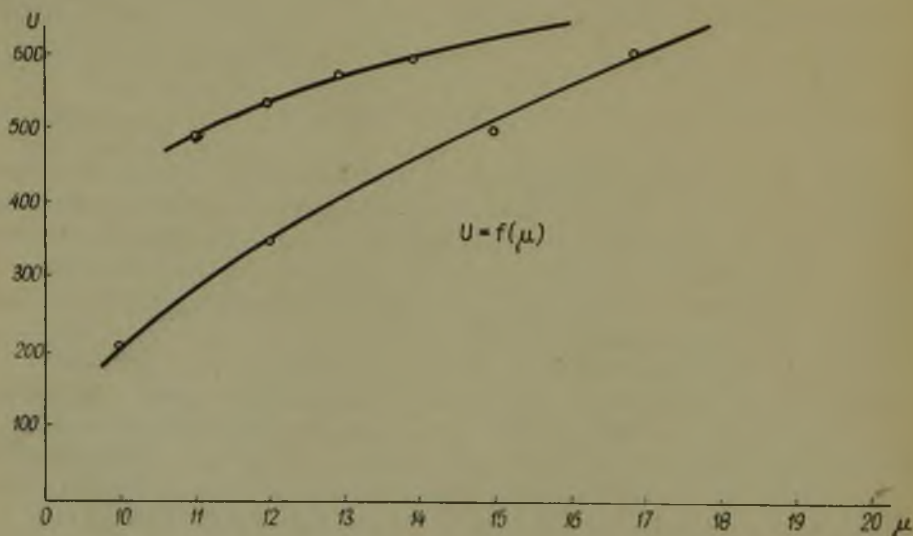


Rys.7. Powstawanie ostrza metalicznego w rysie dielektryka przy nakładaniu elektrod drogą naporowywania

Tę właściwość wnikania posiada szczególnie srebro jako metal ulegający anodowemu rozpuszczaniu. Wnikanie w dielektryk jest w zasadzie większe dla dielektryków organicznych. Wnikanie w mikę szczególnie czystą, wysuszoną jest utrudnione, ale srebro może wnikać w mikę w podwyższonej temperaturze lub zwiększonej wilgotności [13]

Dlatego kondensator po zmontowaniu należy wysuszyć i zalać parafiną lub masą plastyczną, oraz nie należy go używać w podwyższonej temperaturze.

Badania przeprowadzone przez autora nad napięciem przebicia dla miki o grubościach od 10μ naporowanych aluminium i srebrem dały dla aluminium większe napięcia przebicia aniżeli dla srebra, przy czym różnice napięć przebicia były tym większe czym grubość dielektryka mniejsza.

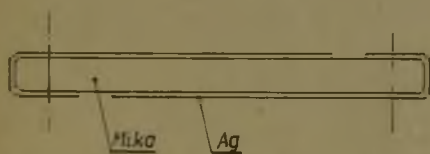


Rys.8. Wykres zależności napięcia przebicia od grubości dla kondensatorów z elektrodami aluminiowymi i srebrnymi naporowanymi w ...

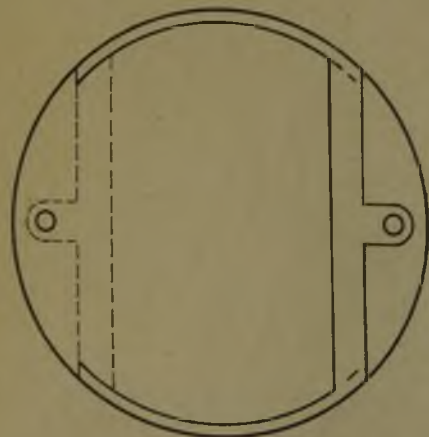
Ze względu na składanie, równoległą lub szeregowo, płytek kondensatorowych lepsze jest jednak pokrywanie miki srebrem, ponieważ tworząca się na aluminium, natychmiast po wyjęciu z aparatury próżniowej, warstwa tlenku aluminium pogarsza kontakt i zwiększa stratność kondensatorów. Również za srebrem przemawia łatwość odparowania dużych ilości srebra z łódek molibdenowych, gdy dla aluminium jest to niemożliwe ze względu na tworzenie przez ciekłe aluminium stopów o niskiej temp. topnienia z wolframem, molibdenem i tantalem.

Mikę przygotowuje się specjalnie oczyszczając ją chemicznie i jonowo.

Oczyszczanie chemiczne to płukanie miki w 25% roztworze amoniaku, w wodzie destylowanej i wygrzewanie w suszarce w 200°C przez 30 minut. Oczyszczanie jonowe odbywa się w aparaturze próżniowej pod ciśnieniem od 1 Tr do 10 m Tr, poprzez wyładowanie w gazach prądem zmiennym wysokiego napięcia (do 3 kV).



Rys.9. Wygląd kondensatora w przekroju



Rys.10. Wygląd kondensatora z góry

Rozchodzący się prostopadłościowo strumień par metalu ugina się na przeszkodach. Zjawisko to wykorzystano dla otrzymania kontaktów między płaszczyznami miki, aby można składać poszczególne kondensatory. Warstwy srebra nakłada się na mikę jak na rys.10 przy czym właśnie na krawędziach miki powstaje warstwa metalu wskutek ugięcia strumienia par srebra na tej krawędzi.

Kondensator jak na rys.11 posiada przy średniej grubości 18μ i powierzchni czynnej 19 cm^2 , a całkowitej powierzchni jednostronnej $34,5\text{ cm}^2$, średnią pojemność $8 \cdot 10^3\text{ pF}$. Badania przeprowadzone na próbnym kondensatorach złożonych z 230 takich płytek wykazały stałość $\frac{40}{100}$ w czasie 3 miesięcy rzędu 0,05%.

Próbowo poddano 3 kondensatory o pojemnościach $0,475 \mu\text{F}$, $0,483 \mu\text{F}$, $0,526 \mu\text{F}$.

Kondensatory te były badane w czasie 3-ich miesięcy, przy czym co tydzień mierzono ich pojemność. Pomiaru były wykonywane mostkiem Sulivana. Mostek zasilany był napięciem o częstotliwościach 1000 C/sec. Dla zwiększenia czułości zastosowano na wyjściu mostka wzmacniacz do którego podłączono słuchawki.

Pomiary kąta stratności przeprowadzone po 4-ach miesiącach od chwili wyprodukowania kondensatorów dały wartości w granicach: $1,5 \cdot 10^{-4}$ - $27 \cdot 10^{-4}$ dla 50 Hz.

Pomiary kąta stratności przeprowadzono na 100 kondensatorach o rozmaitych grubościach. Duża stosunkowo rozpiętość stratności wynika z różnych własności miki użytej na kondensatory.

Pomiary grubości warstw srebra nakładanych na mikę dały wartości od 1 - 5μ , w zależności od odległości maskownicy z miką względem grzejnika.

Pomiary oporności właściwej dla kilku próbek, metodą sondy 4-ro punktowej dały wartości w granicach $0,02 \text{ om} \cdot \text{cm}$ [3]

5. Wnioski

Kondensatory, o dużej pojemności właściwej, wykonuje się przez nakładanie pod próżnią metalicznych elektrod i cienkich warstw dielektryka między nimi. Kondensatory, o dużej stałości a bardzo małej stratności, wykonuje się, między innymi, przez nakładanie w próżni metalicznych elektrod na odpowiednio przygotowany dielektryk. Nakładanie elektrod odbywa się albo drogą naparowywania w wysokiej próżni albo drogą napyłania katodowego. Metoda naparowania jest lepsza jako wydajniejsza, mniej skomplikowana w czynnościach i dająca czystsze i bardziej lite warstwy. Napyłanie stosuje się tylko wtedy gdy nie można przeprowadzić odparowania danych metali. Nakładanie warstw metalicznych pod próżnią eliminuje szkodliwe warstwy powietrza pomiędzy dielektrykiem a elektrodami kondensatora.

W trakcie rozwiązywania technologii produkcji kondensatorów mikowych, drogą naparowania okładzin metalicznych w próżni stwierdzono, że na dielektryk nadaje się bardzo dobrze mika wysokiego gatunku, a kondensator z niej wykonany jest bardzo dobrym kondensatorem w zakresie częstotliwości akustycznych. Posiada on dużą stałość w czasie, a stratność

jego jest rzędu czystej miki. Na elektrody nadaje się najlepiej srebro, ponieważ odparowuje się je czystiej i łatwiej od aluminium oraz ponieważ aluminium tworzy na swojej powierzchni cieniutką dielektryczną warstwę tlenku, który utrudnia kontakt pomiędzy składanymi równolegle kondensatorami. Stwierdzono również, że napięcie przebicia kondensatora zależy od rodzaju metalu, użytego na okładziny. Jest to wynik różnego wynikania atomów parującego metalu w podłoże. Badania przeprowadzone na kondensatorach mikowo-srebrnych i mikowo-aluminiowych dały duże różnice napięć przebicia, szczególnie przy cienkich warstwach dielektryka.

Stałość w czasie kondensatorów mikowo-srebrnych była rzędu 0,05%, stratność $(1-25) 10^{-4}$, napięcie przebicia 30 - 60 kV/mm. Pomiaru oporności właściwej metodą sondy czteropunktowej wykazały, że jakość warstw srebra pod względem elektrycznym jest podobna do metalu litego.

Na zakończenie pragnę podziękować Doc. inż. E. Romerowi i Mgr inż. J. Weichcełgowskiemu za cenne wskazówki praktyczne i teoretyczne, które umożliwiły mi zakończyć pracę.

LITERATURA

Czasopisma

- [1] A.L. B a i l e y: Friction and Adhesion of Clean and Contaminated Mica Surfaces. Jour. Appl. Phys. Nr 8 str.1407. 1961
- [2] St. D e m b i c k a - J e l l o n k o w a, J. K o s s e n d i a k: "Oporność cienkich warstw srebra" - Elektryk z 1 Wrocław 1954 str.72.
- [3] St. D e m b i c k a - J e l l o n k o w a: "Metoda sondy 4-punktowej w zastosowaniu do pomiaru oporności cienkich warstw" - Z.Nauk.Pol.Nr. Nr 44 r.1960.
- [4] C.E. E l l s, G.D. S c o t t: "The Structure of Sputtered silver films" Jour.Appl.Phys. t.23, z.1 str.31.
- [5] K.M. G r e e n l a n d: "Some aspects of research of thin solid films" Jour.Scient.Instr. t.38, nr 1 str.1 1961
- [6] H. M e y e r: Symp. on structure and properties of thin films (1959) by C.A.Neugebauer i inni.

- [7] U. O p p e n h e i n: "Resistivity of thin films"
Jour Appl. Phys. t.24, z.12. str.1521.
- [8] W. S c h i c k: "Capacitance stability of Ruby Muscovit
Mica. J.I.E.E. t.94 P.1. nr 80 str.371 (1957).
- [9] R.S. S e n n e t, G.D. S c o t t: "The structure of
evaporated Metal films and their Optical properties"
Jour Opt.Soc.Am. t.40 z.4 str.203.
- [10] K. W o d o p i a n o w: "Dielektrickieskije swoitswa
sliudy" Elektricestwo z.11 (1950 r.).

Podreczniki

- [11] M ö n c h: "Neues und Bewährtes Hochvakumtechnik"
- [12] F.M. P e n n i n g: "Electrical Discharges in gases"
- [13] W.T. R e n n e: "Elektrickieskije kondensatory"

СПОСОБЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНДЕНСАТОРОВ МЕТОДОМ КАТОДНОГО РАСПЫЛЕНИЯ А ТАКЖЕ СЛЮДЯНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ МЕТОДОМ ВАКУУМНОГО НАПАРЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

Накладывая в вакууме слои металла на диэлектрик или слои металла и между ними слои диэлектрика получаем конденсаторы с большой емкостью на единицу поверхности, или с большим постоянством, очень малым коэффициентом потерь и пробивным напряжением того же ряда, как диэлектрическая прочность диэлектрика. Накладывание металлических пластин происходит при катодном распылении или при испарении в высоком вакууме.

Конденсаторы, изготовленные методом катодного распыления посредством накладывания очередного слоя металла и слоя диэлектрика могут иметь при напряжении 50 в емкость до $1 \mu\text{F}/\text{cm}^2$.

Применять этот метод нельзя только тогда, когда температура плавления выпариваемых металлов очень высокая по отношению к температуре плавления нагревателя, или когда выпариваемый металл образует прочные эвтектические сплавы с металлом нагревателя. Вследствие того, что напарение происходит в вакууме по меньшей мере в 2 ряда больше вакуума при напылении, полученные напарением металлические поверхности являются более надежными. Конденсаторами малых размеров, большого постоянства и очень малого коэффициента потерь являются конденсаторы, изготовленные при помощи напарения на слюду металлических электродов с серебра или алюминия.

Накладываемые слои серебра имеют такие же самые электрические свойства, как и литой металл. Получаем это вследствие быстрого накладывания достаточно толстых слоев.

LES MOYENS DE PRODUCTION DES CONDENSATEURS AU MICA AVEC LA MÉTHODE DE L'ÉVAPORATION À VIDE DES MÉTAUX

En mettant sous le vide les couches du métal sur le diélectrique, ou bien les couches du métal et celles du diélectrique successivement, on obtient des condensateurs dont les caractéristiques sont les suivantes:

1) Les condensateurs à grande capacité par l'unité de surface.

2) Les condensateurs à grande stabilité, très petit coefficient des pertes et à tension de claquage de même ordre que la rigidité diélectrique du diélectrique.

Les condensateurs exécutés selon ce procédé ne possédant pas de couches nuisibles, ni de bulles d'air.

La superposition des plaques métalliques on fait par la désagrégation de la cathode ou par l'évaporation du métal dans le vide élevé.

Les condensateurs faits d'après la méthode de la désagrégation de la cathode par la superposition successive de la couche du métal, celle du diélectrique et encore une fois celle du métal, peuvent avoir, la capacité jusqu'à $1 \mu \text{ F/cm}^2$.

La méthode de l'évaporation est d'un plus grand rendement, elle est la plus simple et donne les condensateurs de très grande qualité.

Les condensateurs faits par l'évaporation, sur le mica, des électrodes métalliques en argent ou en aluminium, ce sont ceux de petites dimensions, de grande stabilité et de très petit coefficient de perte.

Les couches superposées de l'argent possèdent les caractéristiques électriques les mêmes que le métal massif. On l'obtient par la superposition rapide des couches suffisamment épaisses.