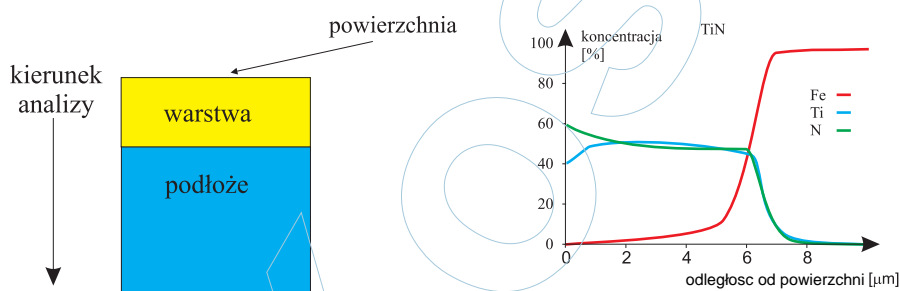


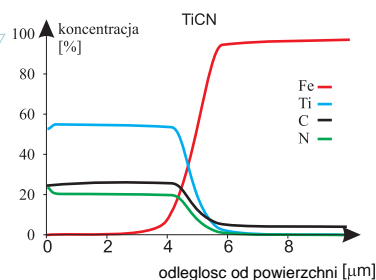
3. Niektóre metody badań właściwości warstw TiN

3.1. Badanie profilu składu chemicznego warstw metodami Spektroskopii Elektronów Auger'a oraz Optycznej Spektroskopii Emisyjnej Wyładowania Jarzeniowego.

Połączenie metod pozwalających na analizę składu chemicznego powierzchni ciała stałego z technikami sukcesywnego strawiania (rozpylania) tej powierzchni umożliwia uzyskanie informacji o zmianach składu chemicznego warstw poczynając od jej powierzchni, w głąb, aż do podłoża. Badania tego rodzaju nazywamy analizą profilową składu chemicznego warstw. Idea analizy profilowej przedstawiona jest na rysunku 1.70.



Rys. 1.70. Idea analizy profilowej składu chemicznego warstw oraz przykładowe profilogramy dla warstw TiN oraz TiCN naniesionych na żelazo; analizę wykonano metodą GDOS (objaśnienie skrótu -patrz dalej).



Istnieje wiele metod, natury fizycznej, stosowanych obecnie do analizy składu chemicznego powierzchni ciała stałego. Mają one charakter spektroskopowy. Przyjęto uznawać skróty, utworzone przez pierwsze litery wyrazów, w języku angielskim, określających dane metody za akronimy, czyli ich nazwy.

Wymieńmy kilka z tych metod:

- AES - Auger Electron Spectroscopy - spektroskopia elektronów Auger'a,
- SIMS - Secondary Ion Mass Spectroscopy - spektroskopia masowa jonów wtórnych,
- SNMS - Secondary Neutrals Mass Spectroscopy - spektroskopia masowa zobojętnionych jonów wtórnych,
- ESCA - Electron Spectroscopy for Chemical Analysis - spektroskopia elektronowa dla celów analizy chemicznej. Metoda ta ma dwa warianty, zależnie od energii fotonów pobudzających próbkę; mamy więc:
 - UPS - Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy - spektroskopia fotoelektronów wzbudzanych promieniowaniem ultrafioletowym,
 - XPS - X-ray Photoelectron Spectroscopy - spektroskopia fotoelektronów wzbudzanych promieniowaniem rentgenowskim,
- RBS - Rutherford Back Scattering - spektroskopia jonów rozpraszanych w geometrii Rutherforda,
- GDOES - Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy - optyczna spektroskopia emisyjna wyładowania jarzeniowego (niekiedy stosowana jest nazwa: GDOS - Glow Discharge Optical Spectroscopy - spektroskopia optyczna wyładowania jarzeniowego),
- GDMS - Glow Discharge Mass Spectroscopy - spektroskopia masowa wyładowania jarzeniowego.

Wszystkie z wymienionych metod (oprócz GDOS) pozwalają na analizę próbek na głębokość kilku do kilkudziesięciu Ångströmów, tj. kilku do kilkunastu stałych sieci. Chcąc dokonać analizy profilowej należy sukcesywnie usuwać przeanalizowane już warstwy poprzez rozpylanie, zwykle przy pomocy działa jonowego.

Ogólna idea wszystkich metod jest taka sama, niezależnie od wykorzystanych do celów analizy zjawisk fizycznych. Powierzchnia próbki poddawana jest działaniu strumienia cząstek (elektronów, jonów, fotonów) o określonych parametrach (energia, natężenie), a analizie i detekcji podlegają cząstki wyzwolane z powierzchni (jony, elektrony, fotony). W rezultacie otrzymuje się zapis natężenia emitowanych z powierzchni cząstek w funkcji energii, masy lub częstotliwości, czyli ich widmo (inaczej spektrum). Stąd określenie ich nazw - spektroskopowe.

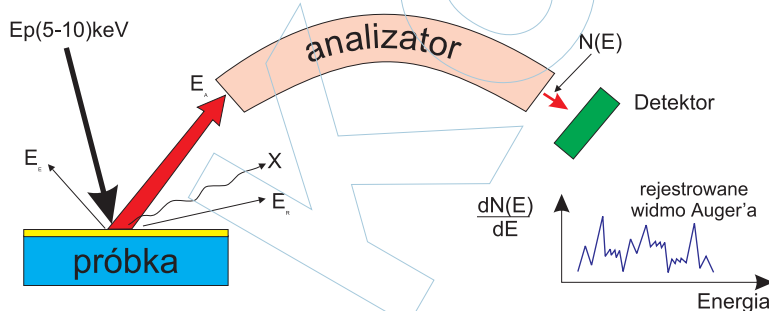
Inną wspólną cechą dla metod analizy powierzchni jest wykorzystywanie wysokiej jakości systemów próżniowych w zakresie ultrawysokiej wysokiej próżni oraz wyrafinowanych elementów techniki i miernictwa próżniowego.

Auger Pierre Victor ur. 1899 fizyk francuski, prof. Sorbony, i dyr. Dept. Nauk. Przyrodniczych UNESCO; prace z fizyki atomowej i promieniowania kosmicznego. Zjawisko Auger'a - bezradiacyjny sposób przejścia atomu ze wzbudzonego stanu elektronowego do stanu o niższej energii połączony z emisją elektronów (tzw. elektronów Auger'a z zewnętrznej Powłoki elektronowej)

Dalej zostanie omówiona jedna z wymienionych wyżej metod, mianowicie GDOS. Jednak dla zilustrowania różnorodności zjawisk fizycznych wykorzystywanych w

analizie profilowej omówmy najpierw pokrótce najpopularniejszą chyba z nich tj. Spektroskopię Elektronów Auger'a.

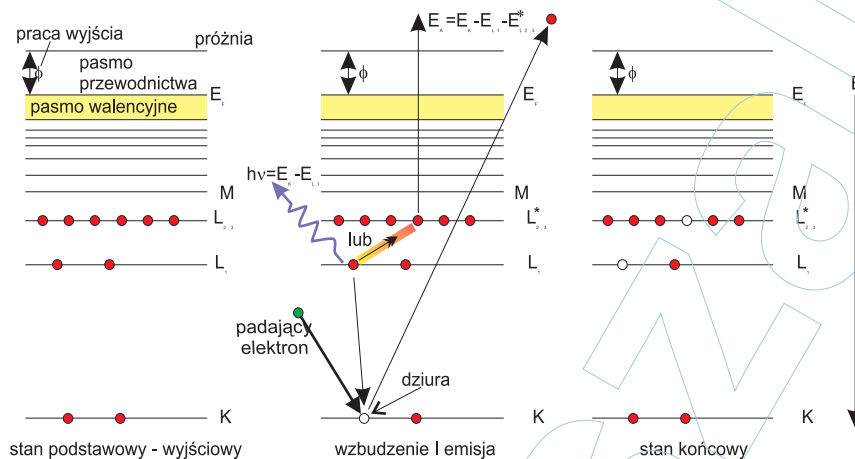
Schemat ideowy metody AES przedstawiony jest na rysunku 1.71. Na powierzchnię próbki pada wiązka elektronów E_p o dużej energii, 5 - 10 keV, znacznie przewyższającej energię jonizacji atomów próbki z podstawowego poziomu energetycznego K. W wyniku oddziaływania padającej wiązki elektronów z powierzchnią próbki następuje rozpraszanie padających elektronów E_R , wyemitowane zostają wybite z poziomów wewnętrznych atomów elektrony E_E , wypromieniowana jest fala elektromagnetyczna w zakresie rentgenowskim X oraz emitowane są elektrony o charakterystycznym widmie energetycznym, zwane elektronami Auger'a.



Rys. 1.71. Schemat ideowy metody AES

- E_p - wiązka elektronów jonizujących,
- E_E - elektrony wybite z próbki w wyniku jonizacji,
- E_R - elektrony rozproszone,
- E_A - elektrony Auger'a,

Wyjaśnijmy mechanizm emisji elektronów Auger'a, wykorzystując w tym celu uproszczony, schematyczny wykres struktury energetycznej elektronów w ciele stałym, ściślej w metalu. Przedstawia go rysunek 1.72.



Rys. 1.72. Schematyczny wykres pasmowej struktury energetycznej metalu ilustrujący mechanizm generacji elektronów Auger'a (w AES przyjmuje się zwyczajowo zero energii na poziomie Fermiego).

Po lewej stronie pokazany jest stan podstawowy układu. Na rysunku środkowym padający elektron o energii $E_p \gg E_K$ wybija elektron z poziomu K (jonizacja) wytwarzając na nim dziurę. Dziura ta zapełniana jest przez elektron rekombinujący z poziomu L_1 . Wyzwalana jest przy tym energia $\Delta E = E_K - E_{L_1}$, która może zostać uwolniona poprzez emisję fotonu o częstotliwości:

$$\nu = \frac{1}{h}(E_K - E_{L_1})$$

lub też zostać przekazana bezpromieniście innemu elektronowi na tym samym poziomie energetycznym (lub poziomie bardziej płytkim) powodując jego emisję.

Pierwszy z procesów nazywany jest fluorescencją rentgenowską i wiąże się z tzw. charakterystycznym promieniowaniem rentgenowskim, drugi zaś jest procesem emisji elektronu Auger'a.

W przykładzie na rysunku nadmiar energii został przekazany elektronowi na poziomie $L_{2,3}$, a zatem wyemitowany elektron Augera ma energię:

$$E_A = E_{KL_1L_{2,3}} = E_K - E_{L_1} - E_{L_{2,3}}^*$$

Gwoli ścisłości należy wyjaśnić pewną nie-konsekwencję oznaczeń na rysunku 4.3. Jeśli rysunek ten ilustruje strukturę energetyczną elektronów w metalu, to zbędne jest wydzielanie pasma walencyjnego. Z teorii elektronów swobodnych wiadomo bowiem, że w metalach puste pasmo przewodnictwa przekrywa się z pasmem elektronów walencyjnych tworząc kontinuum. W spektroskopii wydziela się to pasmo pragnąc podkreślić, że chodzi o elektrony biorące udział w wiązaniach chemicznych - elektrony walencyjne. Można, idąc na pewnego rodzaju kompromis, powiedzieć, że rysunek 4.3. przedstawia sytuację dla temperatury równej 0°K , w której elektrony swobodne zajmują wszystkie poziomy energetyczne do poziomu Fermiego.

ENERGIA FERMIEGO E_F - najwyższa wartość energii elektronów swobodnych w metalu w temperaturze zera bezwzględnej, lub też, dla $T > 0^\circ\text{K}$, taki poziom energetyczny w paśmie przewodnictwa, którego prawdopodobieństwo obsadzenia przez elektrony wynosi $1/2$. Definicje te wynikają z funkcji rozkładu statystycznego energii elektronów swobodnych w metalu, tzw. funkcji Fermiego - Diraca:

$$f_{F-D}(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1}$$

PRACA WYJŚCIA elektronów z metalu (oznaczenie ϕ lub w) to wartość energii, którą trzeba dostarczyć elektronowi przewodnictwa by wyprowadzić go z wnętrza metalu. Wielkość ta wprowadzona jest w słynnym wzorze Einstein'a opisującym efekt fotoelektryczny (zewnętrzny):

$$h\nu = W + E_{\text{kinet}}$$

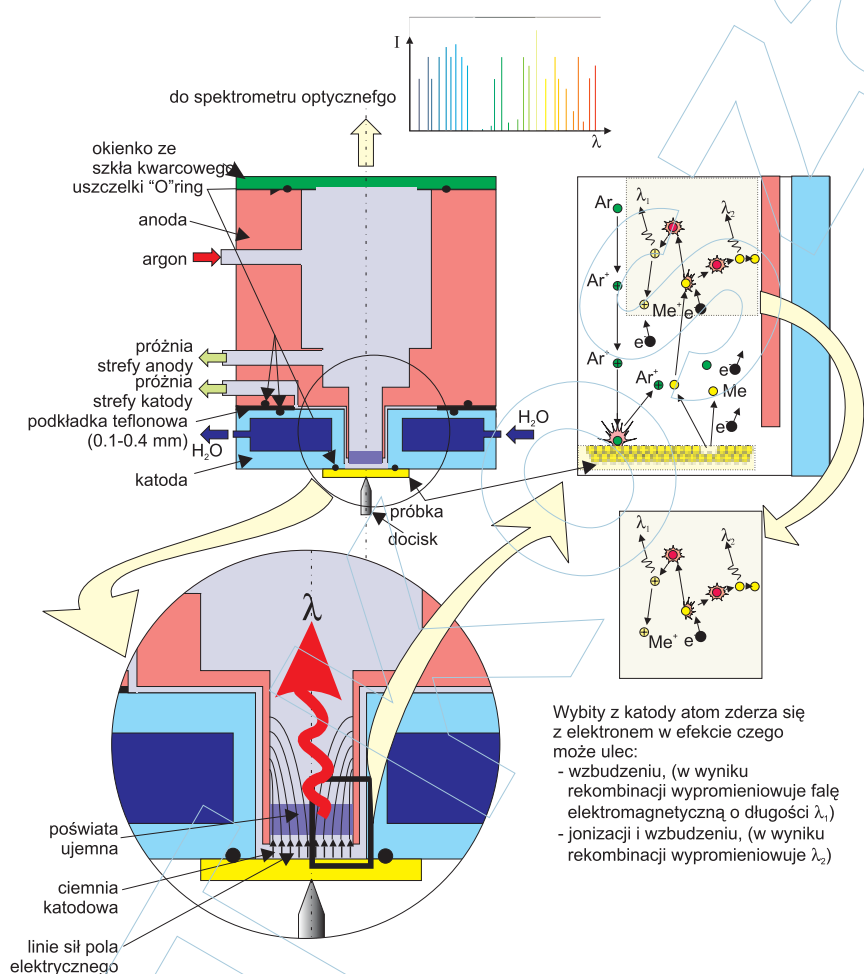
Najistotniejszym jest, że energie elektronów Auger'a wyrażone formułą typu $E_{KL_1L_{2,3}}$ są funkcją jedynie atomowych poziomów energetycznych, zatem dla każdego pierwiastka układu okresowego istnieje jeden i tylko jeden zbiór energii elektronów Auger'a, nie ma bowiem dwóch pierwiastków o tych wartościach energii wiązania elektronów.

Gwiazdka przy sym-

bolu $E_{L_{2,3}}^*$ oznacza, że wartość energii elektronu na tym poziomie mierzona jest w warunkach istnienia dziury na poziomie E_{L_1} , różna jest zatem od energii $E_{L_{2,3}}$.

Naturalnie w atomach ciała stałego, którego struktura energetyczna przedstawiona jest na rysunku możliwe są i realizują się, inne przejścia np. KL_1L_1 , $L_1L_{2,3}L_{2,3}$. Elektrony biorące udział w procesie Auger'a mogą pochodzić także z pasma walencyjnego. W tym przypadku przyjęto używać oznaczeń na przykład KL_1V - jeśli jeden elektron pochodzi z pasma walencyjnego lub też KVV jeśli obydwa elektrony pochodzą z pasma walencyjnego.

Stąd AES pozwala na jednoznaczną analizę jakościową, tj. identyfikację pierwiastków próbki, nawet w przypadku gdy obydwa elektrony biorące udział w procesie Auger'a pochodzą z pasma walencyjnego. Identyfikacja taka jest możliwa, ponieważ w wyrażeniu na energię elektronu Auger'a dominującym członem jest energia wyjściowego jonizowanego poziomu energetycznego.



Rys. 1.73. Schemat ideowy wyladowawczej lampy Grimm'a oraz ilustracja realizowanego w niej obciążonego wyladowania jarzeniowego.

Analiza ilościowa przy pomocy AES polega na porównywaniu uzyskiwanych widm z widmami próbek wzorcowych.

Przejdźmy do zapowiadanego opisu innej z metod analizy profilowej, GDOS - Optycznej Spektroskopii Emisyjnej Wyładowania Jarzeniowego.

Do badania profilu składu chemicznego warstw i podłoża w GDOS wykorzystuje się zjawisko wyładowania jarzeniowego w anormalnej części jego charakterystyki. Badana próbka (warstwa, lity materiał) stanowi katodę komory pomiarowej. Anodę stanowi obudowa.

Metoda GDOS jako narzędzie analityczne została wprowadzona w 1968 roku przez W. Grimm'a. Grimm podał też rozwiązanie komory pomiarowej, która stosowana jest do dziś. Przedstawiona jest ona na rys. 1.73.

W istocie swjej lampa Grimma stanowi napyłarkę diodową, w której podłożem jest specjalnie skonstruowana anoda (a właściwie ekran katody), katodę zaś stanowi badana próbka. Dzięki takiemu rozwiązaniu realizujące się lampie Grimma wyładowanie jarzeniowe zostaje ograniczone do obszaru zorzy (poświaty) ujemnej.

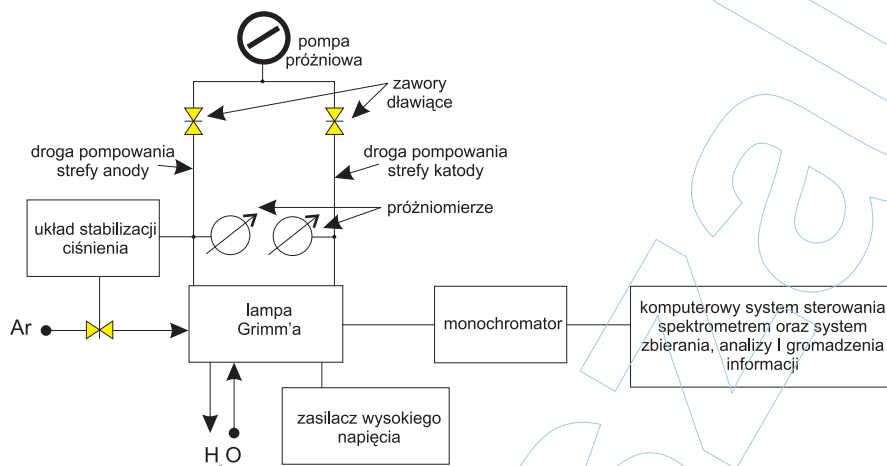
W GDOS źródłem informacji o rodzaju i ilości atomów tworzących badaną próbkę jest powstające w wyładowaniu jarzeniowym promieniowanie elektromagnetyczne w obszarze ultrafioletu, widzialnym i podczerwieni, czyli w przybliżeniu w zakresie długości fali od 2000Å do 9000Å.

Widmo to może pochodzić zarówno od atomów jak i jonów wybitych z podłoża dzięki efektowi rozpylania diodowego i wzbudzanych optycznie w aktach zderzeń z elektronami.

Jako gaz roboczy stosuje się zwykle argon o wysokiej czystości, którego linie emisyjne występują oczywiście także w badanym widmie optycznym stanowiąc niepożądane tło.

Zauważmy, że dzięki wykorzystaniu wyładowania jarzeniowego w GDOS uzyskuje się jednocześnie: źródło informacji o próbce (widmo optyczne) oraz efekt ciągłego strawiania powierzchni niezbędnej dla analizy profilowej.

Zwróćmy teraz uwagę na schemat ideowy spektrometru GDOS (rys. 1.74). Ciśnienie robocze argonu w lampie Grimma można zmieniać typowo w granicach 0,1 - 50 Tor. Za ciśnienie robocze uważa się ciśnienie w strefie anodowej (patrz rysunek 1.73). Strefę katody, tj. bardzo wąski obszar między katodą a anodą, odpompowuje się do wyższej próżni, tak aby niemożliwe było powstanie w niej „fałszywego” wyładowania jarzeniowego. Odległość katoda - anoda w tej strefie musi być zatem mniejsza od szerokości ciemni katodowej w całym zakresie stosowanych ciśnień Ar.



Rys. 1.74 Schemat ideowy spektrometru GDOS.

Dla uzyskania dokładności i powtarzalności pomiarów metodą GDOS stabilizuje się ciśnienie gazu roboczego wykorzystując na przykład sprzężenie próżniomierza strefy anodowej z elektromagnetycznym zaworem dozującym ten gaz.

Jeżeli przedmiotem badań są próbki przewodzące (metale, półprzewodniki o małej oporności elektrycznej) do wzbudzenia wyładowania jarzeniowego stosuje się regulowane zasilacze stałoprądowe stabilizowane bądź prądowo, bądź napięciowo. Typowe wartości stosowanych prądów i napięć to:

- prąd: od kilkunastu do 300 mA,
- napięcie: od kilkuset do 2 kV.

Dla analizy próbek izolacyjnych stosuje się zasilanie prądem przemiennym wysokiej częstotliwości (typowo 13,56 MHz).

W związku z dużą wartością mocy wydzielanej na katodzie jej korpus chłodzony jest intensywnie wodą.

Standardowo średnica wewnętrzna anody w lampie Grimm'a wynosi 4 lub 8 mm, jednak średnica próbki (w kształcie płaskiego walca) musi być dużo większa (10 - 300 mm) ze względu na konieczność dobrego kontaktu cieplnego z korpusem katody (chłodzenie).

W torze analizy optycznej używa się różnego rodzaju elementy dyspersyjne i detektory pozwalające na ciągły, w czasie, zapis wybranego obszaru widma lub tylko wybranych linii emisyjnych.

Typowa, zdolność rozdzielcza układów optycznych wynosi od 1Å do $0,1\text{Å}$.

Przy pomocy szybkiego systemu zbierania i obróbki danych zapisuje się widmo w wybranym zakresie długości fali, identyfikuje poszczególne linie widmowe pierwiastków wchodzących w skład próbki, a następnie zapisuje się je w funkcji czasu. Przy znanej szybkości strawiania próbki transformuje się uzyskane przebiegi czasowe na zależność koncentracji (zwykle względna) określonego pierwiastka od odległości od powierzchni. Uzyskuje się w ten sposób obraz profilu składu chemicznego próbki.

W metodzie GDOS typowe prędkości strawiania powierzchni to: 1 - 100 nm/s.

Granica detekcji w GDOS wynosi od 1 - 10 ppm.

Analizę ilościową składu chemicznego przeprowadza się w oparciu o wykresy uzyskane dla próbek wzorcowych opierając się na założeniu, że natężenie linii widmowej danego pierwiastka jest proporcjonalne do jego ilości w badanej próbce.

Dodajmy, że GDOS występują typowe dla metod spektrometrycznych problemy jak wybór do analizy „czystej” linii emisyjnej nie przekrywającej się z liniami od innych pierwiastków, lub jej separacja, czy też zagadnienie zwiększania stosunku sygnał użyteczny - szum.

W GDOS dla celów analitycznych stosuje się następujące parametry:

- **szybkość rozpylania:** $q = \frac{m}{t}$, $\left[\frac{\mu\text{g}}{\text{s}} \right]$ gdzie: m - ubytek masy katody, t - czas.
- **zredukowana szybkość rozpylania Q**, tj. szybkość rozpylania znormalizowana do prądu katodowego: $Q = \frac{q}{I}$, $\left[\frac{\mu\text{g}}{\text{s} \cdot \text{A}} \right]$
- **szybkość penetracji „W”** tj. szybkość rozpylania w jednostkach grubość warstwy na czas:

$$w = \frac{10^{-2} q}{\rho \cdot S}, \left[\frac{10^{-2} \mu\text{g} \cdot \text{s}^{-1}}{\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot \text{cm}^2} \right] = \left[\frac{\mu\text{m}}{\text{s}} \right] \quad \text{gdzie: } q - \text{szybkość rozpylania,}$$

r - gęstość próbki, S - powierzchnia próbki.

- **zredukowana szybkość penetracji**, tj. szybkość penetracji znormalizowana do prądu katodowego: $W = \frac{w}{I}$, $\left[\frac{\mu\text{m}}{\text{s} \cdot \text{A}} \right]$

- **wydajność rozpylania** (wydajność kwantowa) S , tj. ilość wybitych z katody atomów przez jeden padający na katodę jon: $S = \frac{10^{-6} q N \cdot e}{M \cdot I_{\text{jon}}}$ gdzie: q - szybkość rozpylania [$\text{g}(\text{s}^{-1})$], N - liczba Avogadro [mol^{-1}], e - ładunek elektryczny [C], M - ciężar atomowy, I_{jon} - prąd jonowy

- **prąd jonowy** związany jest z prądem całkowitym relacją: $I_{\text{jon}} = \frac{I}{1 + \gamma}$, gdzie: γ - średnia ilość elektronów wtórnych wybijanych z katody przez jeden jon.

Podstawiając numeryczne dane do wyrażenia na S i wykorzystując definicję q oraz I_{jon} otrzymuje się parametr: $\frac{S}{1 + \gamma} = 0,0965 \frac{\text{Q}}{\text{M}}$, który określa się mianem skorygowanej wydajności kwantowej.

Dla celów analizy ilościowej istotna jest znajomość szybkości rozpylania danej próbki. Okazuje się, że szybkość rozpylania q spełnia prostą, empiryczną formułę: $q = C_Q I (U - U_0)$ gdzie: I , U - prąd i napięcie wyładowania, C_Q, U_0 - stałe zależne od materiału katody, rodzaju użytego gazu roboczego i geometrii komory wyładowawczej, lecz niezależnie od prądu i napięcia wyładowania oraz ciśnienia gazu roboczego.

Metoda GDOS znajduje coraz szersze zastosowanie tak w pracach typowo badawczych jak i w kontrolnych laboratoriach przemysłowych ze względu na prostotę konstrukcji i niezawodność działania lampy Grimm'a, wysoką czułość, krótki czas przeprowadzania analiz oraz stosunkowo nieduże koszty urządzenia.

Inne zalety metody GDOS to:

- minimalny wpływ osnowy (matrycy) materiału na rezultaty analizy,
- liniowość krzywych kalibracji dla analizy ilościowej,
- możliwość wykorzystania jednej krzywej kalibracyjnej dla analizy kilku materiałów,
- możliwość równoczesnego określenia dominujących, minimalnych i śladowych koncentracji pierwiastków w badanym materiale,
- minimalne tło widmowe.

Oprócz zaakcentowanego na początku zastosowania GDOS do analizy profilu składu chemicznego twardych powłok typu TiN, metodę tę wykorzystuje się do analizy między innymi:

- rezultatów azotowania, nawęglania, azotonawęglania, borowania stali,
- składu warstw skorodowanych, utlenionych, spasywowanych,
- rezultatów implantacji jonowej,
- wszelkiego rodzaju warstw nakładanych różnymi metodami,
- analizy ilościowej: żeliwa (białego, szarego, wysokostopowego itd.), stali wszelkiego rodzaju, niklu i stopów kobaltowych, stopów miedzi (brązy, mosiądże), stopy aluminium, stopy tytanu itd.

3.2. Pomiar grubości cienkich warstw metodą Kalotest.

Do pomiaru grubości cienkich warstw wykorzystuje się wiele metod. Wśród nich znajdują się między innymi:

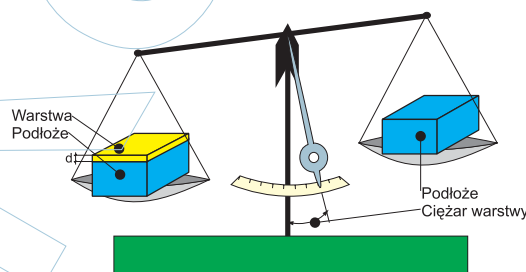
- metoda grawimetryczna,
- metoda profilograficzna,
- metoda zwana Kalotest.

Metoda grawimetryczna (rys. 1.75) jest chyba najstarszą z metod pomiaru grubości warstw. Procedura tej metody sprowadza się do ważenia podłoża przed i po naniesieniu na nie cienkiej warstwy.

Jeżeli: W - jest różnicą w ciężarze, A - powierzchnią podłoża na które naniesiono warstwę, ρ - ciężarem właściwym materiału warstwy, to grubość warstwy wynosi:

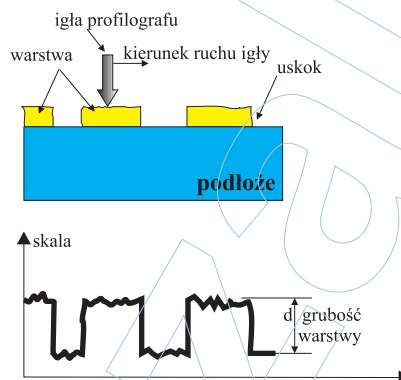
$$d = \frac{W}{A \cdot \rho}$$

Pomijając wszystkie, rzucające się w oczy zastrzeżenia, które można mieć analizując tę metodę należy zauważyć, że jej dokładność jest duża (~1%) i że pozwala zmierzyć grubość warstw rzędu kilku Å.



Rys. 1.75. Metoda wagowa pomiaru grubości warstw

W metodzie profilograficznej (rys. 1.76) do określenia grubości warstw wykorzystuje się standardowy profilograf używany zwykle do charakteryzowania chropowatości powierzchni. Idea pomiaru przedstawiona jest na rysunku. W wyniku zastosowania tej metody otrzymuje się profilogram warstwy z podłożem, przy czym próbkę wykonuje się w ten sposób, że warstwa posiada jeden lub kilka uskoków. Określając bezpośrednio z profilogramu wysokość tego uskoku otrzymuje się grubość warstwy.

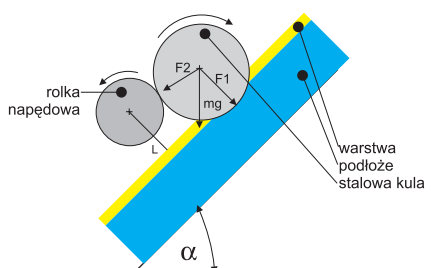


Rys. 1.76. Metoda profilograficzna pomiaru grubości warstw

Istnienie uskoków warstwy można zabezpieczyć przed procesem jej nanoszenia poprzez wykonanie odpowiedniego maskowania fragmentów powierzchni podłoża lub też można je wykonać na naniesionej już warstwie na przykład metodami selektywnego trawienia chemicznego lub jonowego, czy też poprzez mechaniczne ścieranie.

Zasada metody Calotest („calo” - wł. - ubytek, strata na wadze) jest niezwykle prosta. Kula, zwykle stalowa, o znanym promieniu R obraca się na powierzchni warstwy. W wyniku tarcia następuje usunięcie materiału warstwy i podłoża. Geometrycznie, ślady usuniętych: warstwy i podłoża mają kształt koncentrycznych kół. W celu wyznaczenia grubości warstwy wykonuje się pomiar ich średnic, zazwyczaj przy pomocy mikroskopu metalograficznego.

Kolejny zamieszczony rysunek (rys. 1.77) ilustruje bliżej tę metodę, następne zaś pomocne są przy wyprowadzaniu wzorów na grubość warstwy.



Rys. 1.77. Idea metody Kalotest

Dla wyprowadzenia wzoru na grubość warstwy mierzonej metodą Calotest wprowadzimy następujące oznaczenia (patrz rysunki 1.78, 1.79, 1.80):

R - promień kuli ścierającej warstwę,

T - wysokość odcinka kuli (także całkowita głębokość wytarcia),

D - średnica odcinka kuli (także zewnętrzna średnica wytarcia),

d - wewnętrzna średnica wytarcia (średnica wytarcia podłoża),

S - grubość warstwy,

t - grubość startego podłoża.

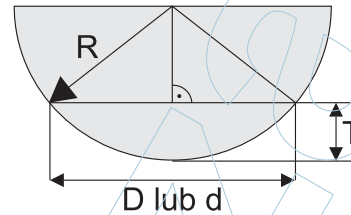
x, y - wielkości pomocnicze, przy czym, jak widać z rysunku:

$$x = \frac{D+d}{2}, \quad y = \frac{D-d}{2}.$$

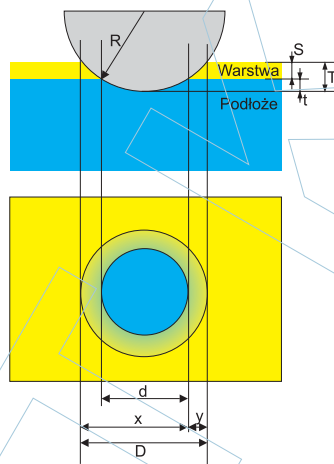
Ponieważ: $S=T-t$,

$$a: \quad T = R - \frac{1}{2}\sqrt{4R^2 - D^2}, \quad t = R - \frac{1}{2}\sqrt{4R^2 - d^2},$$

to grubość warstwy S wynosi:



Rys. 1.78. Oznaczenie parametrów kuli.



Rys. 1.79. Oznaczenie śladów wytarcia w przypadku jednej warstwy

$$S = \frac{1}{2} \left[\sqrt{4R^2 - d^2} - \sqrt{4R^2 - D^2} \right].$$

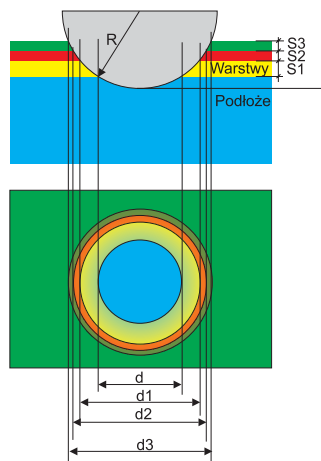
Dla obliczenia S można posłużyć się uproszczoną formułą; zauważmy, że:

$$d \ll R \quad \text{oraz} \quad D \ll R.$$

Rozwijając, przy tych warunkach, wzór na "S" w szereg Taylora otrzymamy:

$$S = \frac{xy}{2R}.$$

Błąd obliczeń S oceniany jest na $\leq 1\%$



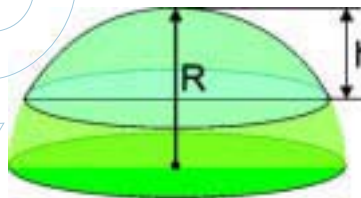
Rys. 1.80. Oznaczenie śladów wytarcia w przypadku trzech warstw

usuniętej warstwy i podłoża w jednostce czasu t (np. 1 minuta). Wprowadza się w tym celu parametr:

$$\gamma = \frac{1}{\frac{V}{t}} = \frac{t}{V} \left[\frac{s}{m^3} \right]$$

Objętość odcinka kuli, V wynosi :

$$V = \frac{1}{3} \pi h^2 (3R - h)$$



Rys. 1.81. Odcinek kuli.

Jeżeli badana warstwa ma strukturę wielowarstwową (patrz rysunek 1.80), to do obliczeń grubości poszczególnych warstw należy wielokrotnie wykorzystać wprowadzony wzór.

Zwróćmy uwagę, że ślad wytarcia warstwy i podłoża kulą stalową, przy dużej jej średnicy - standardem jest $\phi = 10\text{mm}$ - jest w rzeczy samej szlifem ukośnym. Można zatem dodatkowo ocenić:

- budowę warstwy (lita, porowata, kompo zytowa itd.),
- strukturę warstwy (jedno- czy wielofazowa).

Można też ocenić jej odporność na zużycie poprzez określenie objętości V

Na koniec kilka uwag praktycznych:

- dla szybkiego uzyskania szlifę stosuje się drobnoziarnistą pastę diamentową,
- aby uzyskać wyraźnie zarysowaną granicę: podłoże - warstwa można użyć środka trawiącego i zaczerniającego podłoże, a nie trawiącego materiału warstwy. Na przykład dla warstw TiN na stalach wystarczy słaby roztwór kwasu azotowego.
- nacisk kulki na podłoże można zmieniać przez dobór kąta pochylenia α (patrz rys. 1.77).