

2.10. Właściwości elektryczne

• Oporność właściwa.

Oporność właściwa ρ polikrystalicznych warstw azotku tytanu w temperaturze pokojowej zależy od warunków technologicznych ich otrzymywania i waha się w granicach:

$$\rho \in (20+200) \mu\Omega\text{cm}.$$

Dla monokrystalicznych warstw osadzonych epitaksjalnie na podłożu z monokrystalicznego MgO (dla kierunku $\langle 111 \rangle$) oporność właściwa wynosi:

$$\rho = 18 \mu\Omega\text{cm}.$$

Dla litego, spiekanego TiN ρ zawiera się w granicach:

$$\rho \in (25+50) \mu\Omega\text{cm}$$

$$1 \mu\Omega\text{cm} = 10^{-6} \Omega\text{cm}$$

EPITAKSJA - wzrost monokrystalicznej warstwy związku chemicznego na monokrystalicznym podłożu z innego materiału o tej samej strukturze krystalograficznej i bardzo zbliżonej (lub tej samej) stałej sieci krystalograficznej co dany związek.

Typowe wartości oporności właściwej dla innych materiałów przedstawia tabela:

materiał	żelazo	miedź	srebro	stal nierdzewna	mosiądz	diament	szkło
ρ [Ωcm]	$9,7 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$71 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	10^{15}	10^{14}

• Temperaturowy współczynnik oporu α_p

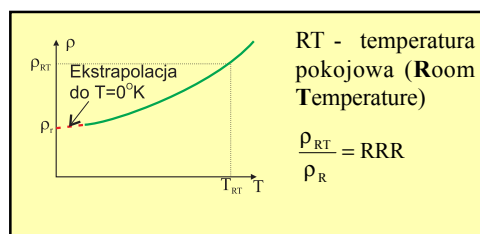
Wzór definiujący: $\rho_T = \rho_0 [1 + \alpha_p (T - T_0)]$

α_p polikrystalicznych warstw TiN wynosi: $\alpha_p \in (900+2000) \text{ppm } ^\circ\text{K}^{-1}$

α_p monokrystalicznego TiN (warstwa epitaksjalna): $\alpha_p = 6200 \text{ppm } ^\circ\text{K}^{-1}$

• Oporność resztkowa

Oporność resztkowa ρ_r jest wartością oporności właściwej otrzymanej z przecięcia ekstrapolowanego do $T = 0^\circ\text{K}$ wy-



kresu $\rho = \rho(T)$ z osią oporności właściwej. (patrz rysunek dalej)

Typowe wartości oporności resztkowej:

$$\rho_r \in (9 \div 100) \mu\Omega\text{cm}$$

• Iloraz oporności warstw TiN

Iloraz oporności RRR (Residual Resistance Ratio) to stosunek oporności właściwej w temperaturze pokojowej do oporności resztkowej.

Typowe wartości ilorazu oporności:

$$\text{RRR} \in (1,8 \div 3)$$

• Magnetoopór

Warstwy TiN nie wykazują zależności oporności właściwej od przyłożonego z zewnątrz pola magnetycznego (zjawisko magnetooporu) do wartości pola równej 15 kGs (1,5 T), w zakresie temperatur $2 \div 300$ °K

Gs - Gauss
T - Tesla

• Koncentracja nośników ładunku (elektronów)

Typowa wartość koncentracji elektronów w polikrystalicznych warstwach TiN wynosi:

$$n = 6,8 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$$

i jest niezależna od temperatury.

KONCENTRACJA:

Ilość cząstek / jednostkę objętości

$$n = \frac{N}{V} \left[\frac{1}{\text{cm}^3} \right]$$

• Ruchliwość nośników ładunku

Typowa wartość ruchliwości nośników w polikrystalicznych warstwach TiN w temperaturze pokojowej jest równa:

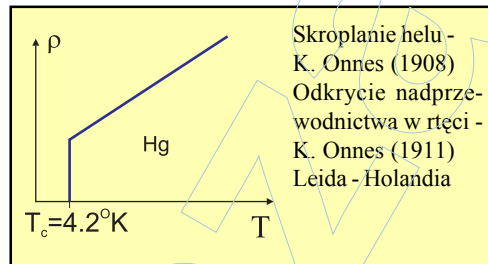
$$\mu = 4,9 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$$

RUCHLIWOŚĆ definiuje się jako stosunek prędkości dryfu elektronów swobodnych (przewodnictwa) do natężenia pola elektrycznego

$$v_{dr} = \mu E \Rightarrow \mu = \frac{|v|}{|E|}$$

• **Temperatura krytyczna przejścia w stan nadprzewodzący.**

Temperatura krytyczna T_C (c - critical - krytyczna) to temperatura poniżej której materiał przechodzi w stan nadprzewodzący. Wartość jej jest zależna od zewnętrznego pola magnetycznego.



Wartość T_C warstw azotku tytanu zawierają się w granicach: $T_C \in (4 + 6) \text{ }^\circ\text{K}$

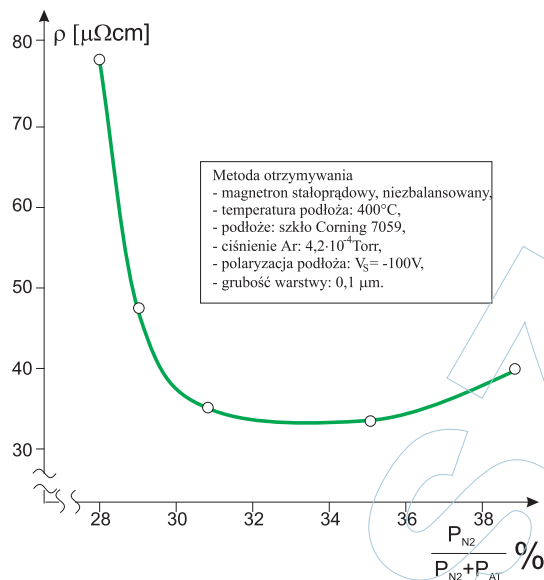
• **Magnetyczne pole krytyczne**

Magnetyczne pole krytyczne H_C to wartość zewnętrznego pola magnetycznego, które niszczy stan nadprzewodzący materiału znajdującego się w temperaturze $T \leq T_C$. Magnetyczne pole krytyczne dla polikrystalicznej warstwy TiN o temperaturze krytycznej $T_C = 4,7 \text{ }^\circ\text{K}$ wynosi:

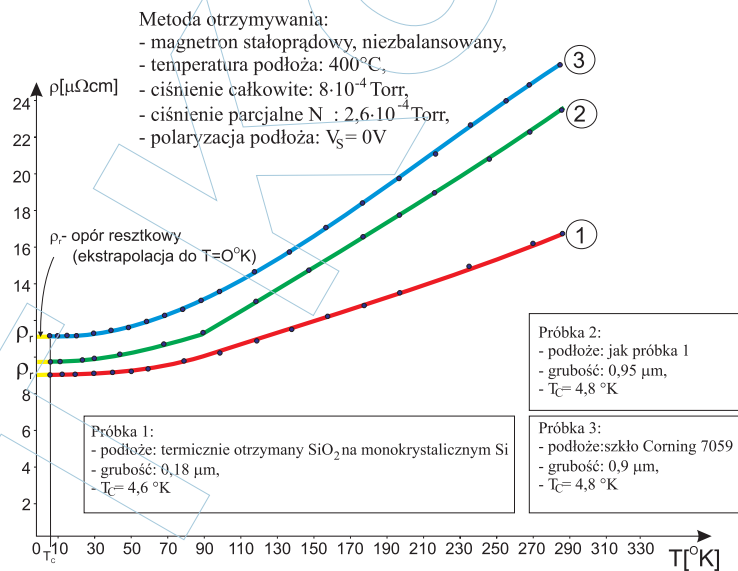
$T[^\circ\text{K}]$	4,5	4,4	4,3
$H_c[\text{Gs}]$	450	580	1000

• **Zależność własności elektrycznych warstw TiN od parametrów technologicznych stosowanych w trakcie ich otrzymywania.**

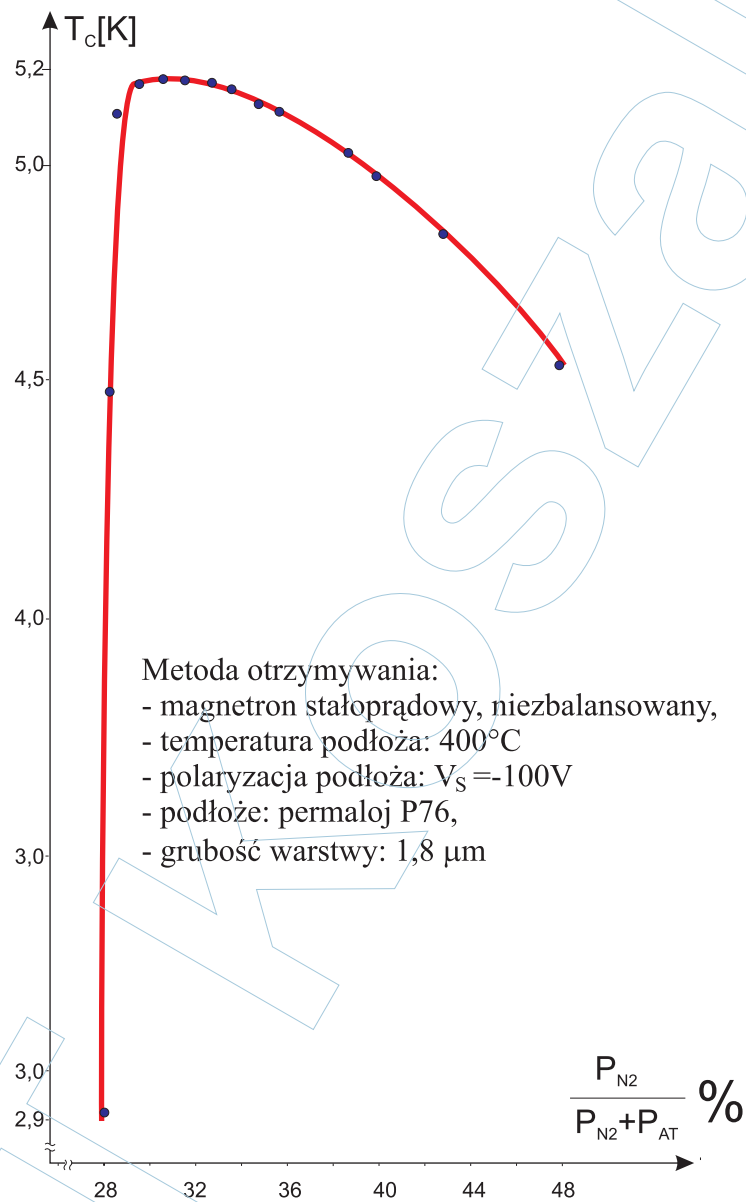
Wszystkie wymienione wyżej parametry warstw TiN zależą od warunków technologicznych ich otrzymywania. Niżej zamieszczone przykładowe wykresy ilustrują to stwierdzenie.



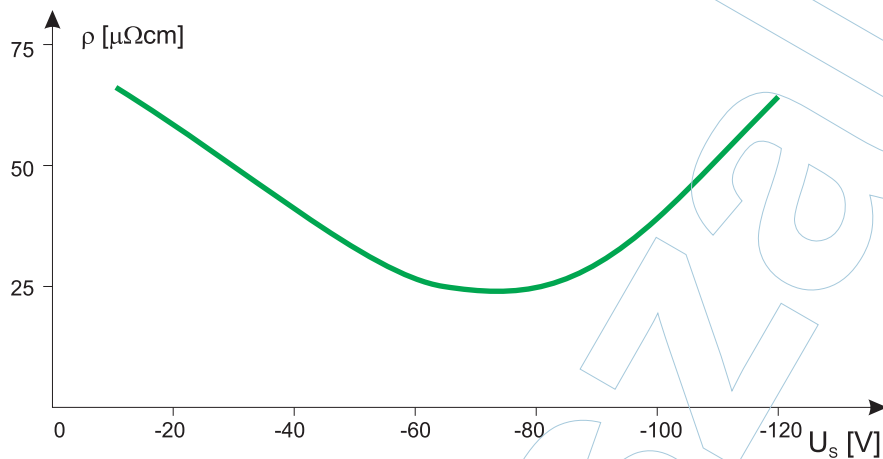
Rys. 1.49. Zależność oporności właściwej warstwy TiN od stechiometrii (tu wyrażonej poprzez stosunek ciśnienia parcjalnego azotu do ciśnienia całkowitego w komorze napyłarki).



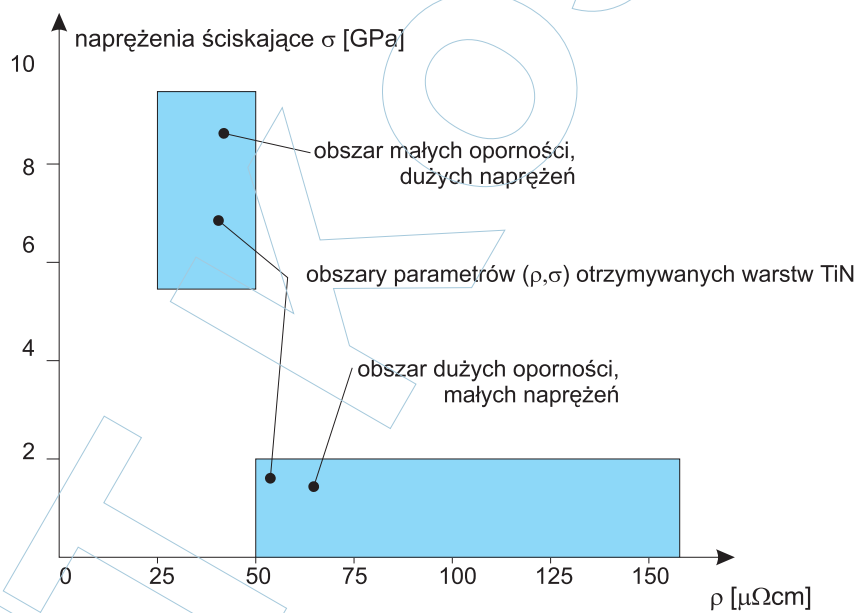
Rys. 1.50. Zależność oporności właściwej kilku warstw stechiometrycznego TiN od temperatury.



Rys. 1.51. Zależność temperatury T_c przejścia w stan nadprzewodzący warstwy TiN w zależności od stechiometrii warstw (tu podanej pośrednio poprzez skład atmosfery w napyłarce.)



Rys. 1.52. Typowa zależność oporności właściwej warstw TiN od stałego napięcia polaryzującego podłoża w procesach rozpylania magnetronowego



Rys. 1.53. Związek między opornością właściwą i naprężeniami warstw TiN otrzymanych przy różnych parametrach technologicznych (zmiennie: ciśnienie całkowite, temperatura podłoża, napięcie polaryzujące podłoża).

Przypis o właściwościach elektrycznych

Oporność właściwą ρ wprowadza się poprzez:
- tzw. całkowite prawo Ohma:

$$I = \frac{1}{R} U$$

- tzw. różniczkowe prawo Ohma:

$$j = \sigma E$$

Oznaczenia: I - natężenie prądu, R - oporność, U - napięcie, j - gęstość prądu, σ - przewodnictwo właściwe, E - natężenie pola elektrycznego.

Gęstość prądu definiuje się jako natężenie prądu przepływającego przez jednostkową powierzchnię prostopadłą do kierunku przepływu. Zatem:

$$j = \frac{I}{S}$$

Ogólniej:

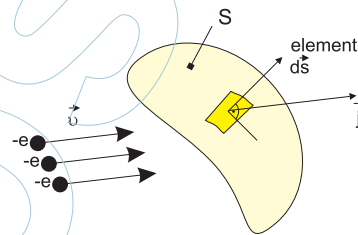
$$I = \int_S j \cdot ds$$

gdzie: $j = env_{sr}$, n - koncentracja elektronów, v_{sr} - średnia prędkość elektronów w kierunku pola elektrycznego, e - ładunek elektronu.

Prędkość unoszenia v_{sr} jest proporcjonalna do natężenia pola E (tzw. formuła Langevin'a):

$$v_{sr} = \mu E.$$

ŁADUNEK ELEKTRYCZNY
 $e = 1,6 \times 10^{-19} C$
C - Coulomb



Rys. 1.54. Określenie natężenia prądu elektrycznego

Współczynnik μ nazywany jest
RUCHLIWOŚCIĄ NOŚNIKÓW ŁADUNKU

$$[\mu] = \left[\frac{cm^2}{V \cdot s} \right]$$

Zatem:

$$j = \sigma E = env_{sr} = en\mu E$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = en\mu$$

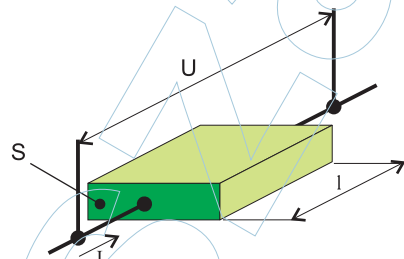
Mierząc ρ można określić iloczyn koncentracji i ruchliwość nośników ładunku.

W przypadku regularnej, prostopadłościennnej próbki oporność właściwą ρ definiuje się następująco:

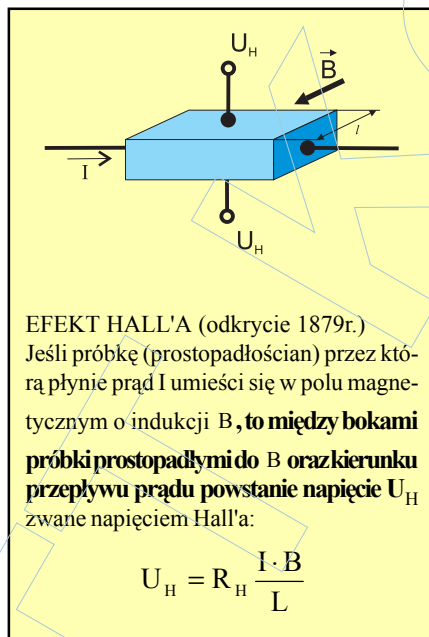
$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \Rightarrow \rho = R \cdot \frac{S}{l}$$

$$\Rightarrow \rho = \frac{U}{I} \cdot \frac{S}{l}$$

Wymiarem ρ jest [$\Omega \cdot \text{cm}$]



Rys. 1.55.



Do niezależnego pomiaru koncentracji można wykorzystać efekt Hall'a. Mierzona w tym efekcie tzw. stała Hall'a R_H jest w modelu elektronów swobodnych metalu określona formułą:

$$R_H = -\frac{1}{en} \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{C}} \right].$$

Zatem mierząc oporność właściwą oraz efekt Hall'a można znaleźć koncentrację i ruchliwość elektronów:

$$n = \frac{1}{eR_H} \left[\text{cm}^{-3} \right]$$

$$\mu = \frac{R_H}{\rho} \left[\text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1} \right]$$

W azotku tytanu dominującym wiązaniem jest wiązanie kowalencyjne co manifestuje się dużą trwałością mechaniczną i wysokim punkcie topnienia związku. Udział wiązania metalicznego wiąże się z utworzeniem przez sphybrydyzowane ostatnie orbitale N i Ti pasma przewodnictwa pokrywającego się z pasmem energetycznym elektronów walencyjnych. Jest zatem TiN bardzo dobrym przewodnikiem metalicznym o czym świadczy wartość jego oporności w temperaturze pokojowej. Charakter metaliczny TiN potwierdza temperaturowa zależność ρ . Jest ona bowiem liniowa w zakresie wyższych temperatur:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha_p \Delta T)$$

gdzie: $\Delta T = T - T_0$ - różnica temperatur pomiaru ρ i ρ_0 , α_p - temperaturowy współczynnik oporu.

Innym argumentem przemawiającym za metalicznym charakterem przewodnictwa elektrycznego TiN jest stałość koncentracji elektronów w funkcji temperatury.

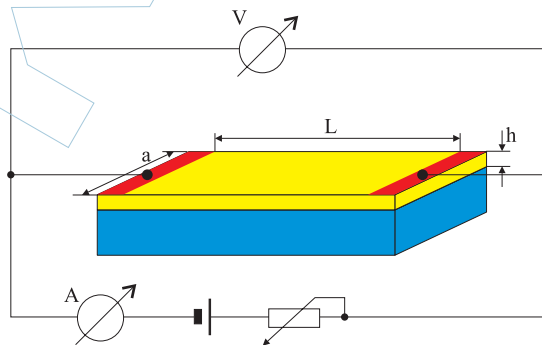
Pomiary oporności właściwej łatwe do przeprowadzenia w porównaniu z innymi technikami analitycznymi, pozwalają szybko określić „jakość” cienkich warstw TiN. Dodatkowo, ze względu na istnienie rozbudowanych teorii przewodnictwa elektrycznego cienkich warstw można, wykorzystując gotowe formuły i posiadane rezultaty pomiaru oporności właściwej ocenić np. średnią wielkość ziaren warstwy, stan powierzchni ziaren itp.

Uwaga:

Niekiedy, szczególnie w zastosowaniach optycznych dla scharakteryzowania właściwości elektrycznych cienkich warstw używa się parametru nazywanego opornością na kwadrat - oznaczenie R_{\square} .

Metoda pomiaru tego parametru przedstawiona jest na rysunku 1.56.

Na warstwę, naniesioną na prostopadłościennym podłożu o szerokości a , nakłada się dwie płaskie elektrody (zwykle pasta przewodząca) odległe o L . Niech h będzie grubością



Rys. 1.56. Schemat ideowy metody pomiaru oporności kwadratu R_{\square}

warstwy. Mierzy się opór warstwy R jako: $R = \frac{V}{I}$, a następnie dzieli się uzyskaną wartość przez stosunek długości warstwy L do jej szerokości a . Stosunek $\frac{L}{a}$ określa nic innego jak ilość kwadratów o boku a na które można podzielić powierzchnię warstwy.

$$\text{Zatem: } R_{\square} = \frac{R}{\frac{L}{a}}. \text{ Z drugiej strony: } R = \rho \frac{L}{a \cdot h}, \text{ stąd: } \frac{R}{\frac{L}{a}} = \frac{\rho}{h} = R_{\square}.$$

$$\text{Mamy więc ostatecznie: } R_{\square} = \frac{R}{\frac{L}{a}} = \frac{\rho}{h}.$$

Mierząc niezależni grubość warstwy można więc określić szybko oporność właściwą warstwy.

2.11. Adhezja i tarcie

Silne przyleganie (adhezja) warstw azotku tytanu do podłoża jest bodaj czy nie najważniejszą cechą warunkującą ich wykorzystanie dla celów praktycznych. Zapewnieniu dobrego przylegania poświęca się kilka kroków w każdej z procedur otrzymywania cienkich warstw TiN.

Niestety pomiar sił wiążących warstwę z podłożem jest bardzo trudny. Istnieje w tym względnie kilka metod, lecz każda z nich ma charakter raczej jakościowy. Osiągane rezultaty są rezultatami porównawczymi i mogą być rozbieżne nawet w obrębie jednej metody, o ile nie używa się standardowych przyrządów pomiarowych.

Odnosi się wrażenie, że ogólną akceptację jeśli chodzi o pomiar adhezji warstw TiN, uzyskała metoda zwana metodą rysy realizowana przy wykorzystaniu urządzenia o nazwie REVETEST produkcji szwajcarskiej. Osiągane tą metodą i przy pomocy wymienionego urządzenia rezultaty siły adhezji warstw TiN do podłoża uznaje się za porównywalne.

Schemat ideowy urządzenia do pomiaru siły adhezji metodą rysy przedstawia rysunek 1.57.