

Edmund PIĘTKA

REZYSTYWNOSC METALI W NISKICH TEMPERATURACH

Streszczenie. Przedstawiono sposób obliczania rezystywności metali w niskich temperaturach oraz wyniki badań wpływu naprężeń mechanicznych w aluminium na zmiany jego rezystywności.

1. Wprowadzenie

Złożone zagadnienia teorii transportu w ośrodkach jednorodnych nie pozwalają w ramach artykułu na omówienie różnych jakościowo zjawisk określających rezystywność w niskich temperaturach. Podjęto więc jedynie próbę omówienia niektórych zagadnień mających jednak istotny wpływ na temperaturowe zmiany rezystywności w zakresie niezbędnym dla rozważań nad zachowaniem się metali w temperaturze ciekłego azotu.

Większość czystych pierwiastków metalicznych wykazuje w temperaturze pokojowej (295 K) rezystywność w przybliżeniu proporcjonalną do temperatury absolutnej. W temperaturach bardzo niskich (4...20 K) rezystywność ustala się, a jej wartość zwana jest rezystywnością szczątkową. Rezystywność szczątkowa metali ρ_0 jest następstwem defektów sieci krystalicznej oraz wtrąceń domieszkowych obcych pierwiastków i praktycznie nie zależy od temperatury. Wyjątek stanowią metale nadprzewodzące oraz ich stopy, których rezystywność zanika poniżej określonej temperatury krytycznej.

Zależność rezystywności od temperatury tłumaczy się w ujęciu mikroskopowym mechanizmem zakłócenia przepływu elektronów w wyniku termicznych drgań sieci krystalicznej. Drgania te przekazywane elektronom w postaci kwantów energii, zwanych fononami, powodują zakłócenia ich uporządkowanego ruchu. Rezystywność metalu, jako efekt zakłócenia ruchu elektronów, można określić w oparciu o podstawowe parametry fizyczne [1] klasycznym wzorem:

$$\rho = \frac{mv}{le^2N}, \quad (1)$$

w którym: m , v , l , e , N - odnoszą się do elektronów i oznaczają odpowiednio: masę, średnią prędkość, średnią drogę swobodną, ładunek, koncentrację.

Masa i ładunek elektronów jest wielkością stałą, a prędkość i koncentracja praktycznie nie zależą od temperatury [1]. Zmiany rezystywności metali określa więc średnia droga swobodna elektronów.

2. Temperaturowe zmiany rezystywności metalu

Rezystywność czystych metali powodowana jest rozproszeniem elektronów przez termiczne drgania sieci krystalicznej. Amplituda i częstość tych drgań, zależne od temperatury, oddziaływając w postaci kwantów energii (fonów) na elektrony, powodują ich rozproszenie. Rozproszenie to, jako funkcyjna zależność temperatury oraz budowa struktury elektronowej metalu, określają średnią drogę swobodną elektronów i temperaturowe zmiany rezystywności.

Analityczne określenie rezystywności metalu, w zależności od temperatury, wymaga określenia energii fononów, powodujących zakłócenia przepływu elektronów. Energię tę określa temperatura Debye'a, dla której energia termiczna substancji, określona tsw. czynnikiem Boltzmanna $k \Theta_D$, jest równa energii fononu. Temperatura Debye'a charakterystyczna dla danego metalu, określona jest równaniem [3]:

$$\Theta_D = \frac{hc}{2k} \left(6\pi^2 \frac{N}{V} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

w którym:

- h - stała Plancka,
- k - stała Boltzmanna,
- c - uśredniona prędkość dźwięku w kryształach,
- N/V - liczba atomów na jednostkę objętości.

Jej wartość (100...1000 K), określana zazwyczaj doświadczalnie [2, 3], charakteryzuje stopień wzbudzenia drgań sieci krystalicznej w dowolnej temperaturze, określając tym samym prawdopodobieństwo rozproszenia elektron-fonon.

Analiza kwantowo-mechaniczna rozproszenia elektronów przez drgania cieplne idealnej sieci krystalicznej, przeprowadzona na jednoelektronowym modelu Blocha, pozwoliła określić rezystywność idealną wynikającą z oddziaływania elektron-fonon [1]:

$$\rho_1(T) = \frac{K T^5}{N e_D^6} \int_0^{\Theta_D/T} \frac{x^5 dx}{(e^x - 1)(1 - e^{-x})}, \quad (3)$$

przy czym:

- M - masa atomowa metalu,
- K - stała charakterystyczna metalu,
- Θ_D - temperatura Debye'a.

Dane doświadczalne [1, 3] potwierdzają zależność (3) dla metali alkalicznych, których budowa elektronowa jest najbardziej zbliżona do modelu Blocha. Dla metali wielowartościowych stwierdzono pewne odstępstwa od tej zależności. Występujące różnice są konsekwencją założeń upraszczających, niezbędnych wobec złożoności zjawisk kwantowych przewodnictwa.

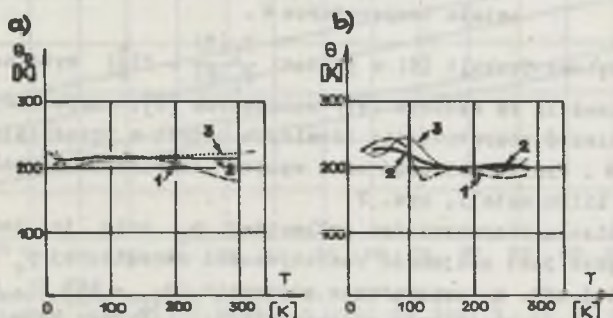
Dokładność obliczeń rezystywności idealnych można znacznie zwiększyć poprzez wprowadzenie w równaniu (3) korekty polegającej na zastąpieniu temperatury Debye'a Θ_D temperaturą Θ , charakterystyczną dla badanego modelu [1, 4]. Temperatura ta jest zdefiniowana ilorazem rezystywności idealnych w wysokich ($T_w > 0,5 \Theta_D$) i niskich ($T_n < 0,1 \Theta_D$) temperaturach [1]:

$$\Theta = T_n \left[497,6 \cdot \frac{T_n}{T_w} \cdot \frac{\rho_{1n}}{\rho_{1w}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

przy czym:

ρ_{1n}, ρ_{1w} - rezystywności idealne w temperaturach T_n i T_w .

Metody wyznaczania temperatury Debye'a Θ_D i temperatury charakterystycznej Θ nie prowadzą do identycznych wyników. Badania eksperymentalne wykazały zależność obu tych parametrów od temperatury [3]. Zależność tę na przykładzie srebra zilustrowano na rys. 1.



Rys. 1. a) Temperatura Debye'a Θ_D i b) Temperatura charakterystyczna Θ dla srebra

Cyfry przy krzywych odnoszą się do różnych metod określania Θ_D i Θ na drodze doświadczalnej [4]

Parametry Θ_D i Θ jako funkcje temperatury mają do siebie sblizony kształt (rys. 1), ale temperatura charakterystyczna Θ zmienia się na ogół w znacznie szerszym niż temperatura Debye'a Θ_D zakresie. Dla aluminium np. temperatury Θ i Θ_D , ustalone doświadczalnie przez różnych autorów [1, 3, 4, 5], mieszczą się w przedziale wartości 385...426 K, z którego do obliczeń rezystywności najczęściej przyjmowana jest temperatura $\Theta = 395$ K.

Dla dokładniejszego określenia rezystywności idealnej metalu proponuje się uwzględnienie zmienności temperatury charakterystycznej w równaniu (3). Trafność takiego postępowania potwierdzają badania własne [6], przeprowadzone na przewodnikach aluminiowych o różnych stopniach czystości metalu. Dały one wyniki rezystywności zgodne (1...2%) z doświadczeniem w przedziale temperatury $\Theta > T \geq 0,2\Theta$.

Postać równania (3) jest niewygodna do obliczeń rezystywności idealnych. Wymaga znajomości stałej charakterystycznej K , określającej intensywność oddziaływania elektronów z drganiami sieci krystalicznej, w zależności od budowy struktury elektronowej metalu. Rezystywność idealną wygodnie jest obliczać w oparciu o zmodyfikowane równanie (3), uzależniające zredukowaną rezystywność $\rho_{iT}/\rho_{i\Theta}$ od zredukowanej temperatury T/Θ :

$$\frac{\rho_i(T)}{\rho_i(\Theta)} = \frac{\rho_i(T)}{\rho_i(\Theta)} \cdot \frac{\rho_i(T_0)}{\rho_i(T_0)}, \quad (5)$$

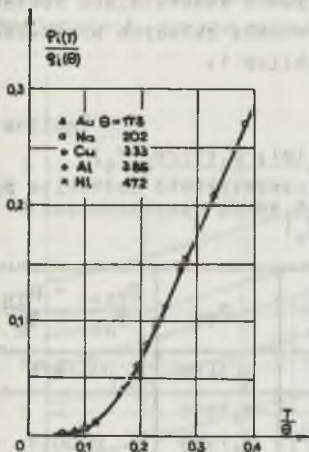
przy czym:

- $\rho_i(T_0)$, $\rho_i(T)$ - rezystywności idealne w temperaturach T_0 i T ,
- $\rho_i(\Theta)$ - rezystywność idealna w charakterystycznej dla badanego metalu temperaturze Θ .

Wartości liczbowe funkcji (5) w postaci $\frac{\rho_i(T)}{\rho_i(\Theta)} = f\left(\frac{T}{\Theta}\right)$ wyliczono numerycznie z dokładnością do sześciu cyfr znaczących [6], zapewniając dużą dokładność obliczeń rezystywności idealnych metali w przedziale temperatury $\Theta \geq T \geq 0,1\Theta$. Wyniki obliczeń oraz wyniki doświadczalne zilustrowano na przykładzie kilku metali, rys. 2.

Dla określenia rezystywności całkowitej ρ_T oraz jej temperaturowych zmian niezbędna jest znajomość rezystywności szczątkowej ρ_0 i rezystywności całkowitej, np. w temperaturze otoczenia ($\rho_T = 293$ K). Wartości ρ_0 i ρ_{T_0} wyznacza się empirycznie w temperaturze ciekłego helu ($T = 4,2$ K) i w temperaturze otoczenia. Zależność między nimi określa doświadczalnie sprawdzona reguła Matthiessena [7], w myśl której rezystywność całkowita metalu jest sumą rezystywności:

$$\rho_T = \rho_i(T) + \rho_0 \quad (6)$$



Rys. 2. Rezystywność zredukowana $\rho_i(T)/\rho_i(\Theta)$ jako funkcja temperatury zredukowanej T/Θ oraz wartości ustalone doświadczalnie dla różnych metali [1, 6]

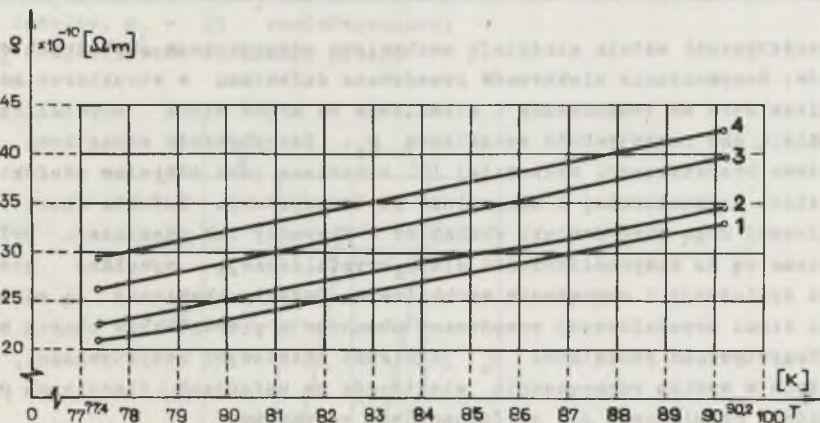
Uwzględniając równania (5) i (6) otrzymuje się zależność określającą rezystywność całkowitą metalu:

$$\rho_T = \frac{\rho_i(T)}{\rho_i(\Theta)} \cdot \frac{\rho_i(\Theta)}{\rho_i(T_0)} \rho_i(T_0) + \rho_0 \quad (7)$$

przy czym:

- $\frac{\rho_i(T)}{\rho_i(\Theta)}$; $\frac{\rho_i(\Theta)}{\rho_i(T_0)}$ - rezystywności zredukowane jako funkcje zredukowanej temperatury $\frac{T}{\Theta}$,
- $\rho_i(T_0)$ - rezystywność idealna w temperaturze otoczenia ($\rho_{iT_0} = \rho_{T_0} - \rho_0$),
- ρ_0 - rezystywność szcztatkowa.

Możliwość eksperymentalnego sprawdzenia obliczonych rezystywności pozwala korygować ewentualne rozbieżności wyni-



Rys. 3. Temperaturowe zmiany rezystywności aluminium dla różnych stopni czystości metalu: 1 - AL 99,9999; 2 - AL 99,999; 3 - AL 99,9; 4 - AL 99

ków poprzez dobór odpowiedniej temperatury charakterystycznej w równaniu (7). Na rys. 3 pokazano wyniki obliczeń rezystywności przewodników aluminiowych w przedziale temperatury 77,4...90,2 K. Rezystywności w temperaturze ciekłego azotu (77,4 K) i tlenu (90,2 K) określono również na drodze dokładnych pomiarów. Korygując na podstawie rozbieżności wyników tem-

peraturę charakterystyczną w równaniu (7), otrzymano zadowalająco dokładne (-1%) wartości temperaturowych zmian rezystywności badanych przewodników. Charakterystyczne wyniki zamieszczono w tabelicy 1.

Tabelica 1

Rezystywności zredukowane $\rho_i(T)/\rho_i(\theta)$; $\rho_i(T)/\rho_i(T_0)$
jako funkcje zredukowanej temperatury θ/T i rezystywność całkowita ρ_T
aluminium (AL 99,9999) oraz współczynnik zmian rezystywności
 $(\rho_{T_{n+1}} - \rho_{T_n}) / (T_{n+1} - T_n)$

T_n	$\frac{\theta}{T_n}$	$\frac{\rho_{iT_n}}{\rho_{i\theta}}$	$\frac{\rho_{iT_n}}{\rho_{iT_0}} = \frac{\rho_{iT_n}}{\rho_{i\theta}} \cdot \frac{\rho_{i\theta}}{\rho_{iT_0}}$	ρ_{T_n}	$\frac{\rho_{T_{n+1}} - \rho_{T_n}}{T_{n+1} - T_n}$
K	-	-	-	$\mu \Omega \text{cm}$	$\mu \Omega \text{cm/K}$
75,00	5,6400	0,0471361	0,0720885	0,1910	-
75,50	5,6026	0,0481094	0,0737771	0,1949	0,0039
76,00	5,5657	0,0491568	0,0751790	0,1992	0,0043
76,50	5,5294	0,0501937	0,0767647	0,2033	0,0041
77,00	5,4935	0,0512283	0,0783472	0,2075	0,0042
77,35	5,4686	0,0519749	0,0794890	0,2106	0,0030

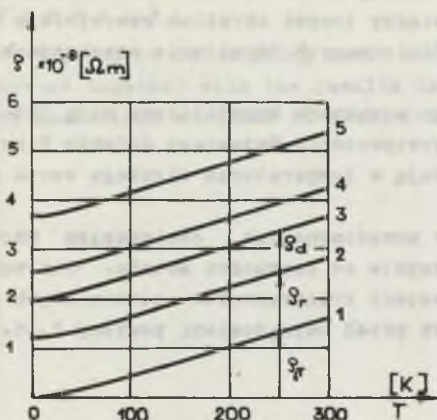
3. Zależność rezystywności metalu od defektów fizycznych i zanieczyszczeń

Rezystywność metalu określają mechanizmy rozproszenia swobodnych elektronów. Rozproszenia elektronów powodowane defektami w strukturze metalu są niezależne od temperatury i niezależne od drgań sieci krystalicznej. Określają one rezystywność szcążkową ρ_0 . Rezystywność szcążkowa jako składowa rezystywności całkowitej (6) określona jest stopniem zdefektowania sieci krystalicznej i nie zależy od temperatury. Defekty sieci krystalicznej mogą mieć dwójaki charakter - fizyczny lub chemiczny. Defekty fizyczne są to nieprawidłowości sieci krystalicznej, wywołane głównie przez dyslokacje i naprężenia mechaniczne. Defekty chemiczne są zaburzeniami sieci krystalicznej powodowane obecnością pierwiastków obcych metali. Rezystywność szcążkowa ρ_0 jako suma składowych rezystywności, powstałych w wyniku rozproszenia elektronów na defektach fizycznych ρ_d i defektach chemicznych ρ_r , określona jest równaniem:

$$\rho_0 = \rho_d + \rho_r \quad (8)$$

Zależność rezystywności całkowitej od defektów chemicznych i fizycznych zilustrowano na przykładzie miedzi, rys. 4. W praktyce czystość i doskonałość kryształów metalu często określa się przez podanie stosunku jego rezystywności w temperaturach otoczenia i ciekłego helu $p = \rho_{293}/\rho_{4,2}$.

Dla wysoko czystych metali stosunek ten, wyrażający temperaturową zmianę rezystywności, osiąga wartości rzędu kilku tysięcy [8].

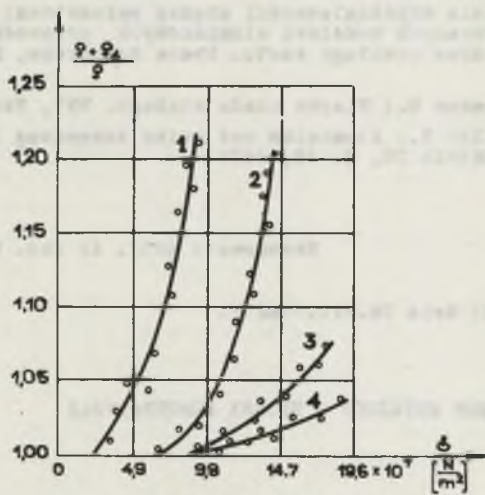


Rys. 4. Rezystywność w zależności od temperatury dla miedzi o różnych stopniach zdefektowania [7]

1 - Cu "czyste"; 2 - Cu + 1,12% N_i; 3 - rezystywność całkowita ($\rho = \rho_{iT} + \rho_r + \rho_d$), 4 i 5 - rezystywności całkowite dla Cu + 2,16% N_i i Cu + 3,32% N_i. Rezystywności: ρ_{iT} - idealna, ρ_r - od zanieczyszczeń; ρ_d - od defektów struktury metalu

W zastosowaniach praktycznych, np. kriotorach wielkopiędowych lub kriokablach istotna jest znajomość wpływu naprężeń mechanicznych w metalu na jego rezystywność. Występujące w niskich temperaturach dylatacje mogą w przypadku nieskutecznego ich kompensowania wywołać w metalu naprężenia powodujące zmiany jego rezystywności.

Badania własne przeprowadzone na aluminiowych przewodnikach w temperaturze ciekłego azotu pozwoliły określić wpływ naprężeń mechanicznych w metalu na jego rezystywność. Wyniki badań przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Rezystywność w temperaturze 77,35 K w zależności od naprężeń σ w aluminium o różnych stopniach czystości metalu,

1 - AL 99,9999; 2 - AL 99,999; 3 - AL 99,9; 4 - AL 99

4. Wnioski

1. Znajomość temperaturowych zmian rezystywności metali ma w krioelektronice istotne znaczenie. Pozwala między innymi określać rzeczywiste rozkłady gęstości mocy Joule'a w zróżnicowanych termicznie przekrojach poprzecznych krioprzewodników.
2. Stopień czystości aluminium i jego struktura krystaliczna mają istotny wpływ na temperaturowe zmiany rezystywności. Natomiast defekty fizyczne i naprężenia mechaniczne powodują w temperaturze ciekłego azotu zauważalne zmiany rezystywności.
3. Zmiany rezystywności przewodników powodowane ich obciążeniem mechanicznym, zależne są w znacznym stopniu od czystości metalu. Dla uniknięcia istotnego wzrostu rezystywności krioprzewodów aluminiowych celowe wydaje się zabezpieczenie ich przed naprężeniami powyżej $2,45 \cdot 10^7$ N/m² (2,5 kg/mm²).

LITERATURA

- [1] White G.K.: Experimental Techniques in low Temperature Physics. Oxford 1959.
- [2] Blatt N.I.: Physics of Electronic Conduction in Solids. Oxford 1967.
- [3] Grüneisen E.: Annale Phys. 14,530 Berlin 1933.
- [4] Mott W.F., Jones H.: Theory of Electrical and Thermal Conductivity in Metals. Springer-Verlag OHG, Berlin 1956.
- [5] Mendelson K., Rosenberg H.M.: Thermal Conductivity of Metals at low Temperatures. Solid State Phys. 1961.
- [6] Piętka E.: Badania współzależności między parametrami elektrycznymi i cieplnymi na wybranych modelach aluminiowych przewodników krótoporowych w temperaturze ciekłego azotu. Praca doktorska, Politechnika Śląska 1979.
- [7] Charles A., Thomson M.: Fizyka ciała stałego. WNT, Warszawa 1974.
- [8] Bergner D., Müller K.: Aluminium und seine Anwendung in der Kryoelektronik. Elektrik 28, H. 19, 1974.

Recenzent: prof. dr inż. Maciej Krakowski

Wpłynęło do redakcji dnia 24.VII.1982 r.

УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ В НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Резюме

Показан способ определения удельного сопротивления металлов в низких температурах и результаты исследований влияния механических напряжений в алюминии на изменение его удельного сопротивления.

Wydawnictwo Naukowe PWN

Warszawa 1962

THE METALS RESISTIVITY IN LOW TEMPERATURES

Summary

The way of calculating metal resistivity in low temperatures is presented together with the results in investigations concerning the effect of mechanical stresses in aluminium on its resistivity changes.

THE METALS RESISTIVITY IN LOW TEMPERATURES
BY J. KUCIŃSKI, J. KUCIŃSKA

WYKŁADY Z FIZYKI METALI, TOM 1, WARSZAWA 1962, STR. 127-132

1. WSTĘP

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań nad zmianami rezystywności metali w niskich temperaturach oraz nad wpływem naprężeń mechanicznych na zmiany rezystywności aluminium.

Wiedza o zmianach rezystywności metali w niskich temperaturach jest ważna dla zrozumienia mechanizmu przewodnictwa w metalach. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań nad zmianami rezystywności aluminium w niskich temperaturach oraz nad wpływem naprężeń mechanicznych na zmiany rezystywności aluminium.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań nad zmianami rezystywności metali w niskich temperaturach oraz nad wpływem naprężeń mechanicznych na zmiany rezystywności aluminium.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań nad zmianami rezystywności metali w niskich temperaturach oraz nad wpływem naprężeń mechanicznych na zmiany rezystywności aluminium.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań nad zmianami rezystywności metali w niskich temperaturach oraz nad wpływem naprężeń mechanicznych na zmiany rezystywności aluminium.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań nad zmianami rezystywności metali w niskich temperaturach oraz nad wpływem naprężeń mechanicznych na zmiany rezystywności aluminium.