

Krzysztof MLECZKO¹
Piotr PTAK²

NISKOTEMPERATUROWE WŁAŚCIWOŚCI REZYSTORÓW RuO₂-SZKŁO

Przedmiotem badań były rezystory grubowarstwowe RuO₂-szkło o znanym składzie, wykonane w warunkach laboratoryjnych. Przeprowadzono pomiary rezystancji i szumów nadmiarowych typu 1/f w funkcji temperatury, w zakresie 30 mK - 300 K oraz w funkcji pola magnetycznego do 5 T. Rezystory RuO₂-szkło dobrze nadają się do wykorzystania w roli kriogenicznych czujników temperatury ze względu na dużą czułość i małą magnetorezystancję. Porównanie tych parametrów z parametrami czujników komercyjnych pozwala stwierdzić, że są to przyrządy tej samej klasy. Badane rezystory charakteryzuje duży wzrost poziomu szumów nadmiarowych w zakresie temperatur kriogenicznych, przez co ograniczeniu ulega rozdzielczość pomiaru temperatury. Na podstawie pomiarów tych szumów określono rzeczywistą rozdzielczość pomiaru rezystancyjnych czujników temperatury. Dokonano także krytycznej analizy mechanizmów przewodnictwa najczęściej stosowanych do opisu rezystorów wykonanych na bazie RuO₂. Pomiary temperaturowej zależności rezystancji pozwalają odrzucić model przewodnictwa skokowego zmiennozakresowego dla tego typu rezystorów. Z kolei pomiary szumów dają dobrą zgodność z jedną z teorii w ramach tego modelu przewodnictwa. Dla próbek badanych w pracy określono krytyczną koncentrację składnika metalicznego w warstwie rezystywnej, przy której następuje przejście metal-izolator.

Słowa kluczowe: rezystory grubowarstwowe, termometry kriogeniczne, rozdzielczość pomiaru, mechanizm przewodnictwa, magnetorezystancja, szumy 1/f

1. Wstęp

Rezystory grubowarstwowe na bazie związków rutenu (obecnie najczęściej RuO₂ lub Bi₂Ru₂O₇) wykazują bardzo atrakcyjne właściwości użytkowe. Z tego względu są często stosowane we wszystkich dziedzinach elektroniki – od sprzętu powszechnego użytku po zastosowania specjalne, np. w motoryzacji czy wojskowości. Oprócz tradycyjnego wykorzystania w mikroelektronice [[6], [13], [30]], rezystory grubowarstwowe odgrywają istotną rolę jako różnego rodzaju czujniki

¹ Autor do korespondencji: Krzysztof Mleczko, Politechnika Rzeszowska, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, 0178651113, kmleczko@prz.edu.pl

² Piotr Ptak, Politechnika Rzeszowska, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, 0178651113, pptak@prz.edu.pl.

[[31]]. Szczególnie istotne jest ich zastosowanie do pomiaru niskiej temperatury [[2], [22], [41], [47], [48]], a także jako czujników piezorezystancyjnych [[5], [6], [10]] czy też czujników wielkości chemicznych [[15], [23]].

Pomimo tak szerokiego zastosowania rezystorów RuO₂-szkło w różnych dziedzinach ciągle prowadzi się ich badania. Można je umownie podzielić na dwie grupy. Pierwsza to badania technologiczne, druga – badania podstawowe. Badania technologiczne mają na celu dalszą poprawę parametrów techniczno-użytkowych rezystorów oraz poszukiwanie nowych obszarów ich zastosowania. Badania podstawowe są ukierunkowane na identyfikację mechanizmu przewodnictwa występującego w tych rezystorach. Mimo iż badania na tym polu rozpoczęto z końcem lat 60. ubiegłego wieku i poświęcono im wiele prac, np. [[1], [3], [7], [8], [17], [20], [29], [32], [34], [39]], mechanizm ten nadal pozostaje niewyjaśniony.

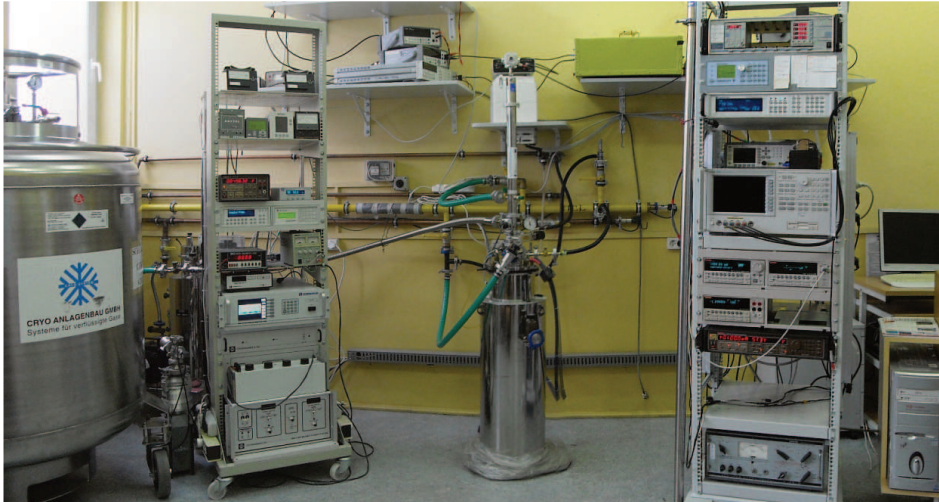
Nieocenionym narzędziem w badaniach właściwości elektrycznych (i nie tylko) materiałów są pomiary niskotemperaturowe. Niska temperatura pozwala na obserwację zjawisk, które normalnie są „maskowane” przez oddziaływania termiczne. Drugim bardzo użytecznym narzędziem w połączeniu z niską temperaturą jest pole magnetyczne.

W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia dotyczące właściwości i zastosowania rezystorów RuO₂-szkło, w których wykorzystano wyniki pomiarów przeprowadzonych w niskiej temperaturze. Pomiary w zakresie 0,3 – 300 K zostały wykonane w Laboratorium Kriomagnetycznym Katedry Podstaw Elektroniki PRZ, natomiast część pomiarów poniżej 1 K (w zakresie 30 mK – 1 K) w Instytucie Fizyki PAN w Warszawie. Badano rezystory wykonane laboratoryjnie, zawierające jedynie RuO₂ i szkło ołowiowo-boro-krzemowe w ściśle określonych proporcjach. Zawartość fazy przewodzącej w paśmie rezystywnej określana jest wartością ułamka objętościowego v . W celach porównawczych przeprowadzono również pomiary właściwości komercyjnego czujnika typu Rox RX-202A. Jest on także rezystorem grubowarstwowym wykonanym na bazie związków rutenu. Ponadto służył jako czujnik temperatury w użytych systemie pomiarowym.

2. System pomiarowy i metodyka pomiarów

Pomiary w zakresie 0,3 K – 300 K prowadzone były w systemie kriomagnetycznym, znajdującym się w Laboratorium Kriomagnetycznym Katedry Podstaw Elektroniki (rys. 1). Kriostat firmy Cryo Industry of America umożliwia uzyskanie temperatury 0,3 K dzięki wykorzystaniu ³He. System wyposażony jest w magnes nadprzewodzący firmy Cryomagnetics, mogący wytworzyć pole magnetyczne o wartości do 10 T. Do jego zasilania służy zasilacz 4G-100 firmy Cryomagnetics o prądzie wyjściowym 100 A. Może on pracować czteroćwiartkowo, co umożliwia płynne przejście przez zero przy zmianie kierunku pola magnetycznego. Temperatura próbki mierzona jest za pomocą dwóch termometrów firmy Lake Shore: Cernox – w przedziale 0,3 – 325 K i Rox – w przedziale 0,3 K – 40 K. Są to czujniki

rezystancyjne o ujemnym współczynniku temperaturowym. Do odczytu i regulacji temperatury służy kriogeniczny regulator temperatury CryoCon 62, wykorzystujący przemiennoprądową metodę pomiaru rezystancji. Przy pomiarach magnetorezystancji, ze względu na zależność wskazań czujników od pola magnetycznego, stosowano metodę regulacji temperatury opartą na kontroli ciśnienia ^3He w komorze próbki [[25]].



Rys. 1. Laboratorium Kriomagnetycznego w Katedrze Podstaw Elektroniki

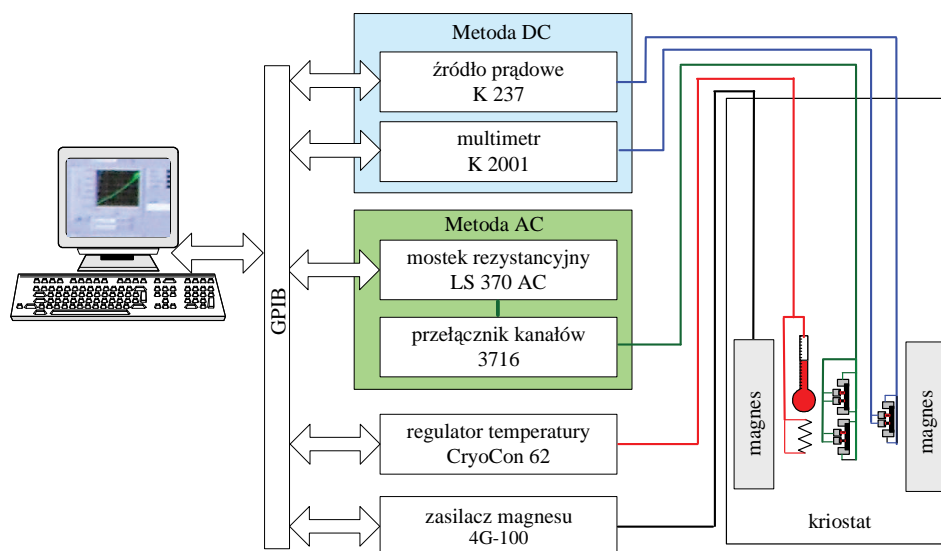
Fig. 1. Cryomagnetic Laboratory in Department of Electronics Fundamentals

W pomiarach zależności $R(T)$ i $R(B)$ rezystancja próbek mierzona była czteroprzewodowo. Stosowano metodę zarówno stałoprądową jak i przemiennoprądową. W metodzie stałoprądowej wykorzystywano źródło prądowo-napięciowe K 237 i multimetr K 2001 firmy Keithley. Przyrząd K 237, pracując jako źródło prądowe, może dostarczać prąd w zakresie od 100 fA do 100 mA przy jednoczesnym pomiarze napięcia od 10 μV do 1100 V. Multimetr K 2001, mierzący napięcie na próbce, ma rozdzielczość 7 i 1/2 cyfry i może mierzyć napięcia stałe w granicach od 10 nV do 1100 V. Przy pomiarach w niskiej temperaturze niezwykle istotne jest zminimalizowanie ciepła dostarczanego do próbki. Każdy pomiar powoduje przepływ prądu przez próbkę i wydzielanie się w niej ciepła. Aby dobrać odpowiednią wartość prądu, mierzono w danej temperaturze zależność $R(I)$. Po przekroczeniu pewnej granicznej wartości prądu płynącego przez próbkę jej rezystancja zmieniała się na skutek podgrzania. Do dalszych pomiarów przyjmowano wartość prądu nieco mniejszą od tej powodującej zmianę rezystancji. Aby wyeliminować siły termoelektryczne, powstające na połączeniach przewodów, napięcie na próbce mierzono przy dwóch kierunkach prądu. Metoda przemiennoprądowa pozwala ograniczyć moc wydzielaną w próbce do poziomu nawet pW. W tej me-

todzie nie występuje również problem sił termoelektrycznych. Przyrządem wykorzystującym tę metodę jest tzw. wzmacniacz fazoczuły (*lock-in amplifier*). W pomiarach korzystano ze wzmacniacza SR 530 firmy Stanford Research Systems, jednak podstawowym przyrządem pomiarowym jest mostek rezystancyjny Lake Shore 370AC, działający na tej samej zasadzie. Jest to specjalizowany przyrząd przeznaczony do pomiaru rezystancji w warunkach kriogenicznych, szczególnie w przedziale temperatury 20 mK – 1 K. Zakres mierzonych rezystancji wynosi 2 m Ω – 2 M Ω . Ponadto korzystano także z mostka Stanford Research System SIM 921 o zakresie 1 m Ω – 100 M Ω .

Schemat układu pomiarowego przedstawia rys. 2. Wszystkie przyrządy pomiarowe pracują pod kontrolą komputera. Oprogramowanie sterujące zostało napisane w środowisku LabVIEW. Wyniki pomiarów od razu przedstawiane są na ekranie komputera w postaci wykresów. Dzięki zastosowaniu przełącznika kanałów (skanera) firmy Lake Shore model 3716, współpracującego z mostkiem LS 370, możliwy jest jednoczesny pomiar kilku próbek. Ponadto możliwe jest użycie różnych metod (stałoprądowej i przemiennoprądowej) w tym samym czasie.

Pomiary w najniższej temperaturze – do 30 mK – wykonano w chłodziarce rozcieńczalnikowej metodą przemiennoprądową (w IF PAN).

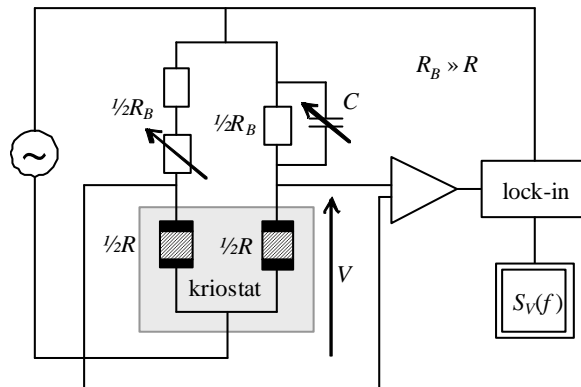


Rys. 2. Schemat układu do pomiaru zależności $R(T)$ i $R(B)$

Fig. 2. System setup used in $R(T)$ and $R(B)$ measurements

Pomiary szumów rezystorów wykonano techniką przemiennoprądową, w której stosuje się detekcję fazoczułą [[36], [42]]. Głównymi zaletami tej techniki są: mała moc rozpraszana w próbce, która ogranicza możliwość jej samona-

grzewanie oraz ograniczenie szumów przedwzmacniacza w zakresie niskich częstotliwości [[38]]. Umożliwia to pomiar sygnału (szumów) przy wartości częstotliwości mniejszej niż 1 Hz. Schemat układu pomiarowego przedstawia rys. 3. Zastosowanie techniki przemiennoprądowej wymaga użycia dwóch próbek (rezystorów), umieszczanych w ramionach mostka. Istotne zatem jest, aby oba rezystory, oprócz identycznych rozmiarów, charakteryzowały się jak najbardziej zbliżonymi parametrami takimi jak rezystancja, czy temperaturowy współczynnik rezystancji (TWR).



Rys. 3. Schemat układu do pomiaru szumów techniką przemiennoprądową

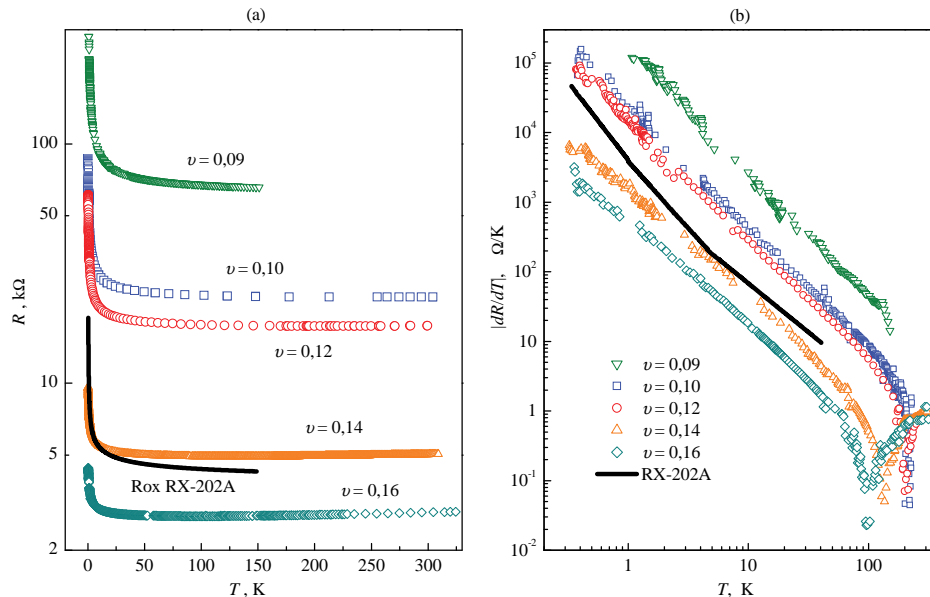
Fig. 3. Experimental circuit for AC noise measurements

Górne ramiona mostka tworzą drutowe rezystory szeregowo oraz pojemność C . Elementy nastawne służą równoważeniu mostka. Wartość rezystancji szeregowo- R_B , powinna być znacznie większa od rezystancji R badanych rezystorów. Mostek zasilany jest napięciem przemiennym. Po zrównoważeniu, sygnał z przekątnej mostka podaje się do przedwzmacniacza (stosowano wzmacniacz PAR model 5186), następnie do wzmacniacza lock-in (PAR model 5105) i do analizatora widma sygnału (HP 35660A), w którym wyznacza się funkcję gęstości widmowej mocy. W ten sposób mierzone jest całkowite widmo szumów, składające się z widma szumu nadmiarowego, $S_{V_{ex}}$ oraz widma szumu tła. Widmo szumu tła mierzy się w warunkach braku polaryzacji próbek. Następnie od całkowitego widma szumów, zmierzonego przy danym napięciu V , odejmuje się widmo szumu tła i w ten sposób oblicza widmo szumu nadmiarowego typu $1/f$, $S_{V_{ex}}$. Dla danej pary rezystorów pomiary wykonywano w stałej temperaturze, w paśmie częstotliwości 0,03125 – 10 Hz i przy różnych wartościach skutecznego napięcia V polaryzującego próbki.

3. Rezystory RuO₂-szkło jako czujniki temperatury

3.1. Podstawowe właściwości

Jednym z zastosowań rezystorów opartych na RuO₂ jest termometria nisko-temperaturowa. Wynika to z niewielkich kosztów ich wytwarzania, dobrej stabilności i powtarzalności parametrów, ale przede wszystkim specyficznych właściwości w tym zakresie temperatury – stromej zależnością rezystancji R od temperatury T i związanej z tym dużej czułości, określanej jako dR/dT [[26], [49]]. Czujniki temperatury na bazie dwutlenku rutenu są przyrządami typu rezystancyjnego z ujemnym temperaturowym współczynnikiem rezystancji. Charakterystyki temperaturowe kilku rezystorów, o zawartości RuO₂ od 9% ($\nu = 0,09$) do 16% ($\nu = 0,16$), przedstawiono na rys. 4a. Widoczna jest bardzo słaba zależność R od T w szerokim zakresie temperatury i gwałtowny wzrost rezystancji dla najniższych wartości temperatury. Dzięki temu, w zakresie temperatury kriogenicznej, ich czułość jest bardzo duża. Na rys. 4b porównano wartości dR/dT badanych rezystorów i czujnika typu Rox RX-202A firmy Lake Shore. Widać,

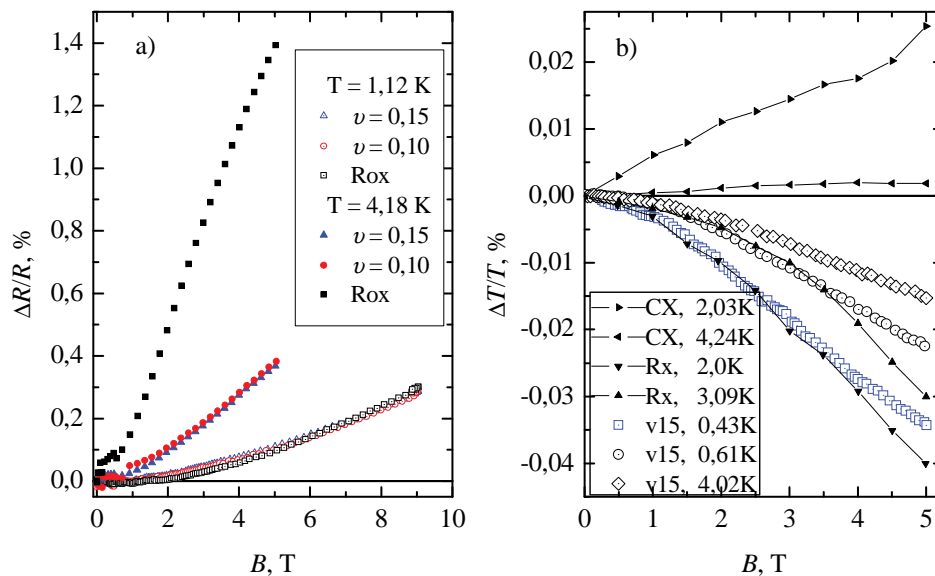


Rys. 4. (a) Zależność rezystancji R od temperatury T badanych rezystorów (o różnej zawartości objętościowej RuO₂) oraz czujnika RX-202A, (b) zależność czułości temperaturowej $|dR/dT|$ od temperatury T , wyznaczona na podstawie charakterystyk z rys. (a) [[36]]

Fig. 4. (a) Resistance R versus temperature T measured for resistors (with different volume fraction of RuO₂) and for RX-202A sensor, (b) temperature sensitivity $|dR/dT|$ versus temperature T , calculated for curves from Fig. (a) [[36]]

że są one podobne. Można zatem stwierdzić, że samodzielnie przygotowane próbki są przyrządami tej samej klasy, co czujniki komercyjne.

Oprócz silnej zależności rezystancji od temperatury i bardzo dużej czułości, rezystory RuO₂-szkło charakteryzują się bardzo małą magnetorezystancją. Ma to duże znaczenie w technice niskich temperatur, w której badania często są prowadzone w obecności bardzo silnych pól magnetycznych. Zmiana rezystancji czujnika pod wpływem pola magnetycznego jest źródłem błędów przy pomiarze temperatury. Na rys. 5 pokazano względną zmianę rezystancji dwóch wybranych rezystorów oraz błąd pomiaru temperatury, wynikający z tych zmian, w porównaniu z magnetorezystancją i błędami czujników komercyjnych Rox i Cernox [[46]].



Rys. 5. Wpływ pola magnetycznego na rezystancję rezystorów RuO₂-szkło oraz czujników Rox i Cernox (CX): a) względne zmiany rezystancji, b) błędy odczytu temperatury [[26]]

Fig. 5. Influence of the magnetic field on the resistance of RuO₂ resistors as well as Rox and Cernox (CX) sensors: a) relative resistance changes, b) temperature reading errors [[26]]

W temperaturze 4 K magnetorezystancja czujnika Rox i badanych próbek jest na tym samym poziomie (rys. 5a). Jednak w miarę obniżania temperatury uwidacznia się znacznie większa wrażliwość czujnika na wpływ pola magnetycznego. Przekłada się to na większe błędy pomiaru temperatury. Na rys. 5b widać, że w temperaturze 2 K wynosi on tyle, co błąd rezystora $\nu = 0,15$ w temperaturze 0,43 K. W temperaturze 4 K prawie zerowy błąd wykazuje czujnik Cernox, który jest specjalnie optymalizowany w tym celu.

3.2. Rozdzielczość pomiaru temperatury

Względna rozdzielczość pomiaru temperatury $\varepsilon_T = \Delta T/T$ czujników temperatury typu rezystancyjnego jest określona przez rozdzielczość pomiaru rezystancji $\varepsilon_R = \Delta R/R$, zgodnie z zależnością [[9]]:

$$\varepsilon_T = \frac{\varepsilon_R}{A} \quad (1)$$

gdzie ΔT i ΔR są bezwzględными rozdzielczościami pomiaru temperatury i rezystancji. Definiuje się je jako najmniejszą zmianę parametru, jaką można zmierzyć. Wielkość A jest czułością właściwą (bezwymiarową), którą dla czujnika rezystancyjnego definiuje się jako $A \equiv |d \ln R / d \ln T|$. Można ją wyznaczyć na podstawie krzywej kalibracji czujnika $R(T)$. Z równania (1) wynika, że rozdzielczość pomiaru temperatury może być określona, jeśli tylko ustalona zostanie rozdzielczość pomiaru rezystancji.

Jak już wspomniano, do precyzyjnych pomiarów rezystancji stosuje się tzw. przemiennoprądowe mostki rezystancyjne wykorzystujące technikę detekcji fazoczułej. Producenci urządzeń pomiarowych definiują rozdzielczość pomiaru rezystancji uwzględniając jedynie szum przyrządu pomiarowego i szum termiczny czujnika w temperaturze pokojowej [[21], [45]]. Rezystory typu RuO₂-szkło charakteryzują się dużym poziomem szumu nadmiarowego w zakresie temperatur kriogenicznych [[37]] i z tego względu powyższa definicja nie określa rzeczywistej rozdzielczości pomiaru rezystancji.

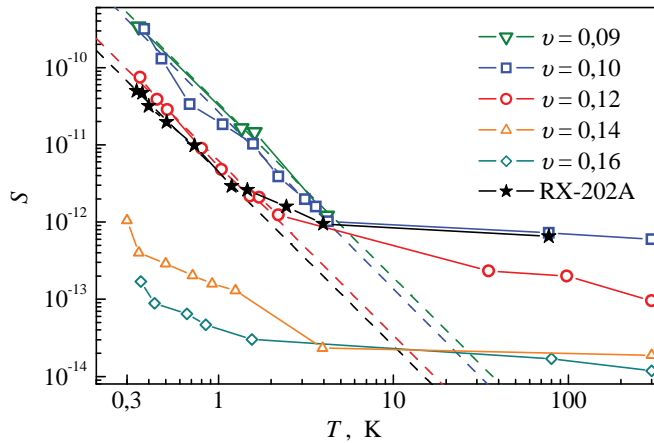
Rys. 6 przedstawia zależność intensywności szumów nadmiarowych od temperatury zmierzona dla rezystorów RuO₂-szkło oraz czujnika RX-202A. Intensywność szumów jest określona wzorem [[36]]:

$$S \equiv \frac{\langle S_{vex}(f) \cdot f \rangle}{V^2} \quad (2)$$

gdzie $S_{vex}(f)$ jest gęstością widmową mocy szumu nadmiarowego, a V – napięciem polaryzującym próbkę. Jest to wielkość bezwymiarowa, niezależna od częstotliwości i napięcia, ale zależna od temperatury [[36]]. Jak widać na rys. 6, intensywność szumów gwałtownie wzrasta wraz z obniżaniem temperatury. Poniżej 4 K następuje wzrost S nawet o dwa rzędy wielkości, gdy temperatura maleje do 0,3 K. Tak duża zmiana występuje w odniesieniu do rezystorów o mniejszej zawartości składnika przewodzącego ($v = 0,09$, $v = 0,10$ i $v = 0,12$) oraz czujnika RX-202A. W wypadku tych elementów zależność $S(T)$ można w zakresie niskich wartości temperatury aproksymować funkcją potęgową

$$S = a \cdot T^{-2,26} \quad (3)$$

gdzie a jest stałą, a wartość wykładnika jest podobna dla wymienionych wyżej rezystorów i wynosi około 2,26.



Rys. 6. Intensywność szumów S w funkcji temperatury T zmierzona dla rezystorów o różnej wartości ν oraz dla czujnika RX-202A. Linie kreskowane są wykresami równania (3) z różnymi wartościami parametru a [[36]]

Fig. 6. Noise intensity S versus temperature T measured for resistors with different values of ν and for RX-202A sensor. Dashed lines are the plots of equation (3) with different values of a parameter for each sample [[36]]

Ze względu na wzrost szumów nadmiarowych w zakresie niskich wartości temperatury ograniczeniu ulega rozdzielczość pomiaru rezystancji – przy wyznaczaniu tej rozdzielczości należy uwzględnić również szum nadmiarowy. W takiej sytuacji względna rozdzielczość pomiaru rezystancji, przy polaryzacji czujnika ze źródła prądowego prądem o stałej wartości skutecznej, wynosi:

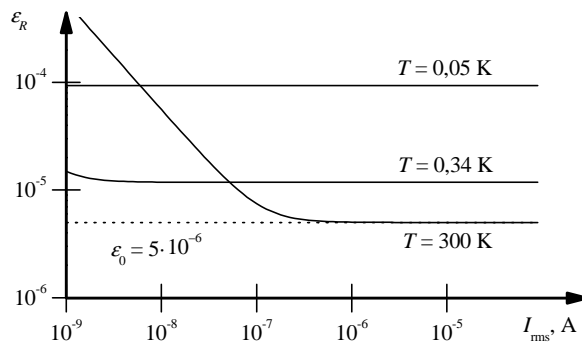
$$\varepsilon_R = \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta V}{V} \cong \sqrt{\varepsilon_0^2 + \varepsilon_{th}^2 + \varepsilon_S^2} \cong \sqrt{\varepsilon_0^2 + \frac{4kTf_g}{I_{rms}^2 R} + \int_{1/t}^{f_g} \frac{S}{f} df} \quad (4)$$

gdzie ε_0 jest względną rozdzielczością przyrządu pomiarowego, ε_{th} jest względną rozdzielczością związaną z szumem termicznym czujnika, a ε_S jest względną rozdzielczością pomiaru rezystancji, związaną z szumem nadmiarowym typu $1/f$ czujnika (rezystora), k jest stałą Boltzmanna, $f_g = 1/12$ Hz jest szerokością pasma szumowego dolnoprzepustowego filtra jednobiegunowego przyrządu pomiarowego (wartość ta odpowiada stałej czasowej wzmacniacza lock-in, $\tau = 3$ s [[21], [45]]), I_{rms} jest skuteczną wartością prądu polaryzującego czujnik, t jest czasem pomiaru.

Teoretycznie możliwy jest pomiar rezystancji z rozdzielczością $\varepsilon_0 = 10^{-6}$ [[21], [45]]. Jednak w rzeczywistych warunkach pomiarowych trudno uzyskać tak dużą rozdzielczość – eksperymentalnie ustalona wartość ε_0 stosowanego w pomiarach urządzenia wynosi około $5 \cdot 10^{-6}$. Rozdzielczość ε_{th} zależy od prądu I_{rms} . Z równania (4) widać, że można poprawić ten składnik rozdzielczości stosu-

jąc większą wartość prądu polaryzującego; może to jednak doprowadzić do samonagrzewania się badanego elementu. Rozdzielczość ε_S może być wyznaczona na podstawie zmierzonej wcześniej intensywności szumów, po obliczeniu całki z równania (4): $\varepsilon_S = \sqrt{S \ln(tf_g)}$. Wartość iloczynu tf_g przyjęto jako równą 10. Taka wartość jest konieczna, aby czas pomiaru t był przynajmniej o rząd wielkości większy niż stała czasowa filtra wyjściowego przyrządu pomiarowego. W przeciwieństwie do ε_{th} , rozdzielczość ε_S nie zależy od wartości prądu polaryzującego, a przez to nie da się jej poprawić przez zwiększenie wartości prądu I_{rms} . Dla rezystorów $\nu = 0,09$, $\nu = 0,10$ i $\nu = 0,12$ oraz czujnika RX-202A charakter zależności ε_S od temperatury jest taki sam, jak zależności intensywności szumów S .

Zakładając, że intensywność szumów S badanych rezystorów wraz ze zmniejszaniem temperatury jest opisana równaniem (3) również w zakresie wartości temperatury mniejszych niż te, w których przeprowadzono pomiary, można wyznaczyć rozdzielczość ε_R w temperaturze $T = 50$ mK. Jest to najniższa temperatura, w której skalibrowany jest komercyjny czujnik RX-202A. Rys. 7 przedstawia wykres całkowitej względnej rozdzielczości pomiaru rezystancji ε_R , wyznaczonej na podstawie równań (3) i (4) w funkcji prądu pomiarowego I_{rms} , sporządzony dla czujnika RX-202A i różnych wartości temperatury [[36]].



Rys. 7. Względna rozdzielczość pomiaru rezystancji ε_R dla czujnika RX-202A w funkcji prądu polaryzującego czujnik I_{rms} . Wykresy przedstawiają rozdzielczość dla różnych wartości temperatury T i odpowiadającej jej rezystancji. Linia kropkowana określa rozdzielczość przyrządu pomiarowego, $\varepsilon_0 = 5 \cdot 10^{-6}$

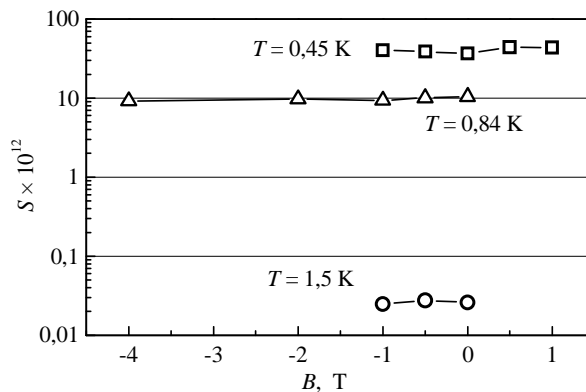
Fig. 7. Relative resolution of resistance measurement, ε_R , as a function of the biasing current I_{rms} , for RX-202A sensor coupled to the instrument with relative resolution of $\varepsilon_0 = 5 \cdot 10^{-6}$ (dotted line)

Na rys. 7 widać, że w temperaturze $T = 50$ mK całkowita rozdzielczość pomiaru rezystancji czujnika RX-202A wynosi około 10^{-4} (0,01%). Tak mała rozdzielczość wynika z dużego poziomu szumu nadmiarowego typu 1/f. Zatem kalibro-

wanie czujników temperatury typu Rox z dokładnością 0,0001% nie oznacza, że temperatura zostanie zmierzona z tak dużą dokładnością.

Czułość właściwa A badanych rezystorów oraz czujnika Rox w zakresie najmniejszych wartości temperatury jest rzędu jedności [[38]]. Zatem, zgodnie z równaniem (1), w zakresie najmniejszych wartości temperatury rozdzielczość jej pomiaru, ε_T , jest również ograniczona do 0,01%.

Przeprowadzono również pomiary intensywności szumów S w obecności pola magnetycznego [[35]]. Wyniki takich pomiarów dla rezystorów $\nu = 0,12$ i $\nu = 0,16$ przedstawia rys. 8. Widać, że wartości S , zmierzone w ustalonej temperaturze, nie zależą od indukcji pola magnetycznego B . Można zatem wnioskować, że obecność pola magnetycznego nie wpływa na rozdzielczość pomiaru temperatury.



Rys. 8. Intensywność szumów S w funkcji indukcji pola magnetycznego B zmierzona dla rezystorów $\nu = 0,12$ w temperaturze $T = 0,84$ K (trójkąty) i $T = 0,45$ K (kwadraty) oraz dla rezystorów $\nu = 0,16$ w temperaturze $T = 1,5$ K (koła)

Fig. 8. Noise intensity S versus magnetic field induction B measured for resistors $\nu = 0,12$ at temperature $T = 0,84$ K (triangles), at $T = 0,45$ K (squares) and for resistors $\nu = 0,16$ at temperature $T = 1,5$ K (circles)

4. Mechanizmy przewodnictwa

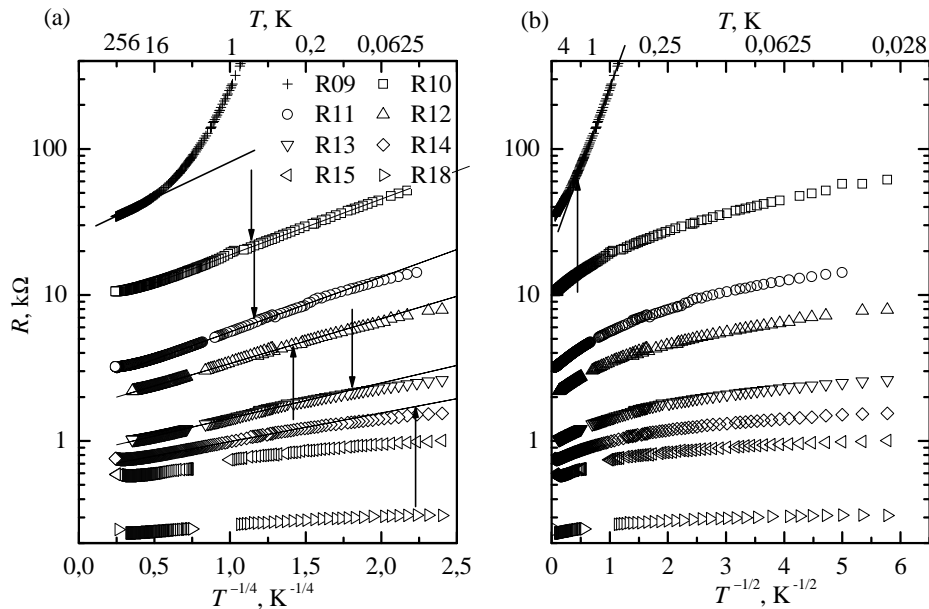
Do opisu przewodnictwa w rezystorach rutenowych stosowane są różne modele. Jednak jednym z najczęściej stosowanych modeli przewodnictwa, a jednocześnie budzącym najwięcej kontrowersji, jest model przewodnictwa skokowego zmiennozakresowego VRH (*variable range hopping*). Teoria przewodnictwa skokowego została opracowana dla półprzewodników. Jednak okazało się, że zależność opisująca rezystywność ρ od temperatury:

$$\rho(T) = \rho_0 \exp\left(\frac{T_0}{T}\right)^p \quad (5)$$

gdzie ρ_0 i T_0 są stałymi, dobrze aproksymuje dane eksperymentalne również dla rezystorów rutenowych [[34]]. Przyjęto zatem, że tu również występuje przewodnictwo skokowe, nie uwzględniając ograniczeń, które narzuca teoria. Z teorii wynika, że wykładnik p może przyjmować jedynie określone wartości, np. $1/3$ w systemach dwuwymiarowych (2D) czy $1/4$ lub $1/2$ w systemach trójwymiarowych (3D). Fakt ten często pomija się w badaniach eksperymentalnych próbek, w których przewodnictwo VRH jest wskazywane jako dominujący mechanizm. Często wartości wykładnika p różnią się od podanych. Na przykład w [[48]] uzyskano wykładnik $p = 0,345$, jednakowy dla rezystorów różniących się rezystancjami ze względu na różną geometrię. Z kolei w [[2]] dla rezystorów wykonanych

z różnych past otrzymano różne wartości wykładnika p .

Zasadnicze zastrzeżenia budzi porównanie parametru T_0 z zakresem stosowania się prawa Motta, które ograniczone jest do temperatury $T \ll T_0$, co często pozostaje w sprzeczności z danymi eksperymentalnymi. Na rys. 9 przedstawiono zależności $\log R$ w funkcji $T^{-1/4}$ lub $T^{-1/2}$ dla rezystorów o różnej zawartości RuO₂.



Rys. 9. Charakterystyki temperaturowe rezystorów R9 ÷ R18 ($v = 0,09 \div v = 0,18$) narysowane w układach współrzędnych $\log R - T^{-1/4}$ (a) i $\log R - T^{-1/2}$ (b)

Fig. 9. R vs. T characteristics for R9 ÷ R18 ($v = 0,09 \div v = 0,18$) resistors plotted in $\log R - T^{-1/4}$ (a) and $\log R - T^{-1/2}$ (b) coordinates

Strzałkami zaznaczono wartości T_0 wyznaczone w procedurze dopasowania. Jak widać, na ogół leżą one w zakresie, gdzie jest spełnione równanie (5). Podobne zależności otrzymano w [[1]]. Analizowane tam przejście od $p = 1/4$ do $p = 1/2$,

ma miejsce jedynie w przypadku próbki R9. Ponadto wielkości wyznaczone na podstawie parametru T_0 powinny być fizycznie akceptowalne, np. wyznaczona wartość długości lokalizacji nie powinna przekraczać $1 \mu\text{m}$, gdyż zjawisko przewodnictwa skokowego dotyczy stanów silnie zlokalizowanych. Ten aspekt poruszony jest w pracach [[7], [39]], w których pomiary charakterystyk temperaturowych przeprowadzono w zakresie od 50 mK do 20 K. Wyznaczona wartość promienia lokalizacji, równa $2 \mu\text{m}$, jest znacznie większa niż średnie rozmiary skupisk

RuO_2 , oszacowane za pomocą mikroskopu skaningowego [[29]].

W ramach mechanizmu przewodnictwa skokowego istnieje kilka teorii, które nie są jednoznaczne. O występowaniu określonego rodzaju przewodnictwa można wnioskować również na podstawie pomiarów szumów nadmiarowych typu $1/f$. W kontekście otrzymanych wyników pomiarów szumów, przedstawionych na rys. 6, można odrzucić te z nich, które przewidują inną niż potęgową zależność intensywności szumów od temperatury, czyli teorię dotyczącą wzbudzeń wieloelektronowych [[14], [24]] oraz dającą zbliżone rezultaty koncepcję, w której zakłada się wymianę ładunku między nieskończonym pękiem przewodzącym a pękami izolowanymi [[44]]. W obu tych wypadkach szum maleje, gdy $T \rightarrow 0$, co jest w ewidentnej sprzeczności z otrzymanymi wynikami. Nie pasuje do nich również teoria dotycząca modulacji liczby nośników ładunku przez pułapki (rzadkie izolowane donory), ze względu na inny charakter wzrostu intensywności szumu przy obniżaniu temperatury – wykładniczą zależność typu $\exp(-T^3)$ dla przewodnictwa skokowego opisanego prawem Efrosa-Shklovskiego oraz $\exp(-T)$ dla przewodnictwa skokowego opisanego prawem Motta [[28], [43]].

Dość dobre przybliżenie wykładniczej zależności intensywności szumów od temperatury, $S \sim T^{-2.26}$, otrzymanej dla rezystorów o mniejszej zawartości RuO_2 , daje teoria dotycząca fluktuacji rezystancji w krytycznej ścieżce przewodzącej, wywoływanych przez modulator dwustanowy [[16], [33]]. Na podstawie tej teorii obliczono wartość wykładnika w zależności $S(T)$ [[38]]. W wypadku przewodnictwa skokowego opisanego prawem Motta ($p = 1/4$), dla potencjału dipolowego modulatora otrzymano zależność $S \sim T^{-1.66}$, a dla potencjału Coulomba: $S \sim T^{-2.28}$. Natomiast w wypadku przewodnictwa skokowego opisanego prawem Efrosa-Shklovskiego ($p = 1/2$), dla potencjału dipolowego otrzymano zależność $S \sim T^{-3.32}$, a dla potencjału Coulomba: $S \sim T^{-4.07}$. Widać bardzo dobrą zgodność otrzymanych wyników z teoretyczną zależnością dotyczącą przewodnictwa skokowego opisanego prawem Motta, na które wpływa kulombowski potencjał układu dwustanowego. Jednak istnieje rozbieżność przy interpretacji zależności rezystancji od temperatury, na co wskazano wcześniej. W świetle omówionych wyników koncepcja przewodnictwa skokowego, jako dominującego mechanizmu przewodnictwa wciąż pozostaje kwestią otwartą.

Innym mechanizmem przewodnictwa, proponowanym dla rezystorów RuO₂-szkło, jest model słabej lokalizacji, dla którego przewiduje się tłumienie poziomu szumów rezystancyjnych pod wpływem pola magnetycznego o połowę [[1]]. Przeprowadzone pomiary intensywności szumów w obecności pola magnetycznego, których wyniki pokazano na rys. 8, wskazują, że poziom szumów nie zależy od indukcji pola magnetycznego, czyli nie zachodzi żadne tłumienie. Wyniki te jednak nie pozwalają na zdecydowane odrzucenie występowania tego zjawiska w badanych rezystorach, ponieważ teoretycznie możliwa jest sytuacja, w której zjawisko odpowiedzialne za rezystancję jest inne niż to, które jest źródłem szumu [[38]].

5. Przejście metal-izolator

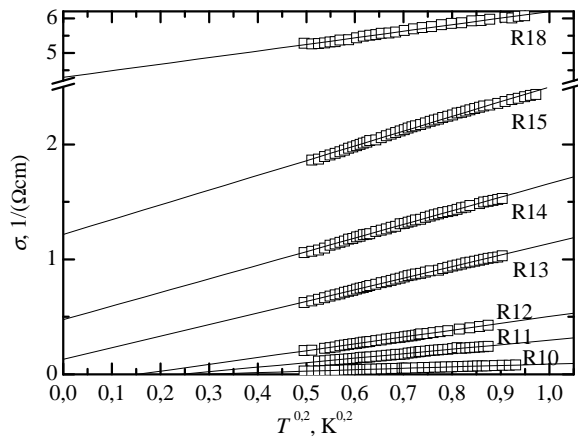
Pomiary charakterystyk temperaturowych rezystorów o różnej zawartości składnika metalicznego (RuO₂) pokazały, że następuje zmiana TWR od wartości dodatniej ($\nu = 0,6$) do ujemnej ($\nu = 0,1$) w całym przedziale [[17]]. Następuje zatem przejście od charakteru metalicznego próbki (TWR > 0) do charakteru izolatora (TWR < 0). Ze wzrostem nieuporządkowania wartość $d\rho/dT$ maleje i przy dostatecznie silnym nieuporządkowaniu zmienia znak. W wielu pracach taka zmiana TWR jest traktowana jako oznaka przejścia metal-izolator (m-i) typu Andersona [[4], [12]].

W badaniach przejścia m-i często stosowanym podejściem jest dopasowanie danych pomiarowych w zakresie niskich wartości temperatury równaniem:

$$\sigma(T) = \sigma(0) + bT^y \quad (6)$$

gdzie σ jest konduktywnością. Możliwe jest wtedy oszacowanie wartości $\sigma(0)$ dla próbek o różnym stopniu nieuporządkowania (w tym wypadku ν). Teoretycznie akceptowalne wartości wykładnika y mieszczą się w przedziale między 2/9 a 4 [[11], [40]], chociaż w eksperymentach otrzymuje się wartości jeszcze mniejsze, np. $y = 0,19$ [[27]]. Dopasowanie wartości $\sigma(0)$ w funkcji nieuporządkowania, ν , zależnością potęgową, oczekiwaną w okolicy przejścia m-i prowadzi do wyznaczenia nieuporządkowania ν_q , przy którym „zerotemperaturowa” konduktywność znika. Wynik dopasowania danych przedstawiono na rys. 10. Do oszacowania wykładnika y użyto podejścia różniczkowego [[19], [40]]. Konduktywność przeliczono z zależności σ od T na zależność $\log(d\sigma/dT)$ od $\log T$ i dopasowano równaniem linii prostej. Jednoczesna optymalizacja wszystkich serii danych daje wartość $y = 0,2$. Optymalizację przeprowadzono dla danych z przedziału $0,03 \div 1$ K by uniknąć ewentualnego wpływu zmiany wykładnika y ze zmianą temperatury. Rezystory z zawartością ν składnika metalicznego równą 0,13 i więcej mają dodatnie wartości $\sigma(0)$. Oznacza to, że rezystory te znajdują się po stronie metalicznej przejścia metal-izolator. Natomiast rezystory z zawartością $\nu = 0,12$ i mniejszą, dla których $\sigma(0) < 0$, znajdują się po stronie

dielektrycznej przejścia metal-izolator. Przejście to ma miejsce w zakresie koncentracji ν między 0,12 a 0,13.



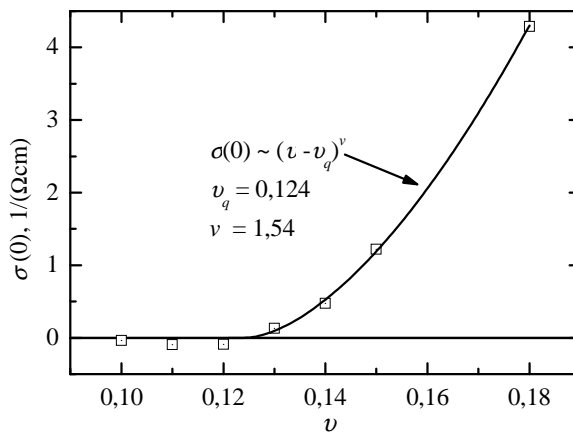
Rys. 10. Aproksymacja danych pomiarowych w najniższej temperaturze równaniem (6) z wykładnikiem $y = 0,2$ [[19]]

Fig. 10. Data measured at the lowest temperature approximated by eq. (6) with exponent $y = 0,2$

Na rys. 11 przedstawiono wartości $\sigma(0)$ w funkcji ν . Wartości $\sigma(0) > 0$ dopasowano zależnością [[18]]:

$$\sigma(0) \sim (\nu - \nu_q)^{\nu} \quad (7)$$

Z dopasowania uzyskano wartości $\nu_q = 0,124 \pm 0,013$ oraz $\nu = 1,54 \pm 0,28$ [[19]]. Linia ciągła na rys. 11 jest wykresem równania (7) z parametrami $\nu_q = 0,124$, $\nu = 1,54$. Wartości $\sigma(0)$ układają się wzdłuż relacji potęgowej, co jest zgodne z teorią przejścia metal-izolator.



Rys. 11. Wartości konduktywności $\sigma(0)$, uzyskane z dopasowania danych eksperymentalnych równania (7) z wykładnikiem $y = 0,2$, wykreślone w funkcji ułamka objętościowego v

Fig. 11. $\sigma(0)$ values, obtained from eq. (7) with exponent $y = 0,2$, plotted against v

Przedstawione tu wyniki dotyczą próbek w ściśle określonym wykonaniu i należy oczekiwać, że przy zmianie któregoś z parametrów (szczególnie wielkości ziarna proszku RuO₂ i szkliwa) koncentracja, przy której wystąpi przejście metal-izolator będzie inna.

6. Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki badań właściwości elektrycznych rezystorów grubowarstwowych RuO₂-szkło wykonanych w Katedrze Podstaw Elektroniki Politechniki Rzeszowskiej. Znane są więc dokładnie ich parametry, takie jak np. zawartość składników (tylko RuO₂ i szkło) i ich uziarnienie, co jest istotne z punktu widzenia interpretacji mechanizmu przewodnictwa elektrycznego i szumów. Badaniom poddano rezystory o różnej zawartości objętościowej RuO₂. Przeprowadzono również pomiary komercyjnego czujnika temperatury typu Rox RX-202A firmy Lake Shore. Porównanie jego właściwości z danymi otrzymanymi dla samodzielnie przygotowanych rezystorów pozwala stwierdzić, że mogą one skutecznie pełnić funkcję kriogenicznych czujników temperatury.

Istotną cechą rezystorów RuO₂-szkło jest dość duży poziom szumów nadmiarowych typu 1/f w zakresie niskiej temperatury. Pomiary tych szumów pozwoliły stwierdzić, że następuje gwałtowny wzrost intensywności szumów poniżej temperatury 4 K. Powoduje to ograniczenie rozdzielczości pomiaru rezystancji i temperatury za pomocą tego typu czujników.

Badania właściwości elektrycznych rezystorów RuO₂-szkło pozwoliły również odnieść się do modeli przewodnictwa elektrycznego w tego typu materiałach. Z pomiarów rezystancji w funkcji temperatury wynika, że często stosowany model przewodnictwa skokowego zmiennozakresowego, dobrze opisujący zależność $R(T)$, prowadzi do niefizycznych wartości niektórych parametrów, co daje podstawę do jego odrzucenia. Jednak wyniki pomiarów szumów wykazują dobre dopasowanie do jednej spośród kilku teorii w ramach przewodnictwa skokowego zmiennozakresowego opisanego prawem Motta. W modelu tym szum 1/f jest wywoływany przez zmianę przebiegu ścieżki krytycznej w pęku perkolacyjnym. Zmianę taką powodują modulatory dwustanowe znajdujące się w otoczeniu połączeń krytycznych. Pomiary intensywności szumów w obecności pola magnetycznego pozwalają odnieść się do zjawiska słabej lokalizacji jako potencjalnego mechanizmu przewodnictwa. Ich wyniki jednak nie pozwalają na zdecydowane odrzucenie występowania tego zjawiska w badanych rezystorach. W tym kontekście ustalenie rzeczywistego mechanizmu przewodnictwa wymaga dalszych badań.

Przeprowadzone badania pozwoliły natomiast stwierdzić, że w badanych rezystorach RuO₂-szkło występuje przejście metal-izolator w zakresie objętościowej koncentracji dwutlenku rutenu między 12 a 13 %.

Literatura

- [1] Affronte M., Campani M., Piccinini S., Tamborin M., Morten B., Prudenziati M., Laborde O.: Low temperature electronic transport in RuO₂-based cermet resistors, *J. Low Temp. Phys.*, vol. 109, 1997, pp. 461-475.
- [2] Bat'ko I., Flachbart K., Somora M., Vanický D., Design of RuO₂-based thermometers for the millikelvin temperature range, *Cryogenics*, vol. 35, 1995, pp. 105-108.
- [3] Bobran K., Kusy A., Stadler A.W., Wilczyński G.: Conduction in RuO₂-based thick films, *Int. J. Electronics*, vol. 78, 1995, pp. 113-119.
- [4] Cohen O., Ovadyahu Z.: Resistance noise near the Anderson transition, *Phys. Rev. B*, vol. 50, 1994, pp. 10442-10449.
- [5] Collins D.G., Arshak K.I.: A study of composite Bi₂O₃, In₂O₃ and RuO₂ planar thick film piezoresistive gauges, *Microelectronics J.*, vol. 27, 1996, pp. 59-65.
- [6] Dziedzic A., Golonka L., Licznarski B., Morten B., Prudenziati M.: Technika grubowarstwowa i jej zastosowania, skrypt napisany w ramach programu TEMPUS JEP 3298 i JEN 3298, Wrocław, 1998.
- [7] Flachbart K., Pavlík V., Tomašovičová N., Adkins C.J., Somora M., Leib J., Eska G.: Conduction mechanism in RuO₂-based thick films, *Phys. Stat. Sol. (B)*, vol. 205, 1998, pp. 399-404.
- [8] Grimaldi G., Maeder T., Rysler P., Strässler S.: Model of transport nonuniversality in thick-film resistors, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 83, 2003, pp.189-191.
- [9] Holmes D.S., Courts S.S.: Resolution and accuracy of cryogenic temperature measurements, *Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry*, J.F. Schooley A/P, New York, vol. 6, 1992, pp. 1225-1230.
- [10] Hrovat M., Belavic D., Samardžija Z.: Characterisation of thick film resistor series for strain sensors, *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 21, 2001, pp. 2001-2004.
- [11] Imry Y.: Introduction to mesoscopic physics, Oxford University Press, 1996.
- [12] Imry Y.: Possible role of incipient Anderson localization in the resistivities of highly disordered metals, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 44, 1980, pp. 469-471.
- [13] Kalita W., Mleczko K., Zając K., Żak D.: Thick-film starting system with changeable Q-factor circuit for sodium discharge lamps, *Proc. 17th Conference of ISHM Poland, Rzeszów-Solina, September 15-18, 1993*, pp. 93-96.
- [14] Kogan Sh.: Electron glass: Intervalley transitions and the hopping conduction noise, *Phys. Rev. B*, 57, 1998, pp. 9736-9744.
- [15] Koncki R., Mascini M.: Screen-printed ruthenium dioxide electrodes for pH measurements, *Anal. Chem. Acta*, vol. 351, 1997, pp. 143-149.
- [16] Kozub V.I.: Low-frequency noise due to site energy fluctuations in hopping conductivity, *Solid State Commun.*, 97, 1996, pp. 843-846.
- [17] Kusy A., Classical percolation threshold and resistance versus temperature behaviour of RuO₂-glass films, *Physica B*, vol. 240, 1997, pp. 226-241.

- [18] Kusy A., Stadler A.W., Mleczko K., Żak D., Pawłowski S., Szałański P., Zawiślak Z., Grabecki G., Plesiewicz W., Dietl T.: Metal-insulator transition in nanocomposites of glass and RuO₂, *Ann. Phys.*, vol. 8, 1999 pp. 589-592.
- [19] Kusy A., Stadler A.W., Mleczko K., Żak D., Wilczyński G., Szałański P., Zawiślak Z., Grabecki G., Dietl T., Plesiewicz W.: Metal-insulator transition in RuO₂-glass films: low-temperature studies, *Proc. Int. Conf. on Localization in Solids, Localization'96*, Jaszowiec, Poland, August 3-6, 1996, pp. 256-257.
- [20] Kusy A.: Struktura, mechanizm przewodnictwa oraz szумы typu 1/f rezystywnych warstw grubych, *Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Rzeszowskiej, Rozprawy 22*, Rzeszów, 1979.
- [21] Lake Shore Model 370 AC Resistance Bridge, Instrukcja użytkownika, v. 1.1, 2001.
- [22] Li Q., Watson C.H., Goodrich R.G., Haase D.G., Lukefahr H.: Thick film chip resistors for use as low temperature thermometers, *Cryogenics*, vol. 26, 1986, pp. 467-470.
- [23] Manjakkal L., Cvejic K., Kulawik J., Zaraska K., Szwagierczak D.: A low-cost pH sensor based on RuO₂ resistor material, *Nano Hybrids*, vol. 5, 2013, pp.1-15.
- [24] Massey J.G., Lee M.: Low-frequency noise probe of interacting charge dynamics in variable-range hopping boron-doped silicon, *Phys. Rev. Lett.*, 79, 1997, pp. 3986-3989.
- [25] Mleczko K. Identyfikacja przejścia metal-izolator w rezystorach grubowarstwowych RuO₂+szkło, rozprawa doktorska, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, 2003.
- [26] Mleczko K., Żak D., Kolek A., Stadler A.W., Szałański P., Zawiślak Z.: Rezystory grubowarstwowe RuO₂ + szkło jako kriogeniczne czujniki temperatury, *Elektronika*, vol. XLVI, nr 2-3, 2005, pp. 54-55.
- [27] Möbius A.: The metal-semiconductor transition in amorphous Si_{1-x}Cr_x films: T^{0.19}-contribution to the metallic conductivity, *Z. Phys. B*, vol. 79, 1990, pp. 265-273.
- [28] Mott N.F.: Conduction in non-crystalline materials. III. Localized states in a pseudogap and near extremities of conduction and valence bands, *Phil. Mag.*, 19, 1969, pp. 835-852.
- [29] Nicoloso N., LeCorre-Frisch A., Maier J., Brook R. J.: Conduction mechanisms in RuO₂-glass composites, *Solid State Ionics*, 75, 1995, pp. 211-216.
- [30] Ogawa T., Fujii M., Asai T., Ikegami A., Kobayashi T.: Application of copper conductor and ruthenium containing oxides-glass resistor to high-frequency hybrid IC's for a portable cellular radio, *IEEE Trans. CHMT*, vol. 11, 1988, pp. 211-217.
- [31] Paszczyński S., Element grubowarstwowy jako czujnik parametryczny, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej nr 58*, Rzeszów, 1989.
- [32] Pike G.E., Seager C.H.: Electrical properties and conduction mechanisms of Ru-based thick-film (cermet) resistors, *J. Appl. Phys.*, vol. 48, 1977, pp. 5152-5169.
- [33] Pokrovskii V.Ya., Savchenko A.K., Tribe W.R., Linfield E.H.: Modulation origin of 1/f noise in two-dimensional hopping, *Phys. Rev. B*, vol. 64, 2001, s. 201318-1-4.
- [34] Prudenziati, M.: Electrical transport in thick film (cermet) resistors, *Electrocomp. Sci. Technol.*, vol. 10, 1983, pp. 285-293.

- [35] Ptak P., Kolek A., Zawisłak Z., Mleczko K., Stadler A.W.: 1/f noise versus magnetic field in RuO₂ based thick film resistors, Proc. 26th Int. Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2003, Stara Leśna, Słowacja, 2003, pp. 196-201.
- [36] Ptak P., Kolek A., Zawisłak Z., Stadler A.W., Mleczko K.: 1/f noise of the RoxTM sensor, Sens. Actuators A: Physical, 2007.
- [37] Ptak P., Kolek A., Zawisłak Z., Stadler A.W., Mleczko K.: Noise resolution of RuO₂ based resistance thermometers, Rev. Sci. Instr., 76, 2005, pp. 014901-1-6.
- [38] Ptak P.: Rozdzielczość szumowa rezystancyjnych czujników temperatury typu RuO₂+szkło, rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław, 2007.
- [39] Roman J., Pavlík V., Flachbart K., Adkins C.J., Leib J.: Electronic transport in RuO₂-based thick film resistors at low temperature, J. Low Temp. Phys., vol. 108, 1997, pp. 373-382.
- [40] Rosenbaum R.L., Slutzky M., Möbius A., McLachlan D.: Various methods for determining the critical metallic volume fraction ϕ_c at the metal-insulator transition, J. Phys.: Condens. Matter, vol. 6, 1994, pp. 7977-7992.
- [41] Sahul R., Tasovski V., Sudarshan T.S.: Ruthenium oxide cryogenic temperature sensors, Sens. and Actuators A, vol. 125, 2006, pp. 358-362.
- [42] Scofield J.H.: ac method for measuring low-frequency resistance fluctuation spectra, Rev. Sci. Instrum., vol. 58, 1987, pp. 985-993.
- [43] Shklovskii B.I.: 1/f noise in variable range hopping conduction, Phys. Rev. B, vol. 67, 2003, pp. 045201-1-6.
- [44] Shtengel K., Yu C.C.: 1/f noise in electron glasses, Phys. Rev. B, vol. 67, 2003, pp. 165106-1-8.
- [45] Stanford Research Systems SIM921 AC Resistance Bridge, Instrukcja użytkownika, v.1.41, 2003.
- [46] Temperature Measurement and Control – katalog firmy Lake Shore
- [47] Watanabe M., Morishita M., Ootuka Y.: Magnetoresistance of RuO₂-based resistance thermometers below 0.3 K, Cryogenics, vol. 41, 2001, pp. 143-148.
- [48] Willekers R.W., Mathu F., Meijer H.C., Postma H.: Thick film thermometers with predictable R-T characteristics and very low magnetoresistance below 1 K, Cryogenics, vol. 30, 1990, pp. 351-355.
- [49] Żak D., Dziedzic A., Kolek A., Stadler A.W., Mleczko K., Szałański P., Zawisłak Z.: Implementation of RuO₂-glass based thick film resistors in cryogenic thermometry, Meas. Sci. Technol., vol. 17, 2006, pp. 22-27.

LOW-TEMPERATURE PROPERTIES OF RuO₂-BASED RESISTORS

Summary

Thick film RuO₂-glass resistors were studied. They were laboratory made, so their composition is well known. The measurements of resistance and 1/f excess noise as a function of temperature in the range of 30 mK - 300 K were performed. Also as a function of magnetic field in the range 0 – 5 T. The RuO₂-glass resistors can be used as a cryogenic temperature sensors due to their

high sensitivity and low magnetoresistance. A comparison of these parameters with the parameters of commercial sensors shows that they are the same class instruments. The resistors studied exhibit a large increase of excess noise level in the range of cryogenic temperatures, thus the temperature measurement resolution is limited. The noise measurements allowed to determine the actual measurement resolution of resistive temperature sensors. A critical analysis of conduction mechanisms frequently used to describe RuO₂ resistors has also been performed. Measurements of temperature dependence of resistance allow to reject variable range hopping conductivity model for this type of resistors. On the other hand, the noise measurements give a good agreement with a theory within this model of conductivity. For the samples studied in the work a critical concentration of the metallic component in the resistive layer has been defined at which the metal-insulator transition occurs.

Keywords: thick film resistors, cryogenic thermometry, measurement resolution, conduction mechanism, magnetoresistance, 1/f noise

DOI: 10.7862/re.2015.21

Tekst złożono w redakcji: luty 2015

Przyjęto do druku: kwiecień 2015