

Z43 - BADANIE PRZEWODNOŚCI ELEKTRYCZNEJ NANODRUTÓW

II Pracownia Fizyczna

Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Jagielloński

Miniaturyzacja urządzeń elektronicznych skierowała uwagę badaczy w stronę obiektów o rozmiarach nanometrowych. Z uwagi na niewielkie rozmiary posiadają one często egzotyczne właściwości elektronowe. W efekcie możliwe jest obserwowanie wpływu efektów kwantowych na makroskopowe charakterystyki badanych obiektów. Za przykład może tu służyć kwantowanie przewodności elektrycznej układów niskowymiarowych. Jednymi z najciekawszych układów w skali nano są nanodrut, obiekty charakteryzujące się kwazi-jednowymiarową strukturą. Niniejsze ćwiczenie poświęcone jest badaniu przewodności elektrycznej nanodrutów złota. Są one wytwarzane poprzez cykliczne tworzenie i zrywanie kontaktu pomiędzy cienkim drutem i płaską próbką przy użyciu elementu piezoelektrycznego. W eksperymencie obserwuje się skokowe zmiany wartości oporu nanozłącza związane z kwantowaniem przewodności elektrycznej, a także wyznaczana się podstawowy kwant przewodności przy wykorzystaniu analizy statystycznej.

Zagadnienia do przestudiowania

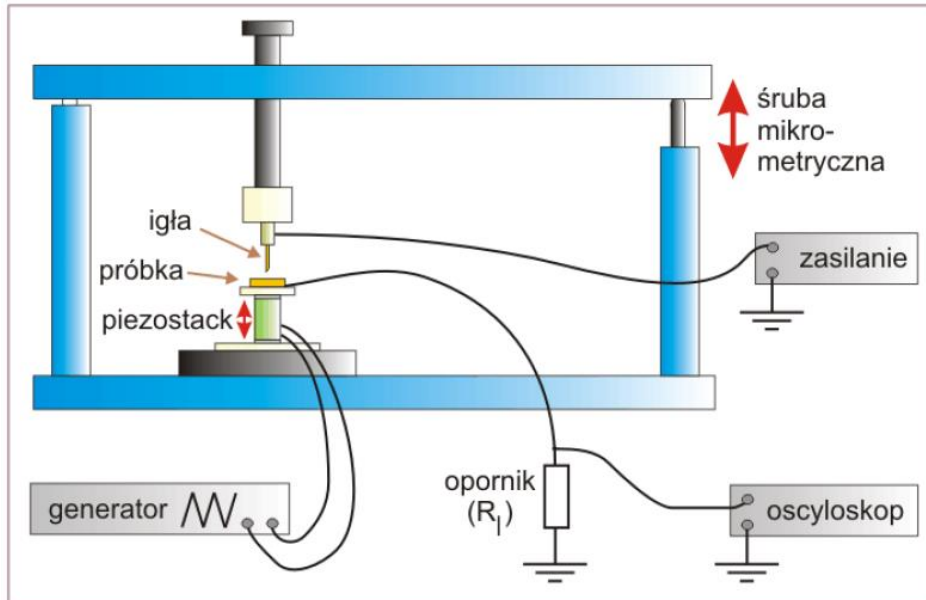
1. Mikroskopowy obraz przewodzenia prądu elektrycznego. Klasyczna teoria przewodnictwa elektronowego (Drudego). Prawo Ohma. [1, 2, 3, 4]
2. Gęstość stanów elektronowych w obiektach trójwymiarowych, dwuwymiarowych i jednowymiarowych. Czym jest funkcja gęstości stanów? [1, 2, 3, 4]
3. Gęstość stanów elektronowych w układach niskowymiarowych: kwazi-jednowymiarowych i kwazi-dwuwymiarowych. Czym różnią się obiekty kwazi-jedno(dwu)wymiarowe od układów stricte jedno(dwu)wymiarowych. Proszę szczególnie uważnie przestudiować zagadnienie przejścia z rozkładu dyskretnego do ciągłego dla obiektów o znacznych rozmiarach. Czym są podpasma struktury elektronowej? [1, 2, 3, 4]
4. Struktura elektronowa kryształów. Co to jest energia Fermiego, kula Fermiego, rozkład Fermiego-Diraca, zakaz Pauliego? [1, 2, 3, 4]
5. Zagadnienie cząstki zamkniętej w wielowymiarowej studni potencjału, dozwolone energie i funkcje własne hamiltonianu. [1, 2, 3, 4]
6. Teoria Blocha. Relacja dyspersji dla elektronów w kryształach. Co to jest masa efektywna elektronu w kryształach? [1, 2, 3, 4]
7. Balistyczny transport elektronów w złączu jednowymiarowym. Kwant przewodności elektrycznej. [1, 2, 3, 4, 5, 6]
8. Przewodność elektryczna rzeczywistego złącza kwazi-jednowymiarowego. Droga swobodna elektronów w kryształach. Proszę przeanalizować w jakich warunkach można zaobserwować kwantowanie przewodności elektrycznej. Jaką rolę odgrywają poszczególne podpasma struktury elektronowej w transporcie elektronów? Co decyduje o

przewodności danego nanozłącza? W jaki sposób można zmieniać przewodność rzeczywistego nanozłącza? [1, 2, 3, 4, 5, 6]

9. Proszę zapoznać się z metodą pomiarową i schematem układu eksperymentalnego wykorzystywanego w ćwiczeniu.

Zadania obliczeniowe

1. Wykorzystując model elektronów swobodnych proszę obliczyć różnice energii pomiędzy krawędziami kilku podpasm dla nanozłącza wykonanego ze złota. Proszę przyjąć, że układ ma charakter kwazi-jednowymiarowy i przyjmuje kształt prostopadłościanu o przekroju prostokątnym o wymiarach 2 nm na 3 nm. Proszę podać wartości liczbowe. Proszę przyjąć, że masa efektywna elektronu w kryształach złota wynosi 1,10 masy elektronu.
2. Wiedząc, że gęstość złota wynosi $19,3 \text{ g/cm}^3$, masa atomu wynosi 197 jednostek masy atomowej, masa efektywna elektronów 1,10 masy elektronu, a oporność właściwa $2,2 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ wyznacz czas relaksacji dla elektronów oraz ich ruchliwość. W kryształach złota na każdy atom przypada jeden elektron przewodnictwa. Następnie proszę wyznaczyć energię Fermiego dla złota.
3. Przyjmując wartość średnią prędkości elektronów w danej temperaturze daną wyrażeniem $v_T = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m^*}}$ i korzystając z wyznaczonego w poprzednim zadaniu czasu relaksacji proszę oszacować maksymalną długość nanodrutów złota, dla których transport elektronów w temperaturze pokojowej może mieć charakter balistyczny.
4. Przyjmując uproszczony model nanozłącza w postaci prostopadłościanu (jak w zadaniu 1) proszę obliczyć przy jakich rozmiarach przekroju nanodrutu dochodzi do zamykania kolejno 3 i 2 kanału i w konsekwencji ostatecznie do uformowa-



Rysunek 1: Schemat układu pomiarowego do badania kwantowania przewodności elektrycznej.

nia drutu o przewodności równej pojedynczemu kwantowi przewodności. Proszę przyjąć, że przekrój poprzeczny pozostaje cały czas prostokątem o bokach, których stosunek długości jest stały.

Aparatura i materiały

Schemat układu pomiarowego przedstawia Rysunek

1. W skład zestawu wchodzi:
 1. Płaska próbka złota umieszczona na elemencie piezoelektrycznym, którego długość regulować można poprzez zmianę napięcia do niego przykładanego.
 2. Igła ze złota.
 3. Masywny statyw, do którego dolnej części zamontowany jest piezoelement z płaską próbką złota, zaś do górnego fragmentu igła ze złota, położenie górnej części statywu może być regulowane w płaszczyźnie pionowej dzięki wykorzystaniu śruby mikrometrycznej.
 4. Generator sygnału trójkątnego służący do zasilania piezoelementu.
 5. Zasilacz umożliwiający przyłożenie stałego napięcia do nanozłącza połączonego szeregowo z zewnętrznym opornikiem o znanym oporze (R_1).
 6. Oscyloskop umożliwiający rejestrację w czasie sygnału trójkątnego zasilającego piezoelement oraz zależności czasowej napięcia na oporniku szeregowo połączonym z nanozłączem.
 7. Kable umożliwiające zestawienie układu pomiarowego.

Program ćwiczenia

1. Ustawienie śruby mikrometrycznej i sygnały trójkątnego zasilającego piezoelement w taki sposób, by doprowadzić do cyklicznego tworzenia i zrywania nanodrutu pomiędzy złotą próbką i igłą.
2. Dobranie parametrów układu zasilającego piezoelement (częstotliwość, amplituda, offset) tak, by obserwować skokowe zmiany napięcia na zewnętrznym oporniku odpowiadające zmieniającym się dyskretnie wartościom przewodności nanozłącza.
3. Pomiar wartości oporu zewnętrznego opornika oraz napięcia zasilającego układ nanozłącza.

Opracowanie wyników

1. Analiza zarejestrowanych wartości napięcia na zewnętrznym oporniku, sporządzenie histogramu zarejestrowanych wartości napięcia.
2. Sporządzenie histogramu wartości przewodności nanozłącza, wyznaczenie kwantu przewodności i jego wielokrotności, porównanie z przewidywaniami teoretycznymi, dyskusja uproszczeń zastosowanych w modelu teoretycznym oraz czynników eksperymentalnych mogących wpływać na wartość zarejestrowanej przewodności.

Literatura

- [1] Instrukcja do ćwiczenia - strona internetowa Pracowni.
- [2] N.W. Ashcroft, N.D. Mermin, *Fizyka ciała stałego*.
- [3] C. Kittel, , *Wstęp do fizyki ciała stałego*.
- [4] Rainer Waser (Ed.), *Nanoelectronics and Information Technology*, 2003, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- [5] S. Godlewski, A. Tekiel, *Postepy fizyki*, 5, str. 210 (2005).
- [6] W. Nawrocki, M. Wawrzyniak, *Zjawiska kwantowe w metrologii elektrycznej*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej (książka dostępna w bibliotece AGH).