

**Maciej WAWRZYŃIAK**

UL. POLANKA 3, POZNAŃ (POLITECHNIKA POZNAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTRONIKI I TELEKOMUNIKACJI)

**Pomiary charakterystyki prądowo-napięciowej nanodrutów****Dr inż. Maciej WAWRZYŃIAK**

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej (1992). Stopień naukowy doktora uzyskał na tym samym wydziale w 2000 roku. Od 1 października 1992 roku pracował w Instytucie Elektroniki i Telekomunikacji Politechniki Poznańskiej. Po powstaniu Wydziału Elektroniki i Telekomunikacji PP (2006) jest pracownikiem Katedry Systemów Telekomunikacyjnych i Optoelektroniki na tym wydziale.



e-mail: mwawrz@et.put.poznan.pl

**Streszczenie**

W artykule opisano sposób pomiarów charakterystyk prądowo-napięciowych nanodrutów z QPC (ang. *Quantum Point Contact*). Do pomiarów wykorzystano system pomiarowy umożliwiający formowane nanodrutów z QPC pomiędzy powierzchnią próbki metalu i wierzchołkiem metalowego ostrza oraz pomiar sygnałów analogowych, na podstawie których wyznaczana jest charakterystyka prądowo-napięciowa. W artykule przedstawiono schemat blokowy systemu pomiarowego i opisano sposób jego działania. Zaproponowano metodę wyznaczania charakterystyki prądowo-napięciowej dla zadanej wartości przewodności nanodrutu. System pomiarowy jest sterowany z komputera osobistego za pomocą interfejsu GPIB. Umożliwia to automatyzację procesu formowania nanodrutów, pomiaru i rejestracji sygnałów napięciowych. Ponadto w artykule przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów charakterystyk prądowo-napięciowych nanodrutów.

**Słowa kluczowe:** nanotechnologia, nanodrut, kwantowanie przewodności, pomiary przewodności, charakterystyki prądowo-napięciowe.

**Current-voltage measurements of nanowires****Abstract**

We present a method of current-voltage measurements of nanowires with quantum point contact (QPC). The used experimental setup allows fabrication of nanowires with QPC between the surface of a metal sample and a metal tip, and measurements of analog signals that provide the basis for tracing the current-voltage curve. The experimental setup is shown in a block diagram, and its operation discussed. In the proposed method current-voltage measurements are performed at a fixed value of nanowire conductance. The setup is controlled from a PC through the GPIB interface, which allows automation of nanowire fabrication, voltage signal measurements and data storage. Sample measurement results are presented as well.

**Keywords:** nanotechnology, nanowires, conductance quantization, conductance measurements, current-voltage curves.

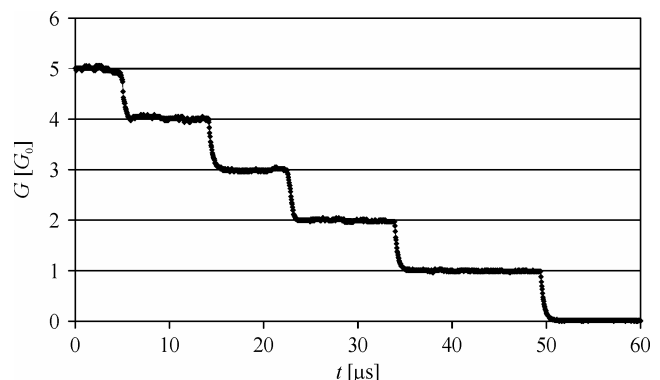
**1. Wprowadzenie**

W ostatnich latach duże zainteresowanie wzbudziły badania dotyczące transportu elektronów w nanodrutach. Postępujący proces zwiększania skali integracji układów elektronicznych doprowadzi do konieczności zastosowania do ich budowy podzespołów o wymiarach nanometrycznych. Nanodrut zostały już zastosowane do budowy diod [1] tranzystorów wykorzystujących efekt polowy [2] (field-effect transistors) oraz tranzystorów wykorzystujących efekt tunelowania pojedynczych elektronów [3] (single electron tunneling transistors). Nanodrut użyte do budowy tych układów mają średnice od kilkudziesięciu

do kilkuset nanometrów. Opisana w artykule metoda wytwarzania nanodrutów i pomiaru ich charakterystyki prądowo-napięciowej umożliwia poznanie właściwości elektrycznych nanodrutów z QPC o średnicy jednego atomu. Powstanie nanodrutu było po raz pierwszy obserwowane za pomocą skaningowego mikroskopu tunelowego (ang. STM – *scanning tunneling microscope*) w 1987 roku przez Gimzewskiego i Möllera [4]. W 1993 roku po raz pierwszy obserwowano kwantowanie przewodności elektrycznej w nanodrutach z QPC wytworzonych ze złota za pomocą STM w temperaturze pokojowej i w ciśnieniu atmosferycznym [5]. Dalsze badania wykazały, że nanodrut z QPC mogą powstawać bez zastosowania STM w znacznie prostszych układach: pomiędzy parą drutów makroskopowych [6] (1995), pomiędzy zestawkami przekaźników [7] (1997). W badaniach właściwości nanodrutów wykorzystywany jest metoda mechanicznego formowania nanodrutów z QPC, która wykorzystuje efekt samoistnego tworzenia nanodrutów pomiędzy makroskopowymi metalowymi elektrodami [8]. W tym celu należy doprowadzić do zderzenia dwóch elektrod a następnie jedną z elektrod oddalać z odpowiednio dobraną prędkością. Po zderzeniu elektrod pomiędzy elektrodami powstają nanodrut. Oddalanie jednej z elektrod powoduje rozciąganie i pęknięcie powstałych nanodrutów. W końcowej fazie rozciągania pomiędzy elektrodami pozostaje jeden nanodrut. Tuż przed zerwaniem tego nanodrutu w jego najwęższym miejscu powstaje QPC. Jeżeli zmierzmy przewodność elektryczną tego nanodrutu w funkcji czasu, otrzymamy zależność przedstawioną na rys. 1. Skokowe zmiany przewodności są efektem kwantowania przewodności w obrębie nanodrutu. Przewodność rozciąganego nanodrutu przyjmuje skwantowane wartości ...,  $5 \cdot G_0$ ,  $4 \cdot G_0$ ,  $3 \cdot G_0$ ,  $2 \cdot G_0$ ,  $1 \cdot G_0$ . Wartość  $G_0$ , można obliczyć na podstawie zależności:

$$G_0 = \frac{2 \cdot e^2}{h} \quad (1)$$

gdzie:  $e$  – ładunek elementarny,  $h$  – stała Plancka.



Rys. 1. Wykres zależności przewodności nanodrutu w funkcji czasu zarejestrowany w czasie rozciągania nanodrutu ze złota

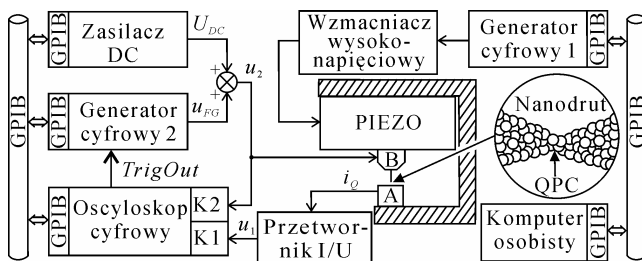
Fig. 1. Results of conductance measurements performed in a gold nanowire during its drawing, plotted versus time.

Metoda formowania nanodrutów pomiędzy makroskopowymi elektrodami była stosowana w badaniach kwantowania przewodności w metalach [9], stopach metali [10], kryształach tlenków metali [11]. Rozwinięcie tej metody polega na odpowiednim ukształtowaniu elektrod w postaci ostrza i próbki o

dobrze zdefiniowanym kierunku krystalograficznym oraz zastosowaniu do przesuwania elektrod mechanizmu skaningowego mikroskopu tunelowego. Metodę mechanicznego formowania z wykorzystaniem STM zastosowano także do formowania nanodrutów z QPC w pomiarach charakterystyki prądowo-napięciowej [9, 12]. Nanodrut powstający pomiędzy elektrodami nie są jednak stabilne, ponieważ podlegają procesowi rozciągania. Każda skokowa zmiana przewodności przedstawiona na rys. 1 związana jest z przegrupowaniem atomów w obrębie nanodrutów. Efektem kolejnych trwałych konfiguracji atomów są plateau na poziomach  $k \cdot G_0$  ( $k = 1, 2, \dots$ ). Pomiar charakterystyki prądowo-napięciowej musi się odbyć w czasie trwania danej konfiguracji atomów w obrębie nanodrutu. Dla nanodrutu, którego wykres zależności przewodności w funkcji czasu przedstawiono na rys. 1 pomiar ten powinien odbyć się w czasie mniejszym od:  $15 \mu\text{s}$  dla  $1 \cdot G_0$ ,  $11 \mu\text{s}$  dla  $2 \cdot G_0$ ,  $8 \mu\text{s}$  dla  $3 \cdot G_0$  oraz  $9 \mu\text{s}$  dla  $4 \cdot G_0$ . Czas trwania poszczególnych plateau przewodności jest odwrotnie proporcjonalny do szybkości rozciągania nanodrutów. Pomiar charakterystyki w tak krótkim czasie wymaga zastosowania odpowiedniego systemu pomiarowego [12, 13].

## 2. System pomiarowy

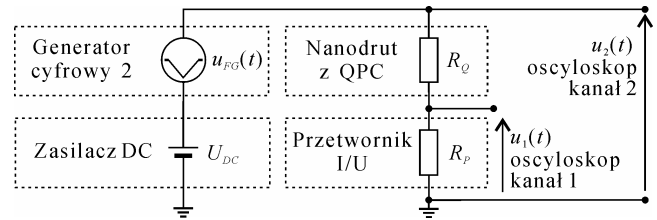
Na rysunku 2 przedstawiono schemat blokowy systemu pomiarowego, służącego do pomiaru charakterystyki prądowo-napięciowej, zaproponowanego przez Hansena [13]. Nanodrut w przedstawionym systemie powstają pomiędzy elektrodą A i B. Elektroda A w postaci próbki metalu jest przymocowana do układu wstępnego pozycjonowania. Elektroda B w kształcie igły jest osadzona na głowicy piezoelektrycznego elementu wykonawczego (PIEZO). Do sterowania ruchem głowicy piezoelektrycznego elementu wykonawczego zastosowano generator cyfrowy 1 (Agilent 33220A). Sygnał napięciowy z generatora jest wzmacniany przez wzmacniacz wysokonapięciowy (PI E-461). Generator cyfrowy 1 sterowany jest z komputera osobistego za pomocą interfejsu GPIB. Umożliwia to odpowiednie ustawienie zakresu i szybkości ruchu elektrody B. Pomiar charakterystyki prądowo-napięciowej rozpoczyna się od wyzwolenia generatora 1. Sygnał sterujący z generatora, podany na piezoelektryczny element wykonawczy, powoduje zderzenie elektrody B z elektrodą A a następnie oddalenie elektrody B od A. Podczas oddalania formują się nanodrut, który są rozciągane i kolejno pękają. W końcowej fazie rozciągania pozostaje jeden nanodrut, w którym tuż przed jego zerwaniem powstaje QPC. Powstały nanodrut polaryzowany jest napięciem  $U_{DC}$  z zasilacza DC (Agilent E3631) co powoduje przepływ prądu  $i_Q$ . Przetwornik prąd-napięcie zamienia sygnał prądowy  $i_Q$  na sygnał napięciowy  $u_1$ . Sygnał  $u_1$  mierzony jest przez kanał 1 oscyloskopu cyfrowego.



Rys. 2. Schemat blokowy systemu pomiarowego  
Fig. 2. Block diagram of the experimental setup.

Przed wykonaniem pomiarów poziom wyzwolenia oscyloskopu musi być ustawiony na wartość odpowiadającą wybranej przewodności  $k \cdot G_0$ . ( $k = 1, 2, \dots$ ), dla której pomiar charakterystyki prądowo-napięciowej jest prowadzony. W chwili wyzwolenia oscyloskop cyfrowy generuje zewnętrzny sygnał TTL  $TrigOut$ , który jest użyty do wyzwolenia generatora cyfrowego 2 (Agilent 33220A). Po wyzwoleniu generatora

cyfrowego 2 na jego wyjściu pojawia się sygnał  $u_{FG}$ , który jest dodawany do sygnału  $U_{DC}$ . Sygnał  $u_{FG}$  powoduje zmianę prądu  $i_Q$  płynącego przez nanodrut w zakresie, dla którego charakterystyka prądowo-napięciowa jest mierzona.



Rys. 3. Schemat zastępczy obwodu pomiarowego  
Fig. 3. Equivalent diagram of the measurement circuit.

Na rysunku 3 przedstawiono schemat zastępczy obwodu pomiarowego gdzie  $R_Q$  reprezentuje rezystancję nanodrutu a  $R_P$  reprezentuje rezystancję wewnętrzną przetwornika prąd/napięcie. Oscyloskop cyfrowy rejestruje w kanale 2 sygnał  $u_2(t)$ , który jest sumą sygnałów z zasilacza DC –  $U_{DC}$  i z generatora cyfrowego –  $u_{FG}(t)$ .

Kanał 1 oscyloskopu cyfrowego został wykorzystany do rejestracji sygnału  $u_1(t)$  na wyjściu przetwornika prąd-napięcie. W wyniku procesu próbkowania sygnały analogowe  $u_1(t)$  i  $u_2(t)$  zamieniane są na analogowe sygnały dyskretne, które mogą być zapisane za pomocą zależności (2) i (3):

$$u'_n = u_1(n \cdot T_S) \quad \text{dla } n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2)$$

$$u''_n = u_2(n \cdot T_S) \quad \text{dla } n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3)$$

gdzie:  $N$  – liczba próbek,  $T_S$  – okres próbkowania,  $u_1(n \cdot T_S)$  – wartość napięcia sygnału  $u_1(t)$  dla próbki pobranej w chwili  $n \cdot T_S$ ,  $u_2(n \cdot T_S)$  – wartość napięcia sygnału  $u_2(t)$  dla próbki pobranej w chwili  $n \cdot T_S$ . Oscyloskop cyfrowy wykonuje także operację kwantyzacji sygnału, zapisując poziomy napięcie poszczególnych próbek za pomocą skończonej liczby kodów. Powstaje w ten sposób sygnał cyfrowy. Poziomy napięcie sygnałów  $u_1$  i  $u_2$  można obliczyć na podstawie zależności:

$$u_1(n \cdot T_S) = (y_1(n \cdot T_S) - y_{ref1}) \cdot y_{inc1} + y_{org1} \quad (4)$$

$$u_2(n \cdot T_S) = (y_2(n \cdot T_S) - y_{ref2}) \cdot y_{inc2} + y_{org2} \quad (5)$$

gdzie:  $y_1(n \cdot T_S)$  – wynik przetwarzania analogowo cyfrowego (kod) dla próbki pobranej w chwili  $n \cdot T_S$  (kanał 1);  $y_{ref1}$ ,  $y_{inc1}$ ,  $y_{org1}$  – współczynniki skalujące zależne od współczynnika wzmocnienia ustawionego dla kanału 1 oscyloskopu,  $y_2(n \cdot T_S)$  – wynik przetwarzania analogowo cyfrowego (kod) dla próbki pobranej w chwili  $n \cdot T_S$  (kanał 2);  $y_{ref2}$ ,  $y_{inc2}$ ,  $y_{org2}$  – współczynniki skalujące zależne od współczynnika wzmocnienia ustawionego dla kanału 2 oscyloskopu. Po podstawieniu zależności (4) do (2) oraz (5) do (3) otrzymujemy zależności opisujące sygnały cyfrowe odczytane z oscyloskopu odwzorowujące sygnały analogowe  $u_1(t)$  i  $u_2(t)$ :

$$u'_n = (y_1(n \cdot T_S) - y_{ref1}) \cdot y_{inc1} + y_{org1} \quad \text{dla } n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (6)$$

$$u''_n = (y_2(n \cdot T_S) - y_{ref2}) \cdot y_{inc2} + y_{org2} \quad \text{dla } n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (7)$$

Zarejestrowane sygnały są przesyłane za pomocą interfejsu GPIB do komputera osobistego gdzie są zapisywane w postaci pliku. Ze

schematu przedstawionego na rys. 3 wynika, że wartości napięć polaryzujących nanodrut dla chwil, w których zostały pobrane próbki sygnałów można obliczyć na podstawie zależności:

$$u_n = u_n'' - u_n' \quad \text{dla } n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (8)$$

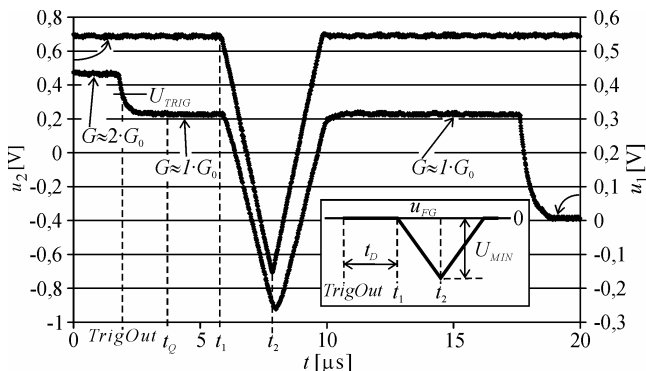
Wartości prądów płynących przez nanodrut dla chwil, w których zostały pobrane próbki sygnałów można obliczyć na podstawie zależności:

$$i_n = \frac{u_n'}{R_p} \quad \text{dla } n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (9)$$

Charakterystykę prądowo-napięciową nanodrutu można wykreślić nanosząc na układ współrzędnych  $xy$  wartości  $(u_n, i_n)$  dla  $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ . Liczba punktów charakterystyki prądowo napięciowej będzie równa liczbie zarejestrowanych próbek sygnału.

### 3. Pomiar charakterystyki prądowo-napięciowej

Na rysunku 4 przedstawiono sygnały  $u_1$  i  $u_2$  zmierzone i zarejestrowane podczas pomiaru charakterystyki prądowo-napięciowej nanodrutu ze złota rozciąganego z szybkością  $16 \mu\text{m/s}$ . Pomiary zostały przeprowadzone w temperaturze pokojowej i ciśnieniu atmosferycznym.



Rys. 4. Zmierzone wartości napięć sygnałów  $u_1(t)$  i  $u_2(t)$   
Fig. 4. Measured values of voltage signals  $u_1(t)$  and  $u_2(t)$ .

System pomiarowy skonfigurowano w sposób umożliwiający pomiar charakterystyki dla przewodności  $G = 1 \cdot G_0$ . Wyzwalanie oscyloskopu musi nastąpić w chwili, gdy następuje skokowa zmiana przewodności nanodrutu z wartości  $G = 2 \cdot G_0$  na wartość  $G = 1 \cdot G_0$ . Ze schematu przedstawionego na rysunku 3 wynika, że wartość napięcia  $u_1$  przed wyzwoleniem generatora cyfrowego 2 można obliczyć na podstawie zależności:

$$u_1 = U_{DC} \frac{R_p}{R_Q + R_p} \quad (10)$$

gdzie:  $R_p = 10,04 \text{ k}\Omega$  – rezystancja wewnętrzna przetwornika prąd-napięcie,  $U_{DC} = 0,700 \text{ V}$  – wartość napięcia polaryzującego obwód pomiarowy,  $R_Q \approx 6,45 \text{ k}\Omega$  dla  $G = 2 \cdot G_0$ ,  $R_Q \approx 12,9 \text{ k}\Omega$  dla  $G = 1 \cdot G_0$ . Obliczone na podstawie zależności napięcia  $v_1$  wynoszą:  $0,426 \text{ V}$  dla  $G = 2 \cdot G_0$  oraz  $0,306 \text{ V}$  dla  $G = 1 \cdot G_0$ . Przyjęto, że wyzwolenie oscyloskopu powinno nastąpić pośrodku tych wartości, czyli dla  $U_{TRIG} = 0,366 \text{ V}$  (poziom wyzwala oscyloskopu). Pozostałe parametry wyzwala oscyloskopu ustawiono następująco: źródło wyzwala: kanał 1, sposób sprzężenia sygnału wyzwala: DC, typ wyzwala: zbocze opadające. Takie nastawy wyzwala oscyloskopu powodują

wyzwolenie oscyloskopu, gdy przewodność nanodrutu zmienia się skokowo z wartości  $G \approx 2 \cdot G_0$  na wartość  $G \approx 1 \cdot G_0$ . W chwili wyzwolenia oscyloskop generuje zewnętrzny sygnał  $TrigOut$ , który powoduje wyzwolenie generatora cyfrowego 2. Po załączeniu na wyjściu generatora pojawi się sygnał  $u_{FG}$ , który dodawany jest do sygnału  $U_{DC}$ . Sygnał ten przedstawiono w prawym dolnym rogu rys. 4. Na rysunku zaznaczono opóźnienie  $t_D$ , po którym pojawi się zakres użyteczny sygnału do  $t_1$  do  $t_2$ . Na podstawie danych zarejestrowanych dla tego zakresu wyznaczana jest charakterystyka prądowo napięciowa nanodrutu. Zakres ten został także zaznaczony na rys. 4. Czas  $t_D$  oraz czas  $t_2 - t_1$  muszą być dopasowane do szybkości rozciągania nanodrutu (szybkości oddalania elektrody B od elektrody A). Podczas pomiarów sygnałów  $u_1$  i  $u_2$  przedstawionych na rys. 4 generator cyfrowy 2 zaprogramowano tak, że czas  $t_2 - t_1$  wynosił  $2 \mu\text{s}$ . Z wartości amplitudy  $U_{MIN}$  sygnału  $u_{FG}$  wynika zakres, dla którego mierzymy charakterystykę prądowo-napięciową. Podczas rejestracji sygnałów przedstawionych na rys. 4 ustawiono  $U_{MIN} = -2 \cdot V_{DC}$ . Umożliwia to pomiar charakterystyki dla zakresu:

$$\left\langle -U_{DC} \frac{R_Q}{R_Q + R_p}, U_{DC} \frac{R_Q}{R_Q + R_p} \right\rangle \quad (11)$$

Jeżeli przyjmujemy, że odniesieniem dla osi czasu jest punkt  $t_1$  czyli  $t_1 = 0$ , sygnał z generatora cyfrowego 2 dla przedziału czasu od  $t_1$  do  $t_2$  w funkcji czasu  $t$  można opisać za pomocą równania:

$$u_{FG} = W \cdot t \quad (12)$$

gdzie  $W$  – szybkość zmian sygnału  $v_{FG}$ , którą można obliczyć na podstawie zależności:

$$W = \frac{U_{MIN}}{t_2 - t_1} \quad (13)$$

gdzie:  $U_{MIN}$  (wartość minimalna),  $t_2 - t_1$  (czas opadania) parametry sygnału  $u_{FG}$  wynikające z zaprogramowanych nastaw generatora cyfrowego 2.

Przy wyznaczaniu charakterystyk prądowo-napięciowych wartości  $U_{DC}$  i  $W$  obliczane są na podstawie danych zarejestrowanych dla sygnału  $u_2$  w zakresie od  $t_1$  do  $t_2$ . Jeżeli przyjmujemy, że  $t_1 = 0$  i próbki sygnału cyfrowego zapiszemy za pomocą zależności (7), to korzystając z regresji liniowej wartości  $W$  i  $U_{DC}$  można obliczyć na podstawie zależności:

$$W = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} (n \cdot T_S \cdot u_n'') - \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} (n \cdot T_S) \cdot \sum_{n=0}^{N-1} u_n''}{\sum_{n=0}^{N-1} (n \cdot T_S)^2 - \frac{1}{N} \cdot \left( \sum_{n=0}^{N-1} (n \cdot T_S) \right)^2} \quad (14)$$

$$U_{DC} = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} u_n'' - W \cdot \sum_{n=0}^{N-1} (n \cdot T_S)}{N} \quad (15)$$

gdzie:  $N$  – liczba próbek pobrana w czasie od  $t_1$  do  $t_2$ .

Wartość tych parametrów obliczone na podstawie zależności (14) i (15) wynoszą:  $W = 700,7 \cdot 10^3 \text{ V/s}$  i  $V_{DC} = 0,6996 \text{ V}$ .

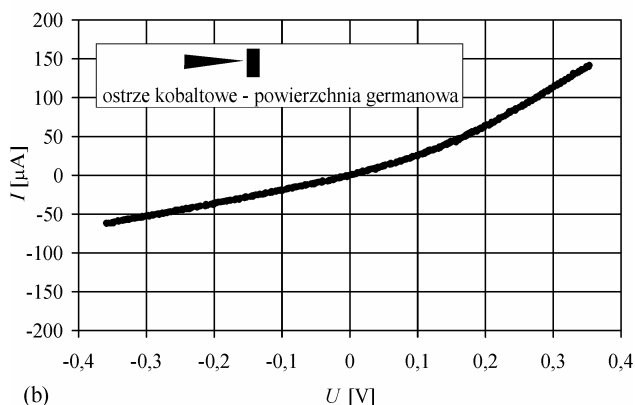
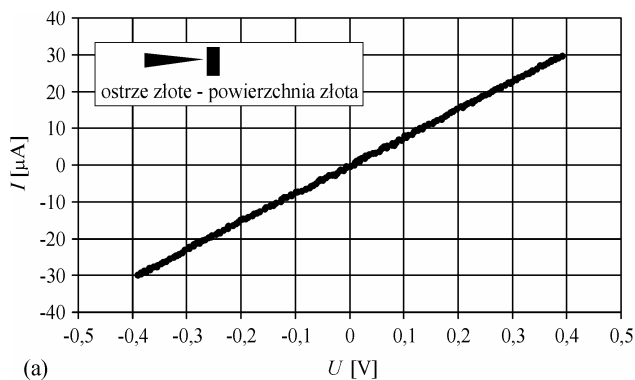
Wartość rezystancji nanodrutu z QPC określono na podstawie przebiegu  $u_1(t)$  dla zakresu od  $t_Q$  do  $t_1$  (rys. 4). Jeżeli przyjmujemy, że  $t_Q = 0$  i próbki sygnału cyfrowego zapiszemy za pomocą zależności (7) to wartość rezystancji  $R_Q$  można obliczyć na podstawie wzoru:

$$R_Q = R_p \left( \frac{U_{DC}}{\frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} u'_n} - 1 \right) \quad (16)$$

Dla sygnału  $u_1(t)$  przedstawionego na rysunku 4 wartość rezystancji  $R_Q$  obliczona na podstawie zależności 16 wynosi  $R_Q = 12,75 \text{ k}\Omega$  ( $1,012 \cdot G_0$ ). Wartość napięcia  $u_1$  po zakończeniu generowania sygnału  $u_{FG}$  musi być taka sama jak przed załączeniem generatora cyfrowego 2. Oznacza to, że przewodność nanodrutu w czasie rejestracji przebiegów  $u_1(t)$  i  $u_2(t)$  nie uległa zmianie i dane mogą być wykorzystane do wyznaczenia charakterystyki prądowo-napięciowej. Po zarejestrowaniu sygnałów  $u_1(t)$  i  $u_2(t)$  przedstawionych na rys. 4 oprogramowanie systemu pomiarowego na podstawie danych dla zakresu od  $t_1$  do  $t_2$  wyznacza charakterystykę prądowo-napięciową korzystając z zależności (8) i (9).

#### 4. Wyniki pomiarów

Na rysunku 5a przedstawiono charakterystykę prądowo-napięciową dla nanodrutu o przewodności  $G = 1,012 \cdot G_0$  wyznaczoną na podstawie wyników pomiarów przedstawionych na rysunku 4.



Rys. 5. Charakterystyki prądowo-napięciowe: (a) wyznaczona dla nanodrutu ze złota ( $G = 1,012 \cdot G_0$ ) na podstawie wyników pomiarów przedstawionych na rys. 4, (b) dla nanodrutu z kobaltu ( $G = 2,21 \cdot G_0$ )  
Fig. 5. The current-voltage curves: (a) for a gold nanowire ( $G = 1,012 \cdot G_0$ ) traced on the basis of the measurement data presented in Fig. 4, (b) for a cobalt nanowire ( $G = 2,21 \cdot G_0$ ).

Czas pomiaru przedstawionej na rys. 5a charakterystyki wynosił 2  $\mu\text{s}$ . Przy tak krótkich czasach pomiarów w obwodzie pomiarowym pojawiają się stany nieustalone spowodowane pojemnościami sond oscyloskopu. Powoduje to błąd systematyczny pomiaru sygnałów  $u_1(t)$  i  $u_2(t)$ . Przedstawione na rys. 5 charakterystyka została wyznaczona z uwzględnieniem korekcji tego błędu.

Na rysunku 5b przedstawiono charakterystykę prądowo-napięciową dla nanodrutu z kobaltu o przewodności  $G = 2,21 \cdot G_0$ . Nanodrut został wytworzony pomiędzy powierzchnią próbki z germanu a ostrzem z kobaltu. Przedstawione na rys. 5b charakterystyka została wyznaczona z uwzględnieniem korekcji błędu systematycznego wynikającego z pojemności sond oscyloskopu. Widoczna na rysunku nieliniowość charakterystyki jest efektem bariery potencjałów Schottky'ego powstającej na złączu germanu z kobaltem.

#### 5. Podsumowanie

Przedstawiony w artykule system pomiarowy został zaprojektowany i uruchomiony w celu zastosowania do pomiarów i wyznaczania charakterystyk prądowo-napięciowych nanodrutów. W systemie zastosowano metodę formowania nanodrutów pomiędzy elektrodami makroskopowymi. System pomiarowy jest sterowany z komputera osobistego za pomocą interfejsu GPIB. Umożliwia to automatyzację procesu formowania nanodrutów, pomiaru i rejestracji sygnałów napięciowych oraz obliczania charakterystyk prądowo-napięciowych. Dużą zaletą systemu, w porównaniu z proponowanymi wcześniej, jest możliwość wyboru przewodności nanodrutu, dla którego charakterystyka prądowo-napięciowa będzie wyznaczona. Zmniejsza to zakres pomiarów i wpływa na większą dokładność wyznaczanych charakterystyk. Przeprowadzone pomiary potwierdziły poprawność funkcjonowania systemu i możliwość jego zastosowania w pomiarach właściwości elektrycznych nanodrutów.

#### 6. Literatura

- [1] B.-K Kim, J.-J. Kim, J.-O Lee, K.-j Kong: Top-gated field-effect transistor and rectifying diode operation of core-shell structured GaP nanowire devices, *Phys. Rev. B* 71, 2005, s. 153313-153316.
- [2] P.-C. Chang, Z. Fan, C.-J Chien, D. Stichtenoth, C. Ronning, J. G. Lu: High-performance ZnO nanowire field effect transistors, *Appl. Phys. Lett.* 89, 2006, s. 133113-133115.
- [3] M. Hofheinz, X. Jehl, M. Sanquer, G. Molas, M. Vinet: Simple and controlled single electron transistor based on doping modulation in silicon nanowires, *Appl. Phys. Lett.* 89, 2006, s. 143504-143506.
- [4] J. K. Gimzewski, R. Möller: Transition from the tunneling regime to point contact studied using scanning tunneling microscopy, *Phys. Rev. B* 36, 1987, s. 1284-1287.
- [5] N. Agrañt, J. G. Rodrigo, S. Vieira: Conductance steps and quantization in atomic-size contacts, *Phys. Rev. B* 47, 1993, s. 12345-12348.
- [6] J. L. Costa-Krämer, N. Garcia, P. Garcia-Mochales: Nanowire formation in macroscopic metallic contacts: quantum mechanical conductance tapping a table top, *Surf. Sci.* 342, 1995, L1144-L1149.
- [7] K. Hansen, E. Lægsgaard, I. Stensgaard, F. Besenbacher: Quantized conductance in relays, *Phys. Rev. B* 56, 1997, 2208-2220.
- [8] J. Martinek, W Nawrocki, M Wawrzyniak, J. Stankowski: Quantized conductance of the nanowires spontaneously formed between macroscopic metallic contacts, *Mol. Phys. Rep.* 20, 1997 157-163.
- [9] J. L. Costa-Krämer, N. Garcia, P. Garcia-Mochales: Conductance quantization in nanowires formed between micro and macroscopic metallic electrodes, 1997, *Phys. Rev. B* 55, s. 5416-5424.
- [10] A. Enomoto, S. Kurokawa, A. Sakai: Quantized conductance in Au-Pd and Au-Ag alloy nanocontacts, *Phys. Rev. B* 65, 2002, s. 125410-125415.
- [11] F. Ott, S. Barberan, J. G. Lunney, J. M. D. Coey, P. Berthet, A. M. de Leon-Guevara: Quantized conductance in a contact between metallic oxide crystals, *Phys. Rev. B* 58, 1998, s. 4656-4659.
- [12] K. Hansen, S. K. Nielsen, M. Bradbyge, E. Lægsgaard, I. Stensgaard, F. Besenbacher: Current-voltage curves of gold quantum point contacts revisited, *Appl. Phys. Lett.* 77, 2000, 708-710.
- [13] K. Hansen, S. K. Nielsen, E. Lægsgaard, I. Stensgaard, F. Besenbacher: Fast and accurate current-voltage curves of metallic quantum point contacts, *Rev. Sci. Instrum.* 71, 2000, 1793-1803.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2006-2007 jako projekt badawczy.