

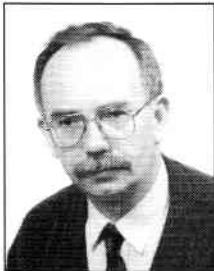
Waldemar NAWROCKI, Maciej WAWRZYŃIAK

INSTYTUT ELEKTRONIKI I TELEKOMUNIKACJI
POLITECHNIKA POZNAŃSKA

Kwantowanie rezystancji elektrycznej i przewodności elektrycznej. Część I *

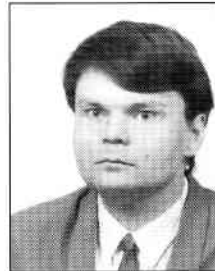
Dr hab. inż. Waldemar Nawrocki

profesor PP - ukończył Politechnikę Poznańską w 1973 r. (Wydział Elektryczny). Doktorat w 1981 r. w Politechnice Poznańskiej, habilitacja w 1990 r. na Friedrich Schiller Universität w Jenie (Wydział Fizyki). Pracuje w Instytucie Elektroniki i Telekomunikacji PP, od 1993 roku profesor Politechniki Poznańskiej. Obszary pracy naukowej to krioelektronika, termometria oraz pomiary słabych sygnałów i szumów, autor monografii „Termometria szumowa” Wyd. Pol. Pozn. (1995).



Mgr inż. Maciej Wawrzyński

absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej (1992). Od 1 października 1992 roku pracuje w zakładzie Elektrycznej Aparatury i Systemów Pomiarowych, Instytutu Elektroniki i Telekomunikacji Politechniki Poznańskiej. Zajmuje się wykorzystaniem zjawisk fizyki kwantowej (tunelowanie pojedynczych elektronów, kwantowanie przewodności) w metrologii elektrycznej.



Streszczenie

W artykule przedstawiono dwa zjawiska kwantowe: kwantowy efekt Halla oraz kwantowanie przewodności w przewodniku o rozmiarach nanometrycznych. Omówiono układ do wzorcowania rezystancji za pomocą kwantowego efektu Halla wykorzystywany w laboratoriach metrologicznych. Przedstawiono układ do pomiaru kwantowania przewodności w nanodrutach metalowych Au, Cu i Sn. Pokazano przykładowe przebiegi czasowe kwantowania w czasie procesów rozwierania i zwierania pary drutów metalowych. Przedstawiono histogramy jako wyniki statystycznej obróbki serii pomiarów kwantowania przewodności elektrycznej.

Abstract

The quantum Hall effect and quantization of the electrical conductance at conductors of a nanometer-size are presented in the paper. The instrumentation of the resistance standard using the quantum Hall effect is described. The experimental setup for investigation of conductance quantization and the measuring technique are presented. Measurements concern the conductance between two vibrating metal wires. Conductance quantization for Au-Au, Cu-Cu, Sn-Sn, Au-Cu, Au-Sn and Cu-Sn contacts has been observed. Some records of measurements of conductance quantization of macroscopic metallic contacts are presented as well.

Wprowadzenie

Rezystancja elektryczna (lub jej odwrotność - przewodność elektryczna) należy do wielkości elektrycznych mierzonych najczęściej zarówno jako parametr obwodu elektrycznego lub jako wielkość wyjściowa czujnika rezystancyjnego wielkości nieelektrycznej. Duże znaczenie dla dokładnych pomiarów ma wzorzec rezystancji. Ze względu na swoje zalety coraz większego znaczenia nabierają wzorce kwantowe. Kwantowy wzorzec rezystancji może działać w oparciu o kwantowy efekt Halla QHE (*Quantum Hall Effect*) lub kwantowanie przewodności elektrycznej w przewodnikach metalowych o rozmiarach nanometrycznych, czyli w tzw. nanodrutach (*nanowire*). Wzorce rezystancji wykorzystujące QHE zostały dopuszczone przez Generalną Konferencję Wagi i Miar od 1 stycznia 1990 r. i wprowadzone już do laboratoriów metrologicznych w świecie. Od 1995 roku badane jest zjawisko kwantowania przewodności elektrycznej w nanodrutach metalowych i oceniana jest przydatność tego zjawiska do budowy wzorca rezystancji lub wzorca przewodności elektrycznej. W artykule tym zamieszczono syntetyczny opis teore-

tyczny obydwu zjawisk, podano zebrane informacje na temat układów i parametrów wzorców rezystancji z QHE, przedstawiono wyniki własnych pomiarów procesu kwantowania przewodności w nanodrutach oraz omówiono możliwości budowy wzorca rezystancji elektrycznej (lub przewodności) działającego w oparciu o to ostatnie zjawisko.

Teoria kwantowego efektu Halla

Kwantowy efekt Halla QHE, odkryty przez von Klitzinga w 1980 roku, polega na dyskretnej (schodkowej) zmianie rezystancji poprzecznej próbki w funkcji indukcji magnetycznej w warunkach, kiedy próbka jest schłodzona do temperatury kilku kelwinów lub niższej [12]. Efekt QHE występuje w próbce, w której istnieje dwuwymiarowy gaz elektronowy (2 Dimensional Electron Gas, 2-DEG). Gaz 2-DEG powstaje w półprzewodniku, w obszarze przy powierzchni złącza półprzewodnik-izolator lub półprzewodnik-półprzewodnik. Kwantyzacja rezystancji Halla występuje wówczas, kiedy silne pole magnetyczne o indukcji rzędu kilku tesli jest przyłożone prostopadle do powierzchni złącza. W niskiej temperaturze T i dla małej koncentracji nośników ładunku n_s (liczba elektronów na jednostkę pola powierzchni) elektrony przewodzące występują jedynie przy powierzchni złącza, a ruch prostopadły do złącza jest zabroniony. Jeżeli indukcja B_Z jest mała, elektrony zajmują stany w sposób ciągły aż do poziomu energetycznego Fermiego i mają swobodę ruchu w płaszczyźnie $x-y$ - rys. 1a.

W tych warunkach rezystancja Halla R_H jest niezależna od rozmiarów elementu i jest określona przez wzór (1).

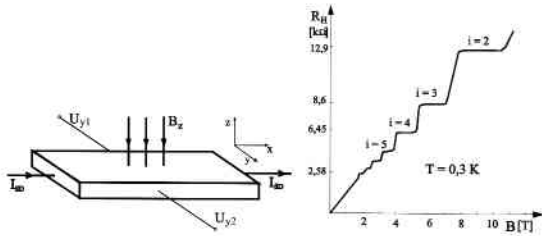
$$R_H = \frac{U_{y1} - U_{y2}}{I_{SD}} = \frac{B_Z}{n_s e} \quad (1)$$

R_H - rezystancja Halla,

B_Z - indukcja magnetyczna,

n_s - koncentracja elektronów (na jednostkę powierzchni).

* Część II będzie zamieszczona w zeszycie PAK 6/1999.



Rys. 1. Kwantowy efekt Halla: a) próбка z dwuwymiarowym gazem elektronowym (2-DEG) b) kwantyzacja rezystancji

Jeżeli indukcja B_z jest dostatecznie duża, to ruch elektronów w płaszczyźnie x - y jest kwantowany na poziomach Landaua, z przerwą energetyczną ϵ_l między nimi,

$$\epsilon_l = [\hbar e B_z / m^*] (l + 1/2) \quad (2)$$

ϵ_l – przerwa energetyczna między poziomami Landaua, $l = 0, 1, 2$ – liczba kwantowa, m^* – masa efektywna elektronu w półprzewodniku.

W elemencie fizycznym poziomy Landaua są poszerzone przez rozszczepianie, lecz są dobrze oddzielone od siebie jeżeli spełniony jest warunek $\mu B_z > > 1$, gdzie μ jest ruchliwością elektronów. Na przykład w półprzewodniku GaAs o ruchliwości elektronów $\mu \approx 25$ T $^{-1}$, w temperaturze $T = 1$ K separacja poziomów Landau występuje wtedy, gdy $B_z \geq 10$ T. W warunkach separacji poziomów rozkład stanów obejmuje oddzielone, rozszczepione poziomy Landaua, z których każdy zawiera $N = e B_z / h$ elektronów na jednostkę powierzchni. Jeżeli wartość indukcji B_z jest tak dobrana, że poziom Fermiego E_F jest zlokalizowany w obszarze pomiędzy dwoma sąsiednimi poziomami Landau tak, że całkowita liczba poziomów „ i ” jest zajęta, to $iN = n_s = ie B_z / h$, a zatem ze wzoru (1) otrzymujemy zależność (3).

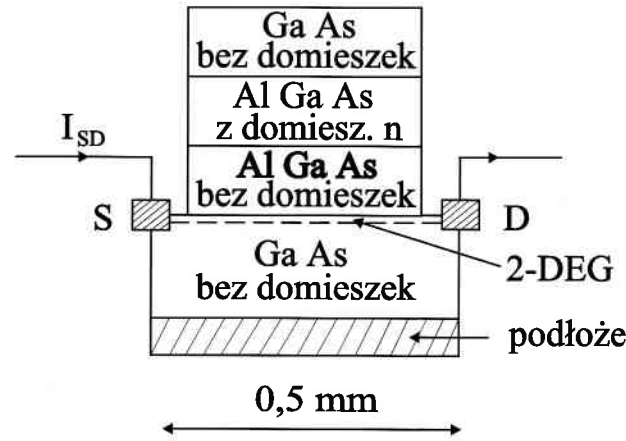
$$R_H(i) = \frac{1}{i} \frac{h}{e^2} = \frac{R_K}{i} \quad (3)$$

$R_K = h/e^2 = 25812,807 \times (1 \pm 2 \times 10^{-7}) \Omega$ – stała von Klitzinga (podana wartość jest zalecana przez Comité Consultatif d'Electricité).

Zależność rezystancji Halla od indukcji magnetycznej, w warunkach występowania kwantowego efektu Halla, pokazano na rys. 1b.

Wzorce rezystancji z kwantowym efektem Halla

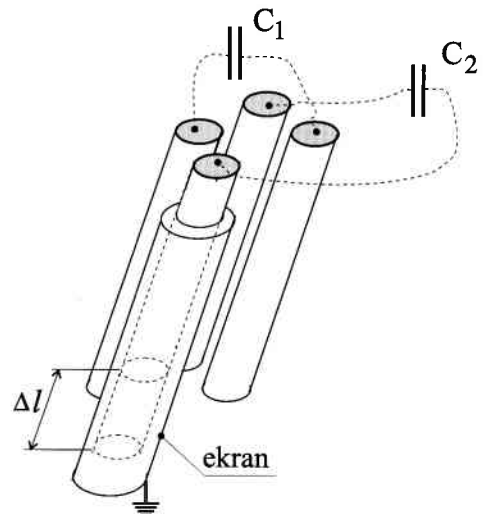
Elementy elektroniczne, w których występuje gaz elektronowy 2-DEG, to tranzystory MOSFET oraz heterostrukury. Pierwsze pomiary kwantowego efektu Halla wykonane przez von Klitzinga dotyczyły próbek MOSFET, jednakże obecnie stosuje się wyłącznie heterostrukury do wytwarzania kwantowych elementów Halla, służących jako wzorce rezystancji. Heterostruktura stosowana jako kwantowy element Halla ma typowe rozmiary 2,5 mm x 0,5 mm i jest wykonana z GaAs/(0,33Al/0,67Ga)As [6]. Przekrój poprzeczny heterostrukury pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Kwantowy element Halla: heterostruktura GaAs/AlGaAs [6]

Zasadnicze znaczenie dla heterostrukury ma złącze GaAs i niedomieszkowanego AlGaAs. Warstwa AlGaAs z domieszkami typu n wzmacnia działanie podstawowego złącza GaAs/AlGaAs w powstawaniu gazu elektronowego, natomiast górna warstwa GaAs chroni umieszczoną pod nią warstwę AlGaAs przed utlenianiem.

Najdokładniejszy sposób realizacji absolutnego pomiaru R_H , to jest pomiaru R_H za pomocą podstawowych jednostek systemu miar SI (m, kg, s, A, K, cd, mol), to mostkowe porównanie R_H z obliczonym wzorcem pojemności typu Thompsona-Lamparda. Wzorec pojemności Thompsona-Lamparda tworzą cztery pręty o przekroju kołowym umieszczone równolegle wobec siebie o ich osiach położonych w narożnikach kwadratu – rys. 3.



Rys. 3. Wzorec pojemności Thompsona-Lamparda o obliczonej wartości pojemności

Odległości między powierzchniami prętów każdej pary są pomijalnie małe. Pojemności między przeciwległymi prętami spełniają zależność (4).

$$\exp\left(-\frac{\pi C_1}{\epsilon_0}\right) + \exp\left(-\frac{\pi C_2}{\epsilon_0}\right) = 1 \quad (4)$$

Dla takiego symetrycznego rozmieszczenia prętów w próżni pojemność elektryczna $C(l)$ na jednostkę długości między przeciwległymi prętami wynosi:

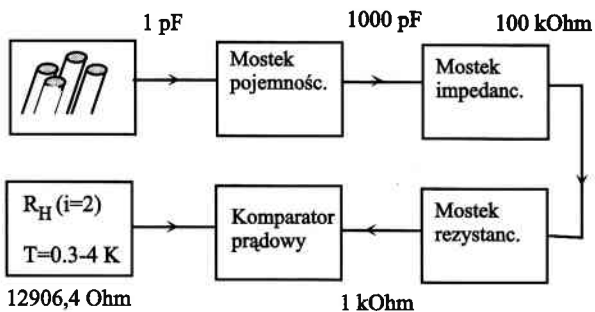
$$C(l) = C_1 = C_2 = \frac{\epsilon_0 \log_e 2}{\pi} \cong 1,95 \frac{pF}{m} \quad (5)$$

gdzie ϵ_0 jest przenikalnością dielektryczną próżni.

Uziemiona rura ekranująca umieszczona między prętami jest przesuwana, co umożliwi określenie długości efektywnej i eliminację efektu brzegowego. Zmiana Δl w położeniu rury ekranującej odpowiada zmianie ΔC pojemności między przeciwnymi prętami.

$$\Delta C = \Delta l \frac{\epsilon_0 \log_e 2}{\pi} \quad (6)$$

Zmiana położenia Δl jest mierzona za pomocą interferometru i dla znanej wartości Δl zmiana pojemności ΔC może być łatwo obliczona, ponieważ przenikalność dielektryczna $\epsilon_0 \cong 1/(\mu_0 c^2)$ jest definiowana w systemie miar SI (wartość przenikalności magnetycznej próżni μ_0 jest ustalona przez definicję ampera, natomiast prędkość światła w próżni c jest ustalona przez definicję metra). Zwykle dokonuje się pomiarów zmiany pojemności około 1 pF (dla $\Delta l \approx 0,5$ m). Do określenia zależności między obliczonym wzorcem pojemności a wzorcami rezystancji stosowane są mostki impedancyjne małej częstotliwości. Na końcu toru pomiarowego wzorec 1 k Ω jest porównywany z R_H za pomocą komparatora prądowego – rys. 4.



Rys. 4. Układ mostków do porównania wzorca rezystancji Halla (QHE) ze wzorcem impedancji utworzonym z pojemności Thompsona-Lamparda

Najdokładniejsze pomiary R_H tą metodą obarczone są niepewnością względną rzędu 7×10^{-8} . Niepewność wnoszona przez sam obliczony wzorec pojemności jest rzędu 4×10^{-8} . Eksperymenty wykazały niezależność R_H od warunków doświadczenia i od cech elementu, w granicach niedokładności eksperymentu $3,5 \times 10^{-10}$, w najlepszym przypadku. Przez pomiar R_K w ich własnej jednostce laboratoria metrologiczne są zdolne do pomiaru dryfu w funkcji czasu swoich jednostek rezystancji, z rozdzielczością rzędu $10^{-8} \dots 10^{-9}$ na rok. Weryfikacja wzorca rezystancji wśród tych narodowych laboratoriów, które mają kwantowy wzorec rezystancji, nie musi już bazować na rezystorach wzorcowych, dla których efekt transportu ogranicza dokładność porównania. BIPM ustanowiło przenośny system Halla, który jest przewożony do laboratoriów państwowych. Przykładowo można podać, że przeprowadzono pomiary wzorców rezystancji w laboratorium państwowym Szwajcarii OFMET za pomocą wzorców kwantowych QHE należących do OFMET i do BIPM [2]. Wzorce

kwantowe użyte do badań miały następujące parametry: wzorec BIPM – heterostruktura GaAs o ruchliwości nośników ładunku 30 T^{-1} , koncentracji nośników $5,1 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$, parametr $i = 2$, temperatura próbki 1,3 K, indukcja magnetyczna 10,5 T, prąd pomiaru 40 μA ; wzorec OFMET – heterostruktura GaAs o ruchliwości nośników 42 T^{-1} , koncentracji nośników $4,8(10^{15} \text{ m}^{-2})$, parametr $i = 2$, temperatura próbki 0,3 K, indukcja 9,9 T, prąd pomiaru 40 μA . Pomiary porównawcze wzorca rezystancji 100 Ω za pomocą wzorców kwantowych z obydwóch laboratoriów dały zgodność wskazań z błędem $(9 \pm 17) \times 10^{-10}$ [2].

Zastosowanie

Kwantowy efekt Halla wykorzystano do budowy wzorca rezystancji elektrycznej. Efekt ten zachodzi w warunkach, kiedy element Halla (próbka wzorcowa) umieszczony jest w ośrodku o bardzo niskiej temperaturze, zwykle mniejszej od 1 K, oraz w polu magnetycznym o indukcji rzędu kilku tesli. Trudności techniczne i koszty budowy stanowiska pomiarowego odtwarzającego takie warunki pomiaru sprawiają, że zaledwie kilkanaście laboratoriów metrologicznych w świecie ma kwantowy wzorec rezystancji QHE, zbudowany w oparciu o opisaną zasadę.

Literatura

- [1] J.L. COSTA-KRÄMER, N. GARCIA, P. GARCIA-MOCHALES, P. SERENA: Nanowire formation in macroscopic contacts: quantum mechanical conductance tapping a table top. *Surface Science* 1995, vol. 342, L1144-L1149.
- [2] F. DELAHAYE, T.J. WITT, JECKELMANN, B. JEANNERET: Comparison of quantum Hall effect resistance standards of the OFMET and BIPM. *Metrologia* 1996, vol. 32, s. 385-388.
- [3] N. GARCIA, J.L. COSTA-KRÄMER: Quantum-level phenomena in nanowires. *Europophys News* 1996, vol. 27, s. 89-91.
- [4] J.K. GIMZEWSKI, R. MÜLLER: Transition from the tunneling regime to point contact studied using scanning tunneling microscopy. *Physical Review B* 1987, vol. 36, s. 1284-1287.
- [5] K. HANSEN, et al.: Quantized conductance in relays. *Physical Review B* 1997, vol. 56, s. 2208-2220.
- [6] A. HARTLAND: The quantum Hall effect and resistance standards. *Metrologia* 1992, vol. 29, s. 175-190.
- [7] H. IBACH, H. LÜTH: Fizyka ciała stałego. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1996.
- [8] R. LANDAUER: Conductance determined by transmission: probes and quantised construction resistance. *J. Phys.: Condens. Matter* 1989, vol. 1, s. 8099-8110.
- [9] W. NAWROCKI, J. MARTINEK, M. WAWRZYŃIAK: Kwantowanie przewodności elektrycznej w drutach metalowych. *Elektronika* 1997, vol. 38, nr 10, s. 17-20.
- [10] J. I. PASCUAL i inni: Quantum Contact in Gold Nanostructures by Scanning Tunneling Microscopy. *Physical Review. Lett.* 1993, vol. 71, s. 1852-1855.
- [11] VAN WEES et al.: Quantum ballistic and adiabatic electron transport studied with quantum point contacts. *Physical Review B* 1991, vol. 43, s. 12431-12435.
- [12] K. von KLITZING, G. DORDA, M. PEPPER: New method for high-accuracy determination of fine-structure contact based on quantized Hall resistance. *Physical Review Lett.* 1980, vol. 45, 494-497.