

## Maciej WAWRZYŃIAK<sup>1</sup>, Grzegorz WICZYŃSKI<sup>2</sup>, Michał ŚWIĄTKOWSKI<sup>3</sup>

<sup>1</sup> POLITECHNIKA POZNAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTRONIKI I TELEKOMUNIKACJI

<sup>2</sup> POLITECHNIKA POZNAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY

<sup>3</sup> POLITECHNIKA WROCŁAWSKA, WYDZIAŁ ELEKTRONIKI MIKROSYSTEMÓW I FOTONIKI

# Pomiary kwantowania przewodności elektrycznej w nanodrutach formowanych za pomocą magnetostrykcyjnego elementu wykonawczego

### Dr inż. Maciej WAWRZYŃIAK

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej (1992). Stopień naukowy doktora uzyskał na tym samym wydziale w 2000 roku. Od 1992 roku pracował w Instytucie Elektroniki i Telekomunikacji Politechniki Poznańskiej. Obecnie jest pracownikiem Katedry Systemów Telekomunikacyjnych i Optoelektroniki na Wydziale Elektroniki i Telekomunikacji Politechniki Poznańskiej. Zajmuje się głównie komputerowymi systemami pomiarowymi i ich zastosowaniami do pomiaru zjawisk kwantowych.

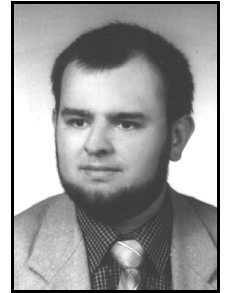
e-mail: mwawrz@et.put.poznan.pl



### Mgr inż. Michał ŚWIĄTKOWSKI

Absolwent Wydziału Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki Politechniki Wrocławskiej (2007). Obecnie doktorant na macierzystym Wydziale w Zakładzie Metrologii Mikro- i Nanostruktur. Aktywność naukowa koncentruje się wokół charakteryzacji aktuatorów MEMS oraz zastosowania mikro-mechanicznych czujników w postaci mikroelektrycznych i mikrowag kwarcowych w aplikacjach biologicznych.

e-mail: michal.swiatkowski@pwr.wroc.pl



### Dr inż. Grzegorz WICZYŃSKI

Studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej ukończył w roku 1990. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał na tym samym wydziale w roku 1998. Obecnie pracownik Zakładu Metrologii i Optoelektroniki Instytutu Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Poznańskiej. Zainteresowania naukowe: metrologia ukierunkowana na pomiary przemysłowe i biomedyczne, badania w zakresie oceny jakości energii elektrycznej oraz zastosowania systemów sensorycznych w układach sterowania.

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



### Streszczenie

W artykule zaproponowano zastosowanie w badaniach kwantowania przewodności elektrycznej w nanodrutach do formowania nanodrutów magnetostrykcyjnego elementu wykonawczego. Przedstawiony w artykule magnetostrykcyjny element wykonawczy jako element czynny wykorzystuje pręt z Terfenolu-D. Omówiono sposób konstrukcji elementu wykonawczego oraz przedstawiono charakterystykę przetwarzania. Zaprezentowane wyniki pomiarów potwierdziły możliwość zastosowania magnetostrykcyjnego elementu wykonawczego w badaniach kwantowania przewodności elektrycznej w nanodrutach.

**Słowa kluczowe:** magnetostrykcyjny element wykonawczy, nanodrut, kwantowanie przewodności elektrycznej, systemy pomiarowe.

## Measurements of conductance quantization in nanowires formed by means of a magnetostrictive actuator

### Abstract

In the paper a method for fabricating nanowires for electric conductance quantization studies is proposed as an alternative to the method based on use of a piezoelectric actuator [1, 2]. The method presented is based on use of a magnetostrictive actuator with Terfenol-D rod (the giant magnetostrictive material). The magnetostrictive actuator structure (Figure 1) [3] as well as the relationship between the output displacement and the input current for the magnetostrictive actuator are discussed (Figure 2). Figure 3 shows comparison of conductance waveforms for nanowires fabricated by means of a piezoelectric actuator with those for nanowires fabricated by means of a magnetostrictive actuator. The results of measurements confirm that the magnetostrictive actuator presented in the paper can be used for electrical conductance quantization studies for forming and stretching of nanowires.

**Keywords:** magnetostrictive actuator, nanowires, electrical conductance quantization, measuring systems.

## 1. Wstęp

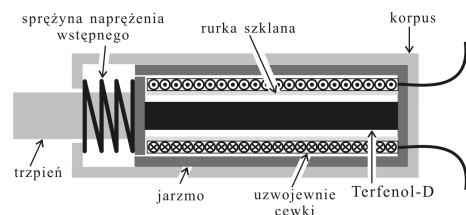
Nanodrut, w których został wytworzony QPC (ang. quantum point contact) wykazują interesujące zjawiska kwantowe, które

mogą być wykorzystane w nowych układach elektronicznych o rozmiarach nanometrycznych. QPC w nanodrucie powstaje, jeżeli szerokość nanodrutu w najwyższym jego miejscu jest porównywalna z długością fali Fermiego. Dla metali długość fali Fermiego wynosi  $\sim 0,5$  nm co jest porównywalne ze średnicą pojedynczego atomu. Dla tego zakresu rozmiarów przewodnika przewodność elektryczna wynika z  $N$  niezależnych modów fali elektronu, biorących udział w transporcie elektronów, nazywanych „kanałami przewodności”. Jeżeli prawdopodobieństwo transmisji dla każdego kanału przewodności  $T_n = 1$  przewodność nanodrutu z QPC wynosi  $G = G_0 N$  gdzie  $N$  całkowita liczba otwartych kanałów przewodności,  $G_0 = 2e^2/h$  ( $e$  – ładunek elementarny,  $h$  – stała Plancka).

Do wytwarzania nanodrutów z QPC najczęściej wykorzystywane są skaningowy mikroskop tunelowy (STM - scanning tunneling microscope) [1] oraz urządzenie do przerywania złącza (MCBJ - mechanicaly controllable break junction) [2]. W każdym z tych przypadków QPC wytwarzane jest poprzez rozciąganie wcześniej wytworzonego nanodrutu. Do formowania i rozciągania nanodrutów wykorzystywany jest piezoelektryczny element wykonawczy. W artykule zaproponowano zastąpienie piezoelektrycznego elementu wykonawczego elementem wykonawczym wykorzystującym efekt gigantycznej magnetostrykcji.

## 2. Magnetostrykcyjny element wykonawczy

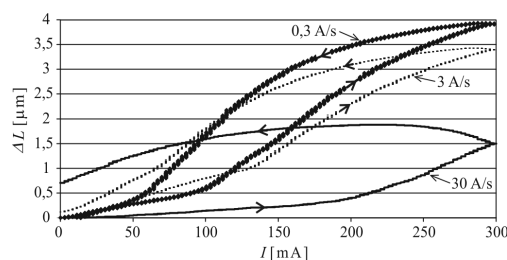
Na rysunku 1 przedstawiono konstrukcję magnetostrykcyjnego elementu wykonawczego [3].



Rys. 1. Konstrukcja magnetostrykcyjnego elementu wykonawczego  
Fig. 1. Construction of a magnetostrictive actuator

Zjawisko magnetostrykcji powoduje deformację mechaniczną materiału, na który działa zewnętrzne pole magnetyczne. Deformacja polega na wydłużeniu (magnetostrykcja dodatnia) lub skróceniu (magnetostrykcja ujemna) materiału w kierunku linii pola magnetycznego przy zmianie natężenia tego pola. Przedstawiony na rysunku 1 magnetostrykcyjny element wykonawczy wykorzystuje jako element czynny pręt z materiału z grupy SMART terfenolu-D ( $Tb_{0,3}Dy_{0,7}Fe_{1,9}$ ). Terfenol-D jest międzymetalicznym stopem pierwiastków ziem rzadkich terbu i dysprozu oraz żelaza.

Zastosowany materiał wykazuje efekt gigantycznej magnetostrykcji (ang. GMM - Giant Magnetostrictive Materials), który występuje w szerokim zakresie temperatur. W prezentowanym elemencie wykonawczym zastosowano pręt o długości 20 mm i średnicy 6 mm charakteryzujący się względnym odkształceniem  $\lambda = 680$  ppm w polu magnetycznym o natężeniu  $H=500$  Oe przy wstępnym naprężeniu normalnym  $\sigma = 6$  MPa. Pręt umieszczono w rurce szklanej, na której nawinięto uzwojenie cewki. W celu zamknięcia obwodu magnetycznego zastosowano jarzmo wykonane z materiału magnetycznie miękkiego. Do wytworzenia naprężenia wstępnego wykorzystano sprężynę napinającą wytwarzającą wstępne naprężenie normalne 1,2 MPa. Natężenie pola magnetycznego wewnątrz cewki dla prądu elektrycznego o natężeniu 1 A płynącego przez uzwojenie cewki wynosi 150 Oe.



Rys. 2. Charakterystyka  $\Delta L=f(I)$  magnetostrykcyjnego elementu wykonawczego dla 3 szybkości zmian sygnału sterującego: 0,3; 3 oraz 30 A/s

Fig. 2.  $\Delta L=f(I)$  characteristic of the magnetostrictive actuator for 3 current slew rates of the control signal: 0,3; 3 and 30 A/s

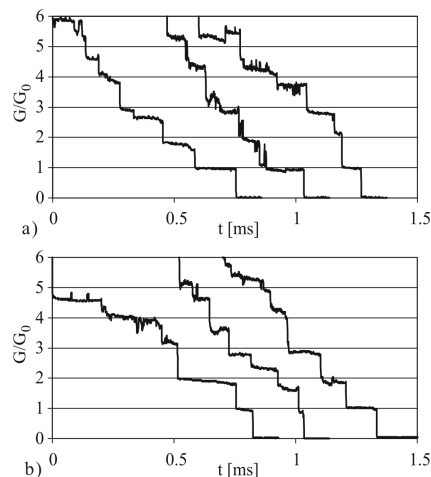
Na rysunku 2 przedstawiono wyniki pomiaru charakterystyki przetwarzania magnetostrykcyjnego elementu wykonawczego  $\Delta L=f(I)$  gdzie:  $\Delta L$  – wydłużenie,  $I$  – prąd płynący przez uzwojenie cewki. Do pomiarów charakterystyki zastosowano natężeniowy światłowodowy czujnik zbliżeniowy w konfiguracji Fabry'ego-Perota. Pomiary wykonano dla trzech szybkości zmian sygnału sterującego: 0,3; 3 oraz 30 A/s. Na przedstawionych na rysunku 2 charakterystykach przetwarzania widoczna jest histereza, której szerokość zwiększa się wraz ze zwiększaniem szybkości zmian sygnału sterującego. Na podstawie przedstawionych na rys. 2 charakterystyk można stwierdzić, że magnetostrykcyjny element wykonawczy może być stosowany przy sterowaniu sygnałem o małej szybkości zmian  $\leq 0,3$  A/s. W celu wyeliminowania efektu histerezy amplituda sygnału sterującego dla danej szybkości jego zmian musi być odpowiednio dobrana na podstawie charakterystyki przetwarzania.

### 3. Wyniki pomiarów

Do pomiarów wykorzystano system pomiarowy służący do rejestrowania przebiegów czasowych przewodności i wyznaczania histogramy przewodności [4]. Nanodrut powstają pomiędzy elektrodami A (próbka) i B (ostrze) wykonanymi z badanego materiału. Elektroda B została przytwierdzona do trzpienia magnetostrykcyjnego elementu wykonawczego. Do sterowania ruchem elektrody B zastosowano generator funkcyjny. Sygnał z generatora po zamianie na sygnał prądowy zasila uzwojenie cewki elementu wykonawczego. Przetwornik napięcie-prąd zbudowano z wykorzystaniem wzmacniaczem operacyjnym OPA 561.

W celu wytworzenie nanodrutu doprowadzamy do zderzenia elektrod B z elektrodą A. Następnie elektrodę B oddalamy od elektrody A z odpowiednio dobraną prędkością. Po zderzeniu elektrod pomiędzy elektrodami powstaje trwałe połączenie. Oddalanie elektrody B powoduje rozciąganie obszaru biorącego udział w zderzeniu. W końcowej fazie rozciągania pomiędzy elektrodami formuje się nanodrut z QPC. Zadaniem systemu pomiarowego jest zmierzenie przewodności rozciąganego nanodrutu w funkcji czasu (przebieg czasowy przewodności), czyli zmierzenie przewodności  $G$  pomiędzy elektrodami A i B w czasie ich oddalania.

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki pomiarów przebiegów czasowych. Nanodrut formowane były pomiędzy ostrzem z kobaltu i próbką ze złota. Przebiegi czasowe przedstawione na rysunku 4a zostały zarejestrowane podczas rozciągania nanodrutów formowanych za pomocą piezoelektrycznego elementu wykonawczego. Dla porównania na rysunku 4b przedstawiono przebiegi czasowe zarejestrowane podczas rozciągania nanodrutów formowanych za pomocą magnetostrykcyjnego elementu wykonawczego.



Rys. 3. Przebiegi czasowe przewodności ektrycznej dla nanodrutów formowanych za pomocą elementów wykonawczych: piezoelektrycznego (a) i magnetostrykcyjnego (b)

Fig. 3. Conductance waveforms for nanowires formed by means of actuators: piezoelectric (a) and magnetostrictive (b)

### 4. Wnioski

Przedstawione wyniki pomiarów potwierdziły możliwość zastąpienia piezoelektrycznego elementu wykonawczego elementem wykonawczym wykorzystującym efekt gigantycznej magnetostrykcji. Pomiary charakterystyki przetwarzania magnetostrykcyjnego elementu wykonawczego przedstawionego w artykule wykazały, że może być on sterowany sygnałem o małej szybkości zmian  $\leq 0,3$  A/s. Na charakterystykach przetwarzania widoczny jest efekt histerezy, który należy wyeliminować poprzez odpowiedni dobór amplitudy sygnału sterującego. Podczas pomiarów charakterystyki przetwarzania zaobserwowano zjawisko nagrzewania się magnetostrykcyjnego elementu wykonawczego spowodowane przepływem prądu przez uzwojenie cewki, co powoduje znaczną zmianę wymiarów pręta z Terfenolu-D. Wyklucza to sterowanie elementem wykonawczym prezentowanym w pracy prądem o wartości większej od około 300 mA.

### 5. Literatura

- [1] Costa-Krämer J. L., García N., García-Mochales P.: Conductance quantization in nanowires formed between micro and macroscopic metallic electrodes, *Phys. Rev. B*, vol. 55 (1997), s. 5416-5424.
- [2] Krans J. M., Muller C. J., Yanson I. K., Govaert Th. C. M., Hesper R., van Ruitenbeek J. M.: One-atom point contacts, *Phys. Rev. B*, vol. 48 (1993), s. 14721-14724.
- [3] Yan R., Wang B, Yang Q, Liu F., Cao S., Huang W.: A Numerical Model of Displacement for Giant Magnetostrictive Actuator, *IEEE Trans. on App. Supercon.*, vol. 14 (2004), s. 1914-1917.
- [4] Wawrzyniak M.: Probe capacitance-dependent systematic error in I-V measurements of nanowires: analysis and correction, *Metrology and Measurement Systems*, vol. 14 (2007), s. 391-408.