

RZECZPOSPOLITA
POLSKA



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY** (19) **PL** (11) **232910**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **418032**

(51) Int.Cl.
G01R 33/00 (2006.01)
G01R 33/09 (2006.01)

(22) Data zgłoszenia: **20.07.2016**

(54) **Magnetorezystancyjny detektor przesunięcia fazowego fal spinowych**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:
29.01.2018 BUP 03/18

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:
30.08.2019 WUP 08/19

(73) Uprawniony z patentu:

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE,
Kraków, PL**

(72) Twórca(y) wynalazku:

**SŁAWOMIR ZIĘTEK, Goczałkowice-Zdrój, PL
TOMASZ STOBIECKI, Kraków, PL
JAKUB CHĘCIŃSKI, Kraków, PL
MAREK FRANKOWSKI, Kraków, PL
WITOLD SKOWROŃSKI, Kraków, PL**

PL 232910 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest magnetorezystancyjny detektor przesunięcia fazowego pomiędzy dwoma biegnącymi falami spinowymi. Szybki rozwój relatywnie młodej dziedziny nauki, jaką jest elektronika spinowa daje nadzieję na stworzenie nowej grupy energooszczędnych nanourządzeń elektronicznych do zastosowań w gromadzeniu, przetwarzaniu oraz przesyłaniu informacji wykorzystując jako nośnik informacji prąd spinowy i/lub fale spinowe. W obecnie stosowanych półprzewodnikowych pamięciach operacyjnych informacja reprezentowana jest przez zgromadzony ładunek elektryczny. Operacje na bitach działają w oparciu o przepływ prądu elektrycznego, któremu nieodłącznie towarzyszy wydzielanie ciepła Joule'a Lenza, które istotnie ogranicza technologie VLSI (*very-large-scale integration*).

Zastosowanie prądów spinowych i/lub fal spinowych do przesyłania i przetwarzania informacji stwarza możliwość znacznego zredukowania ilości wydzielanej energii w przyszłych procesorach czy pamięciach. W ostatnich latach zaprezentowane zostały liczne prototypowe urządzenia działające w oparciu o fale spinowe, takie jak falowody fali spinowej [1, 2], wzmacniacze fal spinowych [3], układy logiczne [4], a także układy do elektrycznej detekcji [1] oraz generatory fal spinowych oparte o mikro-rozmiarowe pętle indukcyjne lub komórki magnetoelastyczne [1]. Detekcja fal spinowych w nanorozmiarowych urządzeniach mikrofalowych jest możliwa dzięki efektowi diody spinowej [5]. Jedną z możliwości elektrycznej detekcji fal spinowych jest zastosowanie nanozłączy opartych o zjawiska magnetorezystancyjne, takie jak gigantyczna magnetorezystancja (GMR – *giant magnetoresistance*) [6], lub tunelowa magnetorezystancja (TMR – *tunnel magnetoresistance*) [7]. Złącza GMR lub TMR zbudowane są z dwóch warstw ferromagnetyka, rozdzielonych niemagnetyczną warstwą metaliczną (np. Cu) w przypadku efektu GMR, bądź krystaliczną barierą tunelową z izolatora (np. MgO) w przypadku efektu TMR. Rezystancja w obu typach urządzeń zależy od kąta pomiędzy wektorami magnetyzacji górnej i dolnej warstwy ferromagnetycznej [6, 7].

Zjawiska fizyczne GMR i TMR, które związane są ze spinowo spolaryzowanym prądem oraz transferem spinowego momentu siły umożliwiają realizację elektronicznych układów spintronicznych, z których niektóre zostały ujawnione w przedstawionych poniżej opisach patentowych.

Z amerykańskiego opisu patentowego nr US6,577,124 znany jest sensor pola magnetycznego o dużej czułości zbudowany w oparciu o element GMR, lub TMR. Dzięki sprzężeniu antyferromagnetycznemu pomiędzy warstwami ferromagnetycznymi czujnika, możliwe jest kształtowanie wrażliwości charakterystyki rezystancyjnej sensora na zewnętrzne pole magnetyczne. W opisie przedstawiono również planarne struktury zawierające cztery magnetyczne złącza tunelowe TMR połączone w układzie mostka Wheatstone'a.

Z amerykańskiego opisu patentowego nr US7,678,475 znane są urządzenia działające w oparciu o spinowy moment siły (*spin-torque devices*), takie jak wzmacniacz spinowy oraz mikrofalowy oscylator, w których wykorzystuje się elementy GMR lub TMR. W przypadku wzmacniacza spinowego wykorzystany został na wejściu element GMR, którego dolna elektroda stanowi falowód fali spinowej połączony z dolną elektrodą elementu TMR, który stanowi wyjście wzmacniacza. Natomiast w przypadku oscylatora mikrofalowego, falowód fali spinowej wykorzystany został do synchronizacji częstotliwości rezonansowych wielu pojedynczych oscylatorów zbudowanych na bazie elementów GMR.

Z amerykańskiego opisu patentowego nr US9,000,546 znane są struktury zbudowane w oparciu o falowody fal spinowych w postaci cienkowarstwowych pasków o grubości ok. 1 nm i o ekstremalnie małej szerokości (zbliżone do drutu), które w końcowych fragmentach są pogrubione do ok. 2 nm. Taka struktura falowodu sprawia, że kierunek wektora spontanicznej magnetyzacji dla strefy cienkiej jest prostopadły w stosunku do płaszczyzny obwodu, natomiast dla strefy pogrubionej, leży w płaszczyźnie falowodu. Dzięki umiejscowieniu w obszarach strefy pogrubionej falowodu sterowanych anten nadawczych możliwa jest lokalna zmiana kierunku wektora magnetyzacji. Tak wytworzone zaburzenie jest przenoszone do elementu odbiorczego umiejscowionego w drugim obszarze strefy pogrubionej tego samego falowodu. W opisie przedstawiono przykładowe realizacje podstawowych podzespołów logicznych, takich jak bramki logiczne AND i NAND oraz przykład realizacji komórki pamięci.

Istotą wynalazku jest magnetorezystancyjny detektor przesunięcia fazowego fal spinowych, zawierający dwa falowody fal spinowych usytuowane względem siebie ortogonalnie i umieszczone na płaskim podłożu, przy czym pomiędzy falowodami fal spinowych, w miejscu ich skrzyżowania, jest umiejscowiona przekładka, która ma galwaniczne połączenie z falowodami fal spinowych, ponadto przy końcu każdego falowodu fal spinowych jest umiejscowiony element wzbudzający fale spinowe.

Pierwsze wykonanie magnetorezystancyjnego detektora przesunięcia fazowego ma niemagnetyczną przekładkę metalową, korzystnie wykonaną z miedzi.

Drugie wykonanie magnetorezystancyjnego detektora przesunięcia fazowego ma przekładkę z niemagnetycznego izolatora, korzystnie wykonaną z tlenku magnezu. Falowody fal spinowych wykonane są z materiału ferromagnetycznego o niskim współczynniku tłumienia Gilberta.

Magnetorezystancyjny detektor przesunięcia fazowego fal spinowych ma element wzbudzający fale spinowe w postaci pętli indukcyjnej odseparowanej elektrycznie od falowodów za pomocą warstwy izolacyjnej.

Przedmiot wynalazku w przykładzie wykonania ujawniono na rysunku, na którym Fig. 1 przedstawia wzajemne usytuowanie głównych elementów wchodzących w skład magnetorezystancyjnego detektora przesunięcia fazowego fal spinowych, Fig. 2 przedstawia w powiększeniu skrzyżowanie falowodów oraz umiejscowienie przekładki, Fig. 3 przedstawia zmiany rezystancji (przed filtrem LPF) i sygnały wyjściowe (po filtrze LPF) magnetorezystancyjnego detektora fazy (z przekładką miedzianą) w funkcji czasu, dla różnych wartości przesunięć fazowych pomiędzy falami spinowymi w miejscu skrzyżowania falowodów, Fig. 4 przedstawia zmiany rezystancji elementu magnetorezystancyjnego (z przekładką miedzianą) w funkcji różnicy faz fal spinowych. Fig. 5 przedstawia zmiany rezystancji (przed filtrem LPF) i sygnały wyjściowe (po filtrze LPF) magnetorezystancyjnego detektora fazy (z przekładką z tlenku magnezu) w funkcji czasu, dla różnych wartości przesunięć fazowych pomiędzy falami spinowymi w miejscu skrzyżowania falowodów, Fig. 6 przedstawia zmiany rezystancji elementu magnetorezystancyjnego (z przekładką z tlenku magnezu) w funkcji różnicy faz fal spinowych.

Wprowadzenie zmiennoprądowych sygnałów wejściowych, do pętli wzbudzających fale spinowe 1a i 1b, powoduje powstanie zmiennego pola magnetycznego w kierunku prostopadłym do powierzchni falowodu, które z kolei wywołuje lokalne oscylacje wektorów magnetyzacji w falowodach fal spinowych 2a i 2b, które ulegają propagacji w postaci biegnących fal spinowych w falowodach fal spinowych 2a i 2b. Przekładka metalowa bądź z izolatora niemagnetycznego wraz z fragmentami falowodów 2a i 2b w miejscu ich skrzyżowania stanowi element magnetorezystancyjny, którego rezystancja na skutek efektu GMR (dla przekładki metalowej), bądź TMR (dla przekładki z izolatora niemagnetycznego) zależy od kąta pomiędzy wektorami magnetyzacji falowodu dolnego 2a i górnego 2b w sposób opisany równaniem (1).

$$R(\theta) = R_P + \frac{R_{AP}-R_P}{2} (1 - \cos \theta) \quad (1)$$

gdzie:

R_P – rezystancja w stanie równoległego ustawienia wektorów magnetyzacji \vec{m}_a i \vec{m}_b

R_{AP} – rezystancja w stanie antyrównoległego ustawienia wektorów magnetyzacji \vec{m}_a i \vec{m}_b

θ – kąt utworzony przez wektory magnetyzacji \vec{m}_a i \vec{m}_b

W stanie spoczynkowym, czyli przy nieaktywnych elementach wzbudzających fale spinowe 1a i 1b, wektory magnetyzacji w materiale ferromagnetycznym stanowiącym falowody fal spinowych 2a i 2b są ustawione w płaszczyźnie horyzontalnej i ortogonalnie względem siebie. Rezystancja w stanie spoczynkowym wynosi zatem $\frac{R_{AP}+R_P}{2}$. Wzbudzone w falowodach 2a i 2b biegnące fale spinowe przesunięte w fazie o kąt φ , wywołują drgania wektorów magnetyzacji $\vec{m}_a(r_a, t)$ i $\vec{m}_b(r_b, t)$ w punktach styku przekładki 3 z falowodami w położeniach r_a i r_b . Skutkuje to powstaniem zależnych od czasu zmian rezystancji opisanej równaniem 2.

$$R(t) = R_P + \frac{R_{AP}-R_P}{2} \left[1 - \left(\frac{\vec{m}_a(r_a, t) \circ \vec{m}_b(r_b, t)}{|\vec{m}_a(r_a, t)| \cdot |\vec{m}_b(r_b, t)|} \right) \right] \quad (2)$$

Generowane przez pętle indukcyjne 1a i 1b, sinusoidalnie zmienne pole magnetyczne o częstotliwości w zakresie GHz i amplitudzie 1 mT w kierunku \vec{z} , prostopadłym do płaszczyzny falowodów 2a i 2b, jest źródłem fal spinowych w falowodach 2a i 2b. Każdy z falowodów o wymiarach 1000×200×20 nm wykonany jest ze stopu Ni₈₀Fe₂₀ charakteryzującym się niskim współczynnikiem tłumienia Gilberta (rzędu 10⁻³) oraz magnetyzacją nasycenia $\mu_0 M_s = 1$ T.

Przykład realizacji 1.

W wykonaniu pierwszym, magnetorezystancyjny detektor przesunięcia fazowego fal spinowych ma dwa skrzyżowane pod kątem prostym falowody fal spinowych 2a i 2b wykonane z materiału ferromagnetycznego o grubości 20 nm, o niskim (rzędu 10⁻³) współczynniku tłumienia Gilberta, które zosta-

ły umiejscowione na płaskim nieferromagnetycznym, dielektrycznym podłożu (np. utlenionym podłożu krzemowym Si/SiO₂). Magnetorezystancyjny detektor przesunięcia fazowego fal spinowych ma pomiędzy falowodami fal spinowych 2a i 2b, w miejscu ich skrzyżowania, umieszczoną kwadratową przekładkę 3 wykonaną z miedzi. Przekładka 3 wraz z lokalnymi warstwami ferromagnetycznymi falowodów fal spinowych 2a i 2b stanowi element GMR. Wartość rezystancji elementu magnetorezystancyjnego w stanie równoległego ustawienia magnetyzacji w falowodach 2a i 2b wynosi $R_P = 10 \Omega$, w stanie antyrównoległego ustawiania magnetyzacji wynosi $R_{AP} = 11 \Omega$, natomiast w przypadku braku zewnętrznego pola magnetycznego rezystancja wynosi $10,5 \Omega$ z uwagi na prostopadłe skierowanie wektorów magnetyzacji w falowodach 2a i 2b. Po wzbudzeniu w falowodach 2a i 2b fal spinowych przesuniętych fazowo o φ , otrzymuje się czasowo zależne przebiegi rezystancji, przedstawione na rysunku Fig. 3. Odseparowanie wartości składowej stałej sygnału wyjściowego elementu magnetorezystancyjnego może być łatwo zrealizowane za pośrednictwem filtra dolnoprzepustowego LPF, co pokazano na rysunku Fig. 1. Linie poziome na rysunku Fig. 3 reprezentują średni poziom rezystancji, który jest różny dla różnych przesunięć fazowych φ . Średnia wartość rezystancji w funkcji przesunięcia fazowego φ pomiędzy falami spinowymi jest przedstawiona na Fig. 4.

Przykład realizacji 2.

W wykonaniu drugim, magnetorezystancyjny detektor przesunięcia fazowego fal spinowych ma dwa skrzyżowane pod kątem prostym falowody fal spinowych 2a i 2b wykonane z materiału ferromagnetycznego o grubości 20 nm, o niskim (rzędu 10^{-3}) współczynniku tłumienia Gilberta, które zostały umiejscowione na płaskim nieferromagnetycznym, dielektrycznym podłożu (np. utlenionym podłożu krzemowym Si/SiO₂). Magnetorezystancyjny detektor przesunięcia fazowego fal spinowych ma pomiędzy falowodami fal spinowych 2a i 2b, w miejscu ich skrzyżowania umieszczoną kwadratową przekładkę 3 wykonaną z tlenku magnezu. Przekładka 3 wraz z lokalnymi warstwami ferromagnetycznymi falowodów fal spinowych 2a i 2b stanowi element TMR. Wartość rezystancji elementu magnetorezystancyjnego w stanie równoległego ustawienia magnetyzacji w falowodach 2a i 2b wynosi $R_P = 1 \text{ k}\Omega$, w stanie antyrównoległego ustawiania magnetyzacji wynosi $R_{AP} = 2 \text{ k}\Omega$, natomiast w przypadku braku zewnętrznego pola magnetycznego rezystancja wynosi $1,5 \text{ k}\Omega$ z uwagi na prostopadłe skierowanie wektorów magnetyzacji w falowodach 2a i 2b. Po wzbudzeniu w falowodach 2a i 2b fal spinowych przesuniętych fazowo o φ , otrzymuje się czasowo zależne przebiegi rezystancji, przedstawione na rysunku Fig. 4. Odseparowanie wartości składowej stałej sygnału wyjściowego elementu magnetorezystancyjnego może być łatwo zrealizowane za pośrednictwem filtra dolnoprzepustowego LPF, co pokazano na rysunku Fig. 1. Linie poziome na rysunku Fig. 5 reprezentują średni poziom rezystancji, który jest różny dla różnych przesunięć fazowych φ . Średnia wartość rezystancji w funkcji przesunięcia fazowego φ pomiędzy falami spinowymi jest przedstawiona na Fig. 6.

Literatura

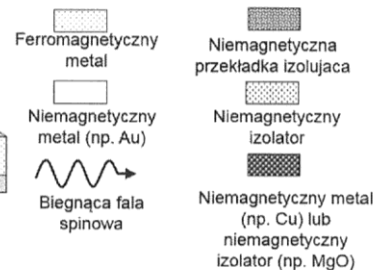
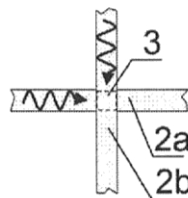
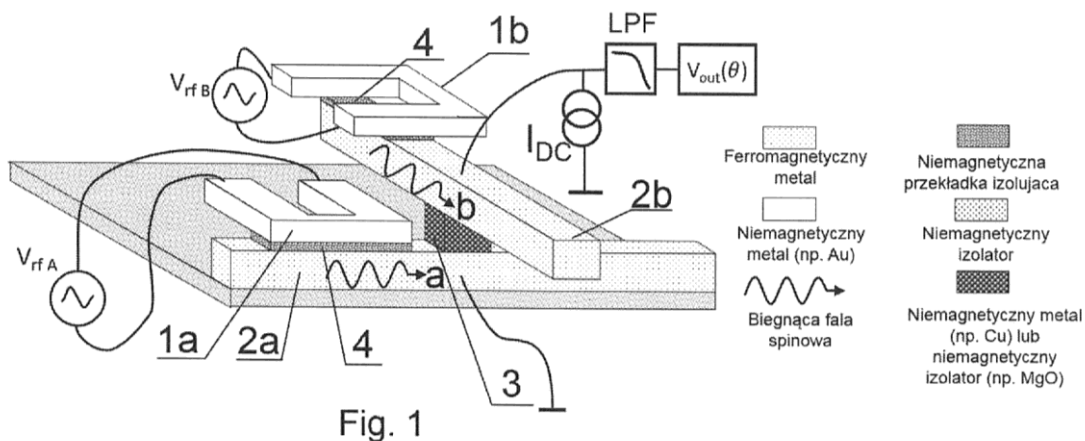
- [1] S. Cherepov, et al. "Electric-field-induced spin wave generation using multiferroic magnetoelectric cells". *Applied Physics Letters* 104.8 (2014): 082403.
- [2] H. Yu, et al. "Omnidirectional spin-wave nanograting coupler". *Nature communications* 4 (2013).
- [3] A. Khitun, et al. "Magnetoelectric spin wave amplifier for spin wave logic circuits". *Journal of Applied Physics* 106.12 (2009): 123909.
- [4] M. Jamali, et al. "Spin wave nonreciprocity for logic device applications". *Scientific reports* 3 (2013).
- [5] A. A. Tulapurkar, et al. "Spin-torque diode effect in magnetic tunnel junctions". *Nature* 438.7066 (2005): 339–342.
- [6] S. Ziętek, et al. "Rectification of radio-frequency current in a giant-magnetoresistance spin valve". *Physical Review B* 91.1 (2015): 014430.
- [7] W. Skowroński, et al. "Spin-torque diode radio-frequency detector with voltage tuned resonance". *Applied Physics Letters* 105.7 (2014): 072409.

Zastrzeżenia patentowe

1. Magnetorezystancyjny detektor przesunięcia fazowego fal spinowych zawierający elementy wzbudzające fale spinowe, elementy umożliwiające propagację biegnących fal spinowych oraz przekładki, **znamienny tym**, że ma dwa falowody fal spinowych (2a) i (2b) usytuowane

- względem siebie ortogonalnie i umieszczone na płaskim podłożu, przy czym pomiędzy falowodami fal spinowych (2a) i (2b), w miejscu ich skrzyżowania, jest umiejscowiona przekładka (3), która ma galwaniczne połączenie z falowodami fal spinowych (2a) i (2b), ponadto przy końcu każdego falowodu fal spinowych (2a) i (2b) jest umiejscowiony element wzbudzający fale spinowe (1a) i (1b).
2. Magnetorezystancyjny detektor przesunięcia fazowego fal spinowych według zastrz. 1, **znamienny tym**, że przekładka (3) jest wykonana z metalu niemagnetycznego, korzystnie z miedzi.
 3. Magnetorezystancyjny detektor przesunięcia fazowego fal spinowych według zastrz. 1, **znamienny tym**, że przekładka (3) jest wykonana z izolatora niemagnetycznego, korzystnie z tlenku magnezu.
 4. Magnetorezystancyjny detektor przesunięcia fazowego fal spinowych według zastrz. 1, **znamienny tym**, że falowody fal spinowych (2a) i (2b) wykonane są z materiału ferromagnetycznego o niskim współczynniku tłumienia Gilberta.
 5. Magnetorezystancyjny detektor przesunięcia fazowego fal spinowych według zastrz. 1, **znamienny tym**, że element wzbudzający fale spinowe (1a) i (1b) stanowi pętla indukcyjna odseparowana elektrycznie od falowodów (2a) i (2b) za pomocą izolatora (4).

Rysunki



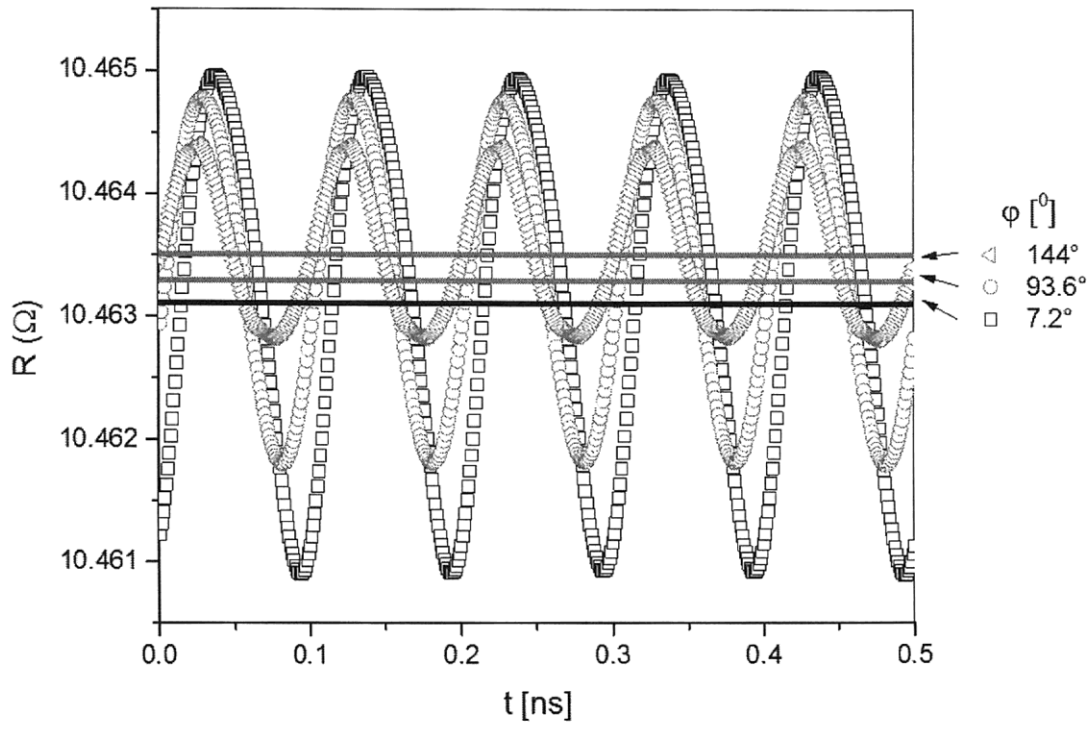


Fig. 3

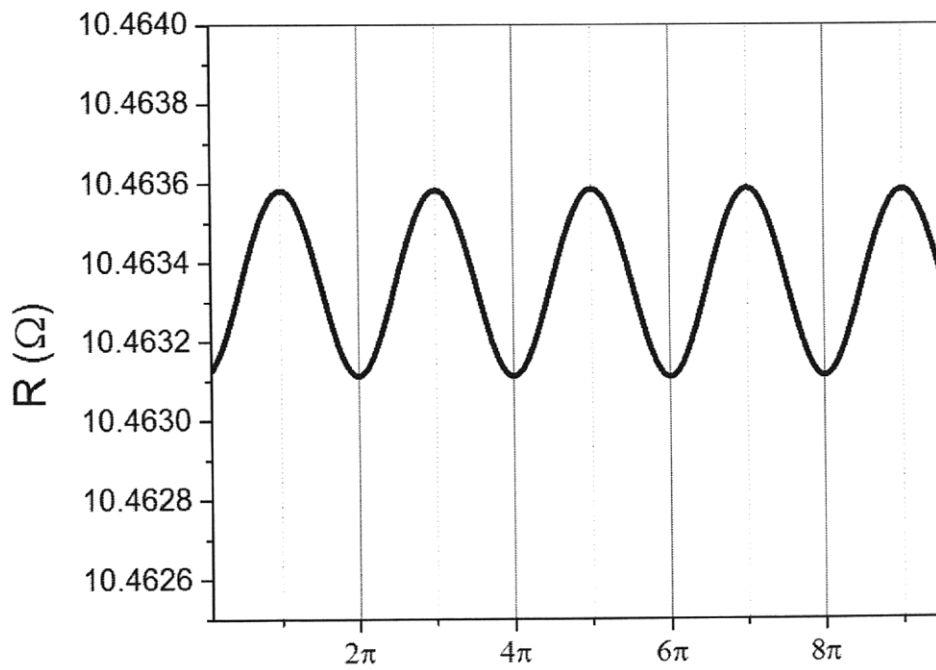


Fig. 4

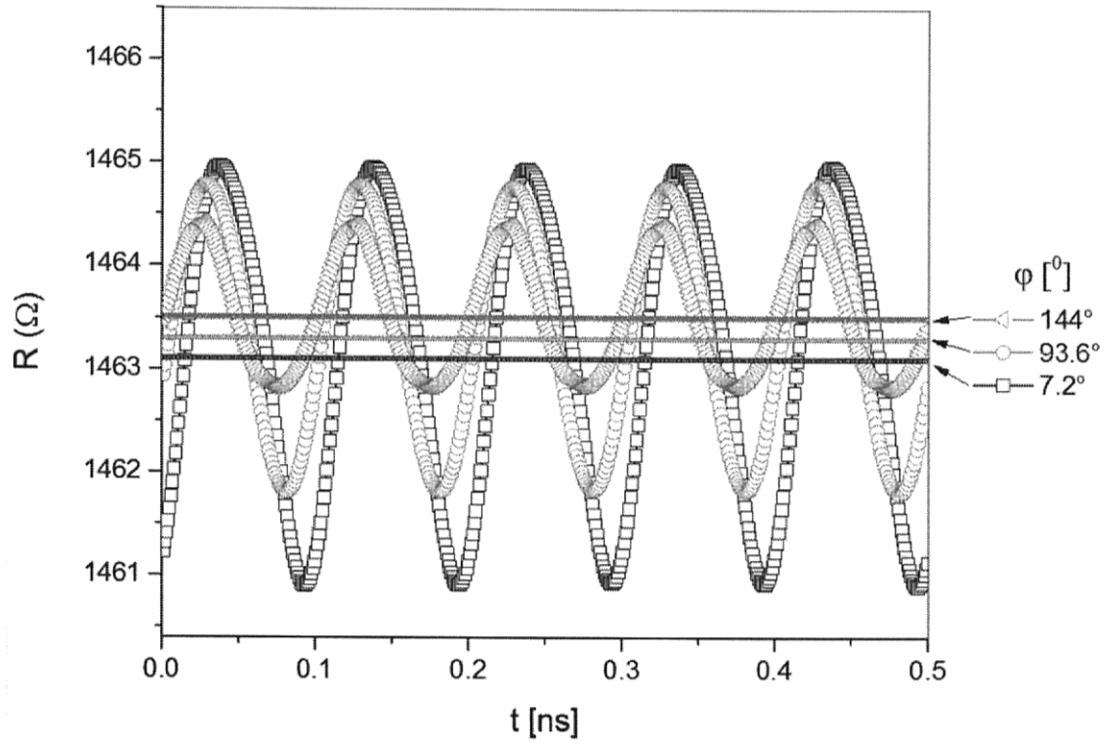


Fig. 5

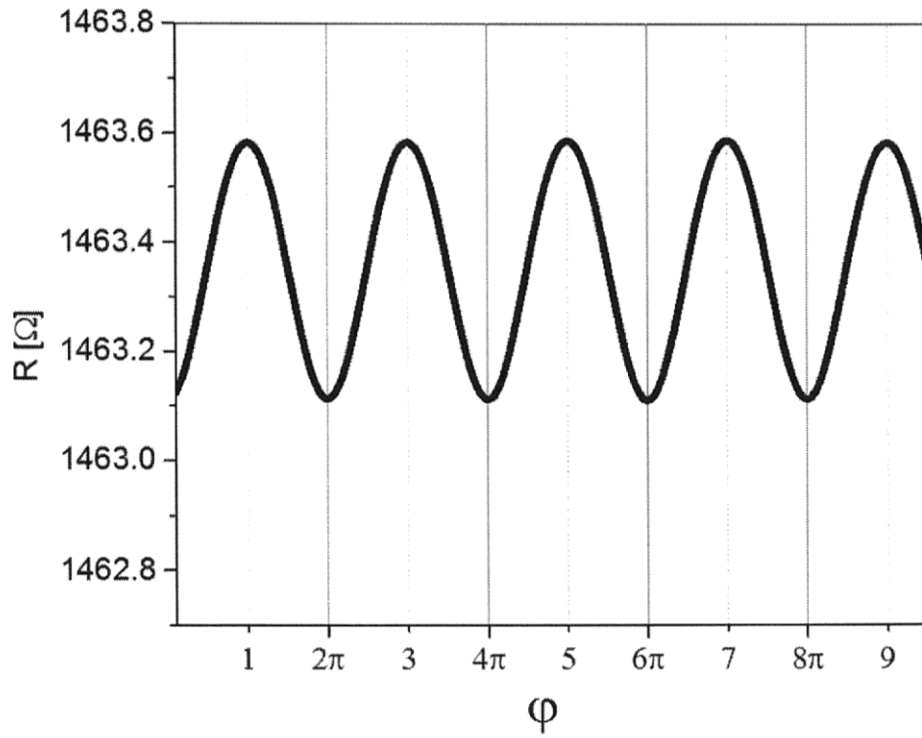


Fig. 6

