

RZECZPOSPOLITA  
POLSKA



Urząd Patentowy  
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY**

(19) **PL**

(11) **229635**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **417862**

(22) Data zgłoszenia: **06.07.2016**

(51) Int.Cl.

**G01R 33/12 (2006.01)**

**G01R 33/381 (2006.01)**

**H01F 7/06 (2006.01)**

(54)

**Zespół elektromagnesów do wytwarzania pola magnetycznego**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:

**15.01.2018 BUP 02/18**

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:

**31.08.2018 WUP 08/18**

(73) Uprawniony z patentu:

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

(72) Twórca(y) wynalazku:

**SŁAWOMIR ZIĘTEK, Goczałkowice-Zdrój, PL  
PIOTR RZESZUT, Kraków, PL  
WITOLD SKOWROŃSKI, Kraków, PL  
TOMASZ STOBIECKI, Kraków, PL  
JANUSZ BUDZIOCH, Kraków, PL**

**PL 229635 B1**

## Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest zespół elektromagnesów przeznaczony do wytwarzania jednorodnego pola magnetycznego, którego wektor kierunkowy może być ustawiany dla dowolnego kąta w płaszczyźnie. Zespół elektromagnesów przeznaczony jest do badań anizotropowych właściwości cienkich warstw magnetycznych, nanostruktur ferromagnetycznych, oraz urządzeń elektroniki spinowej.

W mikro- i nano-rozmiarowych powierzchniowo strukturach magnetycznych, możliwe jest wzbudzenie rezonansu ferromagnetycznego (FMR) oraz fal spinowych w zakresie wysokich (GHz) częstotliwości radiowych. Zbudowane w oparciu o te zjawiska nanourządzenia takie jak: przestrajalne napięciem nanooscylatory STO (spin torque oscillator), detektory mikrofalowe, precyzyjne czujniki pola magnetycznego, czy nieulotne pamięci MRAM (Magnetic Random Access Memory), w chwili obecnej wykazują duży potencjał aplikacyjny zapewniając niskie zużycie energii, w zakresie częstotliwości mikrofalowych. Oczekuje się, że w przyszłości umożliwią one realizację urządzeń nowej generacji przeznaczonych do magazynowania i przetwarzania danych, na potrzeby gospodarki i życia codziennego, na przykład: w diagnostyce medycznej, telekomunikacji, a w nauce, do obliczeń numerycznych.

Z uwagi na fakt, że niektóre parametry elementów magnetoelektroniki i elektroniki spinowej (np.: częstotliwość FMR, dobroć oscylatorów STO) są silnie zależne od kierunku zewnętrznego pola magnetycznego, niezbędna jest precyzyjna metoda pomiaru co do wartości i kierunku pola magnetycznego w bliskim sąsiedztwie badanej próbki bądź elementu mikro-nano-elektronicznego. W tym celu, konieczne jest wytworzenie specyficznego urządzenia badawczego, które zapewni nie tylko silne jednorodne pole magnetyczne w otoczeniu badanej próbki/elementu, lecz również zapewni możliwość precyzyjnej kontroli kierunku pola magnetycznego w zakresie pełnego obrotu wektora pola, czyli  $360^\circ$ . Urządzenie winno charakteryzować się:

- maksymalnie dużą jednorodnością pola magnetycznego, rozumianą jako jednorodność natężenia, oraz kierunku pola w obszarze badanej próbki, przynajmniej o powierzchni  $5 \times 5 \text{ mm}^2$ .
- maksymalnie małą histerezą magnetyczną.

Układ dwóch jednakowych kołowych cewek (tzw. cewki Helmholtza), których promienie są równe odległości pomiędzy środkami równoległe oddalonych cewek, umożliwi wytworzenie jednorodnego natężenia pola magnetycznego. Zastosowanie dwóch zestawów wzajemnie ortogonalnie usytuowanych cewek Helmholtza umożliwia zmianę kierunku pola magnetycznego w płaszczyźnie prostopadłej do ich średnic.

W celu wytworzenia pola magnetycznego o dużej wartości natężenia (np.  $80 \text{ kA/m}$ ) konieczne jest zastosowanie obwodów magnetycznych, które zapewnią koncentrację linii pola magnetycznego w niewielkim obszarze. Zakres wartości zmiany natężenia pola wytworzonego za pomocą cewek Helmholtza jest niewystarczający na przykład do badań elementów spintronicznych wykorzystujących rezonans ferromagnetyczny.

Istotą wynalazku jest zespół elektromagnesów do wytwarzania pola magnetycznego zawierający zewnętrzny zamknięty obwód magnetyczny oraz cztery koncentratory pola magnetycznego skierowane ku środkowej części pola ograniczonego kwadratową ramą obwodu magnetycznego, w którym końcowe fragmenty koncentratorów pola magnetycznego, stanowiące nabiegunniki, są zwężone i umiejscowione kolejno prostopadle względem siebie, ponadto, czoło każdego nabiegunnika posiada wklęsłe sferyczne wyprofilowanie, którego promień  $R$  jest równy iloczynowi wartości „ $\sqrt{2}$ ” oraz wartości połowy odległości pomiędzy krawędziami przeciwnych nabiegunników.

Wokół każdego koncentratora pola magnetycznego nawinięto na metalowych karkasach uzwojenia.

Metalowe karkasy mają bezpośredni kontakt z przewodami, przez które przepływa medium chłodzące.

Na przecięciu osi koncentratorów pola magnetycznego umiejscowiono stolik.

Przedmiot wynalazku w przykładzie wykonania przedstawiono na rysunku, na którym Fig. 1 przedstawia widok ogólny czterobiegunowego elektromagnesu, Fig. 2 przedstawia wzajemne usytuowanie nabiegunników elektromagnesu, Fig. 3 przedstawia przekrój karkasu, na którym nawinięto uzwojenie oraz przewód prowadzący medium chłodzące, Fig. 4 przedstawia rozkład natężenia pola magnetycznego pomiędzy nabiegunnikami elektromagnesu, które posiadają płaskie powierzchnie czołowe, Fig. 5 przedstawia rozkład natężenia pola magnetycznego pomiędzy nabiegunnikami elektromagnesu, które posiadają wklęsłe sferyczne powierzchnie czołowe, Fig. 6 przedstawia zestaw pomiarowy do ba-

dania elementów spintronicznych, natomiast Fig. 7 przedstawia przykładowe wyniki pomiarów przedstawiających zmierzoną, przy użyciu spinowego efektu diodowego, kątową zależność amplitudy rezonansu ferromagnetycznego w pasku permalojowym o rozmiarach mikrometrowych.

Zespół elektromagnesów według wynalazku ma zewnętrzny zamknięty obwód magnetyczny 1 w postaci ramy, która ma w środkowej części każdego boku wykonany otwór 2 przez który przeprowadzono koncentrator pola magnetycznego 3. Koncentratory pola magnetycznego 3 są skierowane ku środkowej części pola ograniczonego kwadratową ramą obwodu magnetycznego 1, a ich końcowe fragmenty, stanowiące nabiegunniki 6 są zwężone i umiejscowione kolejno prostopadle względem siebie. Każdy koncentrator pola magnetycznego 3 zamocowany jest w ramie obwodu magnetycznego 1 za pomocą elementu śrubowego 10, co umożliwi jego przesunięcie względem prostokątnej ramy obwodu magnetycznego 1 i tym samym zmianę odległości pomiędzy nabiegunnikami 6. Wokół każdego koncentratora pola magnetycznego 3 nawinięto na metalowym karkasie 4 uzwojenie 5. Z uwagi na fakt, że przez uzwojenia elektromagnesu wymusza się przepływ prądu o dużej wartości, nieuchronne jest wydzielanie ciepła Joule'a w tych elementach. W celu zabezpieczenia uzwojeń przed nadmiernym wzrostem temperatury wybrane fragmenty karkasów 4 owinięto miedzianymi przewodami rurowymi 9, przez które wymusza się przepływ medium schładzającego.

Koncentratory pola magnetycznego 3 w końcowych fragmentach stanowiących nabiegunniki 6 są stożkowo zwężone. Czoło 7 każdego nabiegunnika 6 posiada wklęsłe sferyczne wyprofilowanie 8, którego promień  $R$  jest równy iloczynowi wartości „ $\sqrt{2}$ ” oraz wartości połowy odległości pomiędzy krawędziami przeciwległych nabiegunników 6. Dzięki zastosowaniu sferycznego kształtu dla czołowej powierzchni każdego z czterech nabiegunników 6 możliwe jest powiększenie strefy jednorodnego pola pomiędzy nimi. Dla udokumentowania korzystnych właściwości sferycznego kształtu dla czołowej powierzchni nabiegunnika na Fig. 4 i Fig. 5 przedstawiono zmierzone rozkłady wektorów pola dla elektromagnesu z płaskimi powierzchniami czołowymi (Fig. 4) i sferycznymi powierzchniami czołowymi (Fig. 5). Wartości prądów płynących przez uzwojenia przeciwległych elektromagnesów są jednakowe, natomiast stosunek wartości prądów płynących przez uzwojenia elektromagnesów usytuowanych wzajemnie ortogonalnie może przybierać różne wartości, dzięki temu możliwa jest kontrola kąтового ustawienia wektora indukcji magnetycznej. Poprzez dobór wartości oraz wzajemnej proporcji prądów płynących przez uzwojenia elektromagnesów, wzajemnie ortogonalnie usytuowanych, urządzenie według wynalazku umożliwia precyzyjne ustawienie zadanego wektora natężenia pola w pełnym zakresie kątów dla strefy pomiędzy czołami 7 nabiegunników 6, w której umieszczono stolik 11.

Przykład wykonania:

Zewnętrzny obwód magnetyczny 1 zespołu elektromagnesów w kształcie kwadratowej ramy o boku długości 410 mm wykonano z czystego żelaza (99.85%) – ARMCO. Profil tworzący ramę ma wymiary 50x50 mm. Koncentratory pola magnetycznego 3 wykonano z tego samego materiału magnetycznego o średnicy 36 mm. Końcowe fragmenty koncentratorów pola magnetycznego 3 są zwężone do średnicy 30 mm i stanowią nabiegunniki 6. Natomiast czołowe powierzchnie nabiegunników 7 posiadają wklęsłe sferyczne wyprofilowanie 8, o promieniu  $R=21.36$  mm.

Uzwojenia 5 zostały nawinięte na czterech kaskadowych karkasach 4 wykonanych z aluminium. Wokół pierścieni separujących kaskadowego karkasu 4 nawinięto miedziany przewód 9, przez który przepływa czynnik chłodzący.

Na każdym z kaskadowych karkasów 4 nawinięto 925 zwojów (589 - duża  $R=144$  mm  $h=46$  mm, 228 - średnia  $R=52$  mm  $h=27$  mm, 108 - mała  $R=40$  mm  $h=25$  mm, wszystkie cewki mają promień wewnętrzny  $r=21$  mm, średnica przewodu miedzianego 1.6 mm.

Przykłady zastosowania.

Zespół elektromagnesów według wynalazku może być wykorzystany do badań charakterystyk elementów spintronicznych wykazujących właściwości kierunkowe/anizotropowe występujące w zjawiskach: rezonansu ferromagnetycznego fal spinowych, magnetorezystancyjnych lub hallowskich. Na przykład: anizotropowa magnetorezystancja (AMR), gigantyczna magnetorezystancja (GMR), tunelowa magnetorezystancja (TMR), kolosalna magnetorezystancja (CMR), anomalny efekt Halla (AHE), planarny efekt Halla, spinowy efekt Halla (SHE).

Zespół elektromagnesów według wynalazku, po podłączeniu w układzie pomiarowym jak przedstawiono na Fig. 6, zastosowano do pomiaru kątowej zależności magnetorezystancyjnego-spinowego efektu diodowego w pasku permalojowym ( $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ ). Na przecięciu osi koncentratorów pola magnetycznego 3, znajduje się stolik 11, na którym został umieszczony permalojowy cienkowarstwowy magnetorezystor w postaci paska o rozmiarach szerokość: 2.5  $\mu\text{m}$ , długość: 90  $\mu\text{m}$ , grubość: 0.02  $\mu\text{m}$ , do którego

za pośrednictwem sondy mikrofalowej wprowadzono sygnał RF o mocy 10 dBm. Na Fig. 7 przedstawiono zmierzone wartości napięcia stałego dla różnych wartości kąta  $\theta$  nasycającego pola magnetycznego o wartości 22.8 kA/m (285Oe) skierowanego w płaszczyźnie magnetorezystora. Zmierzona kątowa zależność wartości sygnału wyjściowego spełnia równanie:

$$V_{dc}(\theta) = \sin(2\theta) \cos(\theta)$$

### Zastrzeżenia patentowe

1. Zespół elektromagnesów do wytwarzania pola magnetycznego zawierający zewnętrzny zamknięty obwód magnetyczny (1) w postaci kwadratowej ramy oraz połączone z zamkniętym obwodem magnetycznym (1) cztery koncentratory pola magnetycznego (3), które wyposażono w uzwojenia (5), **znamienny tym**, że koncentratory pola magnetycznego (3) są skierowane ku środkowej części pola ograniczonego kwadratową ramą obwodu magnetycznego (1), a ich końcowe fragmenty, stanowiące nabiegunniki (6) są umiejscowione kolejno prostopadle względem siebie, ponadto, czoło (7) każdego nabiegunnika (6) posiada wklęsłe sferyczne wyprofilowanie (8), którego promień R jest równy iloczynowi wartości „ $\sqrt{2}$ ” oraz wartości połowy odległości pomiędzy krawędziami przeciwległych nabiegunników (6).
2. Zespół elektromagnesów według zastrz. 1, **znamienny tym**, że wokół każdego koncentratora pola magnetycznego (3) nawinięto na metalowych karkasach (4) uzwojenia (5).
3. Zespół elektromagnesów według zastrz. 2, **znamienny tym**, że metalowe karkasy (4) mają bezpośredni kontakt z przewodami (9), przez które przepływa medium chłodzące.
4. Zespół elektromagnesów według zastrz. 1, **znamienny tym**, że na przecięciu osi koncentratów pola magnetycznego (3) umiejscowiono stolik (11).

### Rysunki

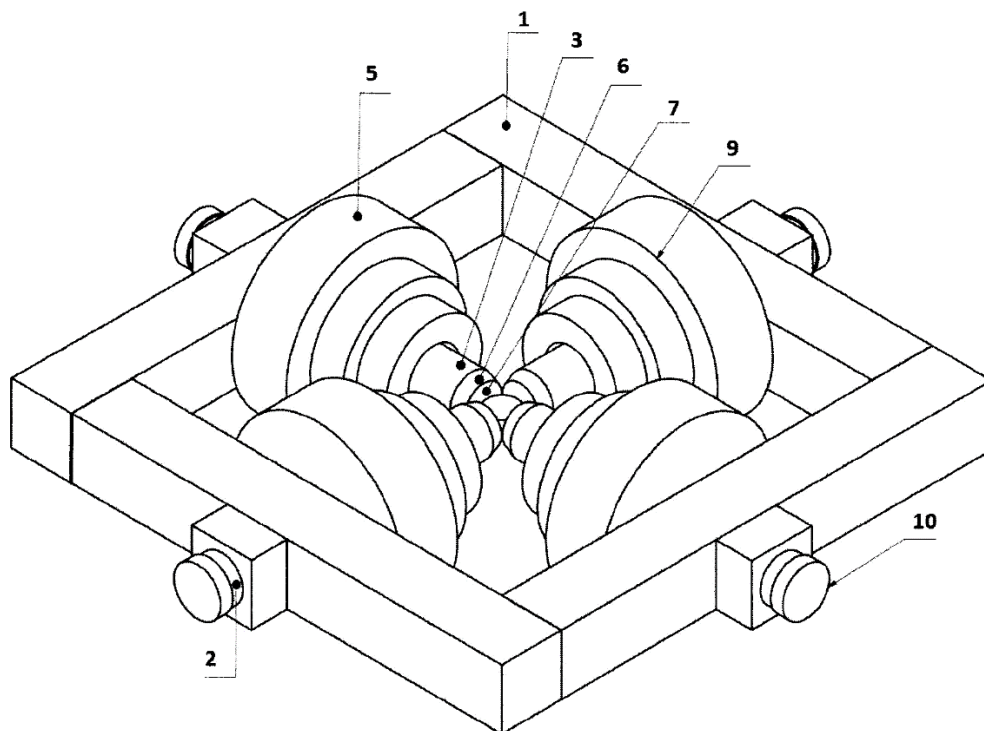


Fig. 1

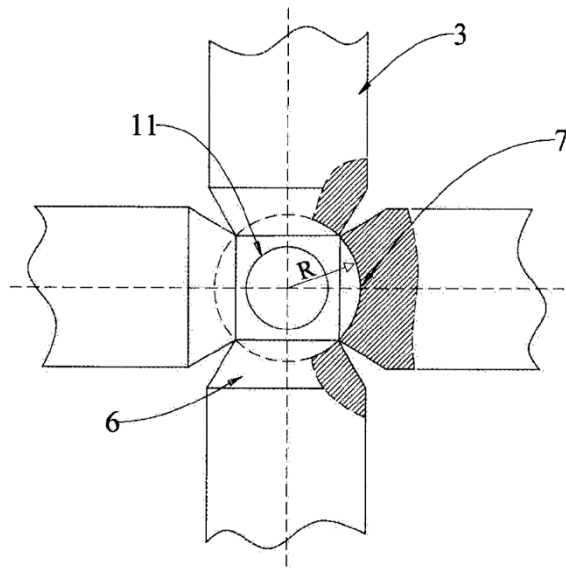


Fig. 2

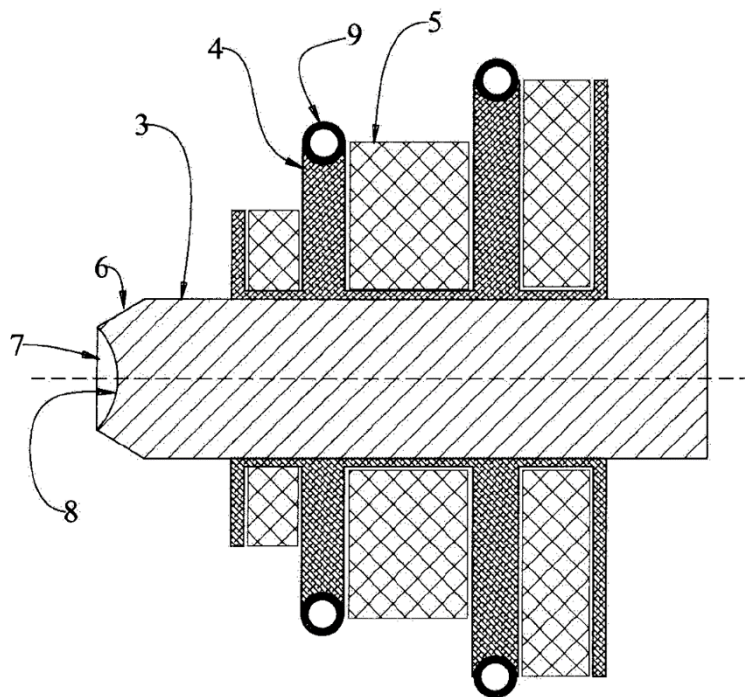
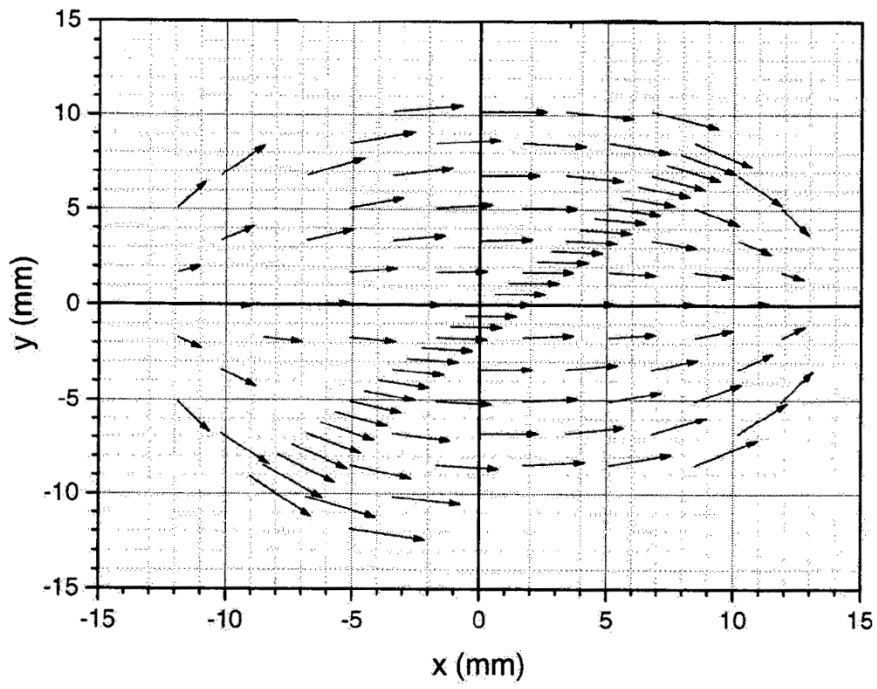
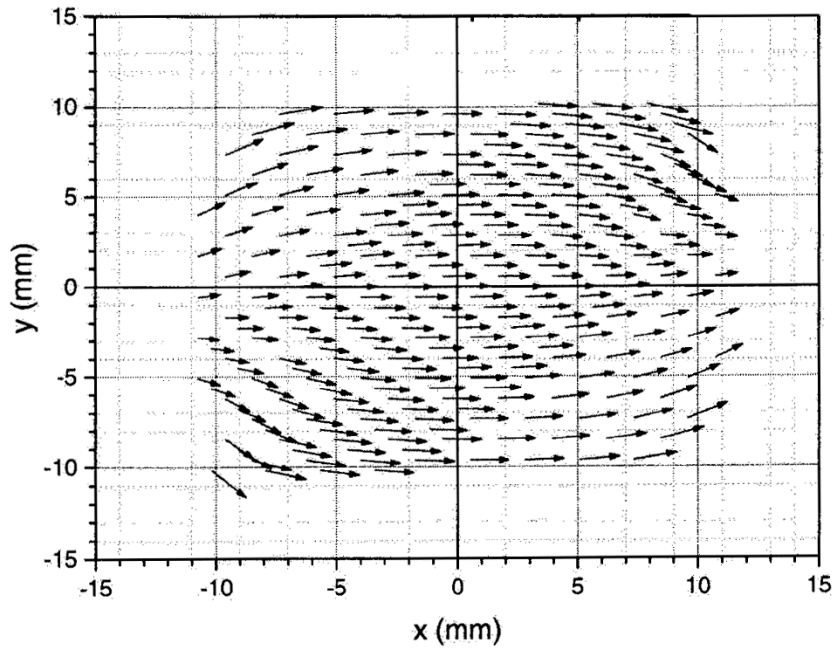


Fig. 3

**Fig. 4****Fig. 5**

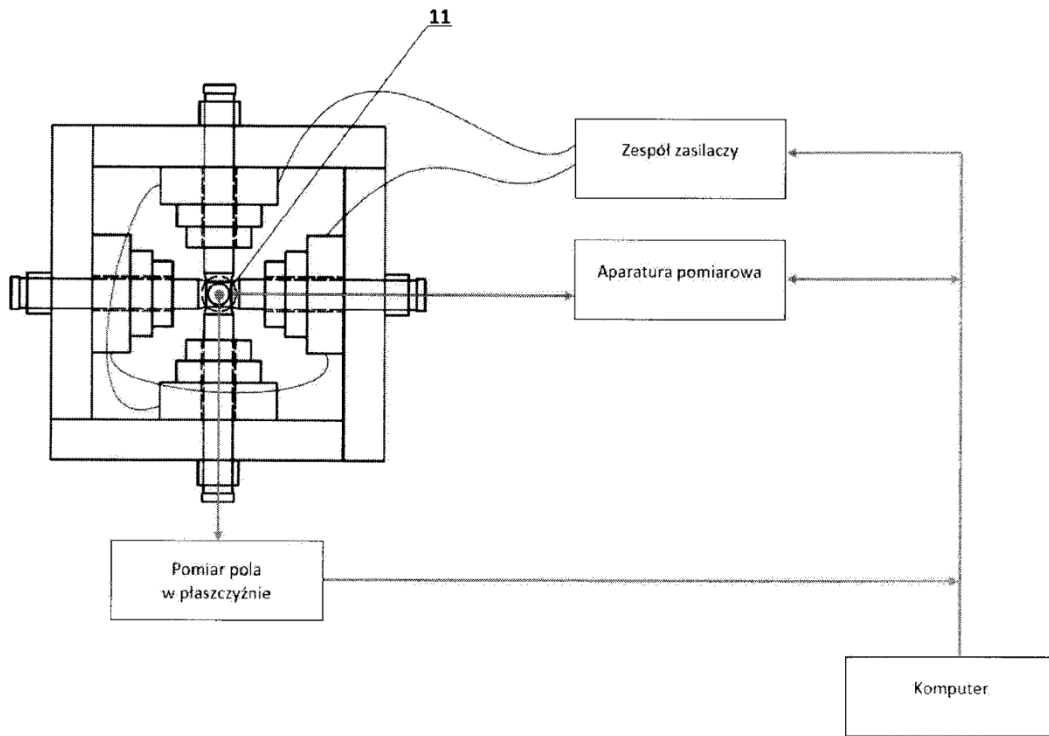


Fig. 6

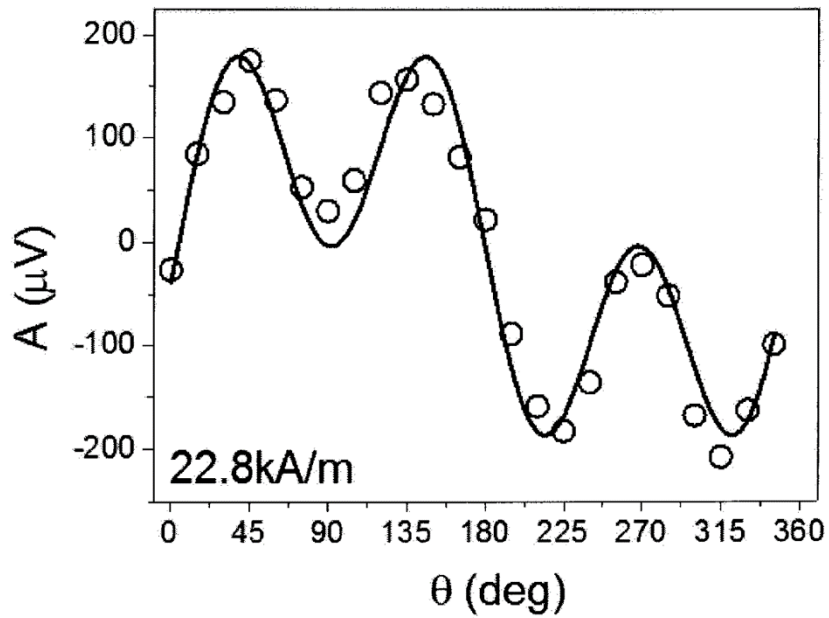


Fig. 7

