

Tomasz PROHUŃ, Jacek GOŁĘBIOWSKI

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI ELEKTRONIKI INFORMATYKI I AUTOMATYKI POLITECHNIKI ŁÓDZKIEJ (INSTYTUT ELEKTROTECHNIKI TEORETYCZNEJ METROLOGII I MATERIAŁOZNAWSTWA)

Modelowanie przestrzennego rozkładu pola magnetycznego przetwornika elektromagnetycznego do pomiaru indukcji zewnętrznego pola magnetycznego

mgr inż. Tomasz PROHUŃ

Studia magisterskie w latach 1997-2002 na Wydziale Elektrotechniki i Elektroniki Politechniki Łódzkiej.

Od 2003 roku jest słuchaczem studium doktoranckiego w Instytucie Elektrotechniki Teoretycznej Metrologii i Materiałoznawstwa PŁ. Od 2004 roku zatrudniony w instytucie Elektrotechniki Teoretycznej Metrologii i Materiałoznawstwa PŁ.

Współautor kilkunastu publikacji prezentowanych na konferencjach i w czasopiśmie naukowych.



e-mail: tompro@p.lodz.pl

Streszczenie

W referacie przedstawiono model czujnika do pomiaru indukcji pola magnetycznego w postaci belki krzemowej z naniesionym płaskim uzwojeniem. Prąd przepływający przez uzwojenie cewki wytwarza strumień oddziałujący z zewnętrznym polem magnetycznym. Koniec belki ulega odkształceniu w kierunku osi z. Kąt ugięcia belki jest miarą indukcji zewnętrznego pola magnetycznego.

Model czujnika składa się z belki wykonanej z krzemu monokrystalicznego oraz płaskiego uzwojenia wykonanego z aluminium. Ze względu na wielowarstwową, anizotropową budowę przetwornika do budowy modelu zastosowano metodę elementów skończonych (metodę pól sprzężonych i oprogramowanie COMSOL). W referacie pokazano rozkład przestrzennego pola magnetycznego cewki płaskiej i jego wpływ na zewnętrzne (mierzone) pole magnetyczne. W pracy przedstawiono wyniki symulacji dla różnych wartości parametrów konstrukcyjnych przetwornika w celu uzyskania zakładanej czułości dla wybranego zakresu pomiarowego indukcji zewnętrznego pola magnetycznego.

Słowa kluczowe: MEMS, MOEMS, struktury krzemowe, pomiary indukcji magnetycznej

Modeling 3D magnetic field of magnetic flux density sensor

Abstract

In the article a magnetic flux density sensor was described. The sensor consist of silicon cantilever and planar coil. Current flowing by the coil produce magnetic flux around the coil. Influence of magnetic flux with external magnetic field causes cantilever deform. The angle of cantilever deformation means external magnetic field induction.

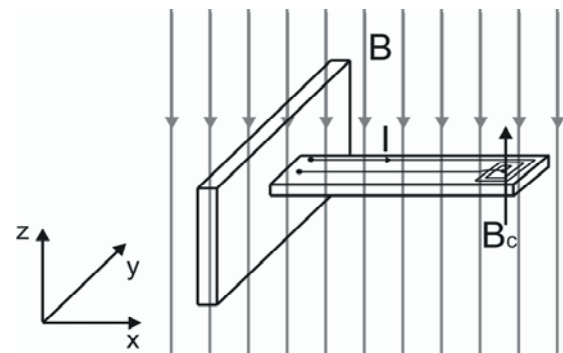
The influence of shape and dimensions of planar coil on magnetic energy density was described. In cause of magnetic anisotropy and heterogeneous of analyzed silicon structure the FEM method and couple field method was applied in simulation.

Keywords: MEMS, MOEMS, silicon microstructures, magnetic flux density measurements

1. Wstęp

Zastosowanie mikromechanicznych struktur krzemowych do pomiarów indukcji pola magnetycznego pozwala na budowanie czujników o małych rozmiarach (rzędu ułamków milimetra). Małe wymiary czujnika pozwalają na dokonywanie pomiarów zbliżonych do punktowych, a także na pomiary w wąskich szczelinach magnetowodów. Technologia mikrokrzemowa umożliwia

wytwarzanie struktur przestrzennych takich jak belki, membrany. Założono wykonanie struktury czujnika z krzemu monokrystalicznego o orientacji $\langle 100 \rangle$ metodą mokrego trawienia.

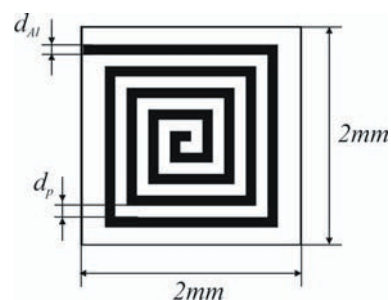


Rys. 1. Mikrokrzemowy czujnik do pomiaru indukcji pola magnetycznego
Fig. 1. The micro-silicon magnetic induction sensor

Na rys. 1 pokazano czujnik w postaci belki krzemowej jednostronnie zamocowanej z naniesionym płaskim uzwojeniem w postaci spirali. Prąd I przepływający przez cewkę powoduje wytworzenie strumienia magnetycznego. Oddziaływanie zewnętrznego pola magnetycznego na wytworzony strumień powoduje ugięcie belki. Kąt ugięcia belki jest miarą wartości indukcji zewnętrznego pola magnetycznego (przy stałej wartości prądu I).

2. Model rozkładu pola magnetycznego cewki

Przeprowadzono statyczną analizę mechaniczną [2, 3] dotyczącą kąta ugięcia belki mikrokrzemowej dla różnych parametrów konstrukcyjnych. Dla belki o szerokości 2mm, długości 5mm, grubości 30 μ m uzyskano ugięcie końca belki o 50 μ m (przy sile odpowiadającej indukcji magnetycznej zewnętrznego pola równej 10mT). Wymiary zewnętrzne cewki (pole powierzchni przetwornika) wynikają z przeprowadzonej analizy mechanicznej struktury krzemowej pod kątem uzyskaniażądanego zakresu pracy i zadanej czułości. Na podstawie jej wyników do dalszej analizy założono powierzchnię cewki o wymiarach 2mm na 2mm.



Rys. 2. Widok cewki o uzwojeniu kwadratowym.
 d_u – szerokość ścieżki, d_p – odległość pomiędzy ścieżkami
Fig. 2. The square planar coil.
 d_u – path width, d_p – distance between paths

Rozkład pola magnetycznego wytworzonego pod wpływem przepływającego prądu można obliczyć stosując równania Maxwella. Równania te po przekształceniu opisują wzory 1 i 2.

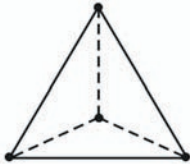
$$-\nabla \cdot d(-\sigma \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) + \sigma \nabla V - \mathbf{J}) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \times d\left(\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \nabla \times \mathbf{A}\right) - d\sigma \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) + \sigma \nabla V = d\mathbf{J} \quad (2)$$

gdzie:

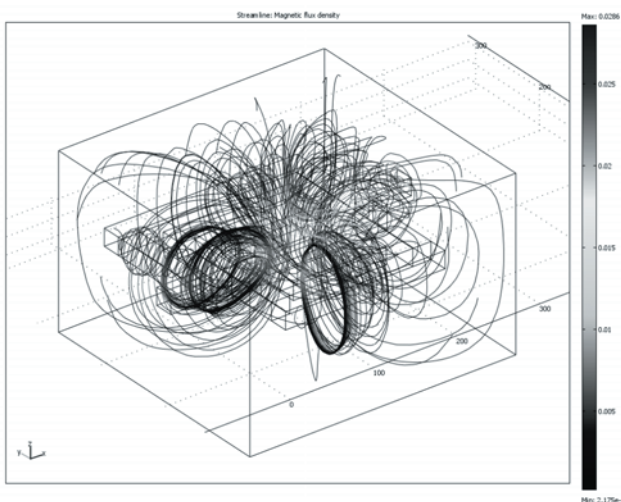
d – grubość ścieżki aluminiowej, σ – przenikalność elektryczna, \mathbf{v} – wektor prędkości przepływu ładunków, V – potencjał elektryczny, \mathbf{A} – wektor potencjałów magnetycznych, \mathbf{J} – gęstość prądu,

Analizowano uzwojenie płaskie o budowie kwadratowej (rys.2). Założono maksymalne wykorzystanie powierzchni cewki. Przeprowadzono analizę wpływu szerokości ścieżek cewki, odległości między nimi oraz liczby zwojów cewki na rozkład indukcji pola magnetycznego. Analizowany model struktury obejmuje cewkę płaską oraz fragment przestrzeni wokół niej. Do analizy rozkładu pola w przestrzeni zastosowano metodę elementów skończonych.



Rys. 3. Widok pojedynczego elementu stosowanego przy podziale w metodzie elementów skończonych
Fig. 3 Single fine element used by FEM method

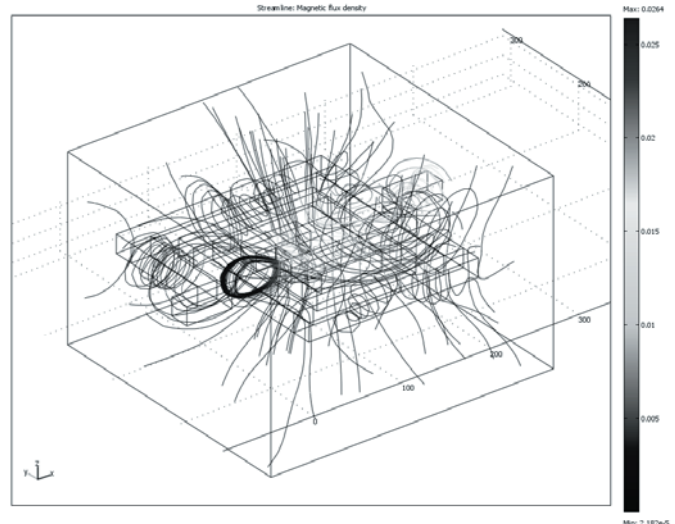
Pozwala ona na podzielenie symulowanej struktury na szereg elementarnych części. Dla każdego węzła podstawowego elementu rozwiązywano układ równań różniczkowych cząstkowych (1 i 2) z uwzględnieniem warunków brzegowych (m.in. izolacja magnetyczna i elektryczna cewki). W obliczeniach wykorzystano metodę modelowania sprzężonych pól elektrycznego i magnetycznego. Otrzymane wyniki obliczeń rozkładu indukcji magnetycznej w kierunku osi Z przedstawiono na rys. 6 i 7. Model MES składał się z około 10 tysięcy elementów. Założono gęstość prądu $J=3,25\text{A/mm}^2$, co odpowiada wartości maksymalnej gęstości dla temperatury uzwojenia 20°C (ścieżki aluminiowe o grubości $1\ \mu\text{m}$). Rozpatrywano rozkład pola dla warunków brzegowych uwzględniających izolację elektryczną i magnetyczną.



4. Rozkład strumienia pola magnetycznego dla cewki kwadratowej (obszar zewnętrzny ekranowany magnetycznie, elektrycznie)
4 The magnetic flux density distribution for square coil (external area magnetic, electric isolated)

Rozkład pola magnetycznego dla cewki płaskiej umieszczonej w obszarze izolowanym magnetycznie i elektrycznie pokazano na rys. 4 (linie pola magnetycznego zamykają się wokół cewki wewnątrz symulowanej przestrzeni).

Rozkład pola magnetycznego cewki płaskiej izolowanej tylko elektrycznie pokazano na rys. 5 (wytworzony strumień magnetyczny przenika na zewnątrz modelowanego obszaru).

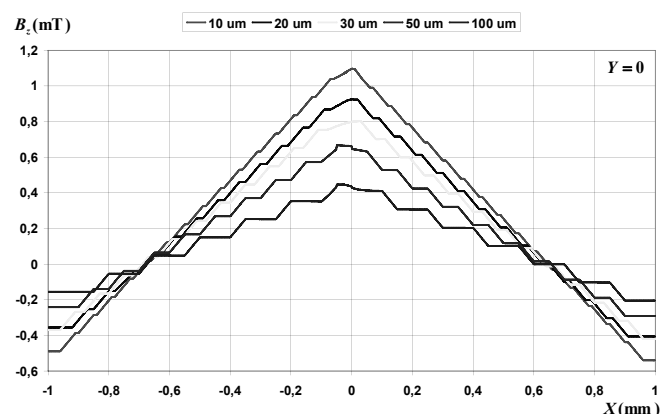


Rys. 5. Rozkład strumienia pola magnetycznego dla cewki kwadratowej (obszar zewnętrzny izolowany elektrycznie)
Fig. 5 The magnetic flux density distribution for square coil (external area electric isolated)

Zastosowanie modelu z izolowaniem magnetycznym powoduje uzyskanie większej wartości strumienia magnetycznego niż w przypadku braku izolacji magnetycznej.

2. Analiza rozkładu indukcji dla różnych parametrów przetwornika

Na rys.6 pokazano rozkład składowej indukcji B_z (w kierunku osi Z) wzdłuż osi X dla współrzędnej osi $Y=0$ (przez środek cewki).

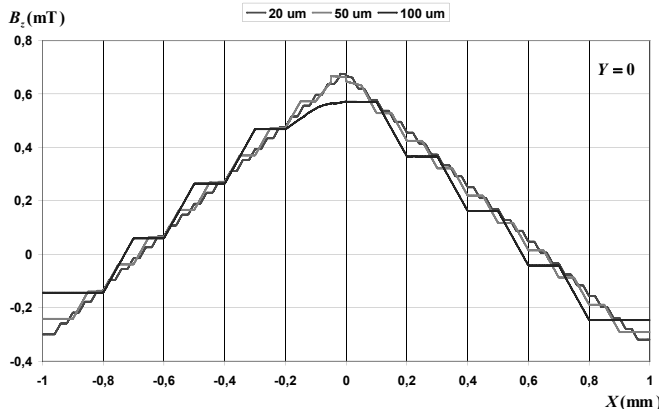


Rys. 6. Rozkład składowej B_z indukcji magnetycznej wzdłuż osi X (przez środek cewki dla $Y=0$) dla różnych odległości d_p pomiędzy ścieżkami. $d_{11}=50\ \mu\text{m}$
Fig. 6. The magnetic flux density B_z characteristic along X axis (in the middle of coil for $Y=0$) for different distances between paths d_p . $d_{11}=50\ \mu\text{m}$

Zmniejszanie odległości pomiędzy sąsiadującymi ścieżkami wywołuje wzrost wartości indukcji B_z wzdłuż osi X . Analizując zmiany odległości pomiędzy ścieżkami przyjęto maksymalne wykorzystanie powierzchni cewki. Zmniejszając odległość pomiędzy ścieżkami powodujemy pojawienie się dodatkowych

zwojów cewki. Natomiast przy zwiększaniu odległości pomiędzy ścieżkami liczba zwojów maleje.

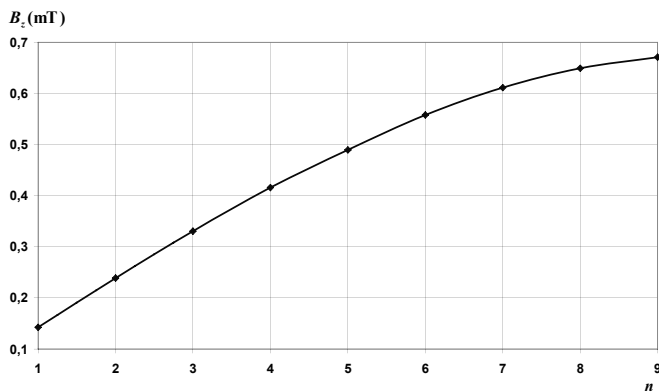
Na rys.7 pokazano rozkład składowej B_z wzdłuż osi X (dla $Y=0$) dla różnych szerokości ścieżek przy założeniu $d_p=d_{AI}$ (założono maksymalne wykorzystanie powierzchni cewki).



Rys. 7. Rozkład składowej B_z indukcji magnetycznej w osi X (przez środek cewki dla $Y=0$) dla różnych szerokości i odległości między ścieżkami. $d_p=d_{AI}$
Fig. 7. The magnetic flux density B_z characteristic along X axis (in the middle of coil for $Y=0$) for different widths and distances between paths $d_p=d_{AI}$

Na podstawie analizy przebiegu indukcji B_z (rys.7) przy założeniu $d_p=d_{AI}$ (w zakresie 20-100 μm) można stwierdzić, że zmiany szerokości ścieżek i odległości praktycznie nie wpływają na charakterystykę przebiegu indukcji. Wynika to z jednoczesnej zmiany szerokości i odległości między ścieżkami.

Na rys.8 pokazano zależność maksymalnej indukcji B_z (dla $X=0$, $Y=0$) od liczby zwojów cewki. Zwiększanie liczby zwojów powoduje zwiększanie wytworzonej indukcji magnetycznej (funkcja kwadratowa).



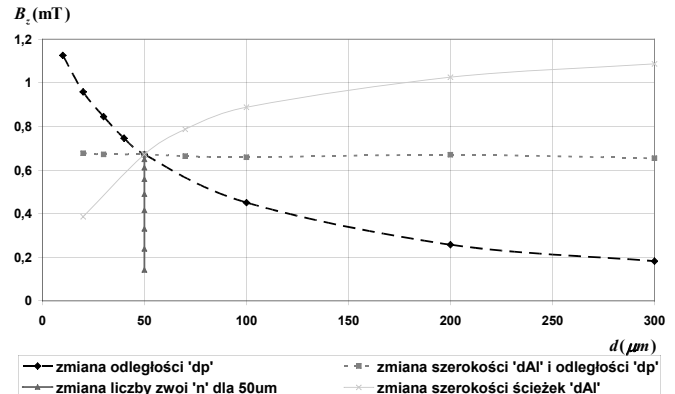
Rys. 8. Zależność maksymalnej składowej B_z indukcji magnetycznej od liczby zwojów n ($d_p=d_{AI}=50\mu\text{m}$)
Fig. 8. The maximum magnetic flux density B_z for different number of twists n ($d_p=d_{AI}=50\mu\text{m}$)

Na rys.9 pokazano zależność maksymalnej składowej B_z indukcji (dla $X=0$, $Y=0$) w funkcji wybranych parametrów cewki.

Pierwsza charakterystyka uwzględnia wpływ szerokości ścieżek przy stałej odległości między nimi $d_p=50\mu\text{m}$.

Druga charakterystyka przedstawia wpływ liczby zwojów na wartość maksymalną indukcji dla cewki o parametrach $d_p=d_{AI}=50\mu\text{m}$.

Trzecia charakterystyka uwzględnia jednoczesną zmianę szerokości ścieżek i odległości między nimi (dla warunku $d_p=d_{AI}$). Czwarta charakterystyka dotyczy zmiany szerokości ścieżek d_{AI} (założono $d_p=50\mu\text{m}$).



Rys. 9. Zależność maksymalnej składowej B_z indukcji magnetycznej dla różnych parametrów cewki

Fig. 9. The maximum magnetic flux density B_z for different parameters of coil

Wzór 3 opisuje zmianę wartości wytwarzanej indukcji wywołaną zmianą szerokości ścieżek cewki d_{AI} .

$$S_p = \frac{\Delta B}{\Delta d_{AI}} \quad (3)$$

Tab. 1. Zmiana współczynnika S_p dla różnych szerokości ścieżek (rys.9)
Tab. 1. The S_p coefficient for different paths widths

Zakres szerokości d_{AI} (μm)	Współczynnik S_p (T/m)
20-50	$9,51 \cdot 10^{-6}$
50-70	$5,75 \cdot 10^{-6}$
70-100	$3,40 \cdot 10^{-6}$
100-200	$1,38 \cdot 10^{-6}$
200-300	$6,10 \cdot 10^{-7}$

Największe zmiany współczynnika S_p występują dla dolnego zakresu, gdzie szerokości ścieżek są porównywalne z odległościami pomiędzy nimi.

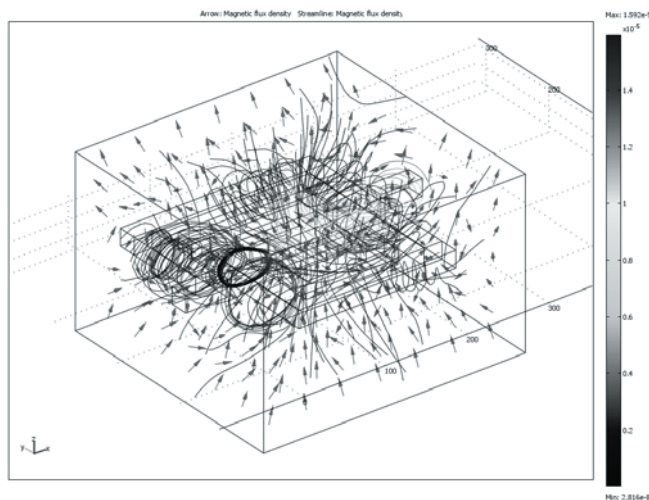
Przy zmianie zakresu z 20-50 μm (szerokość ścieżek jest mniejsza lub równa odległości pomiędzy nimi) w stosunku do zakresu 200-300 μm (dla zmiany szerokości ścieżek z czterokrotnej na sześciokrotną względem odległości między nimi) współczynnik S_p maleje 15-krotnie.

Zastosowanie ścieżek o szerokości powyżej 100 μm (dla odległości między nimi wynoszącej 50 μm) nie prowadzi do znaczącej zmiany maksymalnej indukcji B_z (rys.9). Nie należy natomiast stosować szerokości ścieżek mniejszych od odległości między nimi ze względu na znaczne zmniejszenie maksymalnej indukcji B_z . Szerokość ścieżek powinna być minimum dwa razy większą niż odległość między nimi.

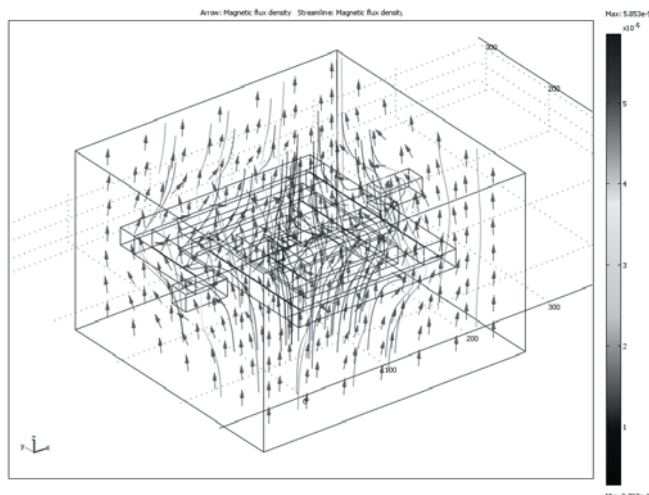
3. Wpływ pola cewki na zewnętrzne (mierzone) pole magnetyczne

Po umieszczeniu cewki w zewnętrznym jednorodnym polu magnetycznym następuje zmiana jego rozkładu spowodowana oddziaływaniem pola magnetycznego cewki.

Na rys.10 pokazano rozkład pola magnetycznego wokół cewki dla przypadku gdy, wartość indukcji zewnętrznego pola jest mniejsza od wartości indukcji pola cewki. W tym przypadku wpływ pola cewki na rozkład zewnętrznego pola magnetycznego jest bardzo duży. Następuje zmiana kierunku wszystkich wektorów (w obrębie analizowanej powierzchni) zewnętrznego pola magnetycznego i ich orientacja zgodnie z polem cewki.



Rys. 10. Zmiana indukcji B_p zewnętrznego pola magnetycznego pod wpływem pola cewki (B_c) dla $B_p < B_c$
 Fig. 10. The change of external magnetic flux density B_p by influence of coil magnetic flux (B_c) for $B_p < B_c$



Rys. 11. Zmiana indukcji B_p zewnętrznego pola magnetycznego pod wpływem pola cewki (B_c) dla $B_p \geq B_c$
 Fig. 11. The change of external magnetic flux density B_p by influence of coil magnetic flux (B_c) for $B_p \geq B_c$

Na rys.11 pokazano przypadek gdy, wartość indukcji zewnętrznego pola jest większa (lub porównywalna) od indukcji pola cewki. W tym przypadku wpływ pola cewki na rozkład zewnętrznego pola magnetycznego jest niewielki. Tylko wektory w bezpośrednim sąsiedztwie cewki ulegają reorientacji zgodnie z jej polem. Natomiast większość zachowuje swój pierwotny kierunek.

4. Wnioski

W artykule analizowano rozkład pola magnetycznego cewki planarnej czujnika (model czujnika do pomiaru indukcji pola magnetycznego składa się z belki krzemowej z naniesionym płaskim aluminium uzwojeniem) oraz wpływ pola własnego czujnika na rozkład zewnętrznego (mierzonego) pola magnetycznego.

Największe skupienie linii sił wytworzonego pola magnetycznego występuje w części centralnej cewki płaskiej (dla $X=0$, $Y=0$). Zmiana parametrów przetwornika (szerokości ścieżek aluminiowych oraz odległości między nimi) powoduje zmianę rozkładu indukcji w kierunku osi Z oraz zmienia jej wartość maksymalną B_z w części centralnej cewki.

Dla założonego pola powierzchni, na którym umieszczono przetwornik indukcja magnetyczna wytworzonego pola rośnie:

- ze zwiększaniem liczby zwojów cewki,
- gdy zmniejszana jest odległość pomiędzy ścieżkami (ze względów technologicznych minimalna odległość między ścieżkami wynosi $20\mu\text{m}$),
- gdy zwiększana jest szerokość ścieżek.

Jednoczesna zmiana szerokości ścieżek i odległości między nimi (dla $d_{Al}=d_p$), nie wpływa znacząco na wartość indukcji wytworzonego pola magnetycznego.

Wpływ pola cewki na rozkład zewnętrznego (mierzonego) pola magnetycznego zależy od wartości jego natężenia. Dla pól porównywalnych wartością natężenia pola cewki gdzie wpływ jej pola powoduje całkowite odkształcenie zewnętrznego pola. Natomiast dla pól porównywalnych z wartością natężenia pola cewki wpływ ten jest już dużo mniejszy. Odkształcenie pola występuje tylko w pobliżu cewki, gdzie wartość natężenia jej pola magnetycznego ma największą wartość.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że przy projektowaniu struktury krzemowej z uzwojeniem w postaci cewki planarnej należy możliwie maksymalnie wykorzystać pole powierzchni przeznaczonej na uzwojenie cewki. Wymiary ścieżek powinny być tak dobrane, aby były przynajmniej dwukrotnie większe od szerokości przerw pomiędzy ścieżkami. Większa wartość prądu płynącego przez uzwojenie powoduje wytworzenie większej wartości indukcji pola magnetycznego cewki. Przepływ większego prądu przez uzwojenie cewki możliwy jest poprzez zwiększanie szerokości jej ścieżek lub ewentualnie jej grubości.

5. Literatura

- [1] Ciudad D., Aroca C., Sanchez M.C., Lopez E., Sanchez P.: *Modelling and fabrication of a MEMS magnetostatic magnetic sensor*. Elsevier Sensors and Actuators, A 115, pp. 408-416, 2004.
- [2] Gołębiowski J.: *Microactuators systems of torsional silicon cantilever*, Proc. of WSES/IEEE Int. Conf. ICRODIC, Skiathos, Greece, pp. 3281-3284, 2002.
- [3] Prohuń T., Gołębiowski J.: *Microsilicon luminous flux switch controlled by means of magnetic field*, ICINCO 2005, str. 301-306, Barcelona – Spain 2005
- [4] Fan L.S., Tai Y.C., Muller R.S.: *Integrated moved micromechanical structures for sensors and actuators*. IEEE Trans. Electron Devices, Vol.ED-14, No. 6, pp.724-730, 1988.
- [5] Fukuda T., Menz W.: *Micro Mechanical Systems*, t.6, Wyd. Elsevier, seria Handbook of Sensors and Actuators, 1998.
- [6] Judy J.W., Muller R.S.: Magnetically Actuated, Addressable Microstructures. Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 6, no. 3, pp. 249-256, 1997.
- [7] Lam T., Darling R.B.: Psychical Modelling of MEMS Cantilever Beams and the Measurement of Stiction Force, Modelling and Simulation of Microsystems. ISBN 0-9708275-0-4, pp. 418-421, 2001.
- [8] Martin S.J., Butler M.A., Spates J.J., Mitchell M.A., Schubert W.K.: *Flexural plate wave resonator excited with Lorentz forces*, J.Appl.Phys., vol.83, no.9, ss.4589-4601, 1998.
- [9] Muller R.S.: *Microdynamics*. Sensors and Actuators, A21-23, pp.1-8, 1990.
- [10] Peiner E., Doering L., *Force calibration of stylus instruments using silicon microcantilevers*. Sensors and Actuators A, v. A123-124, pp. 137-145, 2005.
- [11] Ripka P.: *Magnetic Sensors and Magnetometers*. Artech House Inc., pp. 381-382, 2001.
- [12] Saya D., Belaubre P., Mathieu F., Lagrange D., Pourciel J., Bergaud C.: Si-piezoresistive microcantilevers for highly integrated parallel force detection applications. Sensors and Actuators A, v. A123-124, pp. 23-29, 2005.
- [13] Wagner B., Benecke W., Engelmann G., Simon I.: *Microactuators with moving magnets for linear, torsional, or multiaxial motion*. Sensors and Actuators A (Physical), v. A32, no. 1-3, pp. 598-603, 1992.