

Tomasz PROHUŃ, Marcin RYBAK

POLITECHNIKA ŁÓDZKA, INSTYTUT ELEKTROTECHNIKI TEORETYCZNEJ,
METROLOGII I MATERIAŁOZNAWSTWA

Model mikrokrzemowego czujnika z cewką planarną do pomiaru indukcji pola magnetycznego

Mgr inż. Tomasz PROHUŃ

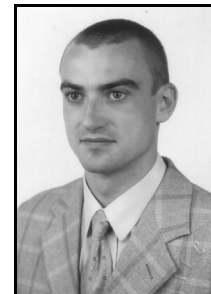
Studia magisterskie w latach 1997-2002 na Wydziale Elektrotechniki i Elektroniki Politechniki Łódzkiej. Od 2003 roku jest słuchaczem studium doktoranckiego w Instytucie Elektrotechniki Teoretycznej Metrologii i Materiałoznawstwa PŁ. Od 2004 roku zatrudniony w instytucie Elektrotechniki Teoretycznej Metrologii i Materiałoznawstwa PŁ. Współautor kilkunastu publikacji prezentowanych na konferencjach i w czasopiśmie naukowych.



e-mail: tompro@p.lodz.pl

Mgr inż. Marcin RYBAK

Studia magisterskie w latach 1998-2003 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: mrybak@p.lodz.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono model czujnika do pomiaru indukcji stałego (jednorodnego) 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. Do analizy zastosowano metodę elementów skończonych oraz metodę pól sprzężonych ze względu na anizotropowość i niejednorodność struktury krzemowej. W pracy opisano charakterystyki wyjściowe czyli kąta ugięcia belki w funkcji indukcji B zewnętrznego pola magnetycznego. Przeanalizowano wpływ wymiarów geometrycznych belki na jej ugięcie.

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

Microsilicon sensor with planar coil for magnetic flux density measurements

Abstract

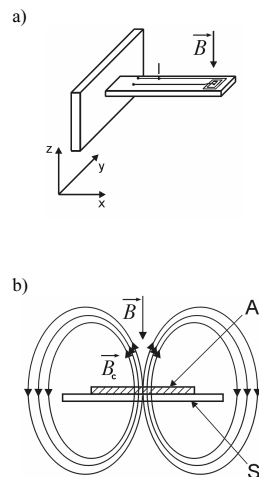
In the article a magnetic flux density sensor was described. The sensor consist of silicon cantilever and planar coil. Current flowing by the coil produce magnetic flux around the coil. Influence of magnetic flux with external magnetic field causes cantilever deform. The angle of cantilever deformation in z axis means external magnetic field induction. In cause of magnetic anisotropy and heterogeneous of analyzed silicon structure the FEM method and couple field method was applied in simulation. The influence of dimensions of beam on beam-end deformation was described.

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 metodą mokrego trawienia [1].

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



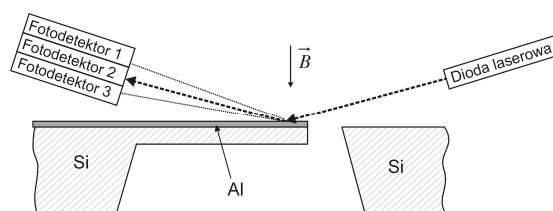
Rys. 1. Mikrokrzemowy czujnik z płaskim uzwojeniem do pomiaru indukcji magnetycznej B : a) widok struktury czujnika, b) rozkład linii pola cewki płaskiej w płaszczyźnie Z

B – indukcja zewnętrznego (mierzzonego) pola magnetycznego, B_c – indukcja wytworzona przez czujnik, I – prąd przepływający przez cewkę, Al – uzwojenie cewki, Si – podłoże krzemowe

Fig. 1. Microsilicon sensor with planar coil for magnetic flux density B measurement: a) view of the sensor structure, b) magnetic flux distribution in Z axis

B – external magnetic flux density, B_c – coil magnetic flux density, I – current flowing by the coil, Al – planar coil, Si – silicon basis

Na rys. 2 pokazano układ do pomiaru kąta ugięcia belki dla danych wartości indukcji magnetycznej. Belka posiada naniesioną dodatkową warstwę lustrzaną (warstwa aluminiowa) służącą do odbijania strumienia światła. Zmiana wartości indukcji zewnętrznego pola magnetycznego powoduje zmianę kąta ugięcia belki. Przesunięcie belki powoduje zmianę kąta odbicia strumienia światła od warstwy aluminiowej.



Rys. 2. Optyczny pomiar indukcji zewnętrznego pola magnetycznego:

Si – struktura krzemowa (krzem Si <100>), Al – ścieżki aluminiowe

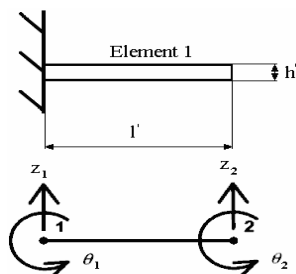
Fig. 2. Optical measurement of the external magnetic flux density:

Si – silicon structure (silicon Si <100>), Al – aluminium paths

Wartość kąta odbicia jest określana przy użyciu linijki fotodetektorów (zmiana kąta ugięcia belki powoduje przemieszczenie strumienia świetlnego na linijce fotodetektorów).

2. Model czujnika do pomiaru indukcji pola magnetycznego

Model matematyczny belki zamocowanej jednostronnie pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Jednoelementowy model belki czujnika: z_1, z_2 – odkształcenia w kierunku osi Z , Θ_1, Θ_2 – rotacje węzłów, l' – długość elementu, h' – grubość elementu

Fig. 3. One element model of sensor cantilever: z_1, z_2 – deformations in Z axis direction, Θ_1, Θ_2 – nodes rotation, l' – element length, h' – element thickness

Model zbudowano z pojedynczego elementu typu belkowego. Element ma oś symetrii X . Węzeł nr 1 zamocowano sztywno do podłoża, natomiast węzeł nr 2 jest węzłem swobodnym.

Zagadnienie statyczne (równanie ruchu) można opisać macierzyowym równaniem różniczkowym drugiego rzędu:

$$\mathbf{K} \cdot [z_1 \quad \Theta_1 \quad z_2 \quad \Theta_2]^T = \mathbf{F}, \quad (1)$$

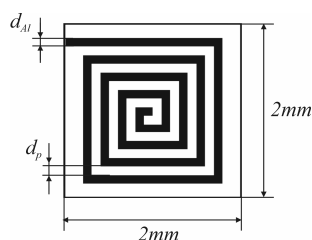
gdzie:

K – macierz sztywności,

F – wektor kolumnowy wymuszenia.

Rozwiązanie równania ruchu (wzór 1) pozwala określić odkształcenia poszczególnych węzłów w kierunku osi Z .

Analiza wyników uzyskanych z symulacji struktury mechanicznej pozwala określić parametry (wymiary zewnętrzne) cewki płaskiej (rys. 4) naniesionej na belce.



Rys. 4. Widok cewki o uzwojeniu kwadratowym.

d_{Ai} – szerokość ścieżki, d_p – odległość pomiędzy ścieżkami

Fig. 4. The square planar coil.

d_{Ai} – 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 2 i 3.

$$-\nabla \cdot d(-\sigma \nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) + \sigma \nabla V - \mathbf{J}) = 0, \quad (2)$$

$$\nabla \times d\left(\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \nabla \times \mathbf{A}\right) - d\sigma \nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) + \sigma \nabla V = d\mathbf{J}, \quad (3)$$

gdzie:

d – grubość ścieżki aluminiowej,

σ – przenikalność elektryczna,

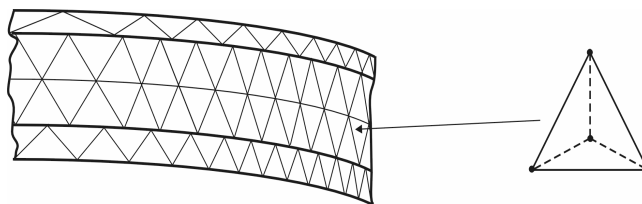
\mathbf{v} – wektor prędkości przepływu ładunków,

V – potencjał elektryczny,

\mathbf{A} – wektor potencjałów magnetycznych,

\mathbf{J} – gęstość prądu.

Analizowany model struktury obejmuje układ belki krzemowej zamocowanej jednostronnie. Struktura belki jest wielowarstwowa. Zastosowana metoda elementów skończonych pozwoli belkę tę zanalizować. Metoda ta pozwala także na uwzględnienie właściwości materiałów takich jak anizotropowość i niejednorodność. Analizowano belkę wykonaną z krzemu monokrystalicznego o orientacji $\langle 100 \rangle$. Model MES belki mikrokrzemowej składał się z około 10 tysięcy elementów, uwzględniono w nim warunki brzegowe m.in. sztywne zamocowanie jednego końca belki.



Rys. 5. Fragment modelu belki wraz z elementarnym elementem

Fig. 5. A part of cantilever model with single fine element used by FEM method

Analizowano uzwojenie płaskie o budowie kwadratowej (rys. 4). Założono maksymalne wykorzystanie powierzchni cewki. Przeprowadzono analizę wpływu szerokości ścieżek cewki, odległości między nimi oraz liczby zwojów cewki na wartość wytworzonej indukcji pola magnetycznego (w kierunku osi z). Analizowany model struktury obejmuje cewkę płaską oraz fragment przestrzeni wokół niej. Dla każdego węzła podstawowego elementu rozwiązywano układ równań różniczkowych cząstkowych (2 i 3) 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. 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 prądu dla temperatury uzwojenia 20°C (ścieżki aluminiowe o grubości $1 \mu\text{m}$). W analizowanych modelach przyjmowany jest jednorodny charakter zewnętrznego pola magnetycznego.

3. Wyniki symulacji modelu struktury czujnika

Na rys. 6 pokazano charakterystyki ugięcia końca belki w funkcji indukcji zewnętrznego pola magnetycznego dla różnych parametrów konstrukcyjnych belki.

Największy wpływ na wartość ugięcia dla zadanej indukcji mają długość i grubość belki. W wyniku tego w celu uzyskaniażądanego zakresu pomiarowego czujnika najpierw należy dobrać długość belki a następnie jej grubość. W przypadku czujnika z cewką o budowie kwadratowej szerokość belki powinna być tak dobrana, aby umożliwić umieszczenie na jej powierzchni cewki o optymalnych parametrach (odpowiednich wymiarach zewnętrznych).

Wymiary zewnętrzne modelowanej cewki płaskiej (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.

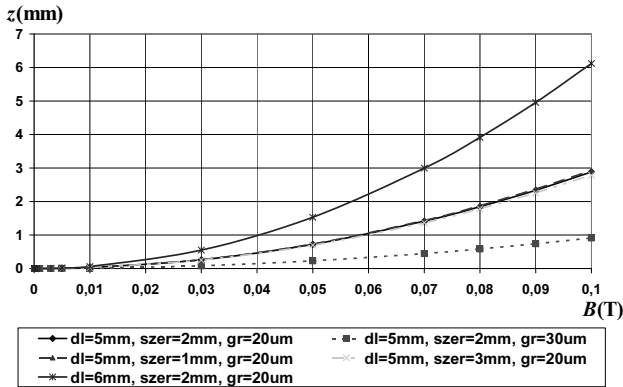
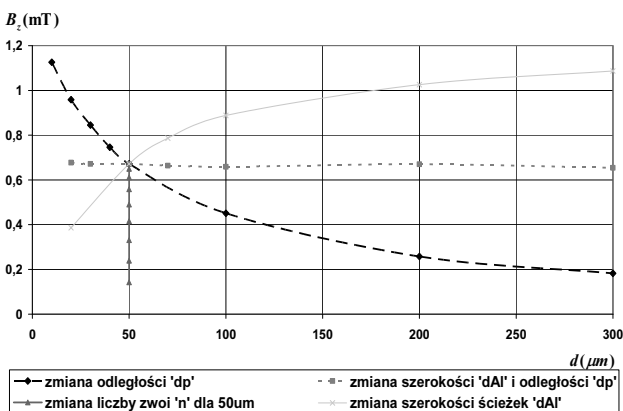


Fig. 6. Ugięcie końca belki w funkcji indukcji zewnętrznego pola magnetycznego dla różnych parametrów konstrukcyjnych belki

Rys. 6. The beam-end deflection on magnetic flux density B for different structural parameters of beam

Na rys.7 pokazano zależność maksymalnej składowej B_z indukcji (dla części centralnej cewki) 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 oraz 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. 7. Zależność maksymalnej składowej B_z indukcji magnetycznej dla różnych parametrów cewki

Fig. 7. The maximum magnetic flux density B_z for different parameters of coil

4. Wnioski

Przeanalizowano wpływ wymiarów geometrycznych belki na ugięcie jej końca dla różnych wartości indukcji B zewnętrznego pola magnetycznego. Wymiary geometryczne belki ograniczają wymiary zewnętrzne cewki płaskiej czujnika. Do określenia pola powierzchni przetwornika należy przeanalizować zachowanie

struktury mechanicznej (mikrobelki krzemowej) pod kątem uzyskaniażądanego zakresu pracy i zadanej czułości.

Dla belki o szerokości 2mm, długości 6mm, grubości $20\mu\text{m}$ uzyskano ugięcie końca belki o $60\mu\text{m}$ (przy sile działającej na belkę odpowiadającej indukcji magnetycznej zewnętrznego pola $B=10\text{mT}$). Do dalszej analizy rozkładu pola magnetycznego dla takiego przetwornika należy założyć powierzchnię cewki o wymiarach 2mm na 2mm (czyli maksymalne wykorzystanie powierzchni przy założeniu cewki o budowie kwadratowej).

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 $d_{AI}=d_p$), nie wpływa znacząco na wartość indukcji wytworzonego pola magnetycznego.

Szerokość ścieżek nie powinna być mniejsza od odległości między nimi ze względu na znaczne zmniejszenie maksymalnej indukcji B_z . Szerokość ścieżek powinna być minimum dwa razy większa od odległości między nimi.

Wpływ pola cewki na rozkład zewnętrznego (mierzonego) pola magnetycznego zależy od wartości jego natężenia. W celu optymalnego działania czujnika należy dobrać tak wymiary belki, aby siła na nią działająca (powstała w wyniku oddziaływania pola cewki z polem zewnętrznym) powodowała jej ugięcie o zadany kąt z uwzględnieniem minimalnego wpływu własnego pola cewki na rozkład zewnętrznego (mierzonego) pola magnetycznego.

Wraz ze wzrostem indukcji pola magnetycznego cewki rośnie jego wpływ na rozkład zewnętrznego pola (przy tej samej wartości indukcji magnetycznej pola zewnętrznego).

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] Gołębowski J.: Microactuators systems of torsional silicon cantilever, Proc. of WSES/IEEE Int. Conf. ICRODIC, Skiathos, Greece, pp. 3281-3284, 2002.
- [3] Judy J.W., Muller R.S.: Magnetically Actuated, Addressable Microstructures. Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 6, no. 3, pp. 249-256, 1997.
- [4] Lam T., Darling R.B.: Physical 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.
- [5] Peiner E., Doering L., Force calibration of stylus instruments using silicon microcantilevers. Sensors and Actuators A, v. A123-124, pp. 137-145, 2005.
- [6] Ripka P.: Magnetic Sensors and Magnetometers. Artech House Inc., pp. 381-382, 2001.
- [7] 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.
- [8] 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.