

MÔ PHỎNG CẢM BIẾN GIA TỐC ÁP ĐIỆN TRỞ BA BẬC TỰ DO SIMULATION OF 3-DOF PIEZORESISTIVE ACCELERATION SENSOR

Vũ Ngọc Hùng, Nguyễn Văn Minh, Lê Văn Minh, Trịnh Quang Thông
Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu về mô hình hóa và mô phỏng các ứng xử cơ học và đặc trưng lối ra của cảm biến gia tốc áp điện trở ba bậc tự do kích thước $1 \times 1 \text{ mm}^2$ trên cơ sở phương pháp phân tích phần tử hữu hạn (FEA) sử dụng phần mềm ANSYS. Phần tử SOLID 226 đã được sử dụng để mô hình hóa bài toán kết hợp hai trường cơ điện của cảm biến áp điện trở. Phân bố ứng suất dọc theo các thanh dầm nhạy cơ đã được phân tích và được sử dụng để xác định vị trí các áp điện trở. Tần số dao động riêng của cảm biến tính toán được theo các phương x , y và là 600110 Hz, 600110 Hz, và 46494 Hz. Độ nhạy của cảm biến tỷ lệ thuận với khối lượng khối gia trọng và tỷ lệ nghịch với chiều rộng và chiều dày thanh dầm treo. Đối với cảm biến gia tốc có thanh dầm kích thước $340 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$, độ nhạy theo phương x , y và z đạt giá trị tương ứng là $38.8 \mu\text{V/g}$, $43 \mu\text{V/g}$ và $23.3 \mu\text{V/g}$. Các kết quả tính toán sẽ là cơ sở để thực hiện các nghiên cứu về thiết kế và chế tạo loại cảm biến này.

ABSTRACT

This paper presents the modeling and simulation results of the mechanical behaviour and output characteristics of a three degree of freedom (3-DOF) piezoresistive accelerometer with outer size of $1 \times 1 \text{ mm}^2$ based on the finite element method (FEM) using ANSYS software. The SOLID 226 element is used for coupled-field analysis of piezoresistive sensor. The stress distributions along the mechanical sensitive beams have been analyzed. The obtained results of this analysis were used to determine the location of piezoresistors. Corresponding to three space directions, i.e., x , y and z , the natural frequencies are 600110 Hz, 600110 Hz and 46494 Hz, respectively. The sensor sensitivity increases with decreasing the thickness and width of the sensing beam. but declines with decrease of the seismic mass weight. For the accelerometer with sensing beam dimensions of $340 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$, the sensitivities are 38.8 mV/g , 43 mV/g and 23.3 mV/g corresponding to x , y and z direction, respectively. The simulation results will be used for design and produce this type of sensor.

I. MỞ ĐẦU

Cảm biến gia tốc vi cơ silic đang có vai trò ngày càng quan trọng do nhu cầu ứng dụng rất lớn trong các lĩnh vực công nghiệp. Chẳng hạn, bộ điều khiển túi khí an toàn được trang bị cho các ô-tô hiện đại, bộ điều khiển và giữ cân bằng trong các máy ảnh, máy quay phim kỹ thuật số hiện nay v...v... và v...v... Các cảm biến gia tốc vi cơ thường hoạt động dựa trên các nguyên lý vật lý cơ bản như hiệu ứng áp điện trở, tụ điện, hiệu ứng tunnel, hoặc cộng hưởng [1-4], trong số đó, cảm biến gia tốc ứng dụng hiệu ứng áp trở có nhiều ưu điểm, như đơn giản về cấu trúc, dễ thu nhận và xử lý tín hiệu, đặc biệt là khả năng tạo linh kiện MEMS tích hợp.

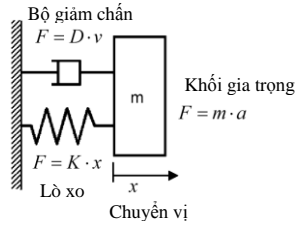
Mô phỏng là việc thực hiện phương pháp tính toán số các bài toán có cấu trúc hình học

phức tạp khó giải quyết bằng phương pháp giải tích. Công việc này giúp giảm chi phí nghiên cứu, tìm lời giải nhanh chóng và đang ngày càng có vai trò quan trọng trong nhiều lĩnh vực kỹ thuật. Thực hiện bài toán mô phỏng đối với cảm biến gia tốc kiểu áp trở sẽ cho phép xác định được vị trí đặt áp trở, trên cơ sở đó có thể xác định được độ nhạy của linh kiện. Trong bài báo này, cấu trúc cơ và các đặc trưng cơ bản của cảm biến gia tốc kiểu áp điện trở ba bậc tự do sẽ được trình bày. Ở đây, hoạt động của cảm biến sẽ được mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn (finite element method - FEM) thông qua phần mềm tính toán ứng dụng của phương pháp này là ANSYS.

II. MÔ HÌNH LÝ THUYẾT

Cảm biến gia tốc silic thường bao gồm một khối gia trọng (seismic mass) có vai trò là bộ phận nhạy cơ được treo lên một khung cố

định bằng một hoặc nhiều thanh dầm (beam). Độ nhạy của cảm biến phụ thuộc vào kích thước của thanh dầm và tỷ lệ với khối lượng của khối gia trọng. Có thể mô tả cấu trúc này bởi một mô hình toán lý bao gồm một lò xo đóng vai trò là phần tử đàn hồi mắc song song với phần tử giảm chấn như chỉ ra trên hình 1.



Hình 1. Mô hình toán lý cấu trúc cảm biến gia tốc

Theo định luật 2 Newton ta có phương trình động lực học một chiều của hệ như sau:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + D \frac{dx}{dt} + Kx = F_{ext} = ma \quad (1)$$

trong đó, K là hệ số độ cứng hiệu dụng của phần tử lò xo, D là hệ số giảm chấn, m là khối lượng của khối gia trọng, a là gia tốc của hệ. Ở đây, F_{ext} là lực tác dụng lên khối gia trọng đóng vai trò là lực quán tính. Lực này gây ra biến dạng đối với phần tử lò xo và tạo ra chuyển vị của khối gia trọng. Bài toán này chỉ giới hạn xét chuyển vị tĩnh, ứng với trường hợp thay đổi chậm của gia tốc theo thời gian.

Dùng phép biến đổi Laplace ta thu được hàm truyền cơ học bậc hai từ gia tốc sang chuyển vị của khối gia trọng [5, 6]:

$$H(s) = \frac{X(s)}{A(s)} = \frac{1}{s^2 + \frac{\omega_r}{Q} + \omega_r^{-2}} \quad (2)$$

trong đó, $X(s)$ và $A(s)$ là biến đổi Laplace của chuyển vị và gia tốc tương ứng, ω_r là tần số dao động riêng và Q là hệ số phẩm chất. Từ đây ta sẽ thu được mối quan hệ giữa chuyển vị với gia tốc và tần số dao động riêng của khối gia trọng như sau [5, 6]:

$$x = \frac{a}{\omega_r^2} \quad (3)$$

Các hệ thức trên cũng đúng cho bài toán 3 chiều tức là trường hợp gia tốc 3 bậc tự do như mục tiêu nghiên cứu cảm biến đã đặt ra.

III. MÔ HÌNH CẢM BIẾN

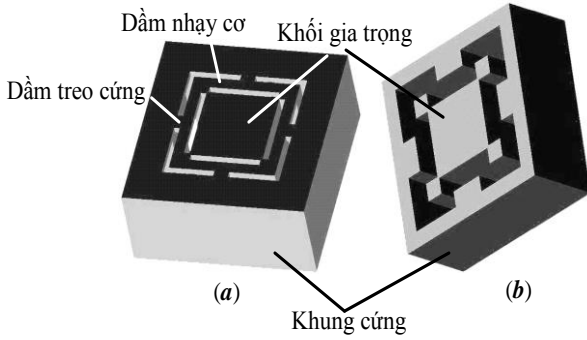
Mô hình của cảm biến có kích thước ngoài là 1000 μm x 1000 μm (hình 2). Các thông số cấu trúc khác của cảm biến được cho trong bảng 1.

Bảng 1. Các thông số hình học sử dụng để mô hình hóa cảm biến

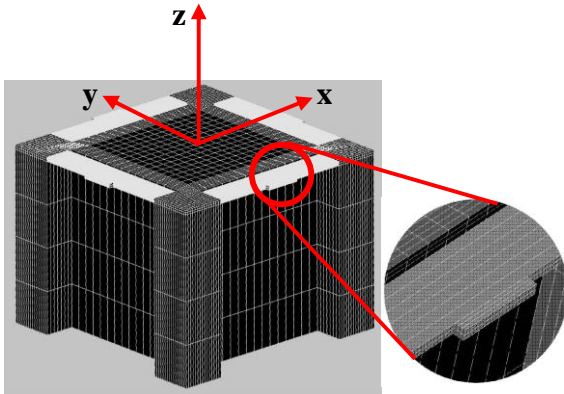
Các bộ phận chính	Thông số
Chiều dày khối gia trọng	450 μm
Chiều dày thanh dầm treo	60 μm
Chiều dài thanh dầm nhạy cơ	340 μm
Chiều dày thanh dầm nhạy cơ	10 μm
Chiều rộng khung cố định	220 μm

Phần tử SOLID 186 trong thư viện của ANSYS đã được sử dụng để mô hình hóa cấu trúc và thực hiện mô phỏng bài toán cơ của cảm biến. Đây là phần tử cấu trúc có hàm dạng bậc hai với hai mươi nút, dùng ma trận độ cứng. Vì vậy, kết quả tính toán thu được sẽ chính xác hơn so với kiểu phần tử sử dụng modun đàn hồi vô hướng. Ma trận độ cứng cho hệ tọa độ trên được tính trên cơ sở ma trận độ cứng trong hệ tọa độ tinh thể chính tắc $\langle 100 \rangle$, $\langle 010 \rangle$, và $\langle 001 \rangle$ với $C_{11} = 1,674 \times 10^5$ MPa, $C_{12} = 0,652 \times 10^5$ MPa, và $C_{44} = 0,796 \times 10^5$ MPa. Trong trường hợp này, việc tính toán được thực hiện khi xoay hệ tọa độ phần tử đi 45° xung quanh trục vuông góc với bề mặt cảm biến. Điều kiện biên được xác định khi cố định khung cứng bên ngoài.

Khi thực hiện bài toán phân tích ứng suất, mô hình phần tử hữu hạn của cảm biến được chia sao cho ở khu vực thanh dầm nhạy cơ, lưới có độ mịn cỡ 1 μm (hình 3), còn phần khung và khối gia trọng được chia thô hơn để giảm số lượng các phương trình tính toán. Đối với bài toán mode, có thể không cần thực hiện việc chia lưới như vậy để giảm thời gian tính toán. Trong phạm vi của nghiên cứu này, yếu tố giảm chấn tạm thời chưa được xét tới.



Hình 2. Mô hình cảm biến gia tốc: mặt trên (a), mặt dưới (b)



Hình 3. Mô hình phần tử hữu hạn (phần khối gia trọng và các dầm nhạy cơ bên trong) của cảm biến

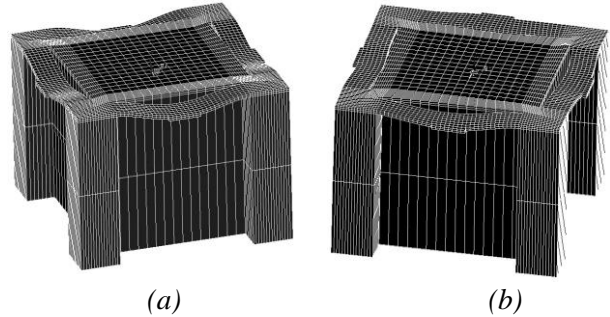
Đối với bài toán phân tích độ nhạy, các áp điện trở kích thước $2 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m} \times 1,8 \mu\text{m}$ được đưa vào mô hình để tính toán tín hiệu điện áp ra một cách trực tiếp. Ma trận hệ số áp trở theo các phương tinh thể chính tắc $\langle 100 \rangle$, $\langle 010 \rangle$, và $\langle 001 \rangle$ được cho như sau: $\pi_{11} = 6,5 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$, $\pi_{12} = -1,1 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$, $\pi_{44} = 138,1 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$. Cũng tương tự như ma trận độ cứng, ma trận hệ số áp trở cũng được tính toán trong hệ tọa độ thực tế bằng cách xoay hệ tọa độ phần tử đi 45° xung quanh trục OZ. Kiểu phần tử SOLID 226 được dùng làm phần tử áp điện trở, có vai trò chuyển đổi sự thay đổi ứng suất gây bởi gia tốc thành tín hiệu điện trên cầu Wheatston.

IV. KẾT QUẢ

Phân tích mode

Các dạng mode của cảm biến cần quan tâm là dao động theo các phương nằm trong mặt phẳng x-y và trục z. Hình ảnh dao động của khối gia trọng theo các phương trên được minh

họa ở hình 4. Kết quả tính toán xác định tần số dao động riêng được trình bày trong bảng 2. Các mode tương ứng với dao động xoay khi chịu tác dụng của các gia tốc góc xoay chiều chưa được xét đến trong bài toán này.



Hình 4. Kết quả phân tích FEM về mode dao động của khối gia trọng theo phương Z (a) và y trong mặt phẳng x-y (b)

Bảng 2. Tần số dao động riêng tương ứng các mode

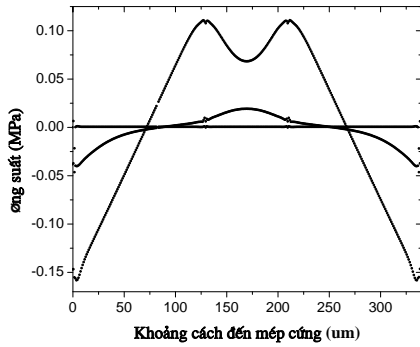
Mode	Tần số(Hz)	Mô tả
Mode 1	46494	Dao động theo phương Z
Mode 5	600110	Dao động theo phương X
Mode 6	600110	Dao động theo phương Y

Khi khối gia trọng dao động với tần số gần tần số dao động riêng, biên độ dao động sẽ rất lớn, dẫn đến có thể gây phá hủy cấu trúc. Vì thế, kết quả này giúp ta xác định được dải tần làm việc cho phép của cảm biến trong sử dụng cũng như cho phép thực hiện các tính toán tỷ số giảm chấn của cấu trúc.

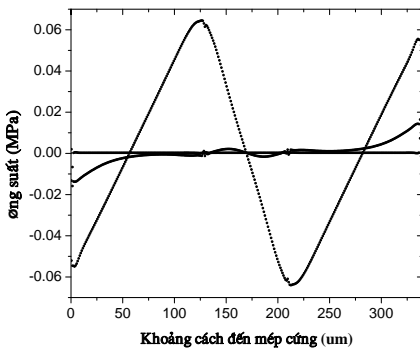
Phân tích ứng suất

Bài toán phân tích ứng suất giúp xác định vị trí tối ưu của các áp điện trở trên thanh dầm nhạy cơ. Khi chịu tác động của tải gia tốc với 3 thành phần gia tốc: pháp tuyến (A_z) và phương nằm ngang (A_x) và (A_y), khối gia trọng sẽ chuyển động thẳng đứng làm cho thanh dầm bị biến dạng. Sự biến dạng gây bởi các thành phần gia tốc dẫn tới thay đổi ứng suất trên thanh dầm. Hình 5 là kết quả phân tích phân bố của các thành phần ứng suất dọc theo các thanh dầm khi chịu tác dụng bởi gia tốc theo phương OZ, OX và OY. Có thể thấy, ứng suất dọc gây bởi gia tốc theo phương Z là như nhau và đối

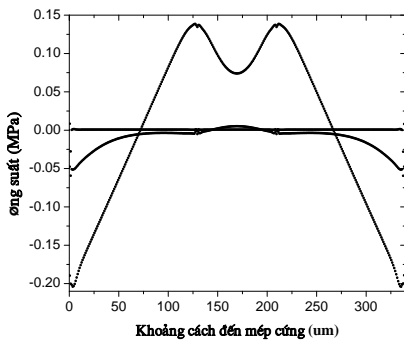
xúng trên bốn thanh dầm, trong khi đó các thành phần ứng suất vuông góc đều rất nhỏ, và vì vậy có thể bỏ qua. Đối với biến dạng trong mặt phẳng chứa phương OX và OY của cảm biến, ứng suất dọc cực đại trên các thanh dầm có phương vuông góc lớn hơn so với trên thanh dầm song song với phương gia tốc tác dụng.



(a)



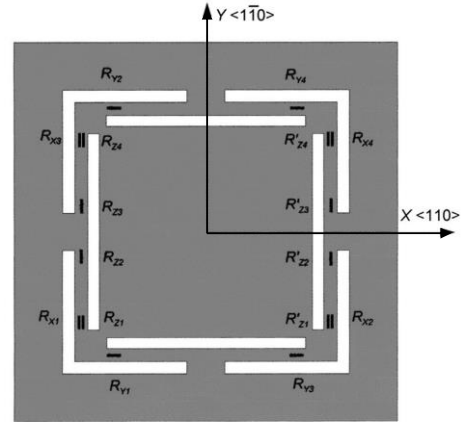
(b)



(c)

Hình 5. Phân bố ứng suất dọc theo các thanh dầm nhạy cơ chịu tác dụng của gia tốc theo phương z (a), y(b), và x (c) nhận được từ phép phân tích FEM

Để đảm bảo tín hiệu trên các cầu điện trở không ảnh hưởng chéo lẫn nhau, các áp điện trở đo gia tốc theo phương OX sẽ được đặt trên trục nằm theo phương OY, và tương tự các áp điện trở đo gia tốc theo phương OY được đặt trên trục nằm theo phương OX.



Hình 6. Cấu hình phối trí các áp điện trở

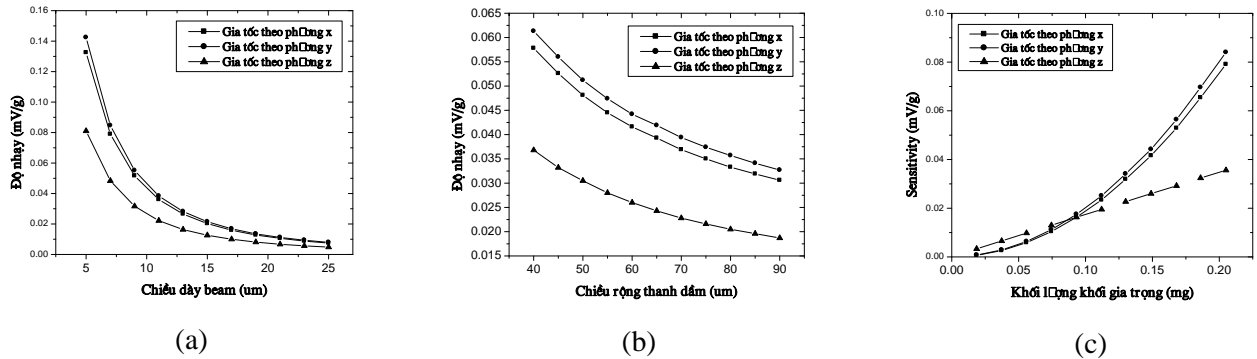
Trên cơ sở các kết quả trên đây có thể đưa ra một phối trí cấu hình cầu điện trở Wheatstone để lấy điện áp tín hiệu ra (hình 6). Giá trị cực đại của ứng suất xuất hiện trên thanh dầm ở các vị trí cách khung cứng cỡ 10÷15 μm .

Phân tích độ nhạy

Phép phân tích này cung cấp sự phụ thuộc của độ nhạy linh kiện vào sự thay đổi của chiều dày, chiều rộng các thanh dầm và khối lượng khối gia trọng. Kết quả mô phỏng trên hình 7 cho thấy độ nhạy tỷ lệ thuận với khối lượng khối gia trọng, tỷ lệ nghịch với chiều dày và chiều rộng thanh dầm.

Để dàng nhận ra rằng, đây là sự phụ thuộc phi tuyến, trong đó, độ nhạy thay đổi rất mạnh theo chiều dày thanh dầm. Cũng từ các kết quả này ta thấy độ nhạy của gia tốc theo phương Oz nhỏ hơn độ nhạy theo phương Ox và Oy (hình 7a và 7b). Độ nhạy theo phương Ox và Oy có sự chênh lệch là vì trong thiết kế vị trí của các áp điện trở trên bề mặt cảm biến không như nhau do đòi hỏi của việc chạy dây dẫn trên bề mặt cấu trúc nhạy cơ khi thiết kế cấu trúc thực. Trong khi đó, khi khối lượng khối gia trọng nhỏ thì độ nhạy của gia tốc theo phương Oz lớn hơn theo phương Ox và Oy (hình 7c). Tuy nhiên, khi tăng khối lượng khối gia trọng, độ nhạy theo phương Ox và Oy tăng

nhanh hơn và dẫn tới độ nhạy theo các phương đó lớn hơn độ nhạy theo phương Oz.



Hình 7. Sự phụ thuộc của độ nhạy theo chiều dày (a), chiều rộng thanh dầm nhạy cơ (b), và khối lượng khối gia trọng (c) nhận được từ phép phân tích FEM

V. KẾT LUẬN

Tần số dao động riêng của các mode dao động theo phương vuông góc và song song với bề mặt khối gia trọng đã được xác định. Kết quả mô phỏng phân bố ứng suất trên các thanh dầm đã định hướng cho thiết kế bố trí các áp điện trở một cách tối ưu. Kích thước hình

học của thanh dầm và khối gia trọng ảnh hưởng mạnh tới độ nhạy của cảm biến gia tốc.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu đã được thực hiện trong khuôn khổ đề tài cấp nhà nước mã số KC 02.15/06-10.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. N. Yazdi, F. Ayazi, and K. Najafi; Micromachined Inertial sensors; Proceeding of the IEEE, vol. 86, No. 8, (1998), 1640.
2. W. J. Flemming; Overview of automotive sensors; Sensors Journal, IEEE, Vol. 1, Issue 4, Dec (2001), pp. 296 - 308.
3. Jon S. Wilson; Sensor Technology Handbook; Elsevier Inc., Burlington-Oxford, 2005.
4. T. Mineta, S. Kobayashi, Y. Watanabe, S. Kanauchi, I. Nagakawa, E. Suganuma, M. Esashi; Three-axis capacitive accelerometer with uniform axial sensitivities; Transducer 95, Stockholm, Sweden (1995), pp.544-577.
5. G. Arfken; Mathematical Methods for Physicists, 3rd ed. Orlando, Academic Press, 1985.
6. Dzung Viet Dao, Machiko Koshigoe, Toshiyuki Toriyama and Susumu Sugiyama; Design and Simulation of an Ultra Small 3-DOF Accelerometer Utilizing Piezoresistive Effect in Si Nanowire; The 8th international Conference on Mechatronics Technology, Viet Nam National university publisher, Ha Noi, (2004), p. 359.

Địa chỉ liên hệ: Vũ Ngọc Hùng - Tel: 0915.396.901, email: hungvungoc@itims.edu.vn
Viện Đào tạo quốc tế về khoa học vật liệu, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội