THIẾT KẾ VÀ MÔ PHỎNG CẤU TRÚC CỦA THANH DẦM MỎNG CHO CẢM BIẾN BIẾN DẠNG ÁP ĐIỆN TRỞ MEMS ĐỘ NHẠY CAO

NGUYỄN CHÍ CƯỜNG

Khoa Công Nghệ Điện, Trường Đại học Công nghiệp TP.HCM;

Tác giả liên hệ: nguyenchicuong@iuh.edu.vn

DOIs: https://www.doi.org/10.46242/jstiuh.v81i3.6011

Tóm tắt. Cảm biến biến dạng (strain gauge), là một thiết bị đo độ biến dạng của cấu trúc vật liệu hoặc cấu trúc cơ khí như cầu, đường, đường sắt, nhà cao tầng. Trong nghiên cứu này, cấu trúc mới của thanh dầm mỏng cho cảm biến trong hệ thống vi cơ điện tử (MEMS) được thiết kế nhằm khuếch đại độ biến dạng trên thanh dầm lên nhiều lần. Phần tử áp điện trở trên thanh dầm của tấm đế silic được thiết kế để phát hiện sự thay đổi độ biến dạng của vật liệu. Yếu tố gauge factor hay độ nhạy *GF* là đại lượng dùng để đánh giá độ nhạy của cảm biến biến dạng. Cấu trúc của thanh dầm mỏng silic được thiết kế và phân tích bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM). Cuối cùng, độ nhạy *GF* cao của cảm biến biến dạng áp điện trở MEMS có thể đạt được trong phạm vi từ 200 đến 500.

Từ khóa. Cảm biến biến dạng, MEMS, thanh dầm, hiệu ứng áp điện trở, độ biến dạng, độ nhạy.

1 GIỚI THIỆU

Ứng dụng chính của cảm biến biến dạng là để đo độ biến dạng của cấu trúc vật liệu dưới tác dụng của ứng suất. Cảm biến biến dạng độ nhạy cao trong hệ vi cơ điện tử (MEMS) [1] được sử dụng cho các ứng dụng tiên tiến trong hệ thống giám sát sức khỏe kết cấu (Structural health monitoring systems, SHMS) cho thành phố thông minh nhằm theo dõi và quan trắc sức khỏe của các kết cấu hạ tầng như cầu, đường sắt, tòa nhà, thân máy bay hoặc trong hệ thống điều khiển bay trên không [2, 3, 4].

Trong cảm biến biến dạng MEMS, độ nhạy gauge factor (*GF*), được tính bằng tỷ số giữa sự thay đổi điện trở (ΔR) và điện trở (R) chia cho độ biến dạng cơ học vật liệu (ε), là thông số quan trọng để đánh giá độ nhạy của cảm biến. Thông thường, cảm biến biến dạng kim loại dạng lá mỏng thường có độ nhạy *GF* bằng 2. Ngoài ra, cảm biến biến dạng MEMS áp điện trở được chế tạo bằng các vật liệu khác như silic bán dẫn [5, 6], ống nano cacbon [7], sợi quang [8], dây nano bạc [9], và hợp kim nhôm [10].

Trong vật liệu bán dẫn (như silic), sự thay đổi điện trở suất lớn hơn nhiều so với sự thay đổi hình học khi vật liệu bị biến dạng. Do đó, độ nhạy *GF* trong cảm biến biến dạng silic cao hơn 50 lần so với vật liệu kim loại [11, 12]. Vật liệu silic dùng cho cảm biến áp điện trở MEMS có độ nhiễu thấp, chi phí thấp, ít phụ thuộc vào nhiệt độ và độ nhạy cao. Để cải thiện hiệu suất của cảm biến, cảm biến biến dạng áp điện trở MEMS đã được thiết kế và chế tạo [13]. Cao và cộng sự [14] đã giới thiệu cấu trúc màng mỏng nhằm tạo ra vùng tập trung ứng suất trên đế silic để tăng độ nhạy cảm biến. Sau đó, ứng suất dọc và ngang sinh ra dọc theo màng mỏng tạo ra độ nhạy cao hơn. Mohammed và cộng sự [1] đã đề xuất cấu trúc rãnh sâu hoặc cấu trúc rãnh bề mặt để tạo thành ứng suất dọc và ngang trên đế silic. Ngoài ra, Mohammed và cộng sự [15] đã thiết kế ra các hoa thị đa dạng của điện trở áp điện thẳng và tròn nhằm tăng độ nhạy của cảm biến áp điện trở MEMS. Do đó, độ nhạy của cảm biến MEMS có thể đạt được cao hơn bằng cách tạo ra các cấu trúc trên đế hoặc đặc điểm trên bề mặt đế silic. Trong những nghiên cứu gần đây [16, 17], cấu trúc thanh dầm lần đầu được đề xuất để tăng ứng suất biến dạng [16] và độ nhạy *GF* [17] của cảm biến biến dạng áp điện trở MEMS. Tuy nhiên, cấu trúc thanh dầm mỏng vẫn chưa được xem xét cho cảm biến biến dạng áp điện trở MEMS để khuếch đại độ biến dạng sinh ra. Cấu trúc thanh dầm mỏng được kỳ vọng là cho hiệu suất cao hơn so với các cấu trúc khác đã có (như màng mỏng [14] hoặc rãnh sâu [1,15]) bởi vì cấu trúc thanh dầm mỏng có thể tạo ra vùng tập trung ứng suất biến dạng chỉ trên 1 phương duy nhất. Trong khi, vùng tập trung ứng suất biến dạng trên phương ngang hay phương khác gần như không đổi.

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã mô phỏng cảm biến biến dạng áp điện trở MEMS cải tiến với thanh dầm mỏng nhằm khuếch đại ứng suất và biến dạng sinh ra trên tấm silic chỉ theo một hướng duy nhất. Phần tử cảm biến áp điện trở (silic loại *n*) của cảm biến biến dạng MEMS được thiết kế để đo biến dạng (ε) của vật liệu. Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) trong phần mềm thương mại của COMSOL Multiphysics

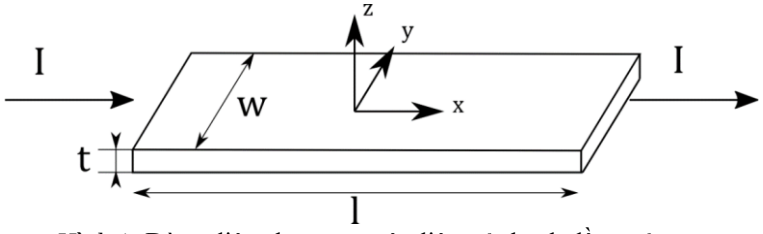
© 2026 Trường Đại học Công nghiệp thành phố Hồ Chí Minh

[18] được sử dụng làm phương pháp mô phỏng và phân tích. Phân bố biến dạng dọc và ngang của cảm biến biến dạng MEMS được đánh giá theo hướng *x* và *y*. Cuối cùng, độ nhạy *GF* cao thu được là trong khoảng 200-500. Kết quả mô phỏng có thể được sử dụng để thiết kế cảm biến biến dạng MEMS có độ nhạy cực cao để phát hiện biến dạng của vật liệu theo một hướng duy nhất.

Bài báo được bố cục cụ thể như sau: Giới thiệu được trình bày trong phần 1. Phương pháp nghiên cứu bao gồm hiệu ứng áp điện trở của thanh dầm và phương pháp phần tử hữu hạn được trình bày trong phần 2. Kết quả mô phỏng và thảo luận được trình bày trong phần 3. Kết luận bài báo được trình bày trong phần 4.

2 PHƯƠNG PHÁP

2.1 Hiệu ứng áp điện trở của thanh dầm



Hình 1: Dòng điện chạy qua một điện trở thanh dầm mỏng.

Điện trở (*R*) của thanh dầm mỏng khi dòng điện (*I*) chạy qua trong Hình 1 được tính bằng:

$$R = \frac{l}{w \cdot t}\rho \tag{1}$$

trong đó *l* là chiều dài, *w* là chiều rộng và *t* là bề dày của điện trở.

Sự thay đổi của điện trở (ΔR) do kéo giãn cơ học theo hướng *x* được tính bằng:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta w}{w} - \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \tag{2}$$

Các định nghĩa về độ biến dạng cơ học: $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ và tỷ số Poisson: $\nu = -\frac{\Delta w/w}{\varepsilon} = -\frac{\Delta t/t}{\varepsilon}$ có thể được kết hợp như sau:

$$GF = \frac{1}{\varepsilon}\frac{\Delta R}{R} = (1+2\nu) + \frac{1}{\varepsilon}\frac{\Delta \rho}{\rho} \tag{3}$$

Trong phương trình (3), số hạng đầu tiên của $(1 + 2\nu)$ biểu thị sự thay đổi điện trở do sự thay đổi hình học. Trong khi số hạng thứ hai của $(1/\varepsilon)(\Delta\rho/\rho)$ biểu thị sự thay đổi điện trở do sự thay đổi của điện trở suất vật liệu. Trong vật liệu bán dẫn như silic, sự thay đổi điện trở suất lớn hơn gấp 50 lần so với sự thay đổi của hình học.

Mối quan hệ giữa điện trường (*E*) và mật độ dòng điện (*J*) được đưa ra bởi:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \rho_{13} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \rho_{23} \\ \rho_{31} & \rho_{32} & \rho_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \end{bmatrix} \tag{4}$$

trong đó ρ được biểu diễn trong tenxơ của điện trở suất.

Dựa trên Y. Kanda [19], tenxơ điện trở suất là đối xứng: $p_{ij} = p_{ji}$. Bằng cách sử dụng tính chất đối xứng của vật liệu tinh thể silic, hiệu ứng áp điện trở [20] được tính bằng biểu thức sau:

$$\begin{bmatrix}\rho_{11}\\ \rho_{22}\\ \rho_{33}\\ \rho_{23}\\ \rho_{13}\\ \rho_{12}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\rho_0\\ \rho_0\\ \rho_0\\ 0\\ 0\\ 0\end{bmatrix} + \rho_0 \begin{bmatrix}\pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0\\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0\\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44}\end{bmatrix} \begin{bmatrix}\sigma_{11}\\ \sigma_{22}\\ \sigma_{33}\\ \sigma_{23}\\ \sigma_{13}\\ \sigma_{12}\end{bmatrix} \quad (5)$$

trong đó π là tenxơ hệ số áp điện trở, ρ_0 là điện trở suất khi vật liệu không chịu ứng suất, σ là tenxơ ứng suất cơ học. Các thành phần của hệ số áp điện trở của silic π_{11}, π_{12} và π_{44} được tìm thấy bởi Smith [21].

Bảng 1: Tenxơ hệ số áp điện trở của silic (10^{-11}/Pa) [21].

	π_{11}	π_{12}	π_{44}
p-Si (7.8 Ω.cm)	6.6	-1.1	138.1
n-Si (11.7 Ω.cm)	-102.2	53.4	-13.6

Vì độ dày thanh dầm trong Hình 1 nhỏ hơn nhiều so với chiều rộng và chiều dài của thanh dầm, xét trạng thái ứng suất phẳng, sự thay đổi tương đối về điện trở có thể được biểu thị bằng:

$$\left[\frac{\Delta R}{R}\right] = \frac{\rho'_{11} - \rho_0}{\rho_0} = \pi'_{11}\sigma'_{11} + \pi'_{12}\sigma'_{22} + \pi'_{44}\sigma'_{12} \quad (6)$$

Giả sử ứng suất trượt nhỏ hơn nhiều so với ứng suất trong mặt phẳng *x* và *y*, hiệu ứng điện trở áp điện có thể thu được:

$$\left[\frac{\Delta R}{R}\right] = \pi_L\sigma_L + \pi_T\sigma_T \quad (7)$$

trong đó $\pi_L = \pi'_{11}$ và $\pi_T = \pi'_{12}$ là các hệ số áp điện trở dọc và ngang. $\sigma_L = \sigma'_{11}$ và $\sigma_T = \sigma'_{22}$ là thành phần ứng suất dọc và ngang. Biểu thức tổng quát của hệ số áp trở π_L và π_T được đưa ra trong [22]:

$$\begin{cases}\pi_L = \pi_{11} - 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 m_1^2 + l_1^2 n_1^2 + m_1^2 n_1^2)\\ \pi_T = \pi_{12} + (\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + n_1^2 n_2^2)\end{cases} \quad (8)$$

Vì vậy, hệ số áp trở dọc và ngang của điện trở áp điện trong silic loại *p* và loại *n* theo hướng <100> đối với silic loại *n* [22] được tính như sau:

$$\begin{cases}\pi_{L|<100>} = \pi_{11} = -102.2\times10^{-11}/Pa\\ \pi_{T|<100>} = \pi_{12} = 53.4\times10^{-11}/Pa\end{cases} \quad (9)$$

Đối với mối quan hệ ứng suất-biến dạng của vật liệu đồng nhất, phương trình tuyến tính có thể được viết theo dạng tổng quát của định luật Hook như sau:

$$\begin{bmatrix}\sigma_{xx}\\ \sigma_{yy}\\ \sigma_{zz}\\ \sigma_{yz}\\ \sigma_{xz}\\ \sigma_{xy}\end{bmatrix} = \hat{E}\begin{bmatrix}1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0\\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0\\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\varepsilon_{xx}\\ \varepsilon_{yy}\\ \varepsilon_{zz}\\ 2\varepsilon_{yz}\\ 2\varepsilon_{xz}\\ 2\varepsilon_{xy}\end{bmatrix} \quad (10)$$

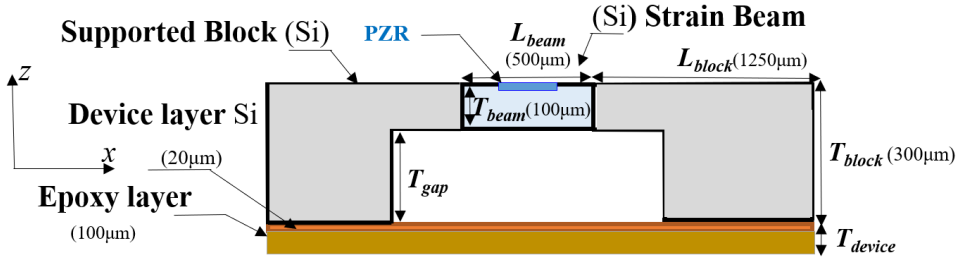
trong đó $\hat{E} = \dfrac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$.

Về tính chất cơ học của thanh dầm mỏng silic, Mô đun Young (E), Mô đun trượt (G) và tỷ số Poisson (ν) của silic (Si) theo các hướng tinh thể silic khác nhau được thể hiện trong Bảng 2. Tất cả những kết quả này đều có thể được sử dụng trong phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) để tính ứng suất và biến dạng của vật liệu.

Bảng 2: Các thông số cơ học cho Mô đun Young, Mô đun trượt, Hệ số Poisson của silic (Si) ở các hướng tinh thể khác nhau [23].

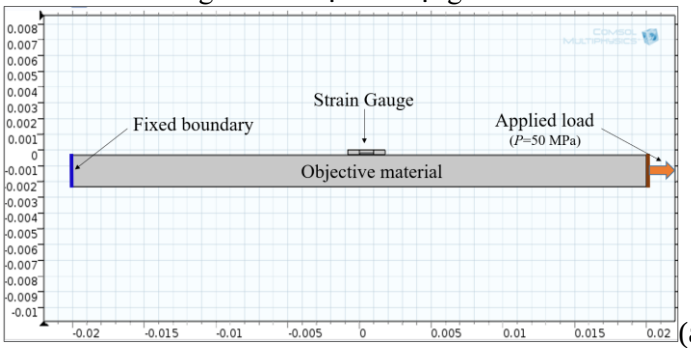
Vật liệu	Hướng tinh thể	Mô đun Young, E [GPa]	Mô đun trượt, G [GPa]	Tỷ lệ Poisson	Mật độ khối lượng [kg/m^3]
Si	<100>	129.8	79.5	0.278	2330
	<110>	168.9	50.4	0.0625	

2.2 Phương pháp phần tử hữu hạn

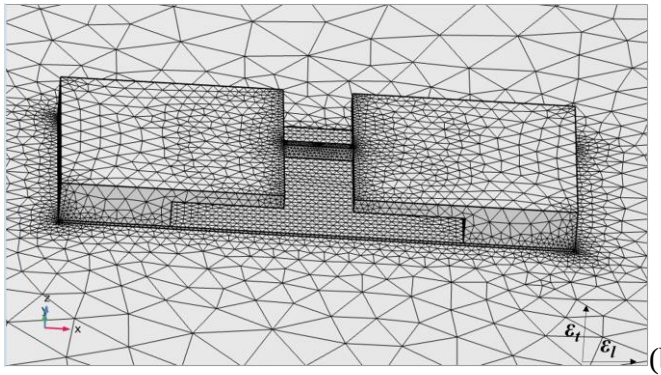


Hình 2: Sơ đồ minh họa cấu trúc thanh dầm mỏng của cảm biến biến dạng áp điện trở MEMS.

Trong Hình 2, cấu trúc cảm biến đo biến dạng áp điện trở MEMS bao gồm đế silic và lớp thiết bị (T_{device}) được dán hoàn toàn trên nền vật liệu chịu tải trọng kéo bằng lớp keo epoxy mỏng. Kích thước hình học, vật liệu, vị trí của phần tử áp điện trở (piezoresitive element, PZR) và cấu trúc cảm biến được trình bày chi tiết trong Hình 2. Phần tử cảm biến áp điện trở (PZR) cho silic loại *n* của cảm biến biến dạng MEMS được đặt trên thanh dầm mỏng của cảm biến để đo ứng suất và độ biến dạng.



(a)



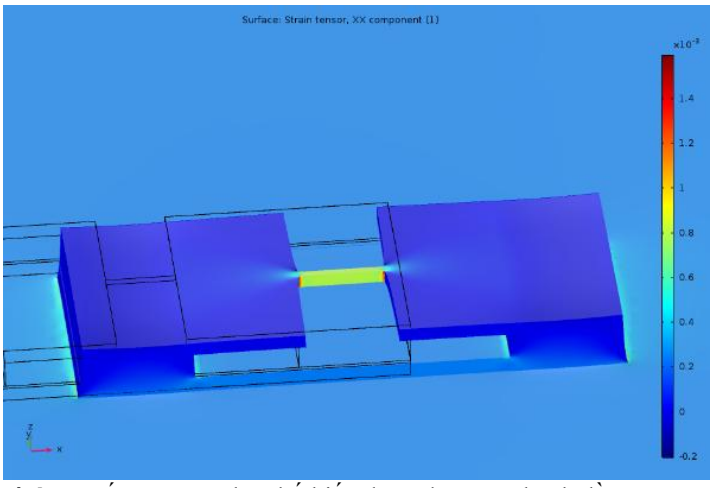
(b)

Hình 3: (a) Điều kiện biên và lực căng, (b) Thiết lập lưới .

Trong Hình 3(a), điều kiện biên cố định (fixed boundary) được áp dụng ở một bên và lực căng phân bố (applied load, *P*) được áp dụng ở phía đối diện của vật liệu. Đối với thiết lập lưới, số lưới tam giác được áp dụng trên mô hình FEM với số phần tử tứ diện là 92.394, số phần tử tam giác là 21.346 và số phần tử cạnh là 1.334 như thể hiện trong Hình 3(b). Tiếp theo, cấu trúc cảm biến được giải quyết và mô phỏng bằng Mô đun vật lý MEMS module của phần mềm thương mại COMSOL Multiphysics [18]. Sử dụng bộ giải phân tích tĩnh (Stationary Solver), kết quả phân bố biến dạng được tính trong mô hình FEM theo các hướng *x* hoặc *y* tương ứng.

3 KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1 Phân bố biến dạng



Hình 4: Kết quả của phân bố biến dạng dọc trên thanh dầm mỏng.

Trong Hình 4, phân bố biến dạng dọc tăng đáng kể qua thanh dầm mỏng của cảm biến biến dạng MEMS. Do đó, kết quả cho thấy biến dạng dọc được khuếch đại đáng kể dọc theo thanh dầm mỏng của cảm biến đo biến dạng MEMS chỉ theo một phương duy nhất.

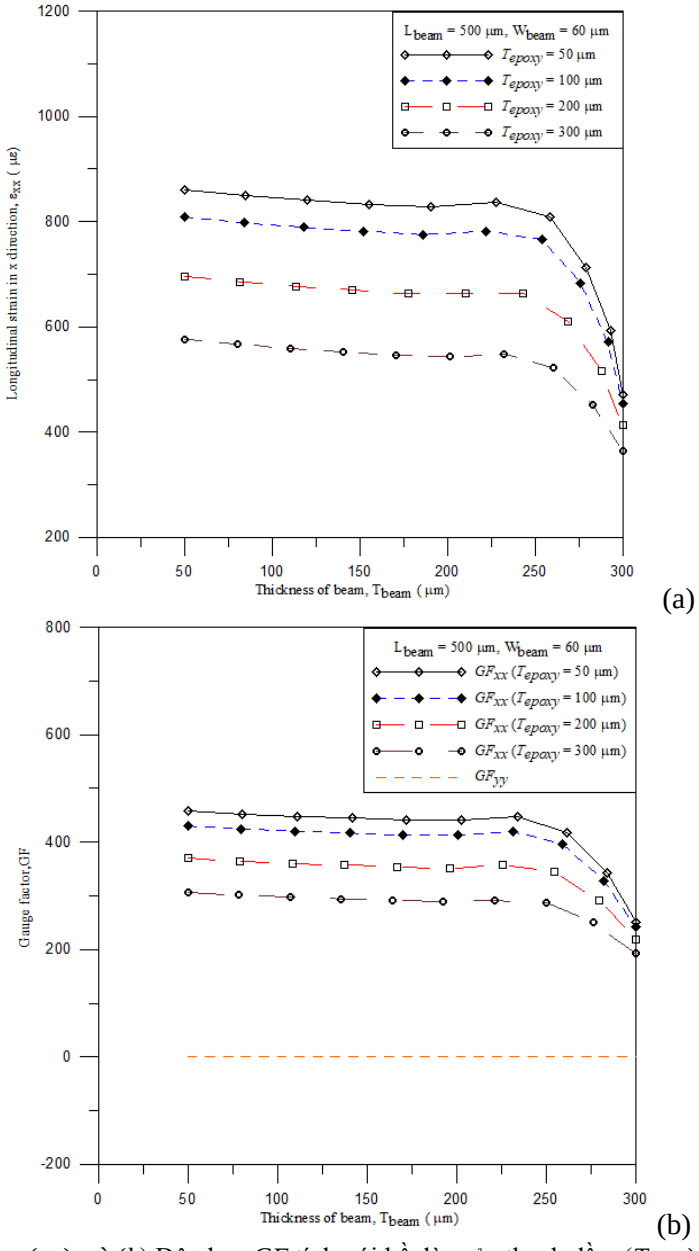
Trong phần kiểm chứng mô hình, kết quả của biến dạng dọc (ε_{xx}) và độ nhạy *GF* được so sánh với số liệu của một số bài báo đã công bố gần đây như trong Bảng 3. Kết quả cho thấy độ biến dạng dọc (ε_{xx}) và độ nhạy GF_{xx} của cấu trúc của thanh dầm mỏng của bài báo này cao hơn so với của cấu trúc thanh dầm dày [16, 17]. Trong khi đó, độ nhạy theo phương ngang GF_{yy} của bài báo này đạt được gần bằng không. Do đó, cấu trúc dạng thanh dầm mỏng của cảm biến MEMS có thể được sử dụng để phát hiện biến dạng trên vật liệu chỉ theo một phương duy nhất có độ nhạy rất cao.

Bảng 3: Kết quả so sánh độ biến dạng dọc ε_{xx} và độ nhạy *GF* của các công trình đã công bố trước đó.

Tác giả	Cấu trúc và vật liệu	Độ biến dạng ε_{xx} (με)	Độ nhạy *GF* cực đại
C. C. Nguyen 2025 [16].	thanh dầm dày, Si	$\varepsilon_{xx} \cong 459$ (με)	

T. K. L. Duong và C. C. Nguyen 2025 [17].	thanh dầm dày, Si		$GF \cong$ 130-230
Bài báo này.	thanh dầm mỏng, Si	$\varepsilon_{xx} \cong 858$ (με)	$GF_{xx} \cong$ 200-500 $GF_{yy} \cong 0$

3.2 Độ nhạy GF của cảm biến biến dạng áp điện trở MEMS



Hình 5: (*a*) Biến dạng dọc (ε_{xx}), và (*b*) Độ nhạy *GF* tính với bề dày của thanh dầm (T_{beam}) cho các độ dày của lớp epoxy (T_{epoxy}).

Trong Hình 5(a), kết quả cho thấy biến dạng dọc giảm đáng kể khi bề dày của thanh dầm tăng. Ngoài ra, biến dạng dọc của thanh dầm giảm đáng kể do ảnh hưởng của độ dày lớp epoxy. Trong Hình 5(b), độ nhạy dọc GF_{xx} tăng khi bề dày của thanh dầm giảm. Hơn nữa, GF_{xx} giảm đáng kể khi độ dày của lớp epoxy tăng. Xu hướng thay đổi này được giải thích bởi khi độ dày thanh dầm tăng và khi độ dày lớp epoxy tăng thì độ cứng thanh dầm tăng lên dẫn đến biến dạng nhỏ hơn dưới cùng một lực tác dụng. Trong khi, độ nhạy ngang GF_{yy} gần như bằng 0 trong phạm vi rộng của điều kiện bề dày thanh dầm. Do đó, độ nhạy *GF* cao của cảm

biến biến dạng MEMS thu được trong khoảng 200-500 trong khoảng rộng bề dày của thanh dầm và độ dày của lớp epoxy.

4 KẾT LUẬN

Tóm lại, cấu trúc của thanh dầm mỏng của cảm biến biến dạng áp điện trở MEMS đã được đề xuất và mô phỏng bằng phương pháp FEM trong COMSOL Multiphysics. Một số kết quả đáng chú ý cho thấy độ nhạy tăng khi bề dày thanh dầm giảm. Ngược lại, độ nhạy cũng giảm đáng kể khi độ dày lớp epoxy tăng. Cuối cùng, độ nhạy cao hơn của cảm biến biến dạng áp điện trở MEMS có thể đạt được trong khoảng 200-500 bằng cách khuếch đại độ biến dạng trên thanh dầm theo một phương duy nhất. Do đó, kết quả có thể được sử dụng để thiết kế và chế tạo cảm biến biến dạng áp điện trở MEMS có độ nhạy cao.

LỜI CẢM ƠN

Tác giả cám ơn Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam đã tài trợ cho nghiên cứu này. Đồng thời, tác giả cám ơn Giáo sư Li Wang Long, Khoa Khoa học và Kĩ thuật Vật Liệu, Đại học Quốc Gia Cheng Kung, Số 1 Đường Đại học, Đài Nam, Đài Loan (ROC) đã tài trợ phần mềm COMSOL Multiphysics và hợp tác trong dự án này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] A. A. S. Mohammed, W. A. Moussa, and E. Lou, High-Performance Piezoresistive MEMS Strain Sensor with Low Thermal Sensitivity, *Sensors*, vol. 11, pp. 1819-1846, 2011.

[2] A. Plankis, and P. Heyliger, *Structural health monitoring MEMS sensors using elasticity-based beam vibrations*, Master thesis, University Fort Collins, Colorado, 2012.

[3] H. N. Li, T. H. Yi, L. Ren, D. S. Li, and L. Huo, Reviews on innovations and applications in structural health monitoring for infrastructures, *Structural Monitoring and Maintenance*, vol. 1, pp. 1-45, 2014.

[4] R. D. Palfreyman and L. A. Trugman, Semiconductor Strain-Gauge Applications for Flight-Control Systems, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation*, vol. IECI-19, no. 2, pp. 56-61, 1972.

[5] S. Ling, X. Chen, L. Miao, J. Yin, J. Jian, and Q. Jin, A Novel Semiconductor Piezoresistive Thin-Film Strain Gauge With High Sensitivity, *IEEE Sensors Journal*. pp. 1-1, 2024.

[6] A. A. Barlian, W. T. Park, J. R. Mallon, A. J. Rastegar, and B. L. Pruitt, Review: Semiconductor Piezoresistance for Microsystems, in *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 3, pp. 513-552, 2009.

[7] O. Kanoun, C. Müller, A. Benchirouf, A. Sanli, C. Gerlach, and A. Bouhamed, Carbon Nanotube Polymer Composites for High Performance Strain Sensors, *2015 1st Workshop on Nanotechnology in Instrumentation and Measurement (NANOFIM)*, Lecce, Italy, pp. 1-4, 2015.

[8] M. Quirion, and G. Ballivy, Concrete Strain Monitoring with Fabry-Pérot Fiber-Optic Sensor, *Journal of Materials in Civil Engineering* , vol. 12, 2000.

[9] S. Yao, J. S. Lee, K'. James, J. Miller, V. Narasimhan, A. J. Dickerson, X. Zhu, and Y. Zhu, Silver nanowire strain sensors for wearable body motion tracking, *2015 IEEE SENSORS*, Busan, Korea (South), pp. 1-4, 2015.

[10] C. Li, A. H. Feng, X. J. Gu, and D. L. Chen, Localized Cyclic Strain Measurements of Friction Stir Welded Aluminum Alloy Using a Flat-Clad Optical Fiber Sensor Array, in *IEEE Sensors Journal*, vol. 10, no. 4, pp. 888-892, 2010.

[11] A. A. S. Mohammed, W. A. Moussa, and E. Lou, High Sensitivity MEMS Strain Sensor: Design and Simulation, *Sensors*, vol. 8. pp. 2642-2661, 2008.

[12] M. W. Chan, D. R. Myers, B. D. Sosnowchik, L. Lin, and A. P. Pisano, Localized strain sensing using high spatial resolution, highly-sensitive MEMS resonant strain gauges for failure prevention, *2011 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*, Beijing, China, pp. 2859-2862, 2011.

[13] A. A. S. Mohammed, W. A. Moussa, and E. Lou, Development and Experimental Evaluation of a Novel Piezoresistive MEMS Strain Sensor, in *IEEE Sensors Journal*, vol. 11, no. 10, pp. 2220-2232, 2011.

[14] L. Cao, and T. Kim, S. Mantell, and D. L. Polla, Simulation and fabrication of piezoresistive membrane type MEMS strain sensors, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 80, pp. 273-279, 2000.

[15] M. O. Kayed, A. A. Balbola, E. Lou, and W. A Moussa, Development of MEMS-based piezoresistive 3D stress/strain sensor using strain technology and smart temperature compensation, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 31, no. 3, pp. 035010, 2021.

[16] C. C. Nguyen, Phân Tích Và Mô Phỏng Cấu Trúc Micro-Beam Cho Cảm Biến Biến Dạng MEMS Dạng Áp Điện Trở Nhằm Dùng Trong Hệ Thống Giám Sát Sức Khỏe Kết Cấu, *Journal of Science and Technology – IUH*, vol. 75, no. 3, pp. 100-109, 2025.

[17] T. K. L. Duong, C. C. Nguyen, A Design Analysis of a Micro-Beam Silicon Piezo-Resistive MEMS Strain Gauge in Structural Health Monitoring Systems (SHMS), *In: Nguyen, DN., Tran, N.D.K., Huynh, V.T., Ono, T., Nguyen, V.H., Pandey, A.K. (eds) Microactuators, Microsensors and Micromechanisms. MAMM 2024. Mechanisms and Machine Science*, Springer, Cham, vol. 177, pp. 124-132, 2025.

[18] COMSOL 6.3, COMSOL Multiphysics, 2024.

[19] Y. Kanda, Piezoresistance effect of silicon, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 28, no. 2, pp. 83-91, 1991.

[20] C. S. Smith, Macroscopic Symmetry and Properties of Crystals, *Solid State Physics*, vol. 6, pp. 175-249, 1958.

[21] C. S. Smith, Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon, *Physical Review*, vol. 94, pp. 42-49, 1954.

[22] W. G. Pfann, and R. N. Thurston, Semiconducting Stress Transducers Utilizing the Transverse and Shear Piezoresistance Effects, *Journal of Applied Physics*, vol. 32, pp. 2008–2019, 1961.

[23] M. A. Hopcroft, W. D. Nix, T. W. Kenny, What is the Young's Modulus of Silicon?, *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 19, no. 2, pp. 229-238, 2010.

A DESIGN AND SIMULATION FOR THIN BEAM STRUCTURE FOR HIGH SENSITIVITY MEMS PIEZERESISTIVE STRAIN SENSORS

NGUYEN CHI CUONG

Faculty of Electrical Engineering Technology, Industrial University of Ho Chi Minh City

Corresponding author: nguyenchicuong@iuh.edu.vn

Abstract. A strain gauge is a device that measures stress or strain of a material structure such as a bridge, road, railway, skyscraper, or aircraft. In this study, a structure of a thin beam for a sensor in a microelectromechanical system (MEMS) is designed to amplify the strain on the beam. A piezoresistive element on the beam of a silicon substrate is designed to detect the change in material strain. The gauge factor (*GF*) is used to evaluate the sensitivity of a strain sensor. A structure of a thin silicon beam was designed and analyzed by the finite element method (FEM). Finally, high *GF* of the MEMS piezoresistive strain sensor can be achieved in the range of 200 to 500.

Keywords. Strain sensor, MEMS, beam, piezoresistive effect, strain, sensitivity.

Ngày gửi bài: 05/11/2025
Ngày chấp nhận đăng:19/01/2026