

PHÂN TÍCH VÀ MÔ PHỎNG CẤU TRÚC MICRO-BEAM CHO CẢM BIẾN BIẾN DẠNG MEMS DẠNG ÁP ĐIỆN TRỞ NHẪM DÙNG TRONG HỆ THỐNG GIÁM SÁT SỨC KHỎE KẾT CẤU

NGUYỄN CHÍ CƯỜNG¹

¹ Khoa Công Nghệ Điện, Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh;

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

DOIs : <https://www.doi.org/10.46242/jstiuh.v75i3.5198>

Tóm tắt. Ứng suất (stress) là một trong những thông số chính để theo dõi tình trạng của kết cấu hạ tầng như cầu đường, tòa nhà, đường ray tàu cao tốc trong hệ thống giám sát sức khỏe kết cấu (SHMS). Cảm biến biến dạng của hệ thống vi cơ điện tử (MEMS) thường được dùng cho các ứng dụng nâng cao do kích thước cảm biến nhỏ, mức tiêu thụ điện năng thấp và độ nhạy cao. Cấu trúc cảm biến biến dạng thường được làm bằng một lớp mỏng kim loại, hợp kim và vật liệu bán dẫn như silicon. Trong nghiên cứu này, cấu trúc mới của thanh micro-beam được mô phỏng để đo ứng suất (stress) và biến dạng (strain) bởi phương pháp phần tử hữu hạn (FEM). Hiệu ứng áp điện trở của vật liệu bán dẫn như silicon được sử dụng để đo ứng suất và biến dạng với độ nhạy cao. Kết quả cho thấy ứng suất tăng lên đến 35.92% khi có cấu trúc thanh micro-beam bởi vì ứng suất được khuếch đại chỉ theo một phương duy nhất trong khi ứng suất theo phương còn lại gần bằng không.

Từ khóa. Hệ vi cơ điện tử MEMS, cảm biến biến dạng, micro-beam, silicon, hiệu ứng áp trở.

1 GIỚI THIỆU

Ứng suất (stress) là một trong những đại lượng quan trọng nhất để theo dõi tình trạng sức khỏe của cơ sở hạ tầng trong hệ thống giám sát sức khỏe kết cấu (Structural Health Monitoring Systems, SHMS) [1, 2]. Để đo ứng suất, tính chất áp trở của vật liệu điện để đo biến dạng được sử dụng trong nghiên cứu này [3]. Thông thường, những cảm biến đo biến dạng thông thường được chế tạo bởi lớp kim loại rất mỏng như đồng, vàng [4, 5, 6]. Tuy nhiên, những cảm biến đo biến dạng với cấu trúc lá kim loại mỏng thường có độ nhạy thấp, phụ thuộc lớn vào nhiệt độ và mức tiêu thụ điện năng cao.

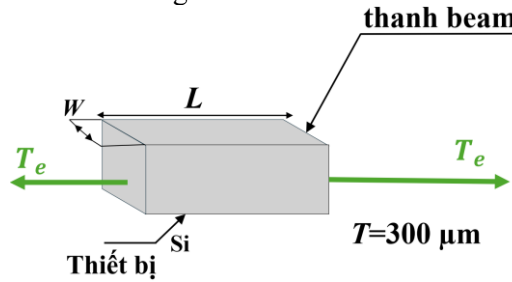
Để cải thiện hiệu suất cảm biến, cảm biến đo biến dạng của Hệ thống vi cơ điện tử (Micro-Electro-Mechanical-Systems, MEMS) có thể được chế tạo bằng vật liệu bán dẫn như silicon dựa trên công nghệ MEMS [7, 8]. Ưu điểm chính của cảm biến MEMS là độ nhiễu thấp, chi phí chế tạo thấp và mạch điện đơn giản [9, 10]. Thông thường, cảm biến đo biến dạng MEMS phải được sử dụng để tính toán cường độ và hướng của ứng suất và biến dạng vật liệu. Ngoài ra, để cảm biến đo biến dạng MEMS có độ nhạy cao thì các vùng tập trung ứng suất cần được tạo ra lên cấu trúc vật liệu cảm biến. Dựa trên ý tưởng đó, Hautamaki và cộng sự [11] cũng đã đề xuất một số thiết kế cho cảm biến biến dạng áp điện trở MEMS hiệu suất cao với ba cấu trúc khác nhau như sợi mỏng (thin monofilament), thanh dầm (cantilever beam) và thanh dầm cong (curved beam). Tất cả các cấu trúc cảm biến đều sử dụng một phần tử áp điện để phản ứng với tải trọng căng theo một trục duy nhất và phát hiện các hướng biến dạng khi thiết bị bị biến dạng. Tiếp theo, Cao và cộng sự [12] đã giới thiệu cấu trúc màng mỏng (membrane) dùng để khuếch đại biến dạng trong tám bán dẫn. Ngoài ra, Caseiro và cộng sự [13] thiết kế cấu trúc cảm biến áp điện trở được thiết kế và chế tạo bằng công nghệ MEMS với cấu trúc rãnh biến dạng hình thang nhỏ đến kích thước micro bằng cách ăn mòn (reaction ion etching-RIE) của hai rãnh hình thang trên bề mặt đế silicon của cảm biến để đo lường mô men và lực uốn lên cấu trúc vật liệu. Biến dạng có thể được khuếch đại lên nhiều lần và đạt biến dạng cực đại là 225 $\mu\epsilon$. Mohammed và cộng sự [14, 15] đã đề xuất hiệu suất tốt hơn của cảm biến đo biến dạng với việc tạo ra các đặc điểm bề mặt như rãnh (trench) được khắc trong vùng lân cận của các phần tử cảm biến để tạo ra các vùng tập trung ứng suất. Gần đây, Mohammed [16] đã đề xuất một cấu trúc đa điện trở dạng hình tròn và đường thẳng để đo ứng suất/biến dạng có độ nhạy cao nhằm phát triển cảm biến ứng suất/biến dạng 3D dựa trên công nghệ MEMS có bù nhiệt độ. Do đó, độ nhạy ứng suất và biến dạng của các cảm biến MEMS được cải thiện đáng kể. Tuy nhiên, cấu trúc mới thanh micro-beam có thể đo được ứng suất biến dạng tập trung theo một phương duy nhất của cảm biến đo biến dạng MEMS chưa được thiết kế và phân tích.

Trong nghiên cứu này, cấu trúc mới của thanh micro-beam cho cảm biến đo biến dạng MEMS được đề xuất và mô phỏng. Cấu trúc mới của thanh micro-beam được khắc trên tấm bán dẫn silicon để khuếch đại ứng suất biến dạng trên tấm bán dẫn nhằm cải thiện độ nhạy của cảm biến đo biến dạng MEMS bằng cách tạo ra các vùng tập trung ứng suất của cảm biến đo biến dạng MEMS theo một hướng duy nhất. Do đó, cấu trúc mới thanh micro-beam có thể được áp dụng để thiết kế cảm biến đo biến dạng MEMS dạng áp trở với nhạy cao hơn nhằm phát hiện một hướng duy nhất trên kết cấu vật liệu.

2 PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

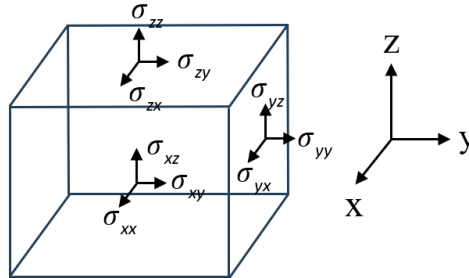
2.1 Cơ sở lý thuyết cho hệ thống phân tích cơ học của vật liệu cảm biến

Trong phân tích lý thuyết này, vấn đề về cảm biến đo biến dạng có thể được đơn giản hóa để hiểu nền tảng lý thuyết và xác định các thông số cơ học quan trọng của cảm biến. Để đạt được bước này, hình học đơn giản của thanh micro-beam được xem xét trong Hình 1 như sau:



Hình 1: Hình học đơn giản của thanh micro-beam cho cảm biến đo biến dạng.

Giả sử thanh micro-beam trong Hình 1 được tác dụng bởi lực phân bố đều (T_e) và song song với mặt phẳng giữa, phù hợp với bài toán ứng suất phẳng trong phân tích cơ học cơ bản [17]. Ngoại lực tác dụng lên vật liệu rắn hoặc một phần tử khối vô cùng nhỏ của vật liệu đàn hồi tuyến tính gây ra ứng suất bên trong vật liệu như được mô tả trên Hình 2.



Hình 2: Thành phần ứng suất trong phần tử khối nhỏ của vật liệu.

Giả định quan hệ tuyến tính giữa ứng suất và biến dạng, dạng tổng quát của định luật Hook được đưa ra:

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

trong đó $\hat{E} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$. Ở đây, E và ν lần lượt là mô đun Young và tỷ lệ Poisson của vật liệu. Hơn

nữa, nếu giả sử $\sigma_{xz} = \sigma_{yz} = \sigma_{zz} = 0$ (ứng suất trong mặt phẳng xy), khi đó công thức (1) trở thành:

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

Lấy nghịch đảo của công thức (2) sẽ cho biến dạng như sau:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ 2\varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & 0 \\ -\nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Các công thức cân bằng trong mặt phẳng xy được cho như sau:

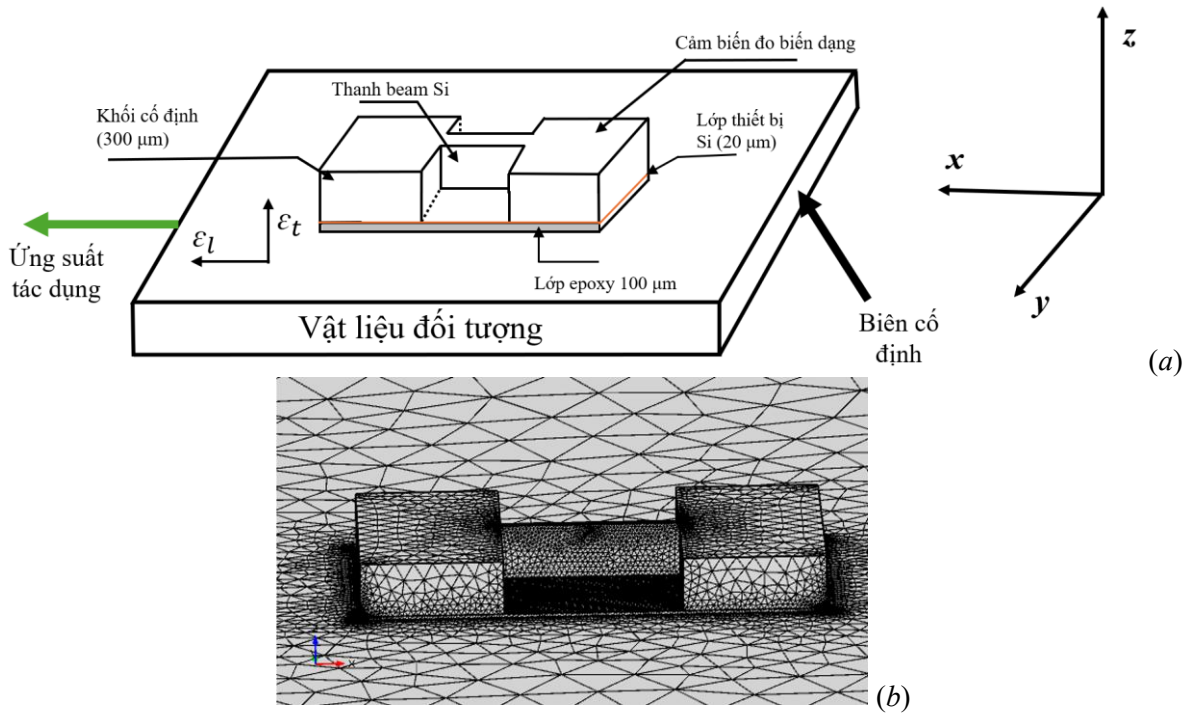
$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + f_x = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + f_y = 0 \quad (5)$$

trong đó f_x và f_y lần lượt là các thành phần lực của vật rắn dọc theo hướng x và y .

Để giải bài toán cấu trúc phức tạp 3D của cảm biến đo biến dạng MEMS, cần phải sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (Finite Element Methods, FEM) để mô phỏng cấu trúc 3D đề xuất của cảm biến đo biến dạng MEMS với lực tác dụng và các điều kiện biên áp dụng lên kết cấu vật liệu. Sau khi giải, phân bố ứng suất và biến dạng của cấu trúc cảm biến được tính toán và phân tích.

2.2 Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM)



Hình 3: (a) Cấu trúc 3D thanh micro-beam của cảm biến, (b) Cài đặt lưới của cảm biến đo biến dạng MEMS được mô phỏng trong COMSOL Multiphysics [18].

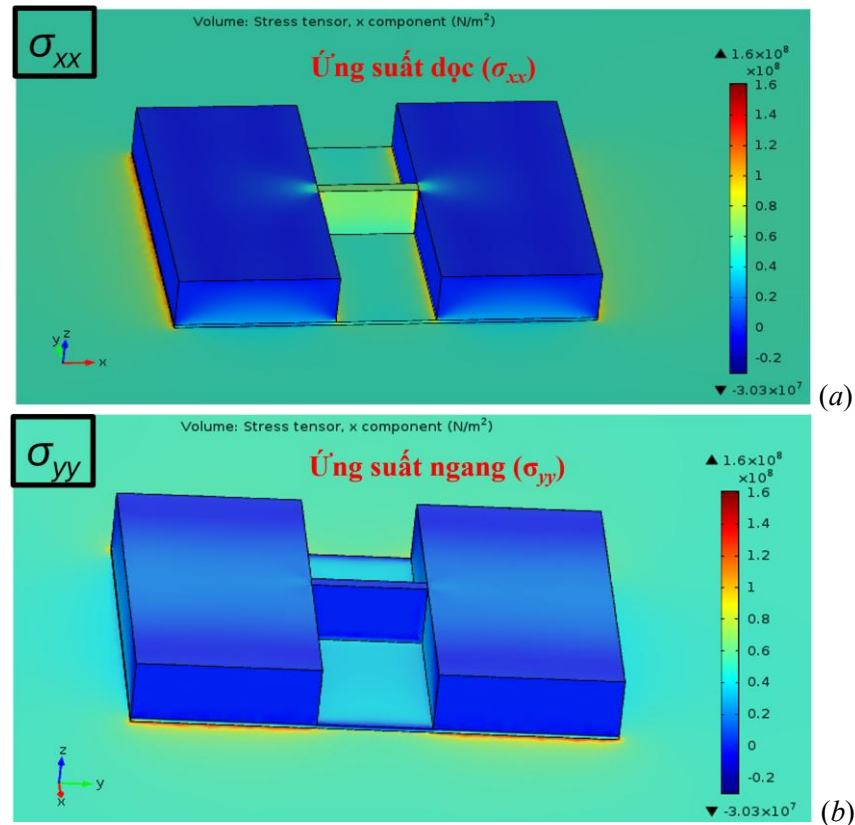
Trong mô phỏng này, chúng tôi đề xuất cấu trúc 3D thanh micro-beam của cảm biến đo biến dạng MEMS được dán trên vật liệu đối tượng có lực tác dụng ở một biên như trong Hình 3(a). Cấu trúc thanh micro-beam silicon (Si) được thiết kế cố định giữa 2 hai khối lớn. Cuối cùng, cấu trúc của cảm biến đo biến dạng MEMS (Si) được dán vào vật liệu đối tượng cần đo. Các điều kiện biên được thiết lập lên vật liệu đối tượng với tải tác dụng (T_e) một bên và điều kiện biên cố định bên còn lại. Trong Hình 3(b), lưới tam giác với số phần tử là 94.851 với mật độ cao để thiết lập cho toàn bộ cấu trúc của cảm biến để đảm bảo tính chính xác trong mô phỏng 3D của cảm biến đo biến dạng MEMS. Sau đó, cấu trúc này là được giải quyết và mô phỏng bằng Mô đun MEMS của phần mềm COMSOL Multiphysics [18]. Sau khi giải, phân bố ứng suất và biến dạng của cảm biến đo biến dạng MEMS theo hướng x (ϵ_l) hoặc y (ϵ_t) được tính toán và phân tích.

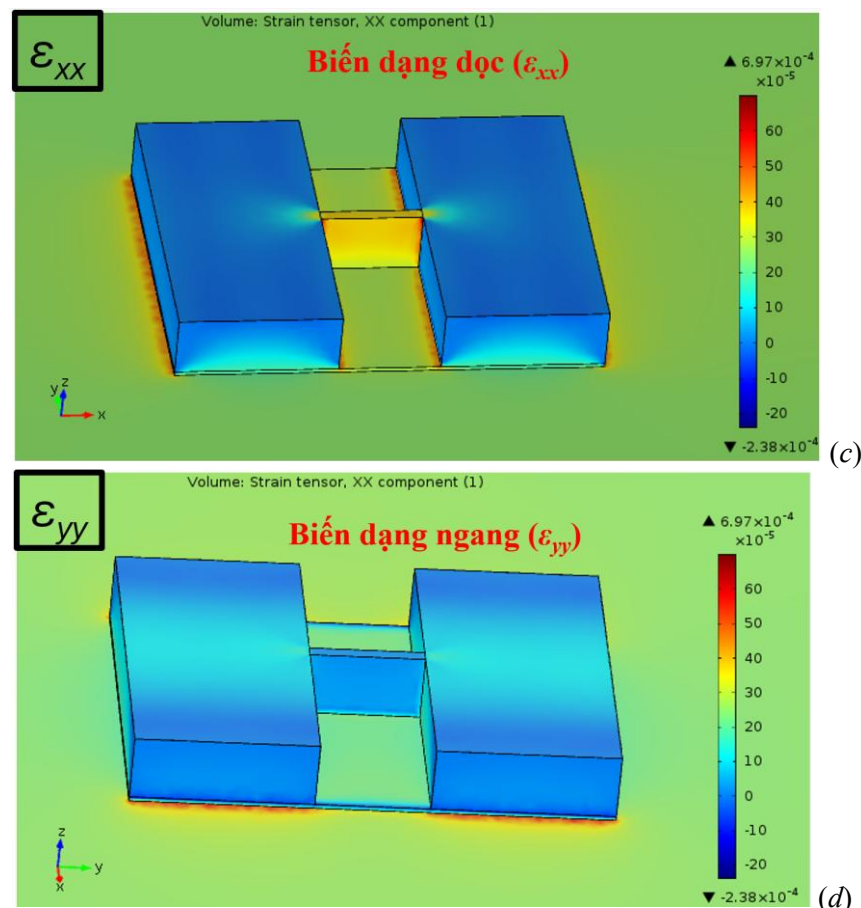
Bảng 1: Các điều kiện hình học và hoạt động của cảm biến đo biến dạng MEMS.

Mô tả	Kí hiệu	Giá trị
Chiều dài thanh micro-beam	L_{beam}	500 μm
Chiều rộng thanh micro-beam	W_{beam}	60 μm
Bề dày thanh micro-beam	T_{beam}	300 μm
Tải tác dụng	T_e	50 MPa
Mô đun Young (100) của Si	E_{Si}	130 GPa
Hệ số Poisson (100) của Si	ν_{Si}	0.28
Mật độ vật liệu (100) của Si	ρ_{Si}	2330 kg/m^3
Mô đun Young của vật liệu đối tượng	E_{object}	200 GPa
Hệ số Poisson của vật liệu đối tượng	ν_{object}	0.3
Mật độ vật liệu của vật liệu đối tượng	ρ_{object}	7800 kg/m^3

3 KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1 Phân bố ứng suất và độ biến dạng của cảm biến đo biến dạng MEMS





Hình 4: (a) Ứng suất phân bố theo chiều dọc (σ_{xx}), (b) ứng suất phân bố ngang (σ_{yy}), (c) biến dạng phân bố theo chiều dọc (ϵ_{xx}), và (d) biến dạng phân bố ngang (ϵ_{yy}) của cảm biến đo biến dạng MEMS được mô phỏng bằng phương pháp phân tử hữu hạn (FEM).

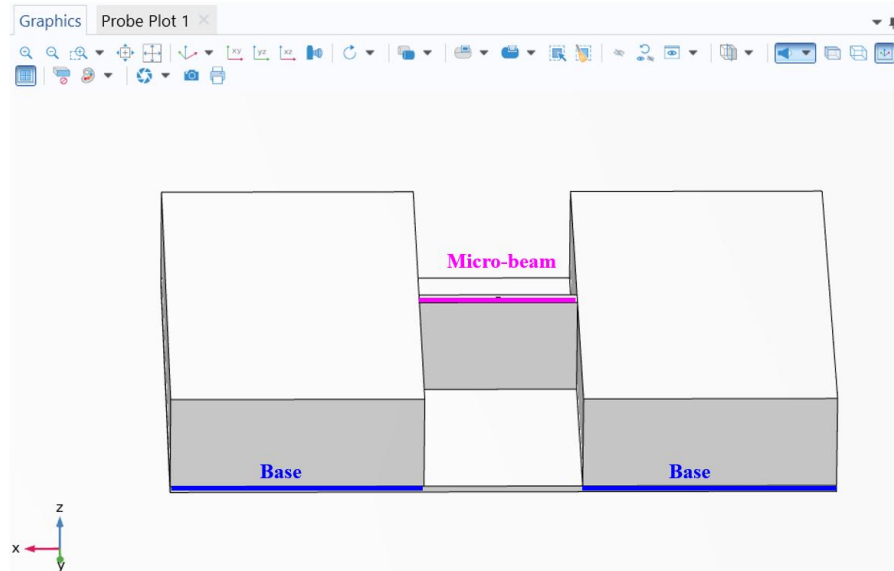
Kết quả trong Hình 4, ứng suất dọc (σ_{xx}) và ứng suất ngang (σ_{yy}) và biến dạng dọc (ϵ_{xx}) và biến dạng ngang (ϵ_{yy}) của cảm biến biến dạng MEMS được mô phỏng theo hướng x và y một cách tương ứng. Các điều kiện hình học và hoạt động cơ bản của cảm biến được liệt kê trong Bảng 1 và được sử dụng cho phân tích FEM này. Kết quả cho thấy ứng suất dọc (σ_{xx}) như trong Hình 4(a) và biến dạng dọc (ϵ_{xx}) như trong Hình 4(c) tăng lên đáng kể dọc theo thanh biến dạng micro-beam so với các vùng khác. Trong khi, phân bố ứng suất ngang (σ_{yy}) trong Hình 4(b) và biến dạng ngang (ϵ_{yy}) trong Hình 4(d) gần như không thay đổi dọc theo thanh micro-beam. Như vậy, ứng suất dọc (σ_{xx}) và biến dạng dọc (ϵ_{xx}) của thanh micro-beam biến dạng được khuếch đại đáng kể theo một phương dọc duy nhất theo hướng x , trong khi phân bố ứng suất ngang (σ_{yy}) và độ biến dạng ngang (ϵ_{yy}) của thanh hầu như không thay đổi trong toàn bộ cấu trúc của cảm biến đo biến dạng MEMS.

Trong Bảng 2, kết quả của biến dạng dọc (ϵ_{xx}) và biến dạng ngang (ϵ_{yy}) được so sánh với số liệu đã công bố của một số bài báo trong phần giới thiệu. Kết quả cho thấy độ biến dạng dọc (ϵ_{xx}) của cấu trúc thanh micro-beam bằng vật liệu silicon cao hơn so với của thanh kim loại mỏng [4, 5], cấu trúc rãnh [14, 15] và cấu trúc rãnh hình thang [13]. Trong khi đó, độ biến dạng ngang (ϵ_{yy}) của bài báo này đạt được gần bằng không. Do đó, cấu trúc mới dạng micro-beam của cảm biến MEMS có thể được sử dụng để phát hiện ứng suất hoặc biến dạng trên vật liệu chỉ theo một phương duy nhất có độ nhạy cao.

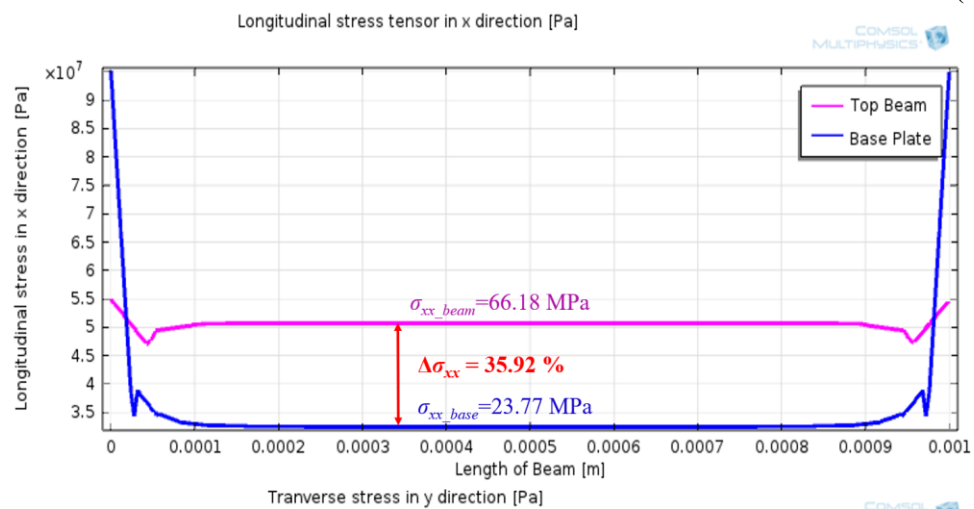
Bảng 2: Biến dạng của một số loại cảm biến biến dạng kim loại, hợp kim, và bán dẫn.

Tác giả	Phân loại cảm biến	Vật liệu cấu trúc cảm biến	Biến dạng cực đại
Rajanna và Mohan [4, 5]	Kim loại	Đồng, vàng: thanh mỏng	$\epsilon_{xx} \cong 230 (\mu\epsilon)$ $\epsilon_{yy} \cong 400 (\mu\epsilon)$

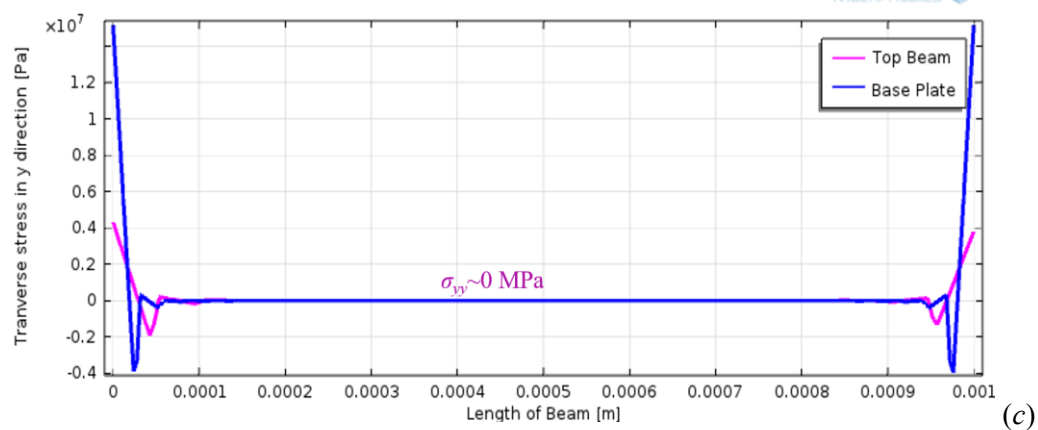
Mohammed và cộng sự [14, 15]	Chất bán dẫn	Silicon: cấu trúc rãnh	$\varepsilon_{xx} \cong 240 (\mu\epsilon)$
Caseiro D và cộng sự [13]	Chất bán dẫn	Silicon: rãnh dạng hình thang	$\varepsilon_{xx} \cong 225 (\mu\epsilon)$
Bài báo này	Chất bán dẫn	<i>n</i> -silicon: micro-beam	$\varepsilon_{xx} \cong 459 (\mu\epsilon)$ $\varepsilon_{yy} \cong 0 (\mu\epsilon)$



(a)



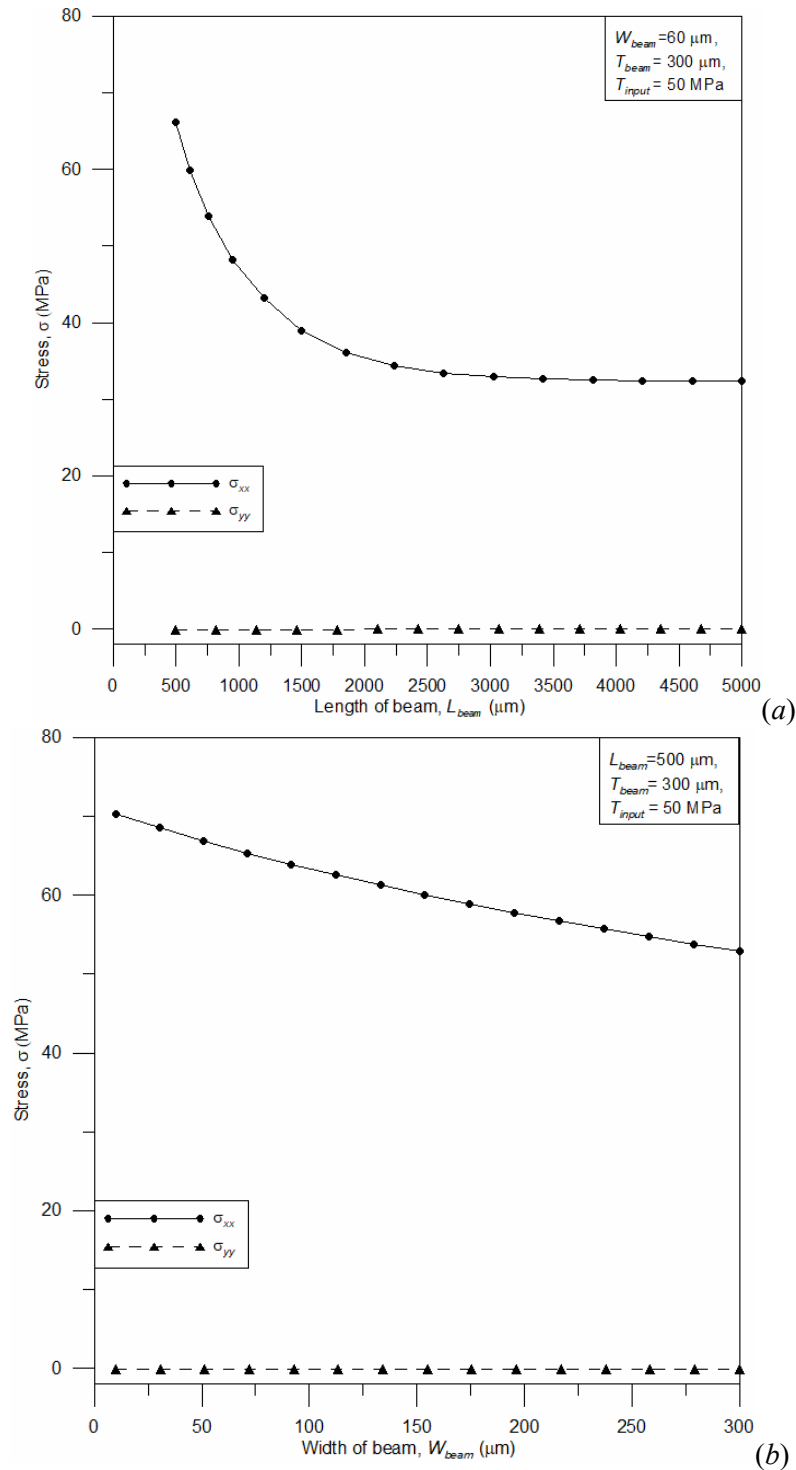
(b)



(c)

Hình 5: (a) Vị trí phân tích ứng suất, (b) ứng suất dọc (σ_{xx}), (c) ứng suất ngang (σ_{yy}) tại micro-beam và khối block của cảm biến biến dạng MEMS.

Trong Hình 5(a), ứng suất dọc (σ_{xx}) và ứng suất ngang (σ_{yy}) được tính toán ở vị trí dọc theo thanh micro-beam và tấm đế của cảm biến đo biến dạng MEMS. Kết quả cho thấy ứng suất đạt được hầu như phân bố đồng đều dọc theo thanh micro-beam và tấm đế. Các giá trị ứng suất dọc của thanh micro-beam ($\sigma_{xx_beam} = 66.18$ MPa) và tấm đế ($\sigma_{xx_block} = 23.77$ MPa) như trong Hình 5(b). Ứng suất của thanh trên thanh micro-beam lớn hơn ứng suất trên tấm đế 35.92 %. Vì vậy, ứng suất (σ_{xx}) dọc theo thanh micro-beam được khuếch đại lên 35.92 % khi lực tác dụng lên vật liệu. Trong Hình 5(c), phân bố ứng suất ngang (σ_{yy}) thu được hầu như bằng không dọc theo thanh micro-beam. Do đó, ứng suất dọc (σ_{xx}) dọc theo thanh micro-beam được khuếch đại theo hướng x , trong khi ứng suất ngang (σ_{yy}) gần như bằng 0 theo hướng y khi lực tác dụng lên vật liệu đối tượng. Do đó, kết quả thu được có thể được áp dụng để thiết kế cảm biến biến dạng MEMS có độ nhạy cao hơn để phát hiện ứng suất biến dạng sinh ra trên vật liệu chỉ theo một hướng duy nhất.



Hình 6: Ứng suất dọc (σ_{xx}) và ứng suất ngang (σ_{yy}) được tính theo: (a) chiều dài (L_{beam}), (b) chiều rộng (W_{beam}) của thanh biến dạng micro-beam.

Trong Hình 6, kết quả cho thấy ứng suất dọc (σ_{xx}) của thanh micro-beam tăng đáng kể khi chiều dài thanh micro-beam (L_{beam}) giảm như trong Hình 6(a). Ngoài ra, giá trị của ứng suất dọc (σ_{xx}) tăng khi chiều rộng thanh beam (W_{beam}) giảm như trên Hình 6(b). Hơn nữa, kết quả còn cho thấy ứng suất ngang (σ_{yy}) hầu như không thay đổi và bằng không trong khoảng rộng chiều dài và chiều rộng của thanh micro-beam. Vì thế, cấu trúc mới micro-beam này của cảm biến đo biến dạng MEMS có thể được sử dụng để thiết kế cảm biến đo biến dạng với độ nhạy cao hơn nhằm phát hiện ứng suất và biến dạng sinh ra trên vật liệu đối tượng trên một phương duy nhất.

4 KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, cấu trúc mới dạng micro-beam của cảm biến đo biến dạng MEMS được phân tích và mô phỏng bằng phần mềm COMSOL Multiphysics với cấu trúc mới thanh micro-beam được tạo ra bằng cách ăn mòn tấm silicon để khuếch đại ứng suất và độ biến dạng sinh ra trên cấu trúc cảm biến. Sau đó, ứng suất và biến dạng dọc và ngang của cảm biến đo biến dạng MEMS được tính toán theo hướng x, y một cách tương ứng. Một số kết quả đáng chú ý được tìm thấy như sau:

1) Ứng suất dọc của thanh micro-beam tăng lên đáng kể, trong khi ứng suất ngang hầu như không thay đổi trong toàn bộ cấu trúc của cảm biến. Do đó, cấu trúc micro-beam mới này của cảm biến đo biến dạng MEMS dựa trên thanh micro-beam có thể đo ứng suất hoặc biến dạng trên vật liệu theo một hướng duy nhất.

2) Ứng suất dọc của thanh micro-beam tăng khi chiều dài và chiều rộng của thanh micro-beam giảm. Từ đó, cấu trúc thanh micro-beam có thể được sử dụng để thiết kế cảm biến đo biến dạng MEMS có độ nhạy cao.

LỜI CẢM ƠN

Tác giả xin chân thành cảm ơn đến Khoa Công Nghệ Điện, trường Đại Học Công Nghiệp TP. HCM đã làm ra kết quả của nghiên cứu này. Xin gởi lời cảm ơn Đại Học Công nghiệp TP. HCM đã cấp kinh phí cho tác giả thực hiện bài báo này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] V. G. M. Annamdas, S. Bhalla, and C. K. Soh, Applications of structural health monitoring technology in Asia, *Structural Health Monitoring*, vol. 16, no. 3, pp. 324-346, 2016.
- [2] P. Alivia, *Structural Health Monitoring MEMS Sensors Using Elasticity-Based Beam Vibrations*, Department of Civil and Environmental Engineering, For the Degree of Master of Science Colorado State University Fort Collins, Colorado, 2012.
- [3] W. P. Mason, and R. N. Thurston, Use of Piezoresistive materials in measuring displacement, force, and torque, *the Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 29, no. 10, pp. 1096-1101, 1957.
- [4] K. Rajanna, and S. Mohan, Studies on meandering path thin film strain gage, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 15, no. 3, pp. 297-303, 1988.
- [5] K. Rajanna, and S. Mohan, Longitudinal and transverse strain sensitivity of gold film, *Journal of Materials Science Letters*, vol. 6, pp. 1027-1029, 1987.
- [6] M. Hrovat, J. Holc, and Z. Samardzija, The influence of firing temperature on gauge factors and the electrical and microstructural characteristics of thick-film resistors, *Journal of Materials Science Letters*, vol. 20, pp. 701-705, 2001.
- [7] P. J. French, and A. G. R. Evans, Polycrystalline silicon strain sensors, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 8, no. 3, pp. 219-225, 1985.
- [8] A. A. S. Mohammed, W. A. Moussa, and E. Lou, Mechanical Strain Measurements Using Semiconductor Piezoresistive Material, in *Proc. Int. Conf. on MEMS, NANO and Smart Systems*, 2006, pp. 5-6.
- [9] J. Fraden, *Handbook of modern sensor: physics, designs, and applications*, AIP Press- Springer: New York, 1996.
- [10] J. Rausch, P. Heinickel, R. Werthschuetzky, B. Koegel, K. Zogal, and P. Meissner, Experimental comparison of piezoresistive MEMS and fiber Bragg grating strain sensors, in *Proc. Int. Conf. on IEEE Sensors*, 2009, pp. 1329-1333.

- [11] C. Hautamaki, S. Zurn, S. C. Mantell, and D. L. Polla, Experimental evaluation of MEMS strain sensors embedded in composites, *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 8, no. 3, pp. 272-279, 1999.
- [12] L. Cao, T. S. Kim, S. C. Mantell, S. C. Mantell, and D. L. Polla, Simulation and fabrication of piezoresistive membrane type MEMS strain sensors, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 80, no.3, pp. 273-279, 2000.
- [13] D. Caseiro, S. Santos, C. Ferreira, and C. Neves, Experimental evaluation of MEMS strain sensors embedded in composites, *Procedia Engineering*, vol. 87, no. 3, pp. 1362-1365, 2014.
- [14] A. A. S. Mohammed, W. A. Moussa, and E. Lou, High Sensitivity MEMS Strain Sensor: Design and Simulation, *Sensors*, vol. 8, no. 4, pp. 2642-2661, 2008.
- [15] A. A. S. Mohammed, W. A. Moussa, and E. Lou, Development and Experimental Evaluation of a Novel Piezoresistive MEMS Strain Sensor, *IEEE Sensors Journal*, vol. 11, no. 10, pp. 2220-2232, 2011.
- [16] O. K. Mohammed, A. B. Amr, L. Edmond, and A. M. Walied, 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.
- [17] M. Bao, *Analysis and Design Principles of MEMS Devices*, Elsevier, 2005.
- [18] COMSOL Multiphysics. Available: <https://www.comsol.com/>

SIMULATION AND ANALYSIS OF MICRO-BEAM STRUCTURE FOR PIEZO-RESISTIVE MEMS STRAIN SENSORS TO APPLY IN STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEMS

NGUYEN CHI CUONG

Dept. of Electrical Engineering Technology, Industrial University of Ho Chi Minh City

Corresponding author: nguyenchicuong@iuh.edu.vn

Abstract. Stress is one of the main parameters to monitor the condition of the infrastructure such as bridges, roads, buildings, and high-speed train rails in the structural health monitoring system (SHMS). Microelectromechanical systems (MEMS) piezo-resistive strain sensors are often used for advanced applications due to their small sensor size, low power consumption, and high sensitivity. Typically, the strain sensor structure is made of a thin layer of metals, alloys, and semiconductor materials such as silicon. In this study, the new structure of the micro-beam is simulated to measure stress and strain by the Finite Element Method (FEM). The piezoresistive effect of semiconductor materials such as silicon is used to measure stress and strain with high sensitivity. Finally, the results show that the stress increases up to 35.92% with the micro-beam structure because the stress is amplified in only one direction while the other stresses in the other directions are close to zero.

Keywords. MEMS, strain sensor, micro-beam, silicon, piezo-resistivity.

Ngày nhận bài: 30/10/2024

Ngày nhận đăng: 29/4/2025