

## VỀ MỘT CẤU TRÚC MỚI CỦA CẢM BIẾN GIA TỐC ÁP ĐIỆN TRỞ BA BẬC TỰ DO NHẪM NÂNG CAO ĐỘ NHẠY

Trần Đức Tân

Trường Đại học Công Nghệ, ĐHQGHN

(Bài nhận ngày 25 tháng 01 năm 2010, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 17 tháng 05 năm 2010)

**TÓM TẮT:** Hiện nay công nghệ Vi cơ điện tử và Vi hệ thống (MEMS) đã có những bước phát triển vượt bậc. Cảm biến gia tốc là một trong những loại cảm biến MEMS thông dụng nhất bởi được sử dụng trong rất nhiều các ứng dụng khác nhau. Để chế tạo thành công một linh kiện MEMS thì quy trình thiết kế mô phỏng là rất quan trọng. Bài báo này trình bày về một thiết kế mới của cảm biến gia tốc ba bậc tự do kiểu áp trở nhằm nâng cao độ nhạy, độ phân giải - một yêu cầu luôn bức thiết của thực tế. Phần mềm ANSYS đã được sử dụng để thiết kế, mô phỏng và đánh giá được những ưu điểm của cấu trúc mới này so với các cảm biến được chế tạo trước đó.

**Từ khóa:** công nghệ Vi cơ điện tử, Vi hệ thống, cảm biến MEMS, Phần mềm ANSYS

### 1. GIỚI THIỆU

Các cảm biến gia tốc được chế tạo dựa trên công nghệ vi cơ điện tử và vi hệ thống đã và đang thâm nhập một cách mạnh mẽ trong hầu hết các lĩnh vực như y sinh [1, 2], công nghiệp ô tô, điện tử dân dụng, khoa học không gian... Hiện nay, về cơ bản có ba loại cảm biến gia tốc, đó là cảm biến gia tốc kiểu tụ [3, 4], áp điện và áp điện trở. Nhìn chung, cả ba loại cảm biến này đều có các ưu và nhược điểm riêng nhưng cảm biến gia tốc kiểu áp trở là thông dụng nhất bởi các ưu điểm vượt trội như độ nhạy cao, giá thành rẻ, mạch xử lý tín hiệu đơn giản [5] ... Với các ứng dụng ngày càng trở nên tinh tế như định vị và dẫn đường cho các vật thể bay thì yêu cầu về cảm biến gia tốc độ nhạy cao, kích thước nhỏ đang được đặt ra.

Hiện nay, việc thiết kế chế tạo các cảm biến gia tốc nhiều bậc tự do đã đạt được những thành công nhất định [5, 6]. Tuy nhiên, một yêu cầu thực tiễn luôn đòi hỏi đó là phải luôn tìm tòi ra các nguyên lý mới, cấu trúc mới có thể nâng cao phẩm chất của các cảm biến gia tốc này. Một yêu cầu nữa với các cảm biến gia tốc đó là kích thước phải nhỏ và đo được gia tốc theo nhiều chiều. Bài báo này trình bày về một cấu trúc cảm biến mới đáp ứng được các tiêu chí nói trên. Việc chế tạo cảm biến được đang được tiến hành và các kết quả đo chuẩn sẽ khẳng định rõ ràng hơn ưu điểm của các thiết kế này [10]. Cảm biến có kích thước nhỏ cỡ  $1.0 \times 1.0 \times 0.45 \text{ mm}^3$ , chế tạo dựa trên cơ sở công nghệ vi cơ khối sử dụng phiên SOI, hướng tới các ứng dụng đo gia tốc của các khối dẫn đường quán tính.

### 2. NGUYÊN TẮC HOẠT ĐỘNG

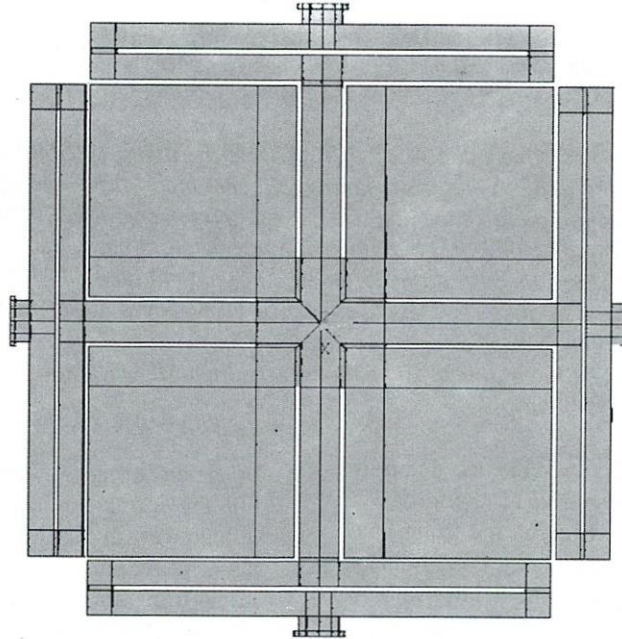
Hiện tượng thay đổi điện trở của vật liệu tinh thể dưới tác dụng của ứng suất cơ được gọi là hiệu ứng áp điện trở [6, 7]. Nguyên nhân đó là đặc tính dị hướng của độ phân giải mức năng lượng trong không gian tinh thể. Trong silic chỉ tồn tại ba hệ số áp điện trở không phụ thuộc vào nhau là  $\pi_{11}$  (liên hệ dọc),  $\pi_{12}$  (liên hệ ngang) và  $\pi_{44}$  (cho liên hệ trượt). Đối với silic đơn tinh thể có mặt độ tạp dẫn thấp thì có thể coi những hệ số áp điện trở  $\pi_{11}$ ,  $\pi_{12}$  và  $\pi_{44}$  là các hằng số. Người ta ứng dụng vật liệu biến dạng cơ là màng mỏng hay cấu trúc thanh dầm. Để đạt được độ dãn ngang (chiều dài và chiều rộng) lớn thì cần chiều dày nhỏ và do vậy có thể bỏ qua ứng suất dọc. Lúc này, phần tử áp điện trở được cấy trên vật biến dạng cơ và mạch điện xử lý bên ngoài được thiết kế một cách thích ứng.

Trong các cảm biến gia tốc áp điện trở thì độ dịch chuyển của khối gia trọng sẽ làm thanh dầm biến dạng. Điện trở được cấy trên các thanh dầm sẽ biến đổi tỷ lệ thuận với gia tốc tác dụng lên khối gia trọng. Các cảm biến loại này thường được chế tạo theo công nghệ vi cơ khối 2 mặt. Cấu trúc thanh dầm và khối gia trọng sẽ được tạo hình bằng ăn mòn nhiều bước. Việc cấy tạp chất nồng độ cao sẽ tạo ra áp điện trở trên cấu trúc thanh dầm treo vật nặng.

Yêu cầu khắc khe đối với các cảm biến gia tốc ba bậc tự do là độ tuyến tính lớn và ảnh hưởng giữa các mode hoạt động (hay còn gọi là độ nhạy pháp tuyến) phải nhỏ. Mặt khác, cảm

biến phải đáp ứng được yêu cầu về độ nhạy cao theo các hướng cần đo. Để thoả mãn các tiêu chí trên, trong công trình này một cấu trúc có

kích thước là  $0.9 \times 0.9 \times 0.5 \text{ mm}^3$  (Hình 1) bao gồm một khối gia trọng được treo bởi hệ thống dầm đặc biệt đã được đề xuất.



Hình 1. Cấu hình cảm biến gia tốc 3 chiều

Ví dụ khi cảm biến chịu tác dụng của gia tốc tịnh tiến theo phương Z thì khối gia trọng sẽ chuyển động lên hoặc xuống. Độ lệch của thanh dầm khi chịu tác dụng của gia tốc sẽ gây nên ứng suất tuyến tính.

Các áp điện trở trong thiết kế là các áp điện trở loại p được cấy trên bề mặt của các thanh dầm, có điện trở thay đổi khi sức căng xuất hiện do gia tốc tịnh tiến hoặc gia tốc quay. Sự thay đổi điện trở sẽ được biến đổi thành tín hiệu điện nhờ sử dụng mạch điện xử lý bên ngoài là các mạch cầu Wheaston. Trong thiết kế này, 8 áp điện trở loại p được cấy trên 4 thanh dầm theo các hướng tinh thể  $\langle 110 \rangle$  và  $\langle 1\bar{1}0 \rangle$  của silic (100) nhờ quá trình khuếch tán.

Bảng 1. Thông số hình học của cảm biến

Thông số	Kích thước
Khe hở không khí	$5 \mu\text{m}$
Dầm bên trong	$455 \times 40 \times 3 \mu\text{m}^3$
Dầm bên ngoài	$25 \times 3 \mu\text{m}^2 (W \times T)$
Bề rộng khung ngoài	$150 \mu\text{m}$
Kích thước chip	$0.9 \times 0.9 \times 0.5 \text{ mm}^3$

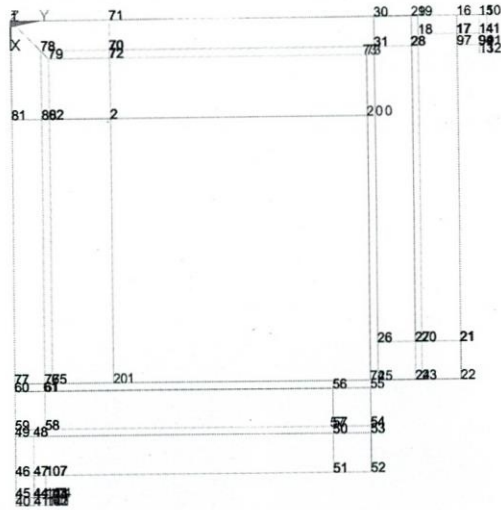
### 3. THIẾT KẾ VÀ MÔ PHỎNG

Các thông số hình học của cảm biến gia tốc sẽ quyết định tới hai thông số quan trọng là độ nhạy cơ học và tần số dao động tự nhiên. Hiện tại, có hai phương pháp chính để thiết kế và mô phỏng các cảm biến vi cơ điện tử là phương pháp phần tử nút (SUGAR) và phương pháp phần tử hữu hạn (ANSYS). Trong bài báo này, chúng tôi thực hiện mô phỏng bằng chương trình ANSYS [8] thông qua hình thức lập trình.

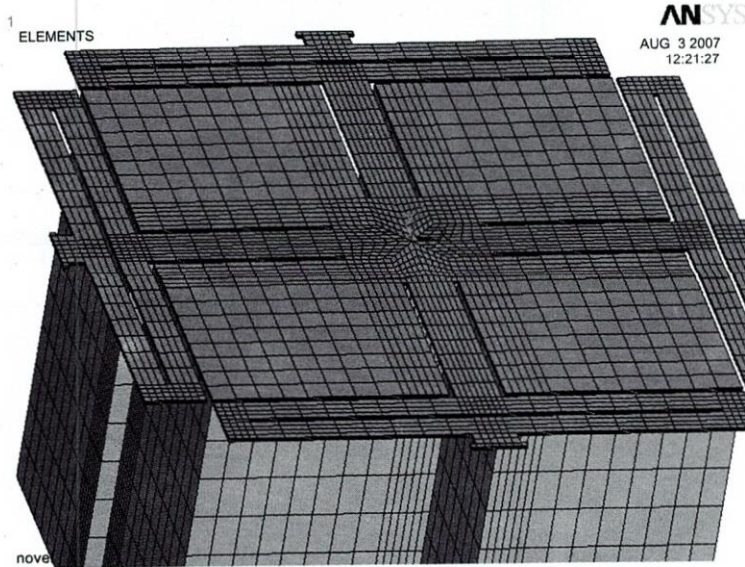
Để xây dựng được một cấu trúc cảm biến, người thiết kế có thể sử dụng tận dụng các phần mềm hỗ trợ vẽ 3 chiều (3D CAD) rồi đưa vào ANSYS để phân tích. Tuy nhiên, để có thể hoàn toàn làm chủ được bài toán thì phương án tốt nhất là xây dựng cấu trúc cảm biến ngay từ trong ANSYS. Để đảm bảo độ chính xác của mô phỏng thì việc xây dựng cấu trúc cũng là một quy trình rất tinh tế. Để nhận thấy là cấu trúc cảm biến là đối xứng nên chúng ta có thể xây dựng toàn bộ cấu trúc từ  $\frac{1}{4}$  thành phần (Hình 2). Việc chia nhỏ như Hình 2 là công việc cần thiết cho quy trình chia lưới sau này. Mô hình phần tử hữu hạn (FEM) của cảm biến được chia lưới dày đặc (Hình 3) trên các thanh

đảm nhằm xác định chính xác phân bố ứng suất trên các thanh dầm. Điều này có ý nghĩa rất lớn vì sẽ quyết định tới vị trí cấy các áp điện trở sao cho tín hiệu đưa ra là lớn nhất. Một lưu ý

cũng rất quan trọng nữa là vị trí cấy các áp điện trở phải đảm bảo cho các gia tốc pháp tuyến là nhỏ nhất.



Hình 2. Xây dựng cấu trúc từ 1/4 thành phần



Hình 3. Chia lưới 3 chiều kiểu phần tử vuông

Có nhiều phương pháp để xác định các mode dao động và trong thiết kế này, người thiết kế sử dụng thuật toán Block\_Lanczos. Các tần số cộng hưởng của 3 mode dao động theo các trục X, Y và Z được liệt kê trong Bảng 2.

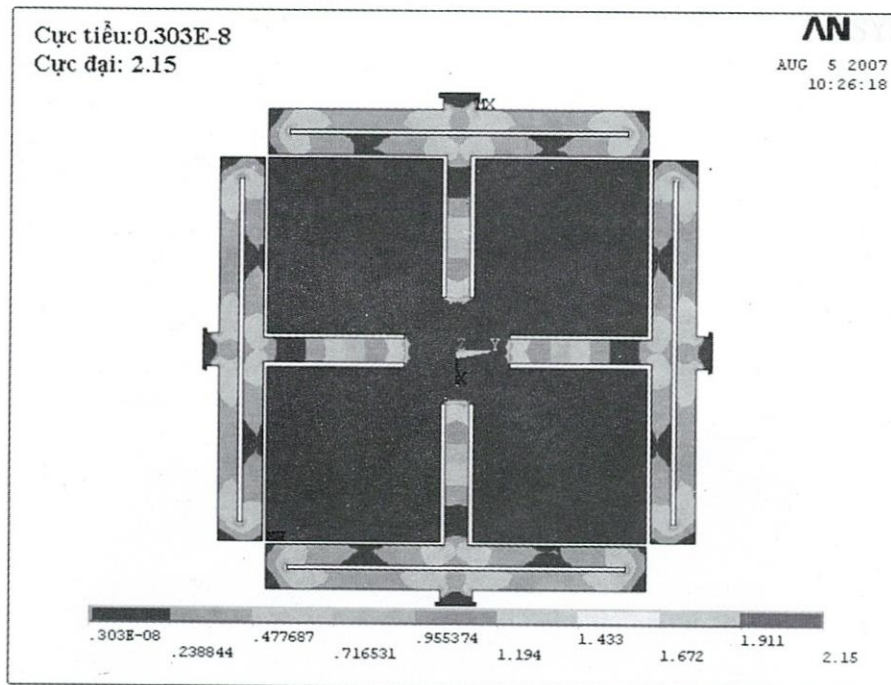
Bảng 2. Các mode hoạt động của cảm biến

Mode	Tần số (Hz)
1 (trục X)	1205
2 (trục Y)	1203
3 (trục Z)	1705

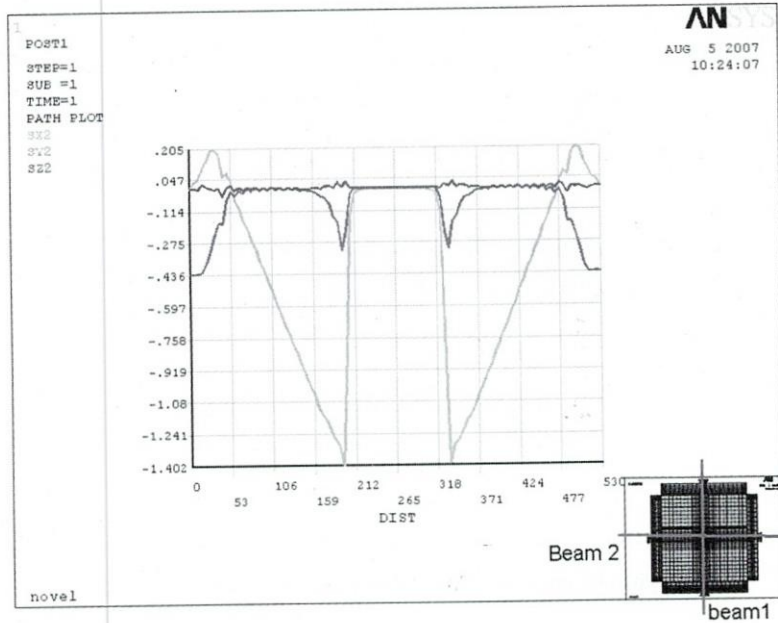
Hình 4 là phân bố ứng suất trên các thanh dầm khi chịu tác dụng bởi gia tốc AZ và Hình 5 là kết quả chi tiết phân bố ứng suất dọc theo thanh dầm thứ 1. Kết quả tương tự cũng thu được khi phân tích ứng suất trên thanh dầm 2. Nhận xét rằng ứng suất dọc theo thanh dầm đóng vai trò quyết định so với các ứng suất pháp tuyến và ứng suất trượt. Từ kết quả như trong Hình 4 đã trình bày, nhận thấy rằng các

ứng suất  $\sigma_2$  và  $\sigma_3$  là rất nhỏ so với  $\sigma_1$ . Hiện tượng này có gây ảnh hưởng đôi chút tới độ nhạy của cảm biến. Cụ thể là cần tránh đặt các áp điện trở quá gần 2 đầu của thanh dầm. Vì thế, độ thay đổi tương đối của điện trở có thể được tính như sau [9]:

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_{11} \sigma_1 \quad (1)$$

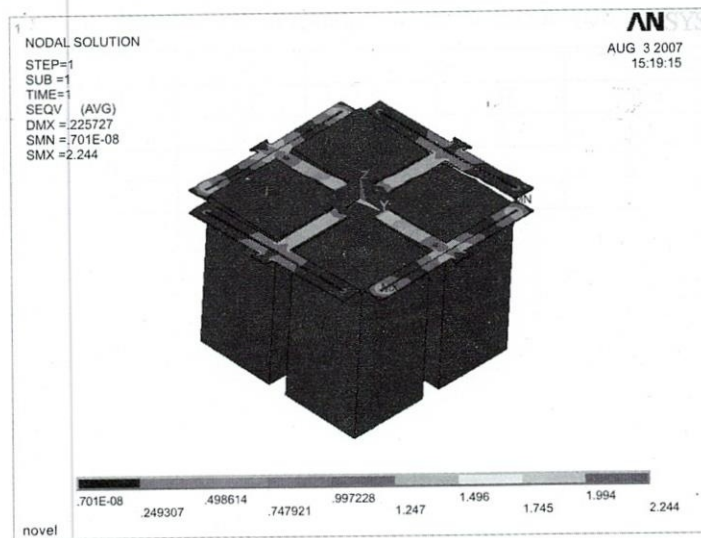


Hình 4. Phân bố ứng suất trên các thanh dầm khi tác dụng gia tốc AZ

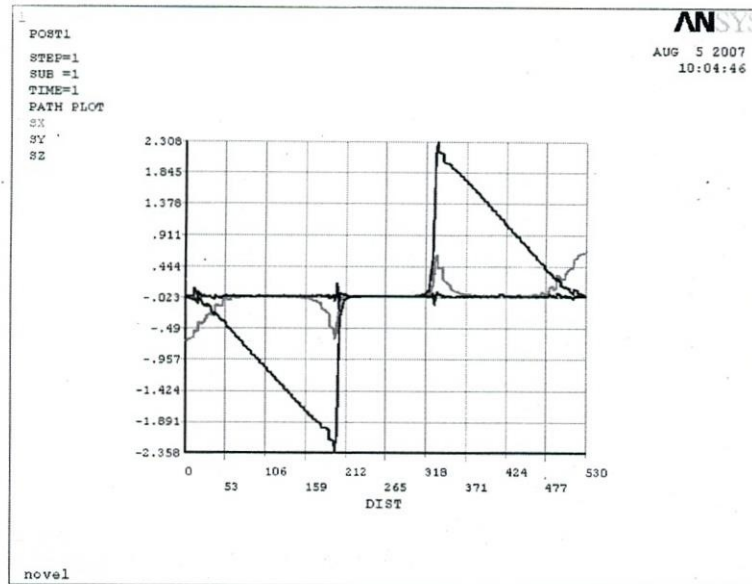


Hình 5. Phân bố ứng suất trên các thanh dầm thứ 2 khi tác dụng gia tốc AZ

Thực hiện việc tác động gia tốc AY vào cấu trúc cũng thu được ứng suất trên các thanh dầm như trong hình 6 và kết quả phân bố ứng suất chi tiết dọc thanh dầm 1 trên Hình 7 (nơi phân bố ứng suất là lớn nhất). Quy trình tương tự cho thành phần gia tốc AX.



Hình 6. Phân bố ứng suất trên các thanh dầm khi tác dụng gia tốc AY



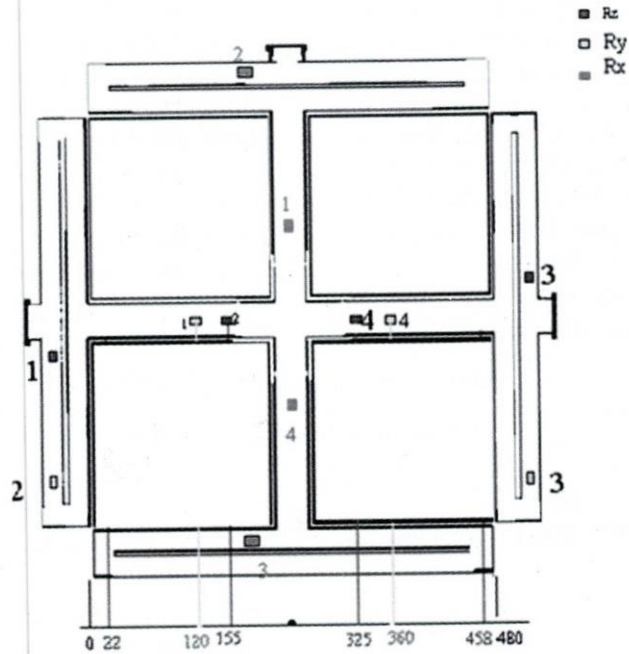
Hình 7. Phân bố ứng suất trên các thanh dầm thứ 1 khi tác dụng gia tốc AY

Sau khi xác định được phân bố ứng suất trên các thanh dầm, điều quan trọng tiếp theo đó là xác định vị trí đặt các áp điện trở sao cho khuếch đại tối đa tín hiệu mong muốn, đảm bảo tính đối xứng của mạch cầu và giảm thiểu tín

hiệu gia tốc pháp tuyến. Có thể xây dựng bảng thay đổi trở kháng ứng với các trường hợp các gia tốc tác dụng (xem Bảng 2). Kết quả từ bảng này được sử dụng trực tiếp cho tính toán vị trí đặt 8 áp điện trở trên 4 thanh dầm (Hình 8).

Bảng 3. Sự thay đổi giá trị của các áp điện trở khi tác dụng các gia tốc

	Ax		Ay		Az			
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>
Ax	-	+	0	0	0	-	0	+
Ay	0	0	-	+	0	0	0	0
Az	-	-	-	-	-	+	-	+



Hình 8. Đặt vị trí các áp điện trở

Các mạch cầu Wheaston được sử dụng để xác định sự thay đổi trở kháng của các áp điện trở trên các cảm biến. Hai mươi áp điện trở được nối với nhau để tạo thành sáu mạch cầu trên bốn thanh dầm như mô tả trên Hình 8. Lưu ý là có hai loại mạch cầu khác nhau được sử dụng.  $R_{ref}$  ở đây là các điện trở cố định có giá trị bằng giá trị của các áp điện trở khi chưa chịu gia tốc tác dụng. Khi cảm biến hoạt động trong điều kiện lý tưởng, điện thế đầu ra bằng 0 và người ta gọi là cầu cân bằng. Khi ứng suất thay đổi, mạch cầu trở nên mất cân bằng và gây ra điện thế xác định ở lối ra. Các điện thế này

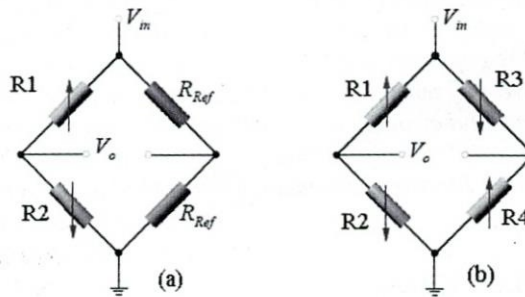
được xác định như sau, với mạch cầu loại (a) thì:

$$V = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R1}{R1} - \frac{\Delta R2}{R2} \right) V_0 \quad (2)$$

Ở đây  $V_0$  là điện thế đầu vào,  $V$  là điện thế đầu ra,  $\Delta R_i$  và  $R_i$  ( $i=1,2$ ) là sự thay đổi giá trị điện trở và giá trị điện trở mắc trên mạch cầu.

Còn với mạch cầu loại (b) thì:

$$V = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R1}{R1} - \frac{\Delta R2}{R2} - \frac{\Delta R3}{R3} + \frac{\Delta R4}{R4} \right) V_0 \quad (3)$$



Hình 8. Hai loại mạch cầu Wheaston được sử dụng

Hình 7 là cách sắp xếp cụ thể các áp điện trở trên các thanh dầm ở các vị trí tối ưu nhất. Từ đó, xây dựng Bảng tính 3 cho phép xác định chính xác các đầu ra ứng với mỗi trường hợp gia tốc tịnh tiến hoặc gia tốc quay tác động vào cảm biến. Nhận xét rằng với cách bố trí tối ưu như vậy, các đầu ra có thể khuếch đại tối đa tín hiệu mong muốn và giảm triệt để các gia tốc pháp tuyến tác động lên cảm biến.

Việc đánh giá chất lượng của cảm biến được thực hiện với các điều kiện khi chế tạo

như sau: các áp điện trở có kích thước  $20 \times 1.5 \times 0.4 \mu\text{m}^3$ , hệ số áp điện trở theo chiều dọc  $43 \times 10^{-5} \text{MPa}^{-1}$  điện trở  $6.6 \text{k}\Omega$  thì cảm biến theo phương Z sẽ có độ nhạy  $0.4 \text{mV/V/g}$  và độ phân giải  $0.5 \text{mg}$  ( $1 \text{g} = 9.8 \text{m/s}^2$ ).

Độ nhạy của cảm biến gia tốc 3 chiều được liệt kê trong Bảng 4. Các kết quả này khi so sánh với các kết quả trong [9, 10] với các điều kiện tương tự sẽ cho độ nhạy tốt hơn.

**Bảng 4.** Độ nhạy của cảm biến gia tốc

	Cấu hình đề xuất		Cấu hình đã chế tạo	
	Ax, Ay	Az	Ax, Ay	Az
<b>Độ nhạy</b>	0.28 mV/V/g	0.4 mV/V/g	30 $\mu\text{V/V/g}$	23 $\mu\text{V/V/g}$
<b>Độ phân giải</b>	0.72 mg	0.5 mg	0.03g	0.05g

#### 4. KẾT LUẬN

Bài báo đã thiết kế và mô phỏng thành công cảm biến gia tốc ba bậc tự do, kích thước nhỏ, độ nhạy cao. Hiệu ứng áp điện trở đã được ứng dụng để xác định các gia tốc tác động vào cảm biến. Ngôn ngữ lập trình ANSYS đóng vai

trò quyết định trong việc xây dựng cấu trúc cũng như vị trí cấy các áp điện trở. Dải hoạt động của cảm biến là  $\pm 5\text{g}$  và dải tần hoạt động là  $250 \text{Hz}$ . Bởi thế nên cảm biến sẽ rất thích hợp với các ứng dụng đặc biệt như dùng trong các khối đo dẫn đường quán tính.

### DEVELOPMENT OF A NEW STRUCTURE OF 3-DOF PIEZORESISTIVE ACCELEROMETER TO ENHANCE THE SENSITIVITY

Tran Duc Tan

Hanoi University of Engineering and Technology

**ABSTRACT:** Nowadays, the Micro Electro Mechanical System (MEMS) technology has been achieved great developments. Accelerometer is one kind of the most popular MEMS sensors due to its widely applications. In order to fabricate any MEMS device, the design and simulation have been considered seriously. This paper presents a new design of the three degrees of freedom piezoresistive accelerometer to improve the sensitivity, urgent demand from the reality. The ANSYS software was utilized to design, simulate and evaluate the advantages of this new structure compared to other sensors fabricated previously.

**Keywords:** the Micro Electro Mechanical System, ANSYS software, Accelerometer

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. J.C.Lotters, J.Schipper, P.H.Veltink, W.Olthuis, P.Bergveld, *Procedure for in-use calibration of triaxial accelerometers*

*in medical applications*, Sensors and Actuators A68, pp. 221-228, (1998).

[2]. L. C. Spangler, C.J. Kemp, *Integrated silicon automotive accelerometer*, Sens. Actuators, A54, pp. 523-529, (1996).



- [3]. Tran Duc Tan, Nguyen Thang Long, Nguyen Phu Thuy, *Mechanical and Electronic Design of Capacitive Accelerometers*, ICMT2005, Malaysia, (2005).
- [4]. F.Rudolf, A.Jornod, J.Bergqvist, H.Leuthold, *Precision accelerometer with  $\mu\text{g}$  resolution*, Sens. Actuator A21/A23, pp. 297-302, (1996).
- [5]. Dzung Viet Dao, Toshiyuki Toriyama, John Wells and Susumu Sugiyama, *Silicon Piezoresistive Six-Degree of Freedom Force-Moment Micro Sensor*, Sensors and Materials, Vol. 15, No.3, pp. 113-135, (2003).
- [6]. C.S.Smith, *Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon*, Physical Rev. Vol.94, No.1, pp.42-49, (1962).
- [7]. Tufte, E.L. Stelzer, *Piezoresistive properties of silicon diffused layers*, J. Appl. Phys., vol.34, No.2, pp.313-318, (1962).
- [8]. [www.mece.ualberta.ca/tutorials/ansys](http://www.mece.ualberta.ca/tutorials/ansys).
- [9]. Ranjith Amarasinghe, Dzung Viet Dao, Toshiyuki Toriyama and Susumu Sugiyama, *A Silicon Micromachined Six-Degree of Freedom Piezoresistive Accelerometer*, IEEE Sensors2004 The 3rd Int'l Conference on Sensors, Oct.24-27, (2004).
- [10]. Bui Thanh Tung, Dao Viet Dzung, Dau Thanh Van, Susumu Sugiyama, *Three Degree of Freedom Micro Accelerometer Depended on MEMS Technology: Fabrication and Application*, First International Workshop on Nanotechnology and Application IWNA, Vietnam, (2007).