

**THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO CẢM BIẾN GIA TỐC ÁP ĐIỆN TRỞ BA BẬC TỰ DO
KÍCH THƯỚC THU NHỎ TRÊN CƠ SỞ CÔNG NGHỆ VI CƠ KHỐI
ÁP DỤNG KỸ THUẬT ẮN MÒN KHÔ HOẠT HÓA SÂU (DRIE)
DESIGN AND FABRICATION OF MEMS MINATURIZED 3-DOF PIEZORESISTIVE
ACCELERATION SENSORS USING DEEP REACTIVE ION ETCHING TECHNOLOGY**

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 thiết kế và chế tạo cảm biến gia tốc ba bậc tự do kích thước thu nhỏ trên cơ sở công nghệ vi cơ khối. Cảm biến được thiết kế có kích thước ngoài là $1 \times 1 \times 0,45 \text{ mm}^3$. Phần tử nhạy cơ của cảm biến gồm khối gia trọng được treo trên bốn thanh dầm đối xứng có kích thước $340 \times 60 \times 10 \text{ }\mu\text{m}^3$ và được giữ cố định trên khung cứng bên ngoài sử dụng vật liệu silic. Các áp điện trở silic dạng bản mỏng có kích thước $3 \times 30 \text{ }\mu\text{m}^2$ được tạo trên các thanh dầm. Qui trình chế tạo cảm biến gia tốc được thực hiện trên cơ sở áp dụng công nghệ vi điện tử để tạo các áp điện trở loại p cũng như dây điện cực, và công nghệ vi chế tạo sử dụng kỹ thuật ắnn mòn khô ion hoạt hóa sâu (DRIE) để tạo cấu trúc cơ của cảm biến. Trong nghiên cứu của chúng tôi, quá trình ắnn mòn vật liệu Si được thực hiện theo phương pháp Bosch sử dụng hỗn hợp khí SF_6 và C_4F_8 . Cảm biến được chế tạo có thể xác định đồng thời ba thành phần gia tốc A_x , A_y và A_z trong dải tần số hoạt động 100 Hz. Độ nhạy theo các phương X (Y) và Z đạt giá trị tương ứng là $30,5 \text{ }\mu\text{V/g}$ và $22,9 \text{ }\mu\text{V/g}$.

ABSTRACT

This paper presents the design and the fabrication of a miniaturized three-degree-of-freedom piezoresistive acceleration sensor based on bulk MEMS technology. The outer dimension of designed sensor is $1 \times 1 \times 0,45 \text{ mm}^3$. The mechanical sensitive part includes a seismass suspended by four symmetrical thin beams which have the dimension of $340 \times 60 \times 10 \text{ }\mu\text{m}^3$. This structure is constrained by a silicon rigid frame. The thin film resistors have the dimension of $3 \times 30 \text{ }\mu\text{m}^2$. The sensor fabrication process consists of two stages dealing with IC compatible technology to form the diffused layer p-type silicon piezoresistors as well as electrical wiring, and with micromachining using deep reactive ion etching (DRIE) to make the sensor structure. In our study, the silicon etching process is performed by Bosch method using the gas mixture of SF_6 and C_4F_8 . The fabricated piezoresistive acceleration sensor can detect simultaneously three components of the linear acceleration at the frequency bandwidth 100 Hz. The net sensitivities for direction components X (Y) and Z without amplifier are $30.5 \text{ }\mu\text{V/g}$, and $22.9 \text{ }\mu\text{V/g}$, respectively.

Keywords: MEMS, accelerometer, Deep RIE

I. MỞ ĐẦU

Cảm biến gia tốc MEMS thuộc chủng loại cảm biến quán tính silic đang được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực kỹ thuật [1-3]. Lĩnh vực này đã được tích hợp trong bộ điều khiển túi khí an toàn cũng như hệ thống treo bằng cách lắp đặt phổ biến trong các ô-tô hiện đại và bộ điều khiển triệt tiêu ảnh hưởng rung chấn với các thiết bị điện tử như điện thoại di động và máy tính xách tay. Cảm biến gia tốc MEMS có những ưu điểm nổi trội như độ nhạy cao, kích thước nhỏ và nhẹ, vì thế, chúng còn được ứng dụng trong các lĩnh vực chế tạo các thiết bị y tế và người máy.

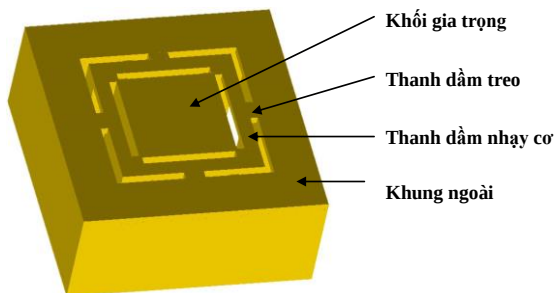
Nguyên lý biến đổi gia tốc tác động lên cảm biến thành tín hiệu điện thường dựa trên hiệu ứng áp điện trở với cấu hình cầu điện trở Wheatstone, và biến đổi điện dung [4, 5]. So với cảm biến gia tốc kiểu điện dung, cảm biến gia tốc kiểu áp điện trở có ưu điểm là trở kháng lối ra của cầu điện trở thấp nên dễ dàng nhận biết và đo đạc được tín hiệu.

Các cố gắng nhằm giảm thiểu kích thước cũng như nâng cao độ nhạy của cảm biến xác định gia tốc đa chiều đã cho phép tăng số lượng linh kiện trên một chip cũng như khả năng tích hợp cao.

Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu thiết kế qui trình và bộ MASK chế tạo cảm biến gia tốc kiểu áp trở ba bậc tự do có kích thước thu nhỏ với việc áp dụng một kỹ thuật tiên tiến, là ăn mòn khô hoạt hóa sâu (DRIE), để tạo cấu trúc ba chiều phức tạp của linh kiện. Các đặc trưng lỗi ra của cảm biến sau chế tạo đã được đo đạc và so sánh với các kết quả tính toán cho thấy cảm biến đã có những đáp ứng như mong đợi.

II. THIẾT KẾ CẢM BIẾN

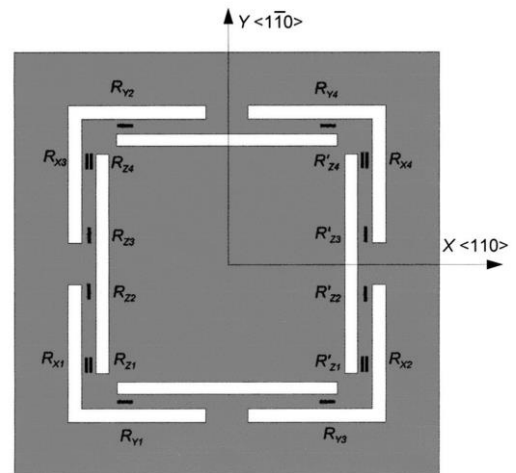
Yêu cầu đặt ra đối với thiết kế cảm biến gia tốc ba bậc tự do là cần có độ nhạy cao và hiệu ứng ảnh hưởng đan xen (cross-talk) của các thành phần gia tốc phải nhỏ. Để đáp ứng yêu cầu đó, chúng tôi đã đưa ra mô hình cấu trúc cảm biến gia tốc kiểu áp trở được trình bày như trên hình 1. Trong thiết kế, phần tử nhạy cơ sử dụng vật liệu silic bao gồm khối gia trọng được treo trên bốn thanh dầm đối xứng. Các thanh dầm này có kích thước $340 \times 60 \times 10 \mu\text{m}^3$ được giữ cố định trên khung cứng. Các áp điện trở silic dạng bản mỏng có kích thước $3 \times 30 \mu\text{m}^2$ được tạo trên các thanh dầm. Kích thước ngoài của cảm biến là $1 \times 1 \times 0,45 \text{ mm}^3$.



Hình 1. Mô hình cảm biến gia tốc

Khi đặt tải gia tốc lên cảm biến, cấu trúc thanh dầm bị biến dạng gây bởi thành phần gia tốc pháp tuyến (Az) tạo chuyển động thẳng đứng của khối gia trọng, thành phần gia tốc theo phương x (Ax) và theo phương y (Ay). Sự biến dạng gây bởi các thành phần gia tốc dẫn tới thay đổi ứng suất trên các thanh dầm. Sự thay đổi đó dẫn tới thay đổi giá trị điện trở của các áp điện trở. Tín hiệu cơ đó được chuyển đổi thành tín hiệu điện trên cơ sở mạch cầu Wheatstone kích thích không cân bằng. Các kết quả nghiên cứu mô phỏng cho thấy trong trường hợp cảm biến chịu tác dụng của thành phần gia tốc Ax và Ay, ứng suất dọc có giá trị

lớn trên các thanh dầm vuông góc với phương của các thành phần gia tốc đó. Trên cơ sở tính toán lý thuyết, một cấu hình hệ thống chuyển đổi tín hiệu cơ thành tín hiệu điện gồm ba cầu Wheatstone đã được thiết lập từ 16 áp điện trở loại p (hình 2). Hệ thống đó cho phép xác định ba thành phần gia tốc tịnh tiến một cách độc lập và hạn chế hiệu ứng tác động đan xen của các thành phần. Trong cấu hình trên, tám áp điện trở R-Az, bốn áp điện trở R-Ax và bốn áp điện trở R-Ey được phân bố trên bốn dầm treo. Các áp điện trở đó được chế tạo trên bề mặt của các thanh dầm theo hướng $[110]$ của phiến silic n-(100). Cấu hình bố trí áp điện trở này cũng cho phép giảm thiểu ảnh hưởng của nhiệt độ tới thông số vật lý của áp điện trở, giúp cải thiện đặc trưng lỗi ra của cảm biến.



Hình 2. Sơ đồ bố trí áp điện trở

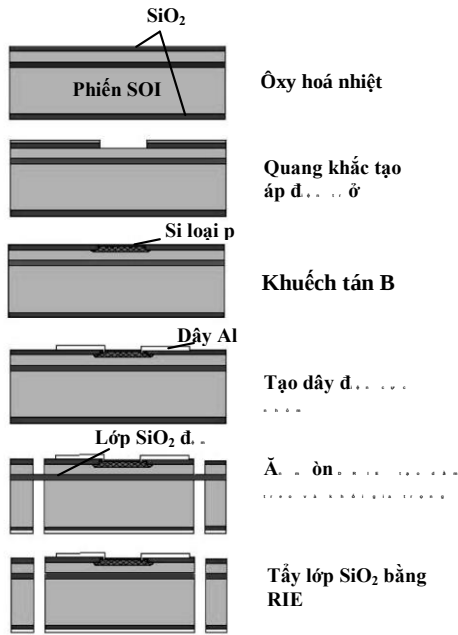
Bảng 1 trình bày quy luật tăng hoặc giảm giá trị điện trở của các áp điện trở khi đặt tải gia tốc lên cấu trúc cảm biến.

Bảng 1. Quy luật thay đổi điện trở của các áp điện trở khi đặt tải lên cảm biến

	R_{x1}	R_{x2}	R_{x3}	R_{x4}	R_{y1}	R_{y2}	R_{y3}	R_{y4}	$R_{z1}+R'_{z1}$	$R_{z2}+R'_{z2}$	$R_{z3}+R'_{z3}$	$R_{z4}+R'_{z4}$
A_x	+	-	+	-	-	+	+	-	+	-	-	+
A_y	+	-	-	+	+	+	-	+	0	0	0	0
A_z	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	+	-

III. CHẾ TẠO CẢM BIẾN

Cảm biến gia tốc kiểu áp trở đã được chế tạo trên cơ sở công nghệ MEMS gồm hai bước chính là công nghệ IC để tạo cấu trúc điện và công nghệ vi cơ khối để tạo cấu trúc cơ của linh kiện.

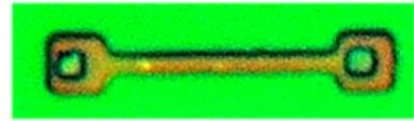


Hình 3. Sơ đồ quy trình chế tạo cảm biến gia tốc

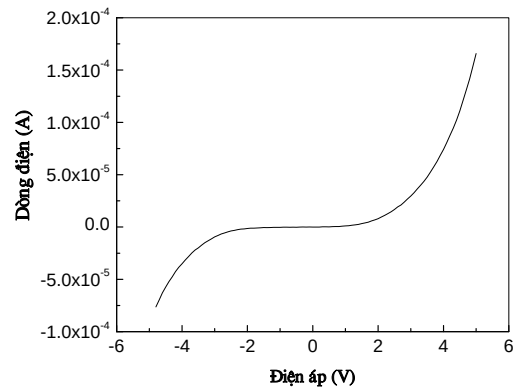
Trong nghiên cứu này, phiên silic Silicon-On-Insulator (SOI) đánh bóng hai mặt loại n-(100) có lớp ôxyt silic đệm ở giữa với bề dày 1 μm đã được sử dụng. Cấu trúc của loại phiên này tạo ra 2 lớp silic, một lớp có độ dày 10 μm được sử dụng để tạo cấu trúc các dầm nhạy cơ và lớp còn lại có độ dày 450 μm để tạo khung cứng cho linh kiện. Quy trình công nghệ chế tạo linh kiện này (hình 3) được bắt đầu với quá trình oxy hoá nhiệt để tạo lớp ôxyt silic (SiO_2) với bề dày cỡ 300 nm trên cả hai mặt của phiên SOI ở nhiệt độ 1100 $^\circ\text{C}$.

Kỹ thuật quang khắc được thực hiện ở bước tiếp theo để mở cửa sổ tạo định dạng các điện trở trên bề mặt phía có lớp Si mỏng của phiên SOI. Các điện trở có dạng hình chữ I, được định hướng theo phương tinh thể silic [110] và được chế tạo bằng kỹ thuật khuếch tán hai bước sử dụng dung dịch SOD boron (tạo ra silic loại p) làm nguồn khuếch tán. Theo đó, trước tiên là quá trình khuếch tán sơ bộ trong môi trường khí N_2 ở nhiệt độ 1050 $^\circ\text{C}$ trong 60 phút để tạo ra các điện trở loại p trên bề mặt mẫu. Sau đó là quá trình khuếch tán sâu (deep drive-in) nhằm đẩy tạp sâu vào để trong môi trường O_2 ở nhiệt độ 1050 $^\circ\text{C}$ trong 30 phút. Hình 4 là ảnh chụp áp điện trở sau bước thứ 3 của qui trình chế tạo. Các đường dẫn nhôm được tạo bằng kỹ thuật bốc bay trong chân

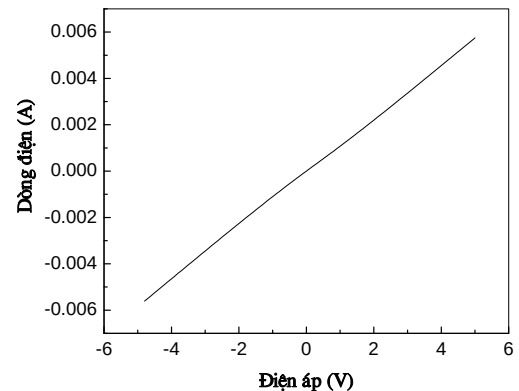
không và quang khắc ở bước 4, kết thúc quá trình tạo cấu trúc điện. Một qui trình xử lý nhiệt đã được thực hiện để có được tiếp xúc ohmic giữa nhôm và silic (hình 5). Bước 5 là qui trình tạo cấu trúc cơ cảm biến bao gồm các thanh dầm và khối gia trọng nhờ công nghệ ăn mòn khô hoạt hóa sâu (DRIE) trong môi trường plasma bằng thiết bị chuyên dụng SAMCO RIE-10iP dùng hỗn hợp khí ăn mòn $\text{SF}_6/\text{Ar}/\text{C}_4\text{F}_8$. Cuối cùng, lớp SiO_2 được tẩy bỏ cũng bằng qui trình ăn mòn khô RIE. Ảnh chụp một trong các cảm biến sau chế tạo được trình bày trên hình 6.



Hình 4. Ảnh chụp áp điện trở sau bước công nghệ 3

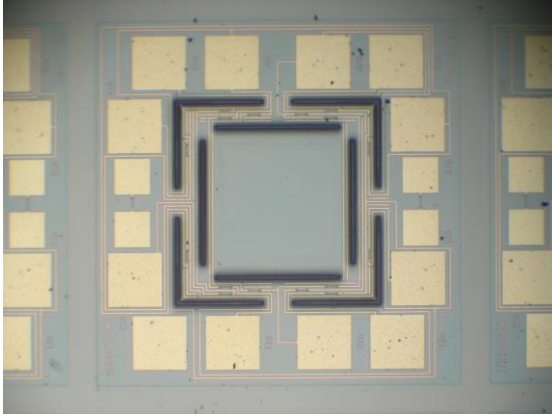


(a)



(b)

Hình 5. Đặc trưng I-V tại các áp điện trở với điện cực nhôm trước (a) và sau xử lý nhiệt (b)

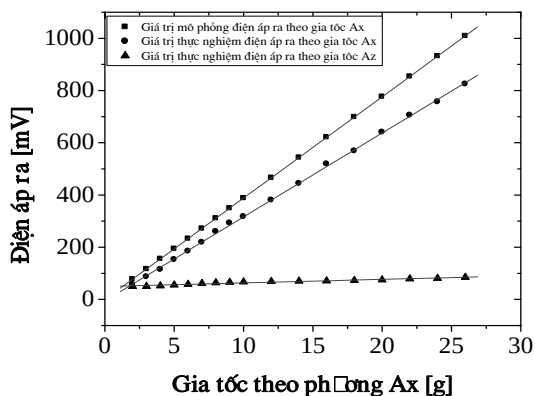


Hình 6. Ảnh chụp cảm biến gia tốc sau chế tạo

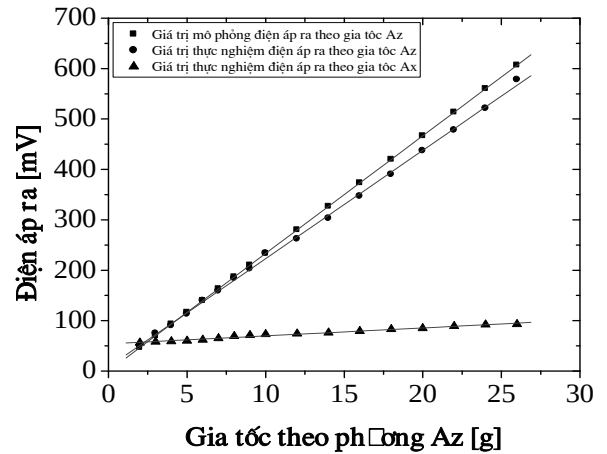
IV. CÁC ĐẶC TRƯNG CỦA CẢM BIẾN

Để đánh giá khả năng hoạt động của cảm biến, đặc trưng điện áp ra phụ thuộc vào gia tốc đã được khảo sát. Phương pháp đo đặc trưng động trên cơ sở thiết bị rung hoạt động ở tần số 50 Hz đã được sử dụng. Điện áp nguồn cung cấp cho cảm biến là 5 V.

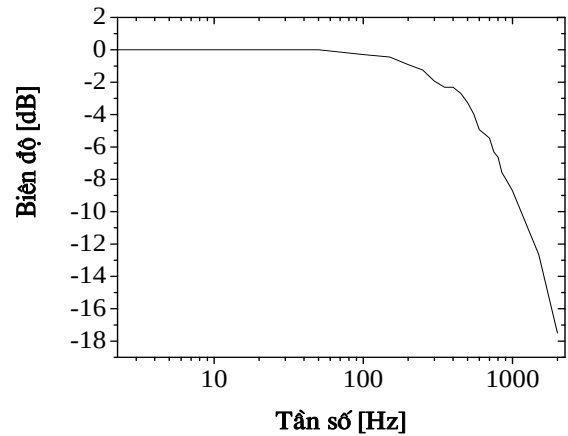
Kết quả thu được cho thấy điện áp ra của cảm biến phụ thuộc tuyến tính vào tải gia tốc Ax và Az trong dải giá trị từ 0 đến 30g (hình 7 và hình 8). Độ nhạy của cảm biến gia tốc đối với thành phần gia tốc Ax/Ay và Az đạt giá trị tương ứng là 30,5 $\mu\text{V/g}$ và 22,9 $\mu\text{V/g}$. Mặt khác, kết quả khảo sát cho thấy khi đo sự phụ thuộc của tín hiệu ra vào thành phần gia tốc theo phương x hoặc z, độ lớn tín hiệu đối với các thành phần vuông góc tương ứng z hoặc x là rất nhỏ. Điều này đã khẳng định ảnh hưởng hiệu ứng đan xen (cross-talk) của cảm biến là không đáng kể.



Hình 7. Sự phụ thuộc điện áp ra vào gia tốc tịnh tiến Ax

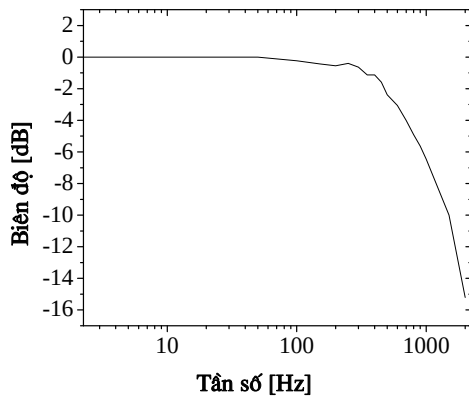


Hình 8. Sự phụ thuộc điện áp ra vào gia tốc tịnh tiến Az



Hình 9. Đặc trưng biên độ - tần số mode dao động ngang của cảm biến gia tốc

Đặc trưng tần số của cảm biến có vai trò rất quan trọng bởi nó cho phép xác định độ rộng dải tần làm việc của linh kiện. Đặc trưng tần số đối với các mode dao động ngang và dao động vuông góc được trình bày trên hình 9 và hình 10. Kết quả cho thấy độ rộng dải tần của cảm biến gia tốc chế tạo có giá trị cỡ 100 Hz. Biên độ giảm ở tần số cao có thể là do sự suy hao lớn gây bởi hiệu ứng trượt của lớp khí dọc bề mặt cảm biến.



Hình 10. Đặc trưng biên độ - tần số mode dao động vuông góc của cảm biến gia tốc

V. KẾT LUẬN

Cảm biến gia tốc MEMS kiểu áp trở ba bậc tự do đã được thiết kế và chế tạo thành công trên cơ sở công nghệ vi cơ khối sử dụng kỹ thuật ăn mòn khô DRIE. Cảm biến với kích thước thu nhỏ $1 \times 1 \times 0,45 \text{ mm}^3$ đạt độ nhạy cao và có thể xác định ba thành phần gia tốc tịnh tiến với hiệu ứng đàn xen thấp.

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), p. 1640.
2. W. J. Fleming; Overview of automotive sensors; Sensors Journal, IEEE, Vol. 1, Issue 4 (2001), p. 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. Sukanuma, M. Esashi; Three-axis capacitive accelerometer with uniform axial sensitivities; Transducer 95, Stockholm, Sweden (1995), p. 544-577.
5. S. Middelhoek; Micro mechanical transducers, Handbook of sensors and actuators; Vol. 8, edited by M. -H. Bao, Elsevier, 2000.

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