

# CẢM BIẾN GIA TỐC MEMS KIỂU TỤ: SO SÁNH KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THỰC NGHIỆM

ThS. Trần Đức Tân\*, GS.TSKH. Nguyễn Phú Thụy\*<sup>\*\*</sup>,

ThS. Chử Đức Trinh\*, TS. Nguyễn Thăng Long\*

\*Khoa Điện tử Viễn thông - Trường ĐH Công nghệ

PGS. TS. Vũ Ngọc Hùng\*\*

\*\*Viện Đào tạo Quốc tế về Khoa học Vật liệu

## Tóm tắt

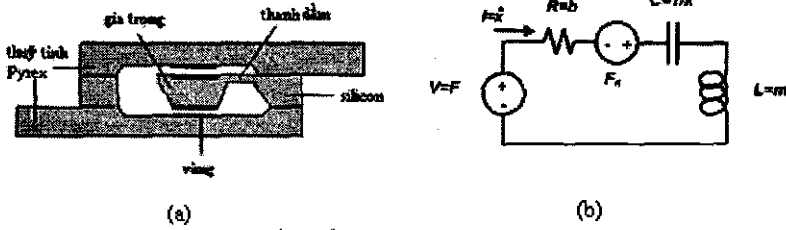
Bài báo này đề cập đến việc thiết kế, chế tạo và đo chuẩn các cảm biến gia tốc kiểu tụ. Đầu tiên, bài báo khảo sát mô hình năng lượng để phân tích nguyên tắc hoạt động của cảm biến. Trong quá trình thiết kế có tính toán tới nhiệt và suy hao cơ học. Chúng tôi sử dụng phương pháp phân tích nút dùng ngôn ngữ Sugar trong môi trường Matlab để mô phỏng và thiết kế. Những kết quả đã được ứng dụng tại trung tâm ITIMS để chế tạo các cảm biến gia tốc với những cấu trúc khác nhau. Các cảm biến này được chuẩn hoá nhờ hệ thống đo chuẩn vi cảm biến gia tốc và mạch đo điện dung. Phần cuối cùng trình bày kết quả so sánh giữa mô phỏng và thực nghiệm đồng thời đưa ra một số hướng nghiên cứu tiếp theo.

## 1. Giới thiệu

Dù MEMS vẫn còn là một lĩnh vực còn mới mẻ tại Việt Nam nhưng cũng đã đạt được những thành công nhất định. Viện đào tạo quốc tế về khoa học vật liệu (ITIMS) và trường Đại học Công nghệ là những nơi đi đầu trong nghiên cứu về MEMS. Bài báo này xuất phát từ nhu cầu thực tiễn là mô phỏng cấu hình của cảm biến MEMS để chế tạo thành các linh kiện ứng dụng được trong thực tế. Điều này đòi hỏi cần có sự hợp tác chặt chẽ giữa Viện ITIMS và trường Đại học Công nghệ.

Cảm biến gia tốc kiểu tụ vi phân được lựa chọn do độ nhạy cao, nhiễu thấp, ít hao phí năng lượng, đặc tính một chiều ổn định, ít chịu tác dụng của nhiệt độ và đáp ứng tuyến tính. Đầu tiên, bài báo khảo sát nguyên tắc hoạt động của cảm biến gia tốc, sau đó tiến hành mô phỏng, thiết kế các cấu hình cảm biến cụ thể. Những kết quả mô phỏng được ứng dụng tại trung tâm ITIMS để chế tạo các cảm biến gia tốc với những cấu trúc khác nhau. Các cảm biến này được chuẩn hoá nhờ hệ thống đo chuẩn vi cảm biến gia tốc và mạch đo điện dung. Phần cuối cùng là đánh giá kết quả mô phỏng và thực nghiệm.

## 2. Cấu trúc và nguyên tắc hoạt động



Hình 1. Mô hình đo gia tốc kiểu vòng mở (a) và mô hình tương đương (b)

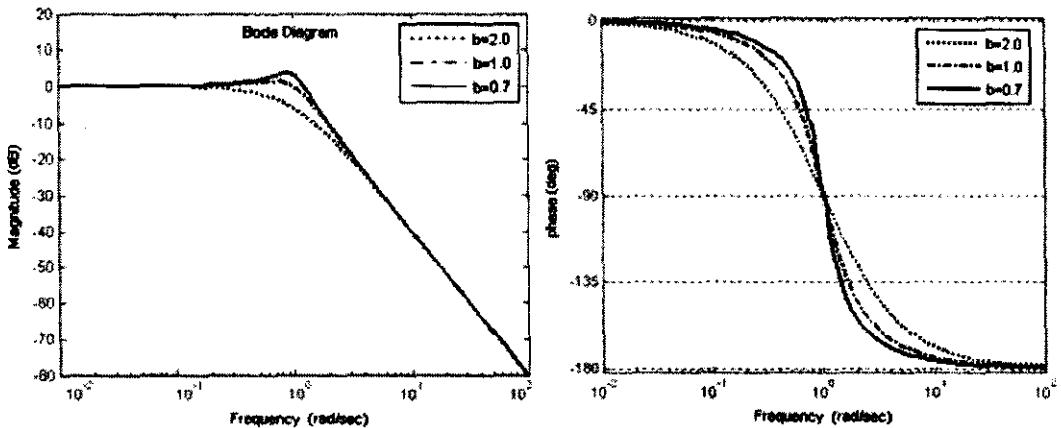
Cảm biến gia tốc đơn giản gồm một gia trọng  $m$  được gắn với một khung cố định nhờ một hay nhiều thanh dầm có hệ số đàn hồi  $k$  (Hình 1.a). Cảm biến gia tốc kiểu tụ tiêu biểu nhất có hai điện cực cố định ở bên ngoài và điện cực ở giữa có thể chuyển động được, tạo thành tụ vi sai. Bất kỳ một gia tốc nào làm cho gia trọng chuyển động khỏi vị trí cân bằng sẽ tạo ra thay đổi giá trị tụ [2].

Mô hình năng lượng của một cảm biến gia tốc MEMS kiểu tụ hoạt động theo chế độ vòng mở được trình bày bằng một mô hình tương đương (Hình 1.b). Ở đây,  $m$  là gia trọng,  $k$  là hằng số đàn hồi của thanh dầm,  $b$  đặc trưng cho suy hao. Ta có:

$$x = \left( \frac{F + F_n}{m} \right) : \left( s^2 + \frac{b}{m}s + \frac{k}{m} \right) \quad (1)$$

Với:  $F$  là lực tác dụng gây nên gia tốc,  $F_n$  là ngoại lực do nhiễu tác động và  $x$  là độ dịch chuyển của thanh dầm. Các thông số khác:  $\omega_o = \sqrt{k/m}$ ,  $\alpha = b/2m$ ,  $Q = \sqrt{km}/b$  lần lượt là tần số cộng hưởng, hệ số suy hao, và hệ số chất lượng.

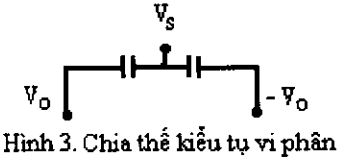
Đáp ứng tần số được biểu diễn như trên hình 2. Từ đó có thể thấy rõ suy hao ảnh hưởng rất lớn đến hoạt động của cảm biến.



Hình 2. Đáp ứng tần số với các hệ số suy hao khác nhau

Bởi vì hầu hết các ứng dụng đều liên quan đến gia tốc tĩnh ( $\omega_o \gg \omega$ ) và nếu bỏ qua  $F_n$  thì thu được:

$$a = \omega_o^2 x \quad (2)$$



Thấy rằng gia tốc chỉ phụ thuộc vào tần số dao động riêng và độ dịch chuyển  $x$ . Độ dịch chuyển ( $x=g_2-g_1$ ) được xác định một cách tuyến tính thông qua điện thế của tụ vi phân (Hình 3).

Ta có:

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1} = \frac{g_2 - g_1}{const} \quad (3)$$

với  $g_1, g_2$  là khe hở 2 tụ.

Nhiều do nhiệt gây ra một gia tốc tương đương là:

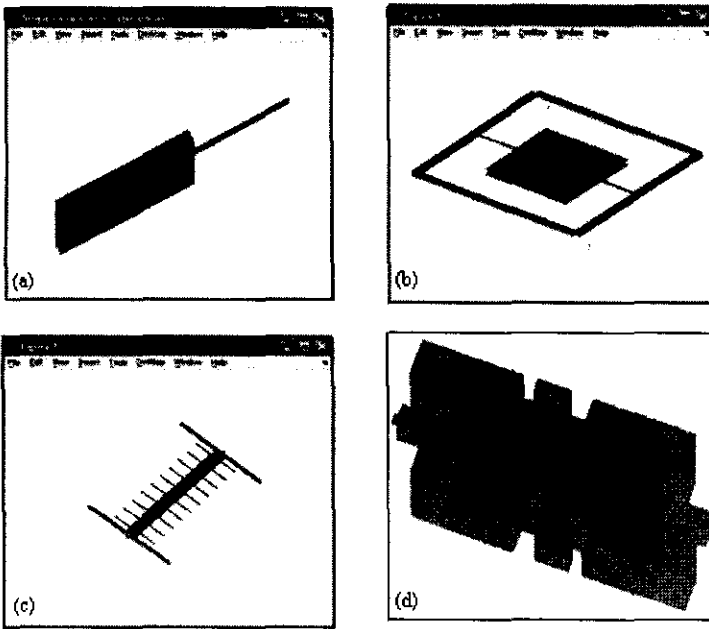
$$a_{n,rms} = \sqrt{4k_B T \omega_n / mQ} \quad (4)$$

Từ (4) ta thấy rằng cảm biến gia tốc MEMS cần được thiết kế với hệ số  $Q$  lớn để tăng tỉ số tín hiệu / nhiễu.

### 3. Mô phỏng cấu trúc và hoạt động của cảm biến gia tốc MEMS kiểu tụ

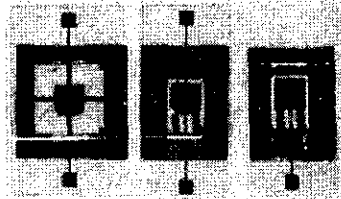
Thiết kế vi cảm biến gia tốc kiểu tụ sử dụng chương trình mô phỏng Sugar hoạt động dựa vào phân tích nút để giải các phương trình vi phân phi tuyến. Chương trình được thực hiện trong môi trường MATLAB với độ chính xác cao, tương đương với những mô phỏng truyền thống (phương pháp phần tử hữu hạn FEM, phương pháp phần tử biên BEM). Các tham số đầu vào có thể dùng thay đổi các tính chất vật lý và hình học như hệ số Young, hệ số Poisson, hằng số điện môi, độ rộng thanh dầm... Điều này rất thuận lợi khi thay đổi thiết kế các cảm biến khác nhau. Đây là một ưu điểm lớn so với các công cụ mô phỏng khác.

Hình 4 biểu diễn một vài cấu trúc cảm biến gia tốc được tính toán, mô phỏng bằng Sugar. Những khảo sát về dải làm việc, tần số cộng hưởng ... cũng đã được thực hiện.



Hình 4. Một số cấu trúc cảm biến gia tốc: (a) 1 thanh dầm, (b) 2 thanh dầm đối xứng, (c) kiểu răng lược, (d) 4 thanh dầm đối xứng

Trên cơ sở các thiết kế nói trên, trung tâm ITIMS đã chế tạo thành công một số cảm biến gia tốc kiểu tụ (hình 5). Các cảm biến có số thanh dầm khác nhau với cấu hình liệt kê trong bảng 1.



Hình 5. Cảm biến gia tốc chế tạo tại ITIMS  
(a) 4 thanh dầm đối xứng, (b) 2 thanh dầm đối xứng, (c) 1 thanh dầm

Độ dài thanh dầm	3000 $\mu\text{m}$
Chiều rộng thanh dầm	500 $\mu\text{m}$
Độ dày thanh dầm	30-40 $\mu\text{m}$
Diện tích điện cực	4x4mm <sup>2</sup>
Khe hở cảm biến	10 $\mu\text{m}$
Kích thước chip	10x10x12mm <sup>2</sup>

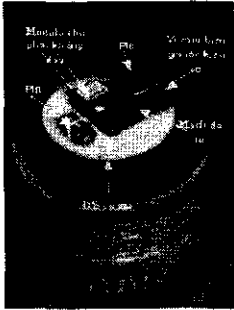
Bảng 1. Các thông số cảm biến chế tạo tại trung tâm ITIMS

Cảm biến được chế tạo dựa vào công nghệ vi cơ khối và phương pháp hàn tĩnh điện để có gia trọng đủ lớn và độ nhạy cao.

#### 4. Hệ thống đo chuẩn vi cảm biến gia tốc và mạch đo điện dung

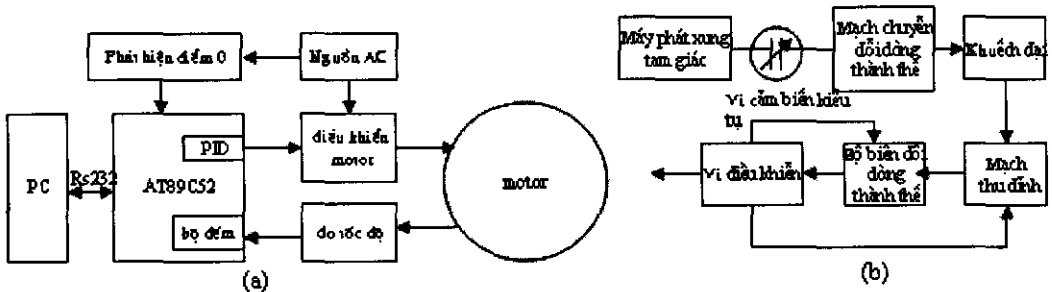
Để đánh giá các thông số của các cảm biến gia tốc kiểu tụ đã được chế tạo và so sánh kết quả đo với kết quả tính toán từ chương trình mô phỏng, chúng tôi đã xây dựng một hệ đo chuẩn vi cảm biến gia tốc. Hệ thống chuẩn hoá được chỉ ra trên hình 6, sử dụng phương pháp gia tốc ly tâm cho phép xác định đáp ứng tĩnh của cảm biến. Vi cảm biến gia tốc được đặt vuông góc với mặt của đĩa quay cách tâm một khoảng  $R$ , nếu đĩa quay tròn với vận tốc góc  $\omega$  thì vi cảm biến chịu một gia tốc ly tâm theo công thức sau:

$$a = \omega^2 R \quad (5)$$



Hình 6. Hệ chuẩn hoá

Bộ vi điều khiển sẽ thu thập thông tin về giá trị của tụ điện thông qua mạch đo điện dung. Giá trị này sẽ được xử lý và gửi về máy tính thông qua bộ thu phát không dây. Hệ đĩa có thể cho phép gia tốc thay đổi trong khoảng từ 0 đến 77g. Độ chính xác của phép chuẩn hoá phụ thuộc vào độ chính xác của mạch đo điện dung, mạch đo vận tốc quay của đĩa và độ ổn định của tốc độ này.

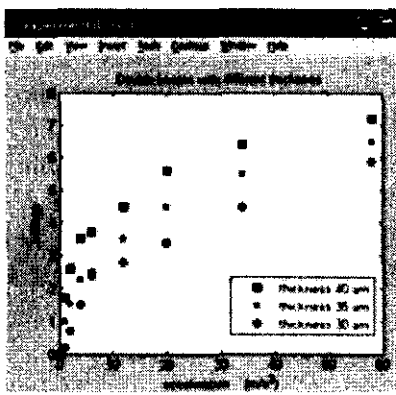


Hình 7. Sơ đồ khối nguyên lý của bộ điều khiển tốc độ của đĩa quay (a), mạch đo điện dung (b)

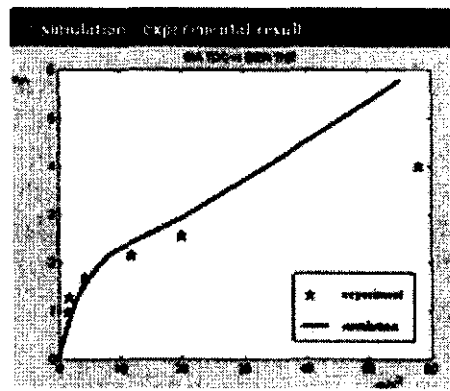
Hình 7(a) mô tả sơ đồ khối nguyên lý của bộ điều khiển tốc độ của đĩa quay. Vi điều khiển sẽ điều khiển tốc độ của motor bằng thuật toán PID. Chương trình này làm cho đĩa quay đều do đó, gia tốc được tạo ra ổn định. Sơ đồ khối nguyên lý của mạch điện để đo điện dung và sự thay đổi giá trị điện dung sử dụng trong bài báo được chỉ ra trên hình 7(b). Mạch này cho phép đo điện dung trong dải pico farad với độ phân dải là 0.05pF.

#### 5. So sánh kết quả mô phỏng và thực nghiệm

Kết quả đo hiệu điện thế như một hàm của gia tốc của các cảm biến 2 thanh dầm với độ dày khác nhau, được thể hiện trên hình 8.a. Nhận thấy đó là đường cong phi tuyến và độ nhạy của cảm biến sẽ cao nếu độ dày của thanh dầm là thấp. Hình 8.b biểu diễn mối liên hệ giữa gia tốc và điện thế của cảm biến gia tốc bốn thanh dầm đối xứng thông qua kết quả mô phỏng và thực nghiệm. Bài toán mô phỏng phi tuyến cho kết quả phù hợp với thực tế khi hệ số đàn hồi  $k$  không phải là hằng số mà là hàm biến đổi phi tuyến.



(a)



(b)

Hình 8. Đặc tính hiệu điện thế – gia tốc (a) kết quả thực nghiệm loại 2 thanh dầm, các độ dày 30, 35, 40  $\mu\text{m}$  (b) so sánh kết quả thực nghiệm và lý thuyết loại 4 thanh dầm đối xứng, độ dày 40  $\mu\text{m}$ .

Với gia tốc nhỏ, các kết quả thực nghiệm và mô phỏng khá giống nhau. Nhận xét rằng khoảng tuyến tính của cảm biến bị giới hạn. Đó cũng chính là nhược điểm của các cảm biến kiểu vòng mở. Khi gia tốc cao, sự sai khác giữa các kết quả thực nghiệm và mô phỏng là tương đối lớn. Sự sai khác này được giải thích do các nguyên nhân sau: nhiễu và suy hao trong mạch đo lường điện tử; độ chính xác trong chế tạo chưa hoàn hảo; tính toán trong miền phi tuyến và suy hao cơ học trong mô phỏng chưa hoàn toàn phù hợp với thực tế.

Tuy nhiên có thể thấy rằng các kết quả mô phỏng là có thể tin cậy được và các cảm biến gia tốc được chế tạo có thể được ứng dụng trong thực tế.

## 6. Kết luận

Để đáp ứng nhu cầu phát triển của việc ứng dụng các cảm biến MEMS trong đời sống chúng tôi đã tập trung vào việc mô phỏng và thiết kế cảm biến gia tốc MEMS kiểu tụ. Một hệ thống đo chuẩn sử dụng bộ biến đổi điện dung - điện thế và mạch thu phát không dây đã được xây dựng để xác định các thông số của các cảm biến được chế tạo tại trung tâm ITIMS. Bài báo cho thấy tầm quan trọng của sự liên hệ chặt chẽ giữa việc thiết kế, chế tạo và chuẩn hoá các cảm biến gia tốc MEMS kiểu tụ.

## Lời cảm ơn

Tập thể tác giả xin cảm ơn sự trợ giúp của đề tài mã số 811404 trong chương trình nhà nước về “Khoa học nano và Công nghệ” của Bộ Khoa học và Công nghệ.

## Tài liệu tham khảo

- [1]. WOLFGANG KUEHNEL, (1994), *Modelling of the mechanical behaviour of a differential capacitor acceleration sensor*, Sens.Actuator A48 101-108.
- [2]. J.V.CLARK, N.ZHOU, D.BINDEL. *3D MEMS Simulation Modeling using modified nodal analysis*. [Http://www-bsac.eecs.berkeley.Edu](http://www-bsac.eecs.berkeley.Edu).