

CẢM BIẾN VẬN TỐC GÓC DRAPPER: CÔNG NGHỆ CHẾ TẠO VÀ GIAO DIỆN ĐIỆN TỬ

**KS Nguyễn Thị Minh Hằng, Trung tâm Công nghệ Vi điện tử và Tin học (IMET)
PGS TS Vũ Ngọc Hùng, ThS Trịnh Quang Thông, TS Đinh Văn Dũng, Đại học BKHN
GS TSKH Nguyễn Phú Thùy, Đại học Quốc gia Hà Nội**

Tóm tắt. Con quay vi cơ đã được ứng dụng nhiều, song việc nghiên cứu để hoàn thiện công nghệ và nâng cao chất lượng của nó vẫn đang được rất nhiều cơ sở trên thế giới quan tâm. Bài báo này đề cập đến một số kết quả chế tạo bộ cảm biến vận tốc góc cấu trúc kiểu Drapper. Phương pháp đo điện dung vi sai và xử lý tín hiệu bằng công nghệ vi điều khiển được sử dụng để đánh giá các thông số của bộ cảm biến.

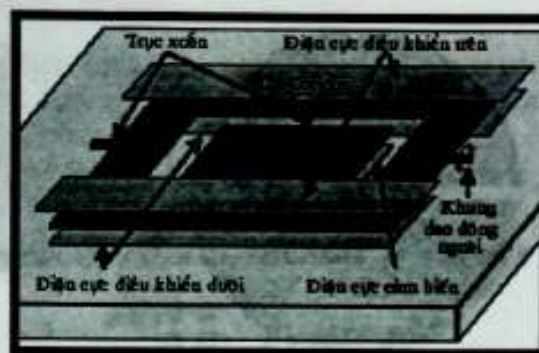
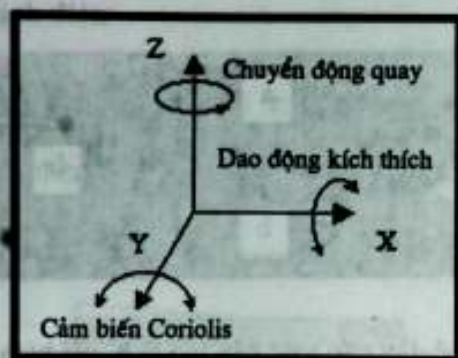
1. Giới thiệu

Con quay hồi chuyển là một loại cảm biến cơ học dùng để đo vận tốc góc, cho phép xác định được tốc độ góc tuyệt đối của vật thể quay đặt trong không gian quán tính, dựa trên hiệu ứng Coriolis. Đây là loại cảm biến có ứng dụng quan trọng trong kỹ thuật tự động (máy bay, tên lửa), đã được sử dụng từ những năm đầu của thế kỷ 20. Tuy nhiên, các cảm biến này khá to lớn cồng kềnh và giá thành cao. Đến những năm 80 khi công nghệ vi điện tử phát triển và ngày càng hoàn thiện, công nghệ vi chế tạo ra đời cho phép tạo các cảm biến vi cơ và tích hợp cảm biến với giao diện điện tử trên cùng một đế silic với kích thước nhỏ (silicon micromachined gyroscope). Từ đó cảm biến vận tốc góc, còn gọi là con quay vi cơ - gyroscope hay gyro - ngày càng được hoàn thiện, chủng loại đa dạng, giá thành thấp, đáp ứng sự phát triển của kỹ thuật hiện đại. Tại Viện Đào tạo Quốc tế về Khoa học Vật liệu (ITIMS) trong những năm qua đã nghiên cứu chế tạo một số linh kiện vi cơ (MEMS - microelectronic mechanical systems) trên cơ sở công nghệ vi cơ khối (bulk micromachined technology) như cảm biến áp suất, cảm biến gia tốc, cảm biến vận tốc góc (sáu đây gọi là CVG). Một vài trong số đó đã bước đầu được triển khai ứng dụng, nhất là CVG. Tiếp theo đó, loại cảm biến vận tốc góc có cấu trúc kiểu răng lược được thiết kế và chế tạo, đó là cảm biến, được chế tạo trên cơ sở công nghệ DRIE (Deep Reactive Ion Etching) - ăn mòn ion tương tác sâu. Cấu trúc này cho phép tăng diện dung lên đáng kể, bằng cách tăng số lượng răng lược và tận dụng tối đa chiều dày của phiến. Quy trình chế tạo cảm biến vận tốc góc theo cả hai công nghệ đã được nghiên cứu và chuẩn hoá theo các điều kiện công nghệ tại ITIMS. Bài báo này giới thiệu quy trình chế tạo CVG tụ kiểu Drapper theo phương pháp ăn mòn ướt khối.

Để hoàn thiện và tăng khả năng ứng dụng của linh kiện, việc đánh giá các thông số của chúng đặc biệt quan trọng. Do kích thước của các linh kiện vi cơ nói chung và CVG nói riêng là rất nhỏ, từ vài chục milimet cho đến vài chục micromet, và nhỏ hơn nữa, nên việc đo đạc đánh giá chính xác các tham số của chúng là một trong những bài toán đòi hỏi độ chính xác cao, tinh tế. Với linh kiện MEMS nói chung và CVG nói riêng, cấu trúc kiểu tụ cho phép linh kiện làm việc với độ ổn định nhiệt, độ nhạy cao. Tuy nhiên, giao diện điện tử tương đối phức tạp. Bài báo này giới thiệu một phương pháp đo điện dung trong chế độ vòng mở, cho độ nhạy đến 1pF và nhỏ hơn. Phép đo trong chế độ vòng kín cũng được giới thiệu.

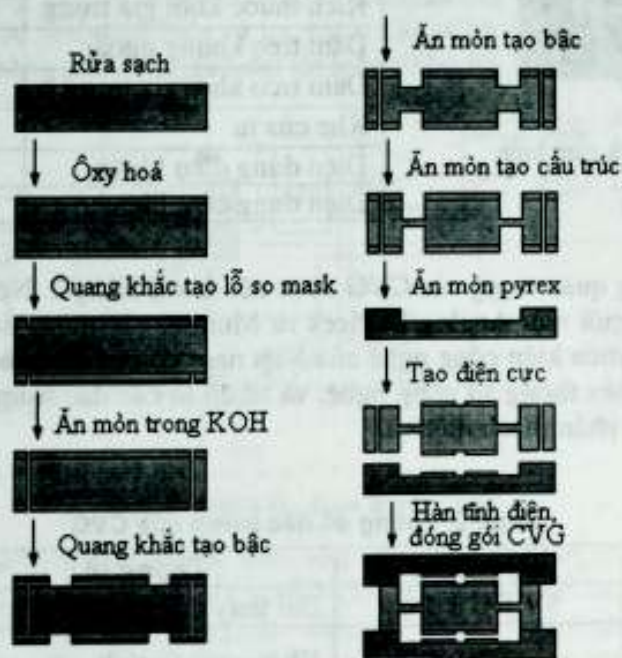
2. Công nghệ chế tạo

Đối với CVG kiểu Drapper, nguyên lý hoạt động dựa trên việc truyền năng lượng gắn như toàn bộ giữa chế độ điều khiển và chế độ cảm biến nhờ tính đàn hồi của trục xoắn (thanh dầm) do hiệu ứng Coriolis khi CVG được đặt trong hệ qui chiếu quay [1, 2, 3, 4] (Hình 1).

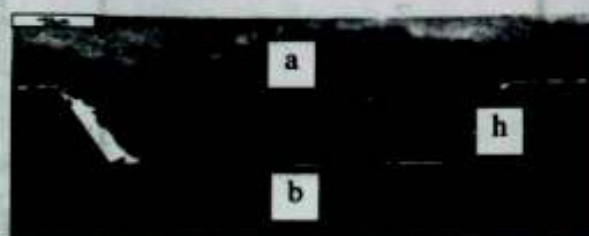
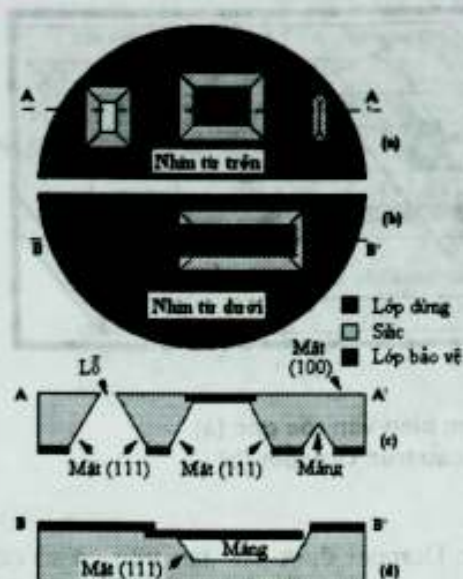


Hình 1. Nguyên lý hoạt động của cảm biến vận tốc góc (a) và mô hình cảm biến vận tốc góc cấu trúc Drapper (b)

CVG được chế tạo bằng vật liệu silic. Cấu trúc Drapper được chế tạo trên cơ sở công nghệ vi cơ khối dựa trên đặc tính ăn mòn dị hướng của vật liệu silic đơn tinh thể trong dung dịch kiềm potassium hydroxide (KOH) để tạo nên các cấu trúc cơ học dạng khối. Đây là công nghệ truyền thống, điều kiện thực hiện tương đối dễ dàng hơn so với công nghệ vi cơ bề mặt, cho phép tạo được các màng/khối có khối lượng tương đối lớn so với thanh dầm (thanh đỡ) mỏng để chế tạo các cảm biến áp suất, cảm biến gia tốc, và cảm biến vận tốc góc [3,4]. Quy trình công nghệ chế tạo CVG kiểu Drapper được trình bày trên Hình 2. Ưu điểm của công nghệ này là tương đối đơn giản, do chỉ dùng kết hợp kỹ thuật quang khắc với phương pháp ăn mòn ướt để tạo cấu trúc. Song nhược điểm của nó là do đặc điểm có sự khác nhau về tốc độ ăn mòn của silic theo các hướng tinh thể khác nhau. Chính vì vậy, cấu trúc không có thành thẳng đứng, và không thể giảm kích thước đến giới hạn ngưỡng đối với một chiều dày nhất định (Hình 3).



Hình 2. Quy trình chế tạo CVG cấu trúc Drapper

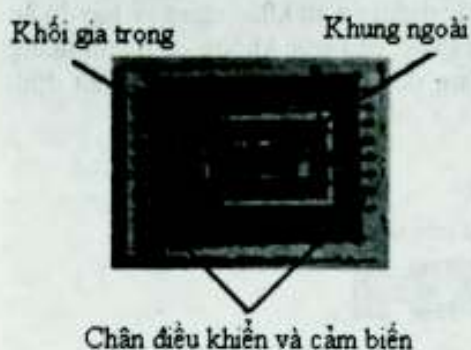


Nếu bề dày cấu trúc cần tạo là h , với kích thước của số là a , thì kích thước đáy b sẽ là:

$$b = a - \sqrt{2}h$$

Hình 3. Hạn chế sự thu nhỏ kích thước cấu trúc trong công nghệ ăn mòn ướt

ITIMS đã thành công trong việc chế tạo CVG kiểu Drapper. Hình 4 là ảnh của CVG được chế tạo theo thiết kế của Trung tâm KHKT-CNQS/Bộ Quốc phòng. Một số thông số cấu trúc được nêu ra trong Bảng 1. Với việc hoàn thiện thêm thiết kế cũng như chế tạo, CVG hứa hẹn sẽ đáp ứng được những yêu cầu cao hơn.



Hình 4

Bảng 1. Thông số hình học của CVG kiểu Drapper

Thông số	Giá trị
Độ dày chung của linh kiện	200 μ m
Độ dày các dầm treo	120 μ m
Kích thước khung ngoài	10000x5506 μ m
Kích thước khối gia trọng	6000x2000 μ m
Dầm treo khung ngoài	1483x158 μ m
Dầm treo khối gia trọng	1100x70 μ m
Khe của tụ	10 μ m
Điện dung điều khiển	23pF
Điện dung cảm biến	15pF

Một số đặc trưng quan trọng của CVG được nêu trong Bảng 2. Nếu so sánh với CVG của một số hãng trên thế giới như Analog Devices và Murata, các thông số CVG sau khi chế tạo có chỉ số thấp hơn do điều kiện công nghệ của Việt nam còn có hạn chế. Song, kết quả nghiên cứu cho thấy rằng, nhiều thông số công nghệ, và từ đó là các đặc trưng kỹ thuật của CVG có thể được cải thiện nhờ phần mạch điện tử.

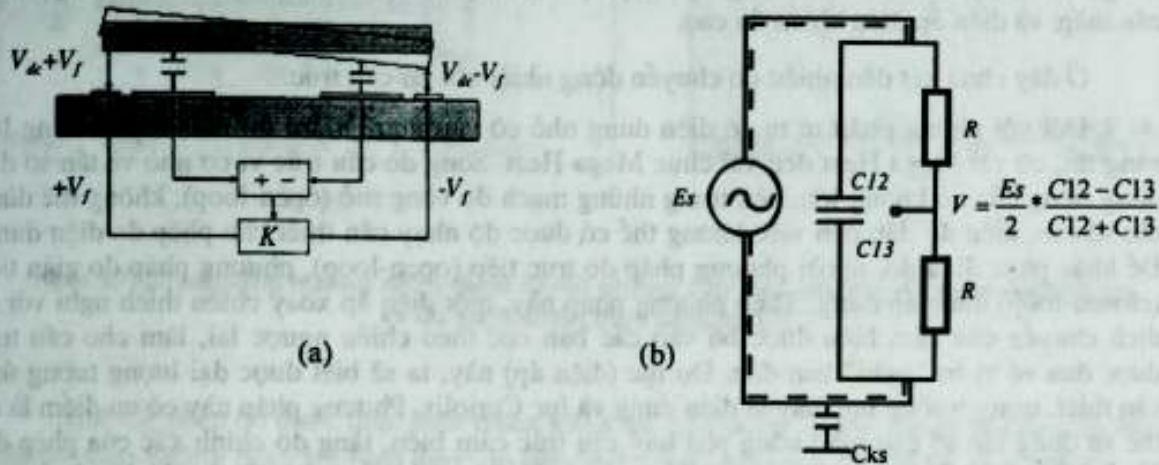
Bảng 2. Thông số đặc trưng của CVG

Thông số	Đặc trưng	Thông số	Đặc trưng
Điện áp vào	5V DC $\pm$ 5%	Dải thay đổi vận tốc góc	> 50 Hz
Dòng vào	< 20 mA	Không tuyến tính	< 0.5% đầu ra toàn dải
Dải hoạt động	$\pm$ 150 $^{\circ}$ /sec	Độ phân giải	< .004 $^{\circ}$ /sec
Đầu ra toàn dải	0.025 to 4.75 V DC	Nhiều đầu ra	< 0.025 $^{\circ}$ /sec/ $\sqrt$ Hz
Điều chỉnh hệ số (ở 22 $^{\circ}$ C)	$\pm$ 3%	Nhiệt độ làm việc	-40 $^{\circ}$ C to 85 $^{\circ}$ C
Điện áp chuẩn	2.50V DC	Độ ổn định điện áp chuẩn	< .1 $^{\circ}$ /sec

3. Mạch điện

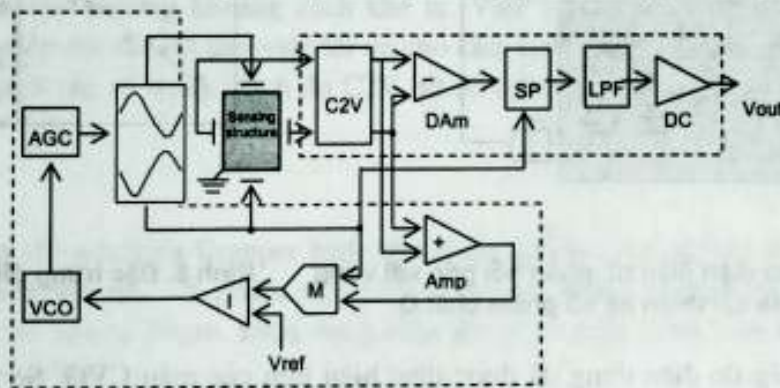
CVG do ITIMS chế tạo dựa trên hiệu ứng điện dung. Khi CVG được kích thích (thành phần kích thích), và nằm trong hệ qui chiếu quay, dưới tác dụng của hiệu ứng Coriolis, thành phần cảm biến sẽ dao động. Khoảng cách giữa các bản cực do đó sẽ thay đổi, dẫn đến sự thay đổi của điện dung. Từ sự thay đổi điện dung này, có thể xác định được vận tốc góc của hệ qui chiếu.

Mạch đo cảm biến xây dựng trên nguyên lý cầu và tụ điện kép vi sai [5, 6, 7] (Hình 5).



Hình 5. Dao động của phần tử điều khiển và phần tử cảm biến trong CVG (a); sơ đồ khối mạch đo điện dung (b)

Nguyên lý đo là sự dịch chuyển được phát hiện bằng sự thay đổi điện dung giữa cấu trúc chuyển động và điện cực cố định. Tính đối xứng của cấu trúc cho phép giảm bớt sai số công nghệ. Tần số dao động cộng hưởng của hai chế độ được đồng nhất để tăng độ nhạy của cảm biến. Tuy nhiên, để mở rộng dải thay đổi vận tốc góc, hai chế độ này được thiết kế với một độ khác biệt nhỏ. Điện dung cần đo được đưa vào bộ chuyển đổi C2V để chuyển đổi thành tín hiệu điện áp, sau đó được giải điều biến và lọc trước khi ra bộ chỉ thị. Tín hiệu liên quan đến tốc độ quay nhận được bằng cách khuếch đại tín hiệu từ bộ lọc tần thấp (Hình 6).



Hình 6. Mạch đo điện dung CVG

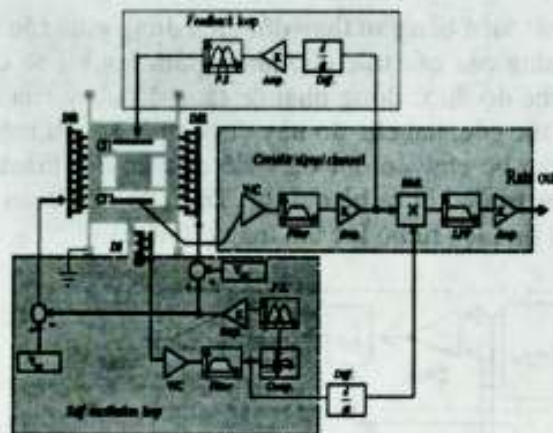
Phần điện tử đo và điều khiển được thực hiện chủ yếu trên bán thành phẩm lập trình và một số linh kiện rời rạc, và được ghép nối với CVG qua các chân để tạo thành con quay vi cơ hoàn chỉnh. Với sự dao động, điện dung cảm biến thay đổi. Trong phương pháp vòng điều khiển mở, điện dung được đo để tính vận tốc góc. Trong phương pháp vòng điều khiển khép kín, lực tĩnh điện điều khiển đặt vào vòng phản hồi cảm biến để đưa khối gia trọng về vị trí nghỉ, lực này có giá trị bằng lực Coriolis và được đo để xác định vận tốc góc. Đối với con quay vi cơ, thông tin nhận được là đại lượng điện nên độ nhạy của nó được xác định có đơn vị là miliVolt/độ/giây (mV/°/s).

Cấu tạo của bộ cảm biến này có một số ưu điểm như giá trị điện dung của các tụ điều khiển và cảm biến tương đối lớn; có thể điều chỉnh tần số cộng hưởng của cả hai chế độ dao động bằng cách thay đổi khe giữa khung ngoài và khối gia trọng với đế; làm phù hợp tần số cộng hưởng của hai chế độ bằng điện áp định thiên một chiều trên các điện cực [4]. Ngoài ra, với việc dùng mạch điện rời, một số thông số quan trọng của cấu trúc cũng có thể được điều chỉnh, như hệ số phẩm chất Q [8], từ đó làm cải thiện đáng kể độ nhạy của CVG.

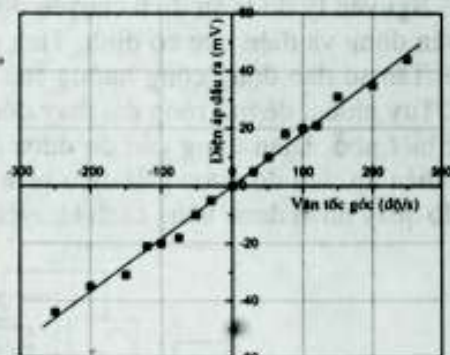
Tuy nhiên bản thân mạch điện tử cũng tạo ra mức nhiễu nhất định, làm hạn chế khả năng đo của bộ cảm biến. Để tăng độ nhạy của của mạch điện tử, nhiễu đầu vào của mạch đo cần thấp, và điện áp điều khiển đủ cao.

Ở đây chưa xét đến nhiễu do chuyển động nhiệt nội tại cấu trúc.

Đối với những phần tử tụ có điện dung nhỏ cỡ vài pico Farad thì tần số phát càng lớn càng tốt, cỡ vài Mega Hertz đến vài chục Mega Hertz. Song do cấu trúc vi cơ nhỏ và tần số dao động riêng của nó không lớn, nên trong những mạch đo vòng mở (open-loop), không thể dùng tần số cao, điều đó dẫn đến việc không thể có được độ nhạy cần thiết cho phép đo điện dung. Để khắc phục điều đó, ngoài phương pháp đo trực tiếp (open-loop), phương pháp đo gián tiếp (closed-loop) được áp dụng. Theo phương pháp này, một điện áp xoay chiều thích nghi với sự dịch chuyển của cảm biến được bù vào các bản cực theo chiều ngược lại, làm cho cấu trúc được đưa về vị trí "nghỉ" ban đầu. Đo lực (điện áp) này, ta sẽ biết được đại lượng tương ứng cần thiết, trong trường hợp này là điện dung và lực Coriolis. Phương pháp này có ưu điểm là có thể sử dụng tần số cao mà không phá huỷ cấu trúc cảm biến, tăng độ chính xác của phép đo. Hình 7 là mạch điện tử được bố xung phần điều chỉnh hệ số phẩm chất Q như đã đề cập ở trên.

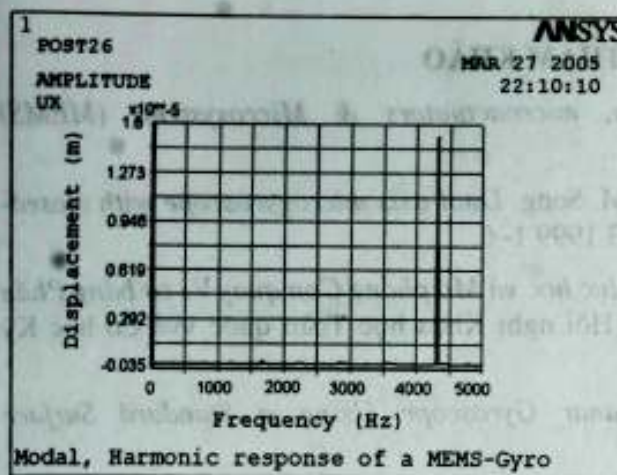


Hình 7. Giao diện điện tử phản hồi góc với vòng lặp để cải thiện hệ số phẩm chất Q

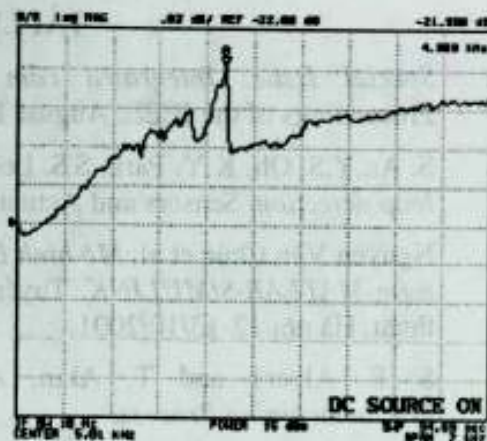


Hình 8. Đặc trưng điện áp ra - vận tốc

Các phép đo điện dung đã được thực hiện trên các mẫu CVG. So sánh với thiết bị đo điện dung Keithley của Mỹ, sai khác là 5%. Bộ vi điều khiển được dùng để hiệu chỉnh phép đo do có sai số công nghệ và nhiễu trong hệ thống điện tử. Bộ LUT được đưa vào để chỉ thị vận tốc góc cần đo tương ứng với các giá trị điện áp nhận được (Hình 8). Kết quả nhận được rất phù hợp với nhiều kết quả của các phòng nghiên cứu trên thế giới cũng như một số cảm biến vận tốc góc thương phẩm [1]. Thiết bị thử nghiệm tốc độ là bàn xoay tốc độ Acutronic Model 120-02 của áo, việc thử nghiệm đo đặc được tiến hành tại phòng thí nghiệm thuộc Trung tâm Khoa học Kỹ thuật và Công nghệ Quân sự, và Trung tâm Công nghệ Vi điện tử và Tin học - Viện ứng dụng Công nghệ, cũng như Trường Công nghệ - Đại học Quốc gia Hà nội.



(a)



(b)

Hình 9. Tần số cộng hưởng nhận được từ mô phỏng cấu trúc bằng phần mềm ANSYS (a) và đo được bằng thực nghiệm (b)

Một vài phép đo được thực hiện nhằm kiểm tra hoạt động và các thông số của cảm biến. Tần số cộng hưởng của cảm biến được đo bằng máy phân tích phổ HP4395A và HM5014, dao động từ khoảng 3KHz đến 15KHz tùy theo kích thước của cảm biến (Hình 9).

So với tính toán theo mô hình bộ cảm biến vận tốc góc [4], và so với kết quả mô phỏng, tần số cộng hưởng đo được khác do sai số công nghệ. Sai khác này có thể dao động từ 5 đến 10%. Trong trường hợp CVG kiểu Drapper, tần số cộng hưởng tính được và mô phỏng bằng ANSYS là 4300Hz, còn tần số đo được bằng thực nghiệm vào khoảng 4000Hz. Sự lệch tần số còn xảy ra giữa tần số điều khiển và tần số cảm biến, song sai khác này thường nhỏ hơn 5%. Có thể khắc phục điều này bằng cách đặt các điện áp định thiên một chiều phù hợp cho các bản cực. Điều này xảy ra là do độ cứng của trục tỷ lệ với bình phương điện áp một chiều song lại tỷ lệ nghịch với lập phương khoảng cách khe tụ. Việc xác định chính xác tần số cộng hưởng của hệ cho phép đặt chế độ làm việc tối ưu cho cảm biến. Ngoài ra, đó cũng là cơ sở để đặt tần số cho bộ phát tần số trong mạch đo C2V, từ đó có được chế độ đo tốt nhất cho từng cảm biến cụ thể.

3. Kết luận

Cảm biến vận tốc góc kiểu Drapper bước đầu được nghiên cứu chế tạo tại ITIMS bằng phương pháp ăn mòn ướt đối với phiến silic (100), có kích thước 10000x5506x200 μ m, và khoảng cách giữa các bản tụ 10 μ m. Điện dung điều khiển và điện dung cảm biến có giá trị tương ứng là 23pF và 15pF.

Mạch điện tử được thiết kế và chế tạo để điều khiển và xử lý tín hiệu của cảm biến. Bộ chuyển đổi C2V được thiết kế theo phương pháp nhảy pha, cho độ nhảy cao với độ phân giải dưới 1pF, ít phụ thuộc vào nhiệt độ. Bộ vi xử lý CY8C27443/ATMEGA8535 được dùng để chuyển đổi tín hiệu và hiệu chỉnh bù tuyến tính. Ngoài ra, kỹ thuật vòng hồi tiếp được áp dụng để nâng cao độ ổn định của linh kiện. Dải làm việc của cảm biến tuyến tính trong khoảng -250÷250độ/s, với điện áp ra -60÷60mV.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. *Special Issue: Integrated cảm biến, microactuators & Microsystems (MEMS) Proceedings of the IEEE. August 1998. .*
2. S. An, Y.S. Oh, K.Y. Park, S.S. Lee, C.M. Song. *Dual-axis microgyroscope with closed-loop detection. Sensors and Actuators* 73 1999 1-6.
3. Nguyễn Văn Chúc et al. *Mô hình Động lực học và Mô phỏng Con quay Vi cơ bằng Phần mềm MATLAB-SIMULINK*. Tuyển tập Hội nghị Khoa học Toàn quốc về Cơ học Kỹ thuật, Hà nội 12-13/10/2001.
4. S. E. Alperl and T. Akin. *A Planar Gyroscope Using a Standard Surface Micromachining Process*.
5. Vu Ngoc Hung et all. *Silicon micromachined gyroscope based on capacitive effect*. Proceedings of the Seventh Vietnamese-German Seminar on Physics and Engineering. Halong City, from March, 28 to April, 5, 2004
6. *Sensor handbook*. Sbric Soloman. Mc Graw-Hill, 1998
7. Phạm Thượng Hàn, Nguyễn Trọng Quế, Nguyễn Văn Hòa. *Kỹ thuật đo lường các đại lượng vật lý*. Nhà xuất bản Giáo dục, 1996
8. Chihwan Jeong, Seonho Seok, Byeungleul Lee, Hyeonched Kim and Kukjin Chun. *A study on resonant frequency and Q factor tunings for MEMS vibratory gyroscopes*.

DRAPPER ANGULAR RATE SENSOR: FABRICATION AND ELECTRONIC INTERFACE

**Nguyen Thi Minh Hang, Vu Ngoc Hung, Trinh Quang Thong,
Đinh Van Dung, Nguyen Phu Thuy**

Abstract: *The angular rate sensor - gyroscope - finds wide applications. Its fabrication and applications have been studied and improved in many institutions over countries. The paper involves some results in fabrication of Drapper silicon micromachined gyroscope. The differential measurement of capacitance and signal processing based on microcontroller were applied for estimating the specifications of the gyroscope.*