

PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH PHẦN TỬ HỮU HẠN ĐÁNH GIÁ HOẠT ĐỘNG CỦA CẢM BIẾN ÁP SUẤT KHÔNG KHÍ SỬ DỤNG CHO VẬT THỂ BAY CỖ NHỎ

AN FINITE ELEMENT METHOD TO ANALYZE THE PERFORMANCE OF BAROMETRIC PRESSURE SENSOR USING IN MICRO-AIR VEHICLE (MAV)

Phạm Anh Đức*, Tào Quang Bằng*, Ngô Thanh Nghị, Trần Văn Tiến

Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng¹

*Tác giả liên hệ: ducpham@dut.udn.vn; tqbang@dut.udn.vn

(Nhận bài: 28/12/2021; Chấp nhận đăng: 18/02/2022)

Tóm tắt - Thiết bị bay cỡ nhỏ (MAV) đang thu hút nhiều chú ý trong cả nghiên cứu và sản xuất. Chúng được ứng dụng nhiều cho các thiết bị giám sát trong vùng làm việc có hạn chế về không gian. Sự phát triển này đòi hỏi cần có nhiều linh kiện linh hoạt và phù hợp với các thiết bị bay loại này. Trong các thành phần đó, cảm biến áp suất là thành phần quan trọng trong MAV. Do đó, nghiên cứu tập trung trình bày thiết kế và phân tích phương pháp đặc tính hoạt động của cảm biến áp suất không khí dựa trên kỹ thuật phân tích phần tử hữu hạn (FEM). Trước hết, thiết kế chi tiết của một cảm biến áp suất không khí sử dụng trong MAV được mô tả. Mô hình phân tích đặc tính hoạt động của loại cảm biến này được xây dựng dựa trên các kỹ thuật phân tích FEM nâng cao. Hơn nữa, các kết quả mô phỏng được so sánh với đo đạc thực nghiệm nhằm chứng minh được sự hữu hiệu trong mô phỏng FEM của cảm biến áp suất không khí đã thiết kế.

Từ khóa - Cảm biến áp suất; áp suất khí quyển; thiết bị bay cỡ nhỏ; phân tích phần tử hữu hạn.

1. Giới thiệu

Thiết bị bay cỡ nhỏ (MAV) đang thu hút nhiều chú ý trong nghiên cứu cũng như trong sản xuất công nghiệp. Một thiết bị bay cỡ nhỏ và siêu nhỏ được tổ chức DARPA xác định là những thiết bị bay có kích thước nhỏ hơn 15cm [1]. Các thiết bị này được ứng dụng rất nhiều trong các thiết bị trinh thám vì kích thước nhỏ đáng kể của nó [2-3]. Để chế tạo các thiết bị bay nhỏ như vậy, các nhà sản xuất cần dùng các linh kiện và thành phần cũng có kích thước nhỏ tương ứng. Một trong các linh kiện quan trọng sử dụng trong các thiết bị bay này là các cảm biến áp suất, giúp chúng cảm nhận được thay đổi áp lực không khí khi đang vận hành [4].

Các cảm biến áp suất sử dụng cho các thiết bị bay cỡ nhỏ thường được nghiên cứu và phát triển với sự hỗ trợ từ công nghệ MEMS [5-7]. Các công nghệ thông thường tạo ra một cảm biến có kích thước không thật sự nhỏ gọn vì cần tích hợp một lúc nhiều thành phần gồm các bộ xử lý, khuếch đại tín hiệu, thành phần cảm nhận đại lượng vật lý cần đo. Tuy vậy, các cảm biến áp suất sử dụng cho MAV thường có kích thước nhỏ và siêu nhỏ đủ để tích hợp trên các bo mạch điều khiển thiết bị bay đó. Do đó, các kỹ thuật sản xuất thông thường khó tạo được các cảm biến áp suất cỡ nhỏ và siêu nhỏ như vậy. Để hiện thực hóa các thiết kế đòi hỏi nhiều hạn chế này, các lợi thế về công nghệ sản xuất

Abstract - Micro-Air Vehicles (MAV) are attracting much attention both in research and in the manufacturing industry. These devices are widely applied in scouting operations with narrow-space areas. This development requires a variety of components that are flexible and suitable for this type of aerial vehicle. On top of all, a pressure sensor integrated inside the circuit board of MAV has an important role and should be carefully designed. Hence, this research focus on introducing a design and technically analyzing the performance of the barometric pressure sensor based on the finite element method (FEM). Firstly, a detail of the designed barometric pressure sensor for the MAV will be illustrated. A simulation model based on some advanced techniques of FE analysis is presented. Furthermore, the simulation results will be compared with experimental ones to determine the usefulness of the proposed simulation model for the designed barometric pressure sensor.

Key words - Pressure sensor; barometric pressure; Micro-Air-Vehicle (MAV); Finite element method (FEM).

với hệ thống Vi cơ điện tử (MEMS) đã được sử dụng [8-9]. Nhờ các tiện ích đó, các cảm biến có thể thu nhỏ đủ để tích hợp vào các thiết bị MAV.

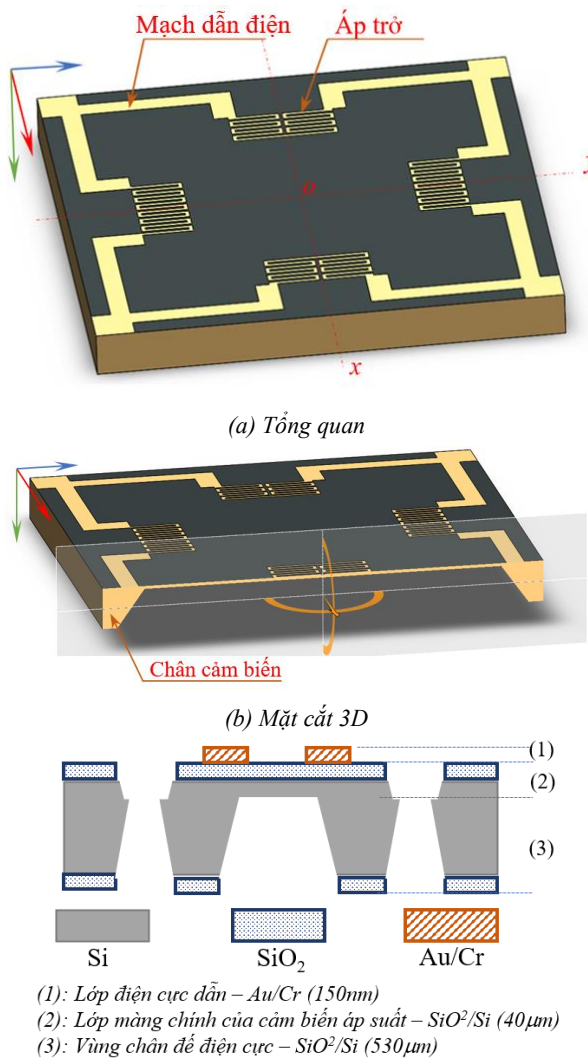
Các loại cảm biến áp suất có thể hoạt động dựa trên nhiều nguyên lý hoạt động, nhưng loại cảm biến áp suất hoạt động dựa trên nguyên lý áp trở thông thường được sử dụng vì nhiều ưu điểm nổi trội của nó. Về cơ bản các loại cảm biến áp suất có thể phân loại thành hai loại chính: Cảm biến điện dung và cảm biến áp trở [10-12]. Các loại cảm biến điện dung có khả năng hoạt động ở vùng áp suất cao, ít chịu ảnh hưởng của nhiệt độ và có độ chính xác cao. Tuy nhiên, các loại cảm biến này thường khó chế tạo, đòi hỏi kỹ thuật cao và có các nhiễu tín hiệu (sai số) mang tính phi tuyến [10]. Ngược lại, các loại cảm biến áp trở có tính ổn định cao, kỹ thuật chế tạo đơn giản và sử dụng tốt cho vùng áp suất cần đo có giá trị giới hạn trung bình, thấp như là môi trường khí quyển [12]. Chính vì yếu tố này, các thiết bị bay MAV có xu hướng sử dụng các loại cảm biến áp suất hoạt động dựa trên nguyên lý áp trở đó.

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả sẽ trình bày thiết kế và phân tích đặc tính hoạt động của cảm biến áp suất không khí hoạt động dựa trên nguyên lý áp trở sử dụng cho các thiết bị bay MAV. Đầu tiên, chi tiết thiết kế của mẫu cảm biến loại này sẽ được giới thiệu. Tiếp đó, phương pháp phân tích, mô phỏng khả năng hoạt động

¹ The University of Danang - University of Science and Technology (Anh-Duc Pham, Quang Bang Tao, Thanh Nghi Ngo, Van Tien Tran)

của cảm biến dựa trên phương pháp phân tích phần tử hữu hạn được mô tả. Các kỹ thuật phân tích nâng cao (như: Kỹ thuật chia lưới mịn, phân định vùng định phần tử, định hướng phân định bề mặt lưới...) sẽ được sử dụng trong đề xuất phân tích. Sau đó, các kết quả mô phỏng của thiết kế chi tiết cũng được so sánh và kiểm nghiệm lại bằng các kết quả thực nghiệm. Các kết quả và so sánh đó cho thấy, sự hiệu quả và hợp lý trong lựa chọn hình dạng và đề xuất thiết kế của loại cảm biến áp suất không khí dựa trên nguyên lý áp trở này.

2. Cấu trúc cảm biến áp suất hoạt động với nguyên lý áp trở

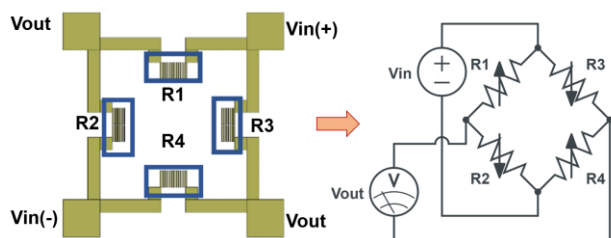


Hình. 1 Thiết kế cảm biến áp suất hoạt động với hiện tượng áp trở

Một cảm biến áp suất sử dụng tích hợp trong các thiết bị bay MAV được biểu diễn như trong Hình 1. Kích thước và đặc điểm thiết kế của cảm biến được mô tả trong Bảng 1. Mẫu thiết kế của cảm biến áp suất hoạt động trên nguyên lý áp trở là một loại tấm màng mỏng được tạo trên các tấm silicon - Wafer (chất liệu SiO₂/Si) [13]. Trong mẫu thiết kế này, cảm biến áp suất sẽ là một tấm màng hình vuông có tiết diện 25 mm² và độ dày không quá 0,038 mm. Phần chân đế có cấu trúc dạng khung viền nhằm tăng độ cứng vững theo

đường vành đai ngoài cho cảm biến, chiều cao phần chân đế này là 0.53 mm được thể hiện rõ hơn ở Hình 1(b). Trên bề mặt của cảm biến sẽ được mạch dẫn điện bằng chất liệu Au/Cr. Cấu trúc các lớp vật liệu theo mặt cắt vuông góc với tấm cảm biến áp suất được mô tả cụ thể trong Hình 1(c).

Các đường dẫn điện với chất liệu Au/Cr trên bề mặt cảm biến tạo ra một mạch điện có cấu trúc như hệ mạch điện Wheatstone bridge như Hình 2. Tại các đỉnh đối xứng theo đường trục tọa độ Ox và Oy, các đường dẫn tạo nên bốn áp trở (R1÷R4) có kích thước (Dài×Rộng) 1,22×0,65 mm. Các áp trở này sẽ có giá trị điện trở biến thiên theo áp lực đặt vào tấm màng của cảm biến. Tại 4 góc đỉnh hình vuông của cảm biến là vị trí của các điện thể vào-ra. Hiệu điện thế đầu vào sẽ có giá trị cố định là 5V, trong khi giá trị hiệu điện thế đầu ra sẽ có giá trị biến thiên theo các giá trị của các điện trở (R1÷R4) khi có sự thay đổi của áp suất lên bề mặt cảm biến. Đây chính là nguyên lý hoạt động của mạch điện Wheatstone bridge [14], và nhờ đo các giá trị hiệu điện thế đầu ra này mà ta có thể suy luận được giá trị thực tế của áp suất tăng khí quyển khi cảm biến được gắn với các thiết bị bay MAV.



Hình 2. Nguyên lý mạch điện của cảm biến

Bảng 1. Bảng thông số cảm biến

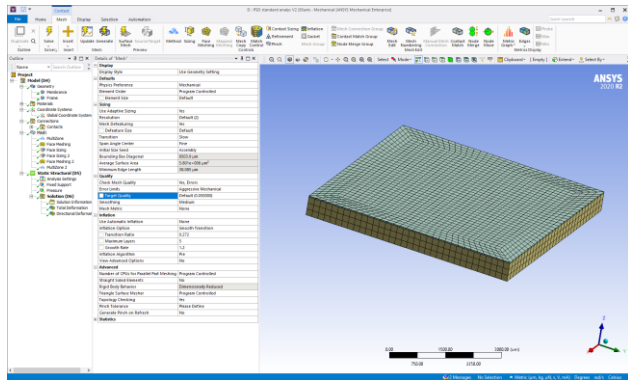
Thông số	Giá trị (đơn vị)
Kích thước màng cảm biến (Dài×Rộng×Dày)	5000×5000×38 (μm)
Vật liệu tấm màng	SiO ₂ /Si
Vật liệu mạch dẫn	Au/Cr
Kích thước áp trở (Dài×Rộng×Dày)	1220×650×0,15 (μm)
Chiều cao chân cảm biến	530 (μm)

3. Mô phỏng và phân tích đặc tính hoạt động của

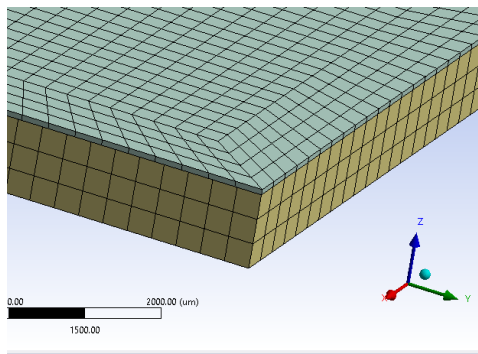
Phương pháp mô phỏng phần tử hữu hạn FEM được ứng dụng để mô tả đặc tính hoạt động của cảm biến áp suất hoạt động dựa trên nguyên lý áp trở [15]. Trước tiên, mô hình mô phỏng phần tử hữu hạn được thiết lập trong môi trường ANSYS Workbench như Hình 3. Cấu trúc hình học của mô hình từ bản thiết kế 3D được đưa vào chương trình ANSYS thông qua định dạng dữ liệu *.IGES. Trong mô hình phân tích, về cơ bản cấu trúc cảm biến được tách làm hai vật thể (body) có liên kết (contact) theo kiểu gắn cứng không tách rời (No Separation), bao gồm: Phần màng cảm biến (cả tấm màng mỏng silicon và mạch dẫn điện trên đó) và phần khung viền bao quanh cảm biến áp suất. Nhằm mục đích giảm thời gian mô phỏng nhưng vẫn đảm bảo độ chính xác tính toán, mô hình phân tích phần tử hữu hạn của cảm biến thiết kế chú trọng vào việc thiết lập cấu trúc lưới và cấu tạo của phần tử khi chia nhỏ. Khi chia lưới trong mô hình FEM, các phần tử nhỏ cấu tạo nên tấm màng cảm biến

và khung viền cảm biến được ràng buộc hình học là các khối phần tử hình lập phương 8 nút (Hexagon-8 nodes) như Hình 3(b). Việc sử dụng cấu trúc phần tử chia lưới dạng vuông như vậy sẽ giúp mô hình máy tính giải quyết nhanh và chính xác các bài toán mà không cần phải chia nhỏ kích thước các phần tử. Trong mô phỏng này, các kích thước phần tử được giới hạn không quá 0,2mm. Từ đó, nhờ kỹ thuật chia lưới với kết hợp giữa phương pháp ràng buộc cấu trúc phần tử và chế độ xếp lớp bề mặt lưới (Face meshing), mô hình mô phỏng có tất cả 2201 phần tử (Elements) và 15596 nút (Nodes).

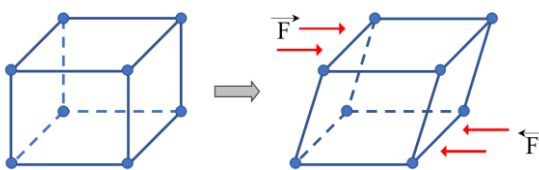
Trong mô phỏng, tấm màng của cảm biến bị tác động trực tiếp từ áp lực bên ngoài trong khi khung viền được thiết lập ràng buộc như Hình 4. Để thiết lập ràng buộc cho mô hình mô phỏng, lựa chọn cố định (Fixed Support) được sử dụng cho 4 mặt đáy của khung viền cảm biến (phần sẽ đặt lên bề mặt của mạch điều khiển hệ thống MAV). Dưới tác động của áp suất, tấm màng của cảm biến sẽ là bộ phận trực tiếp bị biến dạng, co giãn, và thay đổi. Do đó, áp suất tác động cần đặt tại vị trí giữa tâm của tấm màng. Các thông số vật liệu, vùng giới hạn giá trị lực tác động ngoài được giới thiệu trong Bảng 2.



(a) Mô hình FEM phân tích cảm biến áp suất cho MAV

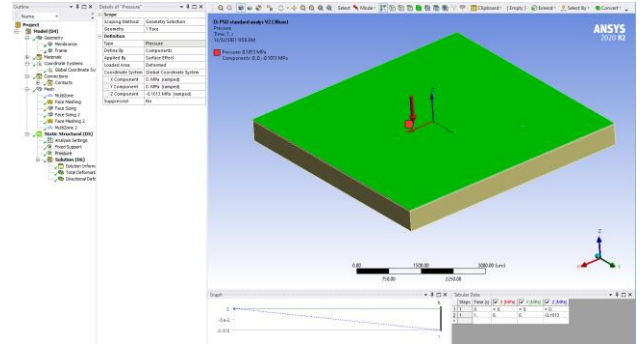


(b) Cấu trúc liên kết phần tử giữa các lớp trong mô hình FEM



(c) Đặc điểm cấu trúc phần tử và nguyên lý biến đổi của phần tử trong mô hình khi có lực tác động

Hình 3. Mô hình mô phỏng FEM

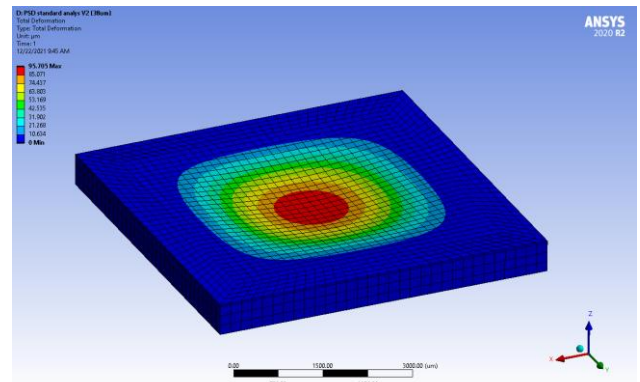


Hình 4. Áp suất tác động lên tấm màng cảm biến trong mô hình FEM

Bảng 2. Thông số thiết lập mô phỏng

Đặc điểm	Thông số	Giá trị
Vật liệu tấm màng (Silicon)	Mô-đun Young	160 GPa
	Hệ số Poisson	0,2
	Giới hạn chịu nén	250 MPa
	Tỷ trọng	2330 kg/m ³
Vật liệu khung viền	Mô-đun Young	200 GPa
	Hệ số Poisson	0,3
	Giới hạn chịu nén	250 MPa
	Tỷ trọng	7850 kg/m ³
Giới hạn áp suất tác động		0 ÷ 1,2 atm

Kết quả mô phỏng của mô hình phân tích được giới thiệu trong Hình 5. Trong mô hình mô phỏng FEM này, việc thực hiện tính toán mô phỏng trong chương trình ứng với một giá trị đầu vào chỉ mất 6 giây (đối với cấu hình máy tính có CPU: i7K- 3.5GHz và 32Gb Ram-Bus 2400MHz). Dựa trên kết quả mô phỏng, dễ dàng nhận thấy, tấm màng cảm biến sẽ có xu hướng biến dạng lõm (hoặc lồi) theo hướng tác động của áp suất đặt vào giữa tâm của tấm màng silicon. Các biến dạng này sẽ lan tỏa đều từ tâm về bốn mép khung viền của cảm biến, và gần như các cạnh viền không chịu sự tác động nào khi áp lực đạt giá trị cực đại trong vùng giới hạn áp suất đầu vào của cảm biến cần thiết kế.

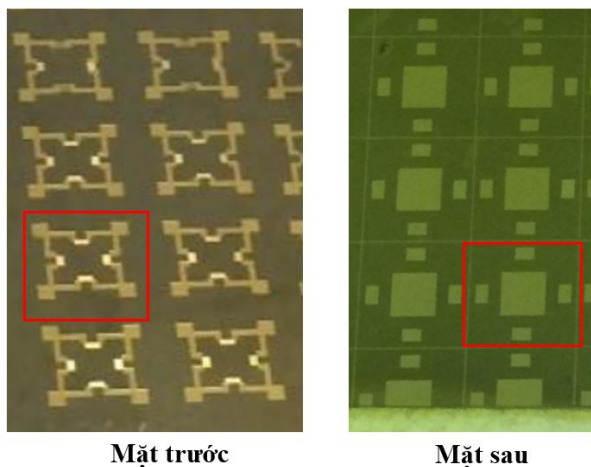


Hình 5. Kết quả mô phỏng của cảm biến áp suất trong ANSYS

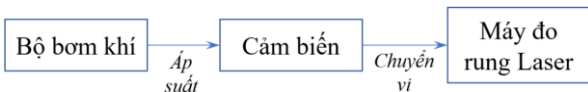
4. So sánh mô phỏng và thực nghiệm

Dựa trên các điều kiện cho phép về thiết bị, mô hình thực nghiệm để kiểm chứng kết quả mô phỏng và đánh giá thiết kế cảm biến được thiết lập. Trước tiên, cảm biến áp suất hoạt động với nguyên lý áp trở được tạo ra tuân

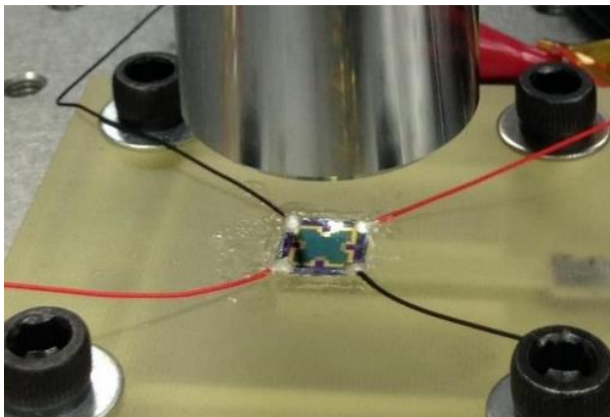
thủ theo quy trình thông thường của hệ thống sản xuất Vi Cơ điện tử (MEMs). Một miếng Wafer có thể gia công và sản xuất cùng lúc nhiều cảm biến áp suất dùng cho các MAV như Hình 6. Hệ thống thí nghiệm để kiểm chứng khả năng hoạt động của cảm biến được giới thiệu ở Hình 7. Cảm biến được gá lên một bộ gá rỗng ruột được gia định như khung máy bay MAV; Áp suất bên trong bộ đồ gá này được thay đổi nhờ vào hệ thống bơm áp suất điều khiển tự động (Syringe). Một đồng hồ đo áp suất (áp kế) Sensys SMAA được sử dụng để đo áp suất thực tế áp đặt lên tấm màng cảm biến. Đồng thời, độ lệch tại tâm màng ngăn (độ lồi/lõm của tấm màng cảm biến) khi chịu áp lực của không khí được đo bởi một máy đo rung laser Poytec MSA-050 (Laser Vibrometer). Ngoài ra, để loại bỏ toàn bộ tác động bên ngoài (như rung động...) lên kết quả đo đạt của thí nghiệm, các thiết bị đều được gắn cứng trên một bàn chống rung của Daeil Systems (mẫu DVIA-MO1000).



Hình 6. Tấm silicon được gia công tạo các cảm biến áp suất



(a) Sơ đồ nguyên lý hệ thống thí nghiệm

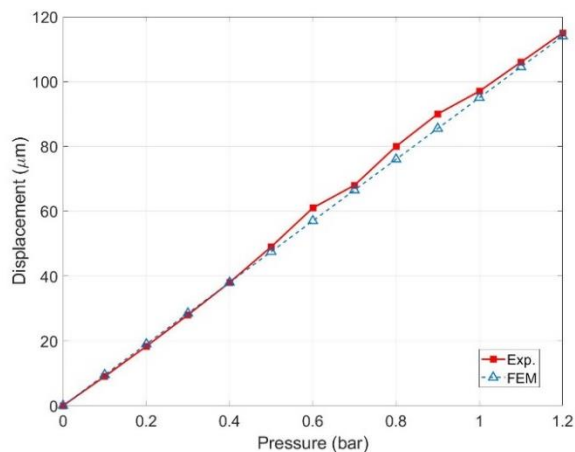


(b) Cảm biến được gá đặt trong quá trình đo

Hình 7. Hệ thống thí nghiệm đánh giá hoạt động của cảm biến áp suất thiết kế dựa trên nguyên lý áp trở

Kết quả so sánh giữa mô phỏng và thực nghiệm được giới thiệu trong Hình 8. Dựa trên kết quả này, ta thấy được

cảm biến có xu hướng biến dạng tăng dần, ổn định theo chiều tăng của áp suất tác động lên cảm biến. Kết quả mô phỏng thể hiện độ biến dạng của cảm biến là một hàm hoàn toàn tuyến tính theo áp suất đầu vào, trong khi kết quả thực nghiệm thể hiện kết quả có một số sai lệch tương đối nhỏ so với kết quả mô phỏng ứng với từng giá trị đầu vào cụ thể. Các sai số này có thể đến từ sai số độ chia trên các thiết bị đo, độ trễ của thu hồi tín hiệu đo trong hệ thống, hoặc nhiễu điện từ của các thiết bị đo... Tuy vậy, các sai số này không đáng kể, thể hiện việc chế tạo cảm biến đạt được kết quả tốt và theo đúng các dự đoán có được trong quá trình thiết kế và mô phỏng.



Hình 8. So sánh kết quả mô phỏng và thực nghiệm

5. Kết luận

Bài báo trình bày thiết kế và phân tích đặc tính hoạt động của cảm biến áp suất không khí hoạt động dựa trên nguyên lý áp trở sử dụng cho các thiết bị bay MAV. Các kỹ thuật phân tích nâng cao (như: Kỹ thuật chia lưới mịn, phân định vùng định phần tử, định hướng phân định bề mặt lưới...) đã được sử dụng trong mô hình phân tích FEM của mẫu cảm biến áp suất không khí được thiết kế.

Dựa trên các đề xuất chi tiết từ mẫu thiết kế, linh kiện cảm biến áp suất dựa trên nguyên lý áp trở đã được chế tạo. Kết quả kiểm thử từ khả năng hoạt động của cảm biến này được so sánh với kết quả mô phỏng FEM từ mô hình phân tích đã đề xuất. Từ kết quả so sánh thực nghiệm và mô phỏng, nhóm tác giả nhận thấy, các thiết lập điều kiện biên và giá định đầu vào trong mô hình mô phỏng FEM đề xuất là hợp lý. Về cơ bản, mức độ biến dạng (lồi/lõm của tấm màng cảm biến) thay đổi gần như tuyến tính tương ứng với thay đổi của áp suất đầu vào.

Nghiên cứu cũng tạo tiền đề để cung cấp linh kiện cần thiết sử dụng trong các thiết bị bay UAV nói chung.

Lời cảm ơn: Bài báo này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng với đề tài có mã số: T2021-02-28.

Nhóm tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ về trang thiết bị thực nghiệm để hoàn thành kết quả nghiên cứu trong bài báo từ các phòng nghiên cứu IMS và PREMA của trường Đại học Soongsil - Hàn Quốc.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] P. N. Sivasankaran, T. A. Ward, R. Vijayapuri, M. R. Johan, "Static strength analysis of dragonfly inspired wings for biomimetic micro aerial vehicles", *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 29, no. 2, 2016, pp. 411–423. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2016.02.007>
- [2] Y. Lei, H. Wang, "Aerodynamic Optimization of a Micro Quadrotor Aircraft with Different Rotor Spacings in Hover", *Applied sciences*, vol 10, no. 4, 2020, 1272. <https://doi.org/10.3390/app10041272>
- [3] C. Zhao, H. Xu, M. Sun, H.Zang, "Micro Aerial Vehicle OVIAB research and application in the city distribution networks", *2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, 14825560, 2014. <https://doi.org/10.1109/CICED.2014.6991738>
- [4] S.S. Kumar, A. Tanwar, "Development of a MEMS-based barometric pressure sensor for micro air vehicle (MAV) altitude measurement", *Microsystem Technologies*, vol. 26, 2020, pp. 901-912.
- [5] R. S. Muller, R. T. Howe, S. D. Senturia, R. L. S. D. Smith, R. M. White, *Microsensor*, IEEE Press, Newyork, NY, 1991.
- [6] H. Fujita, "A decade of MEMS and its future", in *Proc. IEEE The Tenth Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems. An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robots*, 1997, pp. 1–7.
- [7] Z. Mehmood, I. Haneef, F. Udre, "Material selection for optimum design of MEMS pressure sensors", *Microsystem Technologies*, vol. 26, 2020, pp. 2751-2766.
- [8] A.Nallathambi, T.Shanmuganatham, D.Sindhanaiselvi, "Design and Analysis of MEMS based Piezoresistive Pressure sensor for Sensitivity Enhancement", *Materialstoday: Proceedings*, Vol. 5, Iss. 1(1), 2018, pp. 1897-1903.
- [9] M. Krysztof, T. Grzebyk, A. Górecka-Drzazga, K. Adamski, J. Dziuban, "Electron optics column for a new MEMS-type transmission electron microscope". *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, vol. 66 no. 2, 2018, pp.133–137. <https://doi.org/10.24425/119067>.
- [10] R. B. Mishra, N. El-Atab, A. M. Hussain, M. M. Hussain, "Recent Progress on Flexible Capacitive Pressure Sensors: From Design and Materials to Applications", *Advanced materials technologies*, Vol. 6, Issue 4, 2001023, 2021.
- [11] Bijender, A. Kumar, "Flexible and wearable capacitive pressure sensor for blood pressure monitoring", *Sensing and Bio-Sensing Research*, Vol. 33, 100434, 2021.
- [12] V. Mosser, J. Suski, J. Goss, E. Obermeier, "Piezoresistive pressure sensors based on polycrystalline silicon", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 28, Issue 2, 1991, pp. 113-132.
- [13] M. Tilli, *Silicon Wafers*, Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies, 2010.
- [14] Y. Wang, X. Zheng, L. Liu, & Z. Li, "A novel structure of pressure sensors". *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 38, no. 8, 1991, pp. 1797–1802. <https://doi.org/10.1109/16.119017>
- [15] Trần Đức tân, Vũ Ngọc Hùng, Nguyễn Thăng Long, Nguyễn Phú Thùy, "Nghiên cứu thiết kế và mô phỏng cảm biến gia tốc áp điện trở có độ nhạy cao", *Tuyển tập hội nghị toàn quốc lần thứ 3 về cơ điện tử (VCM2006)*, 2006, pp. 161-167.