

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ

Phan Hữu Phú

MÔ PHỎNG VÀ TỐI ƯU HÓA VI GẮP CÓ CẢM BIẾN
DÙNG ĐỂ THAO TÁC VỚI CÁC VI VẬT THỂ

Chuyên ngành: Kỹ thuật điện tử

Mã số: 62 52 02 03

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ
CÔNG NGHỆ KỸ THUẬT ĐIỆN TỬ, TRUYỀN THÔNG

Hà Nội – 2016

Công trình được hoàn thành tại: Trường Đại học Công nghệ,
Đại học Quốc gia Hà Nội

Người hướng dẫn khoa học:

1. PGS. TS. CHỦ ĐỨC TRÌNH

2. PGS.TS. VŨ NGỌC HÙNG

Phản biện: PGS.TS. Nguyễn Văn Chúc

Viện Tên lửa, Viện KH&CN Quân sự.....

Phản biện: PGS.TS. Trần Đức Tăng.....

Học viện Kỹ thuật Quân sự.....

Phản biện: TS. Nguyễn Đức Minh.....

Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng cấp Đại học Quốc gia
chấm luận án tiến sĩ họp tại Trường ĐH Công Nghệ, ĐHQG HN
vào hồi 14 giờ 00 ngày 20 tháng 12 năm 2016.

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Quốc gia Việt Nam
- Trung tâm Thông tin - Thư viện, Đại học Quốc gia Hà Nội

DANH MỤC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA TÁC GIẢ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. 2011, Phan Huu Phu, Chu Duc Trinh, Temperature profile optimization for Silicon-Polymer Electrothermal Microgripper, *International Conference on Advance Technologies for Communications*, Danang, Vietnam, pp.311-314.
2. 2011, Phan Huu Phu, Chu Duc Trinh, Nguyen Tien Dung, Thermal profile optimization and mechanical analysis for a silicon polymer electrothermal sensing microgripper, *International Workshop on Nanotechnology and Application*, Vung Tau, Vietnam, pp. 403-407.
3. 2012, Nguyen Ngoc Viet, Nguyen Minh Ngoc, Phan Huu Phu, Chu Duc Trinh, Optimized heater source silicon-polymer electrothermal microgripper, *The 6th Vietnam Conference on Mechatronics*, pp.853-857.
4. 2012, Phan Huu Phu, Nguyen Ngoc Viet, Nguyen Minh Ngoc, Vu Ngoc Hung, Chu Duc Trinh, Simulation and Optimization of a Silicon-Polymer Bimorph microgripper, *Vietnam Journal of Mechanics*, VAST, Vol. 34, No. 4, pp. 247 – 259.
5. 2013, Phan Huu Phu, Chu Duc Trinh, Control circuit design for a sensing microgripper, *International Conference on Advances in Materials Science and Engineering*, *Adv. Sci. Lett.* 19, pp. 1001-1006, ISSN: 1936-6612.
6. 2015, Phan Huu Phu, Nguyen Ngoc Viet, Nguyen Minh Ngoc, Chu Duc Trinh, Analytical modeling of a silicon-polymer electrothermal microactuator, *Microsystem Technologies*, DOI :10.1007/s00542-015-2700-7, ISSN: 0946-7076.

Chương 1. TỔNG QUAN

1.1 Vi gấp, hệ thống chấp hành và cảm biến

Vi gấp là công cụ thu nhỏ có thể thao tác, gấp, kẹp, dịch chuyển các vi vật thể có kích thước nằm trong dải micro mét. Do nhu cầu phát triển quy trình sản xuất, lắp ráp và thao tác với các vi vật thể ngày càng tăng, vi gấp có vai trò quan trọng.

Một hệ thống vi gấp tích hợp cảm biến là rất cần thiết trong thực tế để ghi nhận thông tin phản hồi về chuyển vị và lực tác động lên đối tượng được thao tác trên hệ thống vi gấp. Để đạt được độ tin cậy và an toàn trong các thao tác, nhiều loại cảm biến lực và chuyển vị tích hợp đã được thiết kế nhằm thu thập thông tin theo thời gian thực.

1.2 Giới thiệu các loại vi gấp

Phần này giới thiệu sự phát triển của các loại vi gấp phổ biến hiện nay cùng các đặc điểm cơ bản của chúng.

1.3 Giới thiệu các loại cảm biến dùng cho vi gấp

Phần này giới thiệu tổng quan về các loại cảm biến đang được nghiên cứu và sử dụng rộng rãi cho hệ thống vi gấp, gồm cảm biến quang học, cảm biến áp trở và cảm biến điện dung.

1.4 So sánh các loại vi gấp và cảm biến dùng cho vi gấp

Phần này so sánh các ưu, nhược điểm của từng loại vi gấp và hệ thống cảm biến dùng cho vi gấp. Từ đó làm nổi bật lý do tại sao chọn vi gấp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến làm đối tượng nghiên cứu của luận án này.

1.5 Vi gắp tích hợp cảm biến nhiệt điện silic-polyme

Trong các loại vi gắp và hệ thống cảm biến đã được giới thiệu, mỗi cấu trúc đều có ưu và nhược điểm riêng. Vi gắp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến với nhiều ưu điểm đã được giới thiệu, chế tạo và đo đạc [11]. Cấu trúc vi gắp này được sản xuất dựa trên công nghệ vi khối, công nghệ polyme, và hoàn toàn tương thích với công nghệ CMOS. Các thông số của vi gắp cho thấy nó có thể thao tác với vi vật thể hiệu quả hơn, chính xác hơn so với các vi gắp đã phát triển trước đó. Chuyển vị của vi gắp lên tới 32 μm và nhiệt độ hoạt động trung bình 176 $^{\circ}\text{C}$ tại điện áp 4,5 V. Vi gắp này có thể thao tác với các vi vật thể có kích thước từ 8 đến 40 μm và tích hợp cảm biến áp trở có thể xác định được cả chuyển vị và lực kẹp. Với những ưu điểm kể trên, vi gắp này được lựa chọn làm đối tượng nghiên cứu tiếp theo cho luận án này. Để thuận tiện cho các nghiên cứu trình bày trong luận án, chi tiết của vi gắp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến được trình bày trong phần này.

Chương 2.

MÔ PHỎNG, PHÂN TÍCH VÀ TỐI ƯU VI CẤU TRÚC VI GẮP NHIỆT ĐIỆN SILIC-POLYME TÍCH HỢP CẢM BIẾN

2.1 Giới thiệu

Đầu tiên, mô hình mô phỏng mới cho hệ thống vi gắp được thực hiện. Tiếp theo, phân bố nhiệt độ của vi gắp ở trạng thái hoạt động cân bằng sẽ được tính toán dựa trên mô hình dẫn nhiệt và đối lưu nhiệt. Chuyển vị và lực tác động lên đối tượng sẽ được tính toán bằng cách sử dụng phương pháp cơ học cổ điển là chuyển vị trực tiếp

được để tìm ra phương trình chuyển vị và lực kẹp. Cuối cùng là những thay đổi về cấu trúc và phân bố lại nguồn nhiệt trên cơ cấu chấp hành của vi gấp để giảm nhiệt độ và công suất hoạt động cho phù hợp với các ứng dụng trong lĩnh vực có yêu cầu khắt khe như thao tác với tế bào sống, mặt khác không làm thay đổi chuyển vị và lực kẹp so với phiên bản đầu tiên.

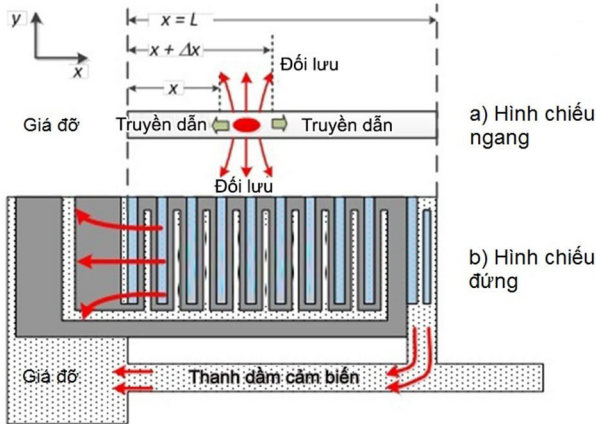
2.2 Mô hình mô phỏng

Hoạt động của vi gấp dựa trên hai chuyển đổi: điện năng thành nhiệt năng và nhiệt năng thành cơ năng (chuyển vị và lực kẹp). Trong mô hình mô phỏng đầu tiên, tác giả [11, 86] mới chỉ lập được mô hình chuyển đổi từ nhiệt năng sang cơ năng, nhiệt lượng được ước tính và đưa vào chương trình mô phỏng như thông số khởi tạo. Bên cạnh đó, mô hình này chỉ mới ở dạng hai chiều.

Chương trình COMSOL được sử dụng để nâng cấp, xây dựng mô hình và mô phỏng hoạt động cho hệ vi gấp này. Cấu trúc ba chiều (3D) được thiết lập với các kích thước và thông số vật lý của từng lớp vật liệu đúng như phiên bản đã được chế tạo thực tế. Các điều kiện môi trường xung quanh vi gấp cũng được đưa vào (mặc định là môi trường không khí ở nhiệt độ phòng). Với mô hình mới này thì độ đàn hồi, phân bố nhiệt độ, công suất tiêu thụ, chuyển vị, và lực kẹp sẽ được xác định khi cấp một giá trị điện áp vào hai đầu của sợi nhôm.

2.3 Phân tích về mặt nhiệt học

Có ba cơ chế chuyển động của nhiệt lượng trong cấu trúc vi gấp này khi hoạt động, đó là truyền dẫn, đối lưu và phát xạ nhiệt.



Hình 2.2 Hình chiếu bằng và hình chiếu đứng của vi gắp để phân tích đặc tính nhiệt

Theo Hình 2.2, nhiệt năng truyền từ cơ cấu chấp hành vào giá đỡ thông qua phần tiếp giáp giữa chúng. Một phần nhiệt khác cũng truyền vào giá đỡ thông qua thanh dầm đỡ cảm biến. Ngoài cơ chế truyền dẫn, nhiệt lượng bị thất thoát một phần do đối lưu không khí bao quanh cơ cấu vi gắp.

Xuất phát từ trạng thái cân bằng của hệ thống và đặt các điều kiện biên, với q_G là công suất tỏa nhiệt trên cơ cấu chấp hành, phương trình phân bố nhiệt độ trên cơ cấu chấp hành thu được:

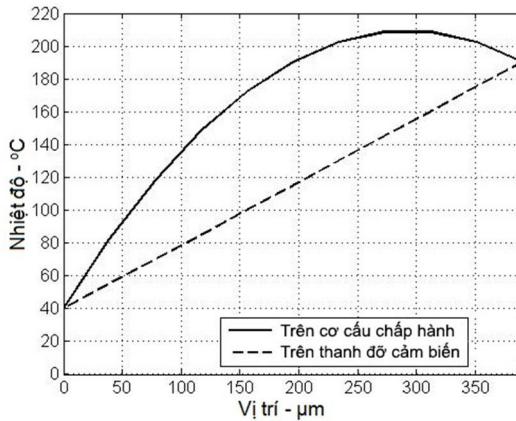
$$T(x) = C_1 \cdot e^{\frac{\tau}{L}x} + C_2 \cdot e^{-\frac{\tau}{L}x} + T_0 + \frac{q_G}{2\alpha} \quad (2.18)$$

Với $\tau = L\sqrt{(2\alpha/\lambda t)}$ và

$$C_1 = -\frac{q_G}{\alpha} \cdot ch\tau \cdot \left(\frac{\left(\frac{1}{ch\tau} - 1\right)}{th\tau - \tau} + e^{-\tau} \right) \quad (2.16)$$

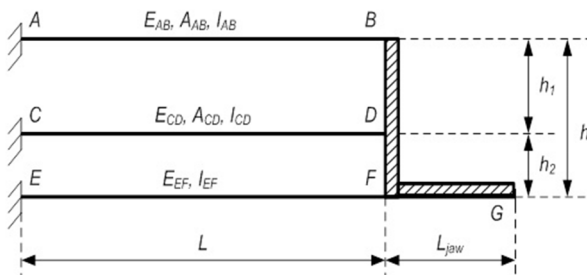
$$C_2 = \frac{q_G}{\alpha} \cdot ch\tau \cdot \left(\frac{\left(\frac{1}{ch\tau} - 1 \right)}{th\tau - \tau} - e^{-\tau} \right) \quad (2.17)$$

Hình 2.3 hiển thị kết quả tính toán phân bố nhiệt độ tương ứng với vị trí dọc theo chiều dài của cơ cấu chấp hành. Phân bố nhiệt độ biến thiên theo dạng parabol ở trên cơ cấu chấp hành, còn trên thanh đỡ cảm biến là tuyến tính. Nhiệt độ tại đầu kẹp xấp xỉ 200 °C và tại điểm cực đại là khoảng 210 °C.



Hình 2.3 Kết quả tính toán phân bố nhiệt độ trên cơ cấu chấp hành

2.4 Phân tích cơ học vi gấp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến

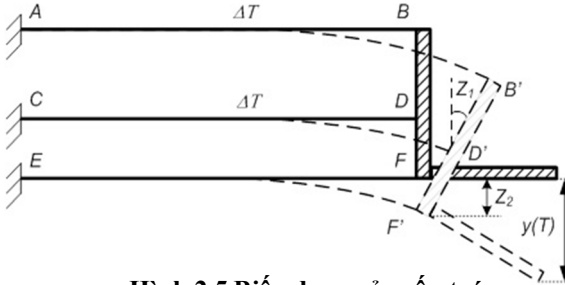


Hình 2.4 Mô hình cơ hệ để phân tích vi gập nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến

Mô hình sử dụng để phân tích vi kẹp cảm biến do thay đổi nhiệt độ trên cơ cấu chấp hành được thể hiện ở Hình 2.4. Đoạn thẳng AB , CD và EF biểu diễn cho cấu trúc các ngăn xếp silic-polyme, xương silic và thanh cảm biến lực áp trở. Các thanh dầm này được cố định một đầu và cùng nối với một thanh cứng BDF ở đầu còn lại. E_{ij} , A_{ij} và I_{ij} lần lượt là môđun đàn hồi Young của vật liệu, diện tích mặt cắt ngang và momen quán tính của mặt cắt ngang ứng với dầm ij .

Chiều dài đoạn AB sẽ tăng khi cấp điện áp (do các ngăn xếp silic-polyme giãn nở). Giá trị các thông số tương đương của thanh AB đã được công nhận tại [86, 101]. Trong phương pháp này, giả sử thay đổi nhiệt độ trung bình trên các thanh AB và CD là ΔT .

2.4.1 Phân tích chuyển vị



Hình 2.5 Biến dạng của cấu trúc

Hình 2.5 biểu diễn biến dạng của hệ do nhiệt độ thay đổi trên dầm AB và CD . Trong hình, Z_1 và Z_2 xác định chuyển vị xoay và chuyển vị thẳng chưa biết của thanh cứng BDF . Giãn nở theo chiều dọc của dầm EF là không đáng kể và được bỏ qua. Để tính toán chuyển vị và lực kẹp, phương pháp chuyển vị trực tiếp được sử dụng

Hình 2.8 được dùng để tính lực tương tác giữa đầu kẹp với đối tượng. Tuân theo các bước, ta thu được kết quả của lực kẹp:

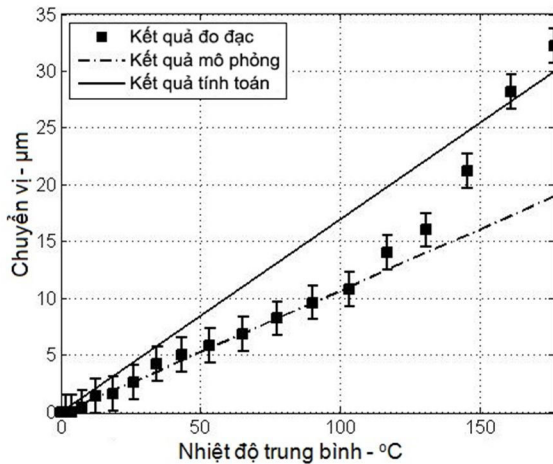
$$F = \frac{R_1(T)(r_{22}L_{jaw} - r_{12}) - h_3 \det K}{r_{11} - 2r_{12}L_{jaw} + r_{22}L_{jaw}^2} \quad (2.34)$$

2.5 So sánh kết quả tính toán, đo lường và mô phỏng

Việc so sánh kết quả giữa các phương pháp đo đạc thực tiễn, tính toán và mô phỏng là cần thiết để xác nhận tính đúng đắn của mô hình mô phỏng và công thức toán học của hệ vi gấp. Từ đó, các phương pháp trên được sử dụng song song với nhau để tối ưu hoạt động của vi gấp cũng như để xác nhận mô hình khi phải thay đổi một số thông số cho phù hợp với từng ứng dụng cụ thể.

Hình 2.9 biểu diễn kết quả tính toán, mô phỏng và đo đạc thực nghiệm của chuyển vị so với nhiệt độ hoạt động trung bình của vi gấp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến. Với khoảng nhiệt độ trung bình từ 0 đến 125 °C thì các giá trị của kết quả mô phỏng và đo đạc thực nghiệm tương đối đồng nhất. Còn với khoảng nhiệt độ trung bình cao hơn thì xuất hiện sự sai lệch hơn 30%. Lý giải cho nguyên nhân sai lệch này là do biến dạng phi tuyến của lớp SU-8 ở dải nhiệt độ cao, trong khi đó chưa đưa được tính chất này vào trong mô hình mô phỏng. Điều này không đáng ngại, vì mục tiêu nhiệt độ hoạt động của vi gấp này sẽ phải dưới mức 100 °C. Nguyên nhân tiếp theo là do đặc trưng của cấu trúc vi gấp, chuyển vị sẽ phụ thuộc vào sự phân bố nhiệt độ trên chiều dài cơ cấu chấp hành chứ không phải từ giá trị nhiệt độ trung bình của chúng. Ở kết quả mô phỏng, giá trị nhiệt độ này được lấy trung bình nhiệt độ từ các vị trí cách đều nhau theo chiều dài của vi gấp. Mặt khác, ở phương pháp đo đạc thực nghiệm,

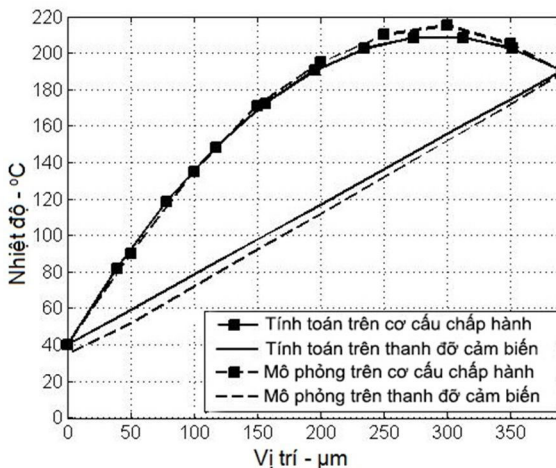
phép đo được thực hiện thông qua việc cưỡng bức nhiệt lượng từ bên ngoài vào hệ vi kẹp hoặc sử dụng phương pháp quang học để đo nhiệt độ [11, 86] nên chỉ thu được nhiệt độ trung bình và có một sai số nhất định. Do đó, sự so sánh giá trị chuyển vị đối với nhiệt độ trung bình giữa các phương pháp không thể hiện được nhiều bản chất hoạt động của vi gấp, và chỉ khẳng định một cách tương đối sự đồng nhất giữa mô hình mô phỏng và đo đạc thực nghiệm.



Hình 2.9 Chuyển vị của các đầu kẹp ở trạng thái cân bằng với nhiệt độ hoạt động trung bình của hệ thống

Đối với kết quả của phương pháp tính toán so với hai phương pháp còn lại, các giá trị này đều nằm trong một kênh với nhau. Tuy nhiên sự sai lệch cũng được ghi nhận do nhiều nguyên nhân khác nhau. Đầu tiên, phương pháp tính toán đã bỏ qua một số yếu tố như đối lưu nhiệt và phát xạ nhiệt. Bên cạnh đó các phương trình toán học không đề cập đến hiện tượng điện trở của lớp nhôm thay đổi theo nhiệt độ. Hơn nữa, cơ cấu chấp hành và thanh dầm đỡ cảm biến được xem như các thanh đơn giản có thể tạo sai lệch trong phương

pháp phân tích tính toán. Tóm lại, kết quả của cả ba phương pháp cho thấy sự ràng buộc giữa chuyển vị và nhiệt độ hoạt động trung bình của vi gấp là đồng nhất ở dải nhiệt độ trung bình thấp hơn 100 °C và có thể sử dụng được.



Hình 2.10 Phân bố nhiệt độ hoạt động trên cơ cấu chấp hành vi gấp

Kết quả phân bố nhiệt độ dọc theo chiều dài vi kẹp ở trạng thái hoạt động cân bằng khi cấp điện áp vào sợi nhôm (4,5 V) với phương pháp tính toán và mô phỏng biểu diễn trên Hình 2.10. Do hạn chế của phương pháp đo thực nghiệm [11, 86], nhiệt độ tại vị trí cụ thể trên cơ cấu chấp hành và thanh cảm biến không đo được một cách chính xác. Do vậy, không có kết quả đo thực nghiệm để so sánh với kết quả tính toán và mô phỏng. Từ đồ thị cho thấy có tương đồng đáng kể giữa kết quả mô phỏng và tính toán, và do đó không chỉ phương pháp toán học mà cả mô hình mô phỏng được xác nhận là phù hợp.

2.6 Tối ưu vi gấp

Nhiệt độ hoạt động tại vị trí đầu kẹp cao (gần 200 °C), do đó việc ứng dụng vi gấp này bị hạn chế, đặc biệt là trong các thao tác với các tế bào sống. Yêu cầu tối ưu cấu trúc vi gấp này để nhiệt độ hoạt động thấp hơn 100 °C được đặt ra, mặt khác việc tối ưu này phải không ảnh hưởng tới cấu trúc cơ bản ban đầu và không làm giảm chuyển vị hay lực kẹp.

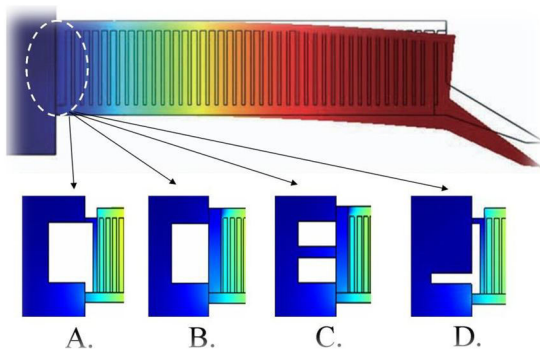
2.6.1 Tối ưu về mặt cấu trúc

Hình 2.10 cho thấy nhiệt độ cao tập trung vào các ngăn xếp silic-polyme ở gần phía đầu kẹp, còn các khối ở gần giá đỡ (đế) có nhiệt độ thấp hơn nhiều. Hiện tượng này xảy ra bất kể nhiệt lượng tỏa ra ở từng vị trí ngăn xếp bằng nhau khi có dòng điện chạy qua sợi nhôm. Nguyên nhân là do nhiệt lượng truyền dẫn vào giá đỡ. Đối lưu nhiệt do không khí xung quanh cũng có thể là một nguyên nhân, tuy nhiên trong trường hợp này nó không ảnh hưởng đến phân bố nhiệt như vậy do tiết diện tiếp xúc giữa không khí và cơ cấu là đồng đều.

Từ phương trình tính toán (2.2 và 2.18), ta thấy chúng chỉ thể hiện cơ chế bên trong cấu trúc vi gấp, còn phần tiếp giáp với đế chỉ xem là một điều kiện biên (xem phương trình 2.8) khi xem phần đế này luôn có nhiệt độ bằng nhiệt độ phòng. Việc sử dụng phương trình phân bố nhiệt của vi gấp để tìm kiếm vùng cực trị cho sự truyền nhiệt ra bên ngoài (trong đó có phần giá đỡ) là không khả thi. Bước đầu tiên trong quá trình tối ưu nhiệt độ hoạt động của vi gấp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến là sử dụng phương pháp thử nghiệm và sàng lọc kết quả thông qua chương trình mô phỏng.

Hình 2.11 chỉ ra một số cách cắt bỏ một phần silic ở vùng tiếp giáp để giảm cơ chế truyền nhiệt. Phương án D có kết quả tốt nhất

theo phương diện giảm nhiệt độ hoạt động (nhiệt độ ở cao nhất giảm xuống còn 82 °C so với 155 °C của cấu trúc ban đầu – giảm 47%). Thêm vào đó, chuyển vị của đầu kẹp cũng tăng lên 30% (từ 3,02 μm đến 4,05 μm).



Hình 2.11 Các phương án thay đổi về cấu trúc trên cơ cấu chấp hành

2.6.2 Tối ưu về mặt nhiệt độ

Từ công thức tổng quát về phân bố nhiệt độ 2.18, chuyển vị 2.17 và lực kẹp 2.35, không có mối liên hệ nào giữa phân bố nhiệt độ trên chiều dài của vi gấp với các thông số còn lại. Do đó không thể tìm được cực trị của hàm số khi thay đổi phân bố nhiệt độ.

Bước đầu tiên để tối ưu phân bố nhiệt độ dọc cánh tay của vi gấp ở trạng thái cân bằng là đánh giá tính hiệu quả của một đơn vị nhiệt lượng tại từng vị trí ngăn xếp silic-polyme cụ thể. Sau khi đánh giá được vai trò giãn nở của từng ngăn xếp tại mỗi vị trí khác nhau, một số phép mô phỏng được thực hiện với tổng giá trị công suất như ban đầu nhưng không dàn đều mà tập trung nhiệt lượng theo giá trị tăng dần tương ứng với vai trò của vị trí ngăn xếp. Kết quả cho thấy phân bố nhiệt độ trên cánh tay gấp đó được dàn đều hơn và giá trị chuyển vị tăng lên so với cách thức cấp nhiệt dàn đều như ban đầu

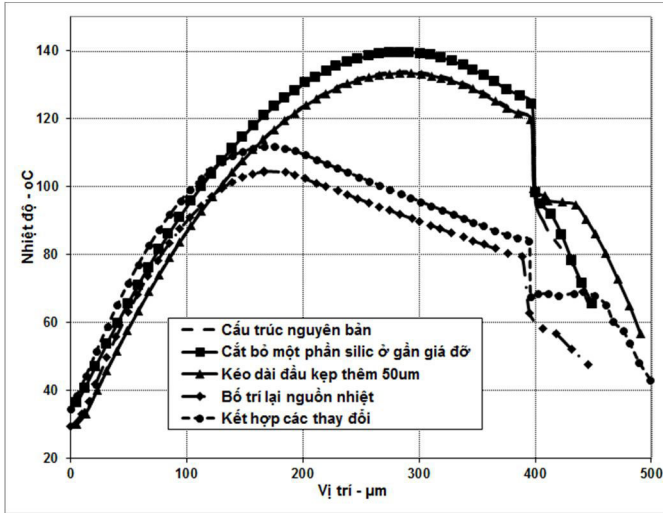
(nhiệt lượng tỏa ra đồng đều theo dọc sợi nhôm). Tuy nhiên, để ứng dụng được thay đổi này vào cơ cấu chấp hành thực tế của vi gấp, cần phải thay đổi kích thước của lớp nhôm trên bề mặt của cơ cấu chấp hành – với vai trò là nguồn cấp nhiệt. Điều này sẽ làm cho cấu trúc của cơ cấu chấp hành bị thay đổi lớn về mặt cấu trúc và có thể ảnh hưởng tới các đặc điểm cơ học và các tính chất khác của vi gấp này. Do đó, tác giả đề xuất cách giải quyết khác là chỉ cấp nhiệt vào các vị trí cần thiết và không cấp nhiệt cho các vị trí ngăn xếp silicopolyme còn lại. Có nghĩa là ta có thể giữ nguyên độ rộng của lớp nhôm, phần không được cấp nhiệt sẽ bị nối tắt về mặt dẫn điện.

Cơ cấu chấp hành gồm 40 ngăn xếp silic-polymer và sẽ được đánh số từ 1 đến 40 tính từ phần tiếp giáp với giá đỡ ra phía đầu kẹp. Kết quả mô phỏng cho thấy “tắt/mở” nhiệt lượng tại một số vị trí đã khắc phục vấn đề phân bố nhiệt độ trên cơ cấu chấp hành. So sánh kết quả mô phỏng của các phương án đề xuất, kết quả tốt nhất là giảm 15% nhiệt độ cực đại và phân bố nhiệt độ trên cơ cấu chấp hành đồng đều hơn trong khi chuyển vị không thay đổi so với phiên bản cũ. So sánh với cấu trúc vi gấp nguyên bản, phân bố nhiệt độ trên cơ cấu chấp hành đã được khắc phục đáng kể. Nhiệt độ cực đại giảm hơn 65%, trong khi chuyển vị của đầu kẹp không thay đổi và công suất tiêu thụ giảm 50%.

2.6.3 Kết hợp các tối ưu

Tác giả đề xuất kéo dài má kẹp thêm 50 μm để giảm nhiệt độ trên má kẹp. Hình 2.17 biểu diễn phân bố nhiệt độ trên cánh tay của vi gấp nhờ những thay đổi. Khi kết hợp các giải pháp trong cùng một cấu trúc thì kết quả thu được khá tốt. So với cấu trúc ban đầu, nhiệt độ cao nhất đã giảm đi hơn một nửa, nhiệt độ của đầu má kẹp chỉ

tương đương với nhiệt độ phòng trong khi vẫn giữ nguyên được chuyển vị của đầu kẹp so với phiên bản đầu tiên.



Hình 2.17 Kết quả mô phỏng của các cấu trúc

2.7 Kết luận chương 2

Chương này trình bày việc xây dựng và nâng cấp mô hình mô phỏng của hệ vi gấp. Mô hình 3D với hai sự chuyển đổi năng lượng được thiết lập cùng các điều kiện mô trường bao quanh hệ vi gấp.

Tiếp đến là phân tích, tính toán tổng quát cho hệ thống vi gấp cảm biến nhiệt điện: theo mô hình nhiệt học và mô hình cơ học cổ điển. So sánh kết quả cho thấy sự phù hợp giữa đo đạc thực nghiệm, mô phỏng và tính toán.

Tìm ra cấu trúc tối ưu với nhiệt độ hoạt động giảm 65%, nhiệt độ trên má kẹp tương đương với nhiệt độ phòng trong khi chuyển vị của đầu kẹp là không đổi so với cấu trúc đầu tiên. Mặt khác, công suất tiêu thụ của vi gấp cũng giảm được 50%.

Chương 3. THIẾT KẾ MẠCH ĐIỀU KHIỂN TÍCH HỢP

3.1 Giới thiệu

Chương này trình bày cơ chế điều khiển vi gấp và thiết kế hệ thống điều khiển tích hợp cho vi gấp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến từ tổng thể đến chi tiết từng mạch chức năng nhằm tận dụng tối đa ưu điểm của quy trình chế tạo của hệ vi gấp này tương thích với công nghệ CMOS. Trang bị một hệ điều khiển tích hợp và cùng một công nghệ chế tạo có rất nhiều ưu điểm. Việc tích hợp này cho phép thu nhỏ kích thước của cả hệ thống vi gấp một cách tối đa, giảm giá thành sản phẩm, nâng cao độ chính xác và độ tin cậy khi hoạt động.

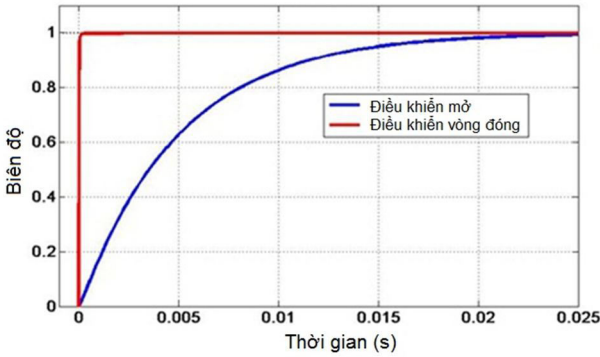
3.2 Thiết lập hàm điều khiển PD cho hệ thống

Một hệ điều khiển khép kín PID là cần thiết cho hệ thống vi gấp. Từng bước xác định hàm truyền thành phần của hệ và đánh giá đáp ứng của các cơ chế điều khiển riêng rẽ như điều khiển tỉ lệ (P), điều khiển tỉ lệ tích phân (PI), điều khiển tỉ lệ đạo hàm (PD) và hệ điều khiển PID cho hệ thống, hàm truyền tối ưu cho hệ thống là PD có phương trình:

$$H_{PD}(s) = \frac{0,03 \cdot s + 500}{0,00000025 \cdot s^2 + 0,03505 \cdot s + 501} \quad (3.12)$$

Đáp ứng của hệ thống điều khiển được thể hiện ở Hình 3.7 khi so sánh với điều khiển mở. Với cơ chế điều khiển khép kín PD, cả thời gian đáp ứng và thời gian thiết lập của lõi ra giảm khoảng 500 lần so với khi không sử dụng cơ chế điều khiển (thời gian đáp ứng giảm từ 10 ms xuống 20 ns, thời gian thiết lập cân bằng giảm từ 25

ms xuống 50 ns). Bên cạnh đó, hệ thống vẫn đảm bảo được ổn định mà không có sự giao động nào ở lối ra.



Hình 3.7 Đáp ứng của hệ thống PD và so sánh với hệ điều khiển mở

3.3 Lựa chọn công nghệ chế tạo và chương trình mô phỏng mạch điện

Mạch điều khiển tích hợp sẽ phải bao gồm cả mạch tương tự và mạch tín hiệu số, điện áp cao và dòng tiêu thụ lớn. Công nghệ Bi-CMOS 1,2 μm tiêu chuẩn của nhà sản xuất TSMC được lựa chọn. Công nghệ này có nhiều ưu điểm phù hợp với hệ vi gấp này như có các linh kiện hoạt động ở dải điện áp cao (lên đến 40 V) và các linh kiện hoạt động ở dải điện áp thấp (5 V). Mặt khác, công nghệ này đã được kiểm chứng là có độ ổn định, ít lớp mặt nạ và giá thành sản xuất phù hợp.

Mô hình mô phỏng của từng linh kiện trong công nghệ này đã được cung cấp và xây dựng thành một thư viện đầy đủ và tin cậy. Bên cạnh các thông số vật lý hoàn chỉnh, các biến thiên về kích thước, tính năng hoạt động ở các điều kiện khác nhau đã được tích hợp vào mô hình này.

Chương trình chuyên dụng để mô phỏng vi mạch bán dẫn là HPICE được lựa chọn để mô phỏng hoạt động của mạch điều khiển.

3.4 Mô hình hóa vi gấp theo các thông số điện

Để có thể thiết kế và mô phỏng hệ thống điều khiển cho hệ thống cơ học và cảm biến phản hồi, đầu tiên cần phải thiết lập được mô hình điện cho toàn bộ cơ cấu vi gấp và hệ cảm biến. Mô hình này của vi gấp cần đảm bảo các yếu tố sau: (a) Đáp ứng tần số; (b) Liên hệ giữa điện áp lõi vào và điện áp lõi ra cảm biến; và (c) công suất đúng với đo đạc thực nghiệm.

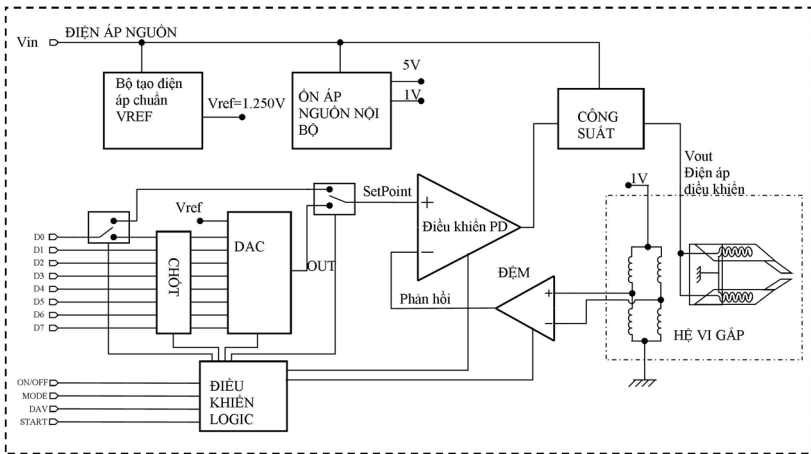
Từ những tiêu chí trên và sử dụng các linh kiện có sẵn trong công nghệ Bi-CMOS 1,2 μm , mô hình điện cho hệ vi gấp và cảm biến đã được thiết lập.

3.5 Sơ đồ khối toàn hệ thống

Mục tiêu đặt ra đối với hệ thống điều khiển là có vòng điều khiển đóng theo hàm truyền PD đã được thiết lập để hoạt động ổn định và độc lập. Hệ thống hoạt động với thông tin đầu vào là giá trị điện áp tương tự hoặc tín hiệu số 8 bit tương ứng với chuyển vị. Việc điều khiển vi gấp đến vị trí định trước cần có tốc độ nhanh và chính xác. Do vậy bộ điều khiển cần phải giám sát tín hiệu phản hồi từ hệ cảm biến và tín hiệu tham chiếu một cách liên tục. Phần chính của bộ điều khiển được lựa chọn thiết kế hoàn toàn theo điện tử tương tự với nhiều ưu điểm: đáp ứng nhanh, không có sai số, mạch đơn giản, tiết kiệm diện tích và kích thước cho cả hệ thống.

Hình 3.9 là sơ đồ khối của hệ thống điều khiển, gồm một vòng điều khiển kín với bộ đệm tín hiệu từ cảm biến, bộ tạo điện áp chuẩn tham chiếu, bộ tạo điện áp nguồn nội bộ, mạch điều khiển công suất cho cơ cấu chấp hành, các chuyển mạch logic và các khối chức năng

nhận lệnh chuyển vị cho đầu kẹp. Trong các khối chức năng kể trên, bộ tạo điện áp tham chiếu chuẩn và bộ tạo điện áp nguồn nội bộ được thiết kế để có khả năng hoạt động với dải điện áp vào lớn (từ 5V đến 40V), các khối còn lại hoạt động với điện áp thấp được cấp nguồn từ bộ tạo điện áp nguồn nội bộ. Khối chức năng nhận giá trị chuyển vị đầu kẹp được thiết kế để có thể nhận lệnh bằng tín hiệu tương tự và tín hiệu số 8 bit.



Hình 3.9 Sơ đồ khối của hệ thống vi gáp và mạch điều khiển

3.6 Thiết kế mạch chi tiết

Chi tiết các mạch chức năng của hệ thống điều khiển đã được tính toán, thiết kế và mô phỏng theo từng tiêu chí cụ thể đặt ra. Các điều kiện môi trường thay đổi, sai số ảnh hưởng đến tính năng của các linh kiện khi chế tạo trong dây chuyền công nghệ hoặc thay đổi về điện áp nguồn đều được cân nhắc trong bản thiết kế và mô phỏng. Mục đích là đảm bảo hệ thống sau khi được chế tạo có thể hoạt động đúng như mong muốn.

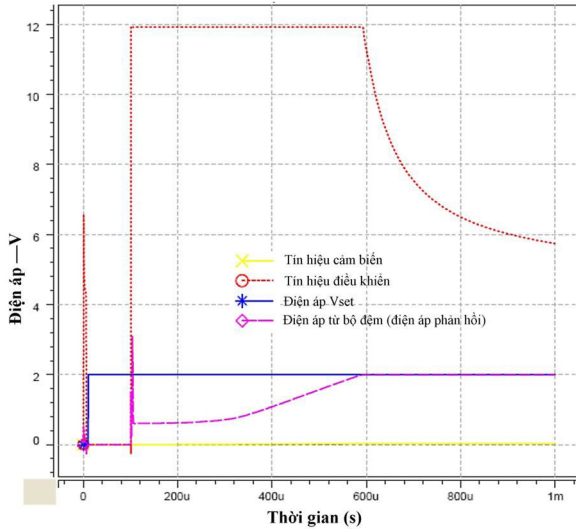
3.7 Thiết kế chi tiết và kết quả mô phỏng toàn hệ thống

Các mạch chức năng được kết nối tạo thành một hệ điều khiển hoàn chỉnh. Hệ thống có thể hoạt động với dải điện áp nguồn rộng, từ 7 đến 40 V và người dùng chỉ cần đặt giá trị chuyển vị cùng các tín hiệu chọn chế độ để hệ thống vi gấp hoạt động. Vị trí chuyển vị của đầu vi gấp có thể được xác định bằng hai cách thức, thứ nhất là thông qua tín hiệu tương tự vào chân C_0 và đặt tín hiệu MODE ở trạng thái cao; cách thức thứ hai là thông qua cổng 8 bit (C_0, C_1, \dots, C_8) khi đặt tín hiệu MODE ở trạng thái thấp. Chúng ta có thể gọi hai cách thức này lần lượt là chế độ tương tự và chế độ số.

Hệ thống chỉ có thể hoạt động khi tín hiệu EN=1 hoặc được thả nổi; giá trị tín hiệu DAV=1 để báo cho hệ thống biết là các số liệu trên cổng 8 bit tín hiệu số là đã sẵn sàng; tín hiệu STA=1 để bắt đầu tiến hành gấp vật thể và STA=0 khi nhả vật thể đó ra. Tất cả các chân tín hiệu này đều được nối với các khối ESD nhằm bảo vệ hệ thống mạch bên trong khỏi sự phá hủy của điện tích tĩnh.

Kết quả mô phỏng hoạt động chính của hệ thống được trình bày ở Hình 3.28 với điện áp nguồn 12 V, chuyển vị được đặt theo chế độ tương tự với giá trị 2 V, tín hiệu khởi động được kích hoạt 100 μ s sau khi nguồn được cấp.

Từ đồ thị biểu diễn các tín hiệu chính của hệ thống, ta có thể thấy nó cần 10 μ s để ổn định các trạng thái từ khi được cấp nguồn; đây là khoảng thời gian để mạch tạo điện áp nguồn chuẩn tham chiếu, mạch tạo điện áp nguồn nội bộ khởi động và đạt trạng thái cân bằng. Ngoài ra còn có các xung điện áp không mong muốn trong khoảng thời gian này. Tuy nhiên do đã có các cơ chế bảo vệ nên hệ thống không rơi vào trạng thái lỗi.



Hình 3.28 Kết quả mô phỏng toàn hệ thống

Khi tín hiệu STA được đặt ở mức cao, bộ điều khiển khép kín bắt đầu hoạt động, cho phép transistor công suất mở tối đa và lúc này điện áp đặt vào hai đầu sợi nhôm của cơ cấu chấp hành bằng với điện áp nguồn. Cơ cấu vi gấp khi được cấp nguồn sẽ bắt đầu dịch chuyển, tương đương với tín hiệu phản hồi từ cảm biến bắt đầu tăng lên. Vòng lặp này tiếp tục được thực hiện cho đến khi điện áp phản hồi tiệm cận với điện áp định sẵn, điện áp điều khiển transistor cũng giảm tương ứng theo cho đến khi đạt được mức cân bằng (điện áp phản hồi bằng điện áp tham chiếu). Quá trình từ khi bắt đầu kích hoạt cho đến khi đạt được đích chuyển vị khoảng $500 \mu\text{s}$. Nếu tăng điện áp nguồn lên giá trị cao hơn thì khoảng thời gian này sẽ giảm đi, ví dụ ở mức điện áp nguồn là 30V thì thời gian đáp ứng là $200 \mu\text{s}$.

Như vậy, với sự hiện diện của mạch điều khiển, chỉ cần đặt các tín hiệu lệnh là hệ thống tự hoạt động cho đến khi đạt được vị trí mong muốn của đầu kẹp. Ngoài ra, với dải điện áp nguồn nuôi được

mở rộng, hệ có thể hoạt động với điện áp bất kỳ trong khoảng từ 7 đến 40 V. Thời gian đáp ứng của vi gấp giảm đi nhiều lần so với khi không có bộ điều khiển.

3.8 Kết luận chương 3

Hàm truyền điều khiển cho hệ thống được tính toán và thiết lập cho hệ vi gấp này. Cụ thể là hệ điều khiển PD, kết quả mô phỏng cho thấy đáp ứng của lõi ra (chuyển vị từ lúc xuất phát đến vị trí mong muốn) tăng gấp 500 lần so với khi không có hệ điều khiển khép kín.

Công nghệ được lựa chọn để thiết kế mạch điều khiển tích hợp là Bi-CMOS 1,2 μm tiêu chuẩn của TSMC. Với công nghệ này, hệ thống có thể hoạt động trong dải điện áp từ 7 đến 40 V. Mô hình các linh kiện trong công nghệ này được cung cấp đầy đủ và sử dụng chương trình mô phỏng chuyên dụng HSPICE để hỗ trợ thiết kế mạch điều khiển.

Hệ vi gấp tích hợp cảm biến được mô hình hóa bằng mạch điện tương đương với đáp ứng về tần số, công suất tiêu thụ, điện áp lõi ra của cảm biến theo điện áp nguồn đặt vào đúng như phiên bản đã chế tạo.

Thiết kế hệ thống điều khiển từ sơ đồ khối tổng thể đến chi tiết các mạch chức năng. Với thiết kế này, hệ thống có thể hoạt động độc lập khi nhận được tín hiệu điều khiển chuyển vị mong muốn thông qua giá trị điện áp tương tự hoặc qua cổng tín hiệu số 8 bit. Kết quả mô phỏng cho thấy, hệ thống hoạt động ổn định và thời gian đáp ứng giảm xuống còn 200 μs ở điện áp nguồn nuôi là 30 V, có nghĩa là giảm thời gian đáp ứng của vi gấp 120 lần (25 ms) so với khi không có hệ điều khiển.

KẾT LUẬN

Với các mục tiêu đề ra, luận án này đã thực hiện được các điểm mới như sau:

- Nâng cấp và xây dựng mô hình mô phỏng hoàn chỉnh cho hệ thống vi gấp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến với cấu trúc 3D và mô hình chuyển đổi năng lượng qua hai giai đoạn là từ điện năng thành nhiệt năng và từ nhiệt năng thành cơ năng đúng như hoạt động thực tế của vi gấp.

- Tính toán tổng quát cho hệ thống vi gấp theo mô hình nhiệt học và mô hình cơ học cổ điển. Kết quả này được so sánh với kết quả của phương pháp mô phỏng và đo đạc thực nghiệm trên phiên bản vi gấp đã chế tạo. So sánh số liệu cho thấy sự phù hợp giữa ba phương pháp.

- Tối ưu cấu trúc vi gấp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến với một số thay đổi nhỏ về cấu trúc và cơ chế phân bố nhiệt để giảm nhiệt độ và công suất hoạt động của nó. Kết quả cho thấy đã giảm được 65% nhiệt độ tại điểm cực đại và giảm 50% công suất tiêu thụ, trong khi giữ nguyên được giá trị chuyển vị so với cấu trúc ban đầu. Đặc biệt, nhiệt độ tại đầu kẹp đã giảm xuống gần với nhiệt độ phòng, có nghĩa là vi gấp này sẽ phù hợp với các ứng dụng trong y sinh.

- Thiết lập hàm truyền điều khiển PD cho hệ vi gấp. Với hàm truyền này, kết quả mô phỏng cho thấy đáp ứng của hệ thống nhanh hơn 500 lần so với khi không có hệ điều khiển.

- Thiết kế hệ điều khiển tích hợp để tăng tốc độ thi hành, tăng độ tin cậy và chính xác cho hệ vi gấp so với khi không có hệ điều khiển khép kín. Hệ thống này có thể hoạt động với dải điện áp nguồn

rộng (từ 7 đến 40 V) và vị trí chuyển vị được điều khiển thông qua tín hiệu tương tự hoặc tín hiệu số 8 bit. Với việc tích hợp mạch điều khiển, hệ vi gáp này dễ dàng kết nối với lớp điều khiển cao hơn qua tín hiệu số hoặc hoạt động độc lập qua tín hiệu điều khiển tương tự. Kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống hoạt động tốt và giảm thời gian đáp ứng nhiều lần so với khi không có hệ điều khiển.

Từ việc xây dựng được mô hình mô phỏng có độ tin cậy và công thức tính toán tổng quát cho cấu trúc cho hệ thống vi gáp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến, việc thiết kế lại hay sửa đổi cấu trúc cho phù hợp với từng ứng dụng cụ thể trong tương lai sẽ dễ dàng hơn. Tùy thuộc vào tiêu chí cụ thể của từng ứng dụng, các thông số được định hình qua công thức tổng quát, thiết kế và mô phỏng xác nhận trước khi đưa vào chế tạo. Do vậy, sẽ giảm được đáng kể thời gian cũng như giá thành khi cần phát triển và chế tạo một phiên bản vi gáp mới cho một ứng dụng cụ thể.

Việc tích hợp hệ thống vi gáp này với hệ thống điều khiển lên cùng một đế trong cùng một công nghệ chế tạo cho phép nâng cao tốc độ hoạt động, độ tin cậy và tính chính xác hơn, giá thành sản phẩm rẻ hơn. Bên cạnh đó, nhờ việc mở rộng dải điện áp nguồn và giảm nhiệt độ hoạt động của vi gáp cho phép mở rộng ứng dụng trong môi trường chất lỏng hoặc đáp ứng cho các ứng dụng có yêu cầu cao hơn như thao tác với tế bào sống.

DỰ KIẾN TIẾP THEO

Mặc dù đã đạt được một số kết quả đáng kể đối với mô hình mô phỏng, công thức toán học cho hệ vi gấp cũng như tối ưu cấu trúc về nhiệt độ hoạt động và thiết kế mạch điều khiển tích hợp cho hệ thống vi gấp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến này, còn nhiều hạng mục công việc cần tiếp tục được hoàn thiện để có thể đưa ra được một hệ thống hoàn chỉnh. Các công việc đề xuất tiếp theo như sau:

- Hoàn tất thiết kế vật lý (layout) hệ thống vi mạch điều khiển tích hợp, bao gồm cả mô phỏng thiết kế vật lý của mạch cho phù hợp với các tiêu chuẩn của công nghệ chế tạo, tránh can nhiễu và sai lệch khi hệ thống hoạt động.

- Ghép nối phần vi mạch tích hợp với cấu trúc vi gấp lên một đế. Từ đó chế tạo thử nghiệm bản thiết kế này. Hiện tại ở Việt Nam chưa có cơ sở nào đủ khả năng để chế tạo hệ thống như vậy nên cần phải tìm kiếm sự hỗ trợ từ một cơ sở nghiên cứu khác ở nước ngoài. Giai đoạn này có thể sẽ phải thiết lập hay định dạng một quy trình công nghệ mới khi kết nối cả hai phần chế tạo thiết bị MEMS và phần vi mạch bán dẫn CMOS lại với nhau.

Kiểm tra, đo đạc và đánh giá các thông số của phiên bản chế tạo thử nghiệm trên. Từ đó xác nhận tính đúng đắn của mô hình tính toán, mô hình mô phỏng và hệ điều khiển hoặc có thể phải chỉnh sửa các mô hình đó cho phù hợp.