

**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**

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

**Hà Nội – 2016**

**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**

**LUẬN ÁN TIẾN SĨ**

**NGÀNH CÔNG NGHỆ KỸ THUẬT ĐIỆN TỬ, TRUYỀN THÔNG**

**NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:**

**1. PGS. TS. CHỦ ĐỨC TRÌNH**

**2. PGS. TS. VŨ NGỌC HÙNG**

**Hà Nội – 2016**

## LỜI CẢM ƠN

Trước tiên, tác giả tỏ lòng biết ơn sâu sắc tới **PGS. TS. Chử Đức Trình, PGS. TS Vũ Ngọc Hùng** đã luôn tâm huyết, nhiệt tình hướng dẫn, quan tâm và hỗ trợ về tài liệu, thiết bị và phương pháp luận trong suốt thời gian thực hiện nghiên cứu để tác giả hoàn thành Luận án này.

Tác giả xin cảm ơn chân thành tới các thầy cô trong Khoa Điện tử Viễn thông, Trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội đã luôn quan tâm, giúp đỡ, hướng dẫn cũng như tạo điều kiện thuận lợi nhất cho nghiên cứu sinh trong quá trình học tập và nghiên cứu tại trường.

Tác giả xin chân thành cảm ơn tới nhóm nghiên cứu ở Bộ môn Vi cơ điện tử, Khoa Điện tử Viễn thông đã hỗ trợ tôi trong quá trình mô phỏng, đo đạc và thu thập số liệu cho các nghiên cứu thuộc phạm vi của Luận án này.

Tác giả cũng xin trân trọng cảm ơn đơn vị công tác – Cục Sở hữu trí tuệ, Bộ Khoa học và Công nghệ đã tạo mọi điều kiện thuận lợi, chia sẻ khó khăn, động viên tác giả trong suốt thời gian học tập, nghiên cứu để hoàn thành Luận án này.

Cuối cùng, tác giả muốn cảm ơn tới tất cả bạn bè, và đặc biệt là vợ, bố mẹ và các thành viên khác trong gia đình luôn quan tâm động viên và chia sẻ những lúc khó khăn về tinh thần và vật chất.

*Hà Nội, ngày 22 tháng 12 năm 2016*

**Phan Hữu Phú**

## LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan luận án “*Mô phỏng và tối ưu hóa vi gắp có cảm biến dùng để thao tác với các vi vật thể*” là công trình nghiên cứu của bản thân và không nằm trong một luận án, luận văn hay khóa luận của khóa học bất kỳ tại các cơ sở đào tạo nào khác.

Những trích dẫn tài liệu tham khảo trong luận án đã được nêu rõ trong phần tài liệu tham khảo. Các số liệu, kết quả trình bày trong luận án là hoàn toàn trung thực. Nếu sai tôi xin hoàn toàn chịu trách nhiệm và thi hành kỷ luật của khoa, trường đề ra.

*Hà nội, ngày 22 tháng 12 năm 2016*

Nghiên cứu sinh

**Phan Hữu Phú**



## MỤC LỤC

CÁC KÝ HIỆU, VIẾT TẮT.....	vi
DANH MỤC HÌNH ẢNH.....	x
DANH MỤC CÁC BẢNG.....	xiii
MỞ ĐẦU.....	1
Chương 1. TỔNG QUAN.....	5
1.1 Vi gấp và cảm biến dùng cho vi gấp.....	5
1.1.1 Định nghĩa vi gấp.....	5
1.1.2 Cảm biến dùng cho vi gấp.....	5
1.2 Giới thiệu các loại vi gấp.....	6
1.2.1 Phân loại vi gấp.....	6
1.2.2 Vi gấp tĩnh điện.....	6
1.2.3 Vi gấp nhiệt điện.....	11
1.2.4 Vi gấp khí nén.....	15
1.2.5 Vi gấp điện từ.....	17
1.2.6 Hợp kim định hình.....	17
1.2.7 Các loại vi gấp khác.....	19
1.3 Giới thiệu các loại cảm biến dùng cho vi gấp.....	21
1.3.1 Cảm biến quang học.....	21
1.3.2 Cảm biến lực áp trở.....	22
1.3.3 Cảm biến lực điện dung.....	23
1.4 So sánh các loại vi gấp và cảm biến dùng cho vi gấp.....	24
1.4.1 So sánh giữa các loại vi gấp.....	24
1.4.2 So sánh giữa các loại cảm biến dùng cho vi gấp.....	25
1.4.3 Lựa chọn đối tượng nghiên cứu của đề tài.....	26
1.5 Vi gấp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến.....	27
1.5.1 Thiết kế.....	27
1.5.2 Mô phỏng và đo đạc.....	29
1.5.3 Tính chất của vi gấp.....	30
1.5.4 Tính chất của cảm biến.....	33
1.5.5 Đáp ứng tần số của vi gấp.....	35
1.6 Kết luận chương 1.....	36

Chương 2.    MÔ PHÒNG, PHÂN TÍCH VÀ TỐI ƯU CẤU TRÚC VI GẤP NHIỆT ĐIỆN SILIC-POLYME TÍCH HỢP CẢM BIẾN .....	38
2.1    Giới thiệu .....	38
2.2    Mô hình mô phỏng .....	38
2.3    Phân tích về mặt nhiệt học .....	39
2.4    Phân tích cơ học .....	45
2.4.1    Phân tích chuyển vị .....	46
2.4.2    Phân tích lực chấp hành.....	49
2.5    So sánh kết quả tính toán, đo lường và mô phỏng .....	50
2.6    Tối ưu vi gấp .....	53
2.6.1    Tối ưu về mặt cấu trúc.....	53
2.6.2    Tối ưu về mặt nhiệt độ.....	56
2.6.3    Kết hợp các tối ưu .....	62
2.7    Kết luận chương 2 .....	64
Chương 3.    THIẾT KẾ MẠCH ĐIỀU KHIỂN TÍCH HỢP.....	67
3.1    Giới thiệu .....	67
3.2    Thiết lập hàm điều khiển PID cho hệ thống.....	67
3.2.1    Cơ chế điều khiển.....	67
3.2.2    Hàm truyền của vi gấp.....	68
3.2.3    Mạch điều khiển công suất .....	69
3.2.4    Điều khiển mở.....	71
3.2.5    Điều khiển Tỷ lệ (P).....	72
3.2.6    Điều khiển Tỷ lệ đạo hàm (PD).....	73
3.2.7    Điều khiển Tỷ lệ tích phân (PI) .....	74
3.2.8    Điều khiển Tỷ lệ tích phân đạo hàm (PID).....	75
3.3    Lựa chọn công nghệ chế tạo và chương trình mô phỏng mạch điện.....	76
3.3.1    Lựa chọn công nghệ .....	76
3.3.2    Chương trình mô phỏng.....	77
3.4    Mô hình hóa vi gấp theo các thông số điện.....	78
3.5    Sơ đồ khối toàn hệ thống .....	80
3.6    Thiết kế mạch chi tiết .....	82
3.6.1    Mạch tạo điện áp chuẩn tham chiếu .....	82
3.6.2    Mạch tạo điện áp và nguồn dòng nội bộ.....	86

3.6.3	Mạch chuyển đổi tín hiệu số tương tự (DAC) .....	94
3.6.4	Mạch khuếch đại tín hiệu cảm biến.....	97
3.6.5	Mạch điều khiển trung tâm .....	100
3.7	Thiết kế chi tiết và kết quả mô phỏng toàn hệ thống.....	103
3.7.1	Thiết kế chi tiết toàn hệ thống.....	103
3.7.2	Kết quả mô phỏng hoạt động của toàn hệ thống.....	105
3.8	Kết luận chương 3 .....	106
	KẾT LUẬN .....	108
	DỰ KIẾN TIẾP THEO .....	110
	DANH MỤC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA TÁC GIẢ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN	
ÁN	.....	111
	TÀI LIỆU THAM KHẢO .....	112

## CÁC KÝ HIỆU, VIẾT TẮT

---

### A. Danh mục các kí hiệu

$A, A_0, A_{(z)}, A_{ij}, A_{AB}, A_{CD}, A_{EF}$ : Diện tích ( $m^2$ )

$d, d_1, d_2, y$ : Chuyển vị (m)

$E, E^p, E^c, E^\perp, E_{app}, E_{stack}, E_{ij}, E_{AB}, E_{CD}, E_{EF}$ : Mô đun đàn hồi Young (Pa)

$F, F_1, F_2, F_{ex}$ : Lực (N)

$f$ : Tần số (Hz)

$f_c$ : Hệ số số học

$I, I_{ij}, I_{CD}, I_{AB}, I_{EF}, I_0, I_{(z)}$ : Mômen quán tính ( $kg.m^2$ )

$K, r_{11}, r_{22}, r_{21}, r_{12}$ : Ma trận độ cứng và các chỉ số (N/m)

$k, k_1, k_2, m, n, t, \gamma$ : Các tỉ số sử dụng

$k_1, k_2$ : Độ dẫn nhiệt (W/m.K)

$L, L_{act}, L_{jaw}, L_{comb}, W, W_{act}, W_{bone}, W_{can}, W_{dis}, W_{jaw},$

$W_{gap}, W_{mean}, W_{Si}, W_{SU8}, W_{tip}, H, H_{Al}, H_{act}, H_{Si}, H_{SU8}$ : Các thông số kích thước (m)

$T, T_{Al}, l, w, h, h_{si}, h_2, h_3, h(z), a, b, d_{int}, z$

$M, M_m, \overline{M}_k$ : Mômen lực (N.m)

$\overline{N}_1^{AB}, \overline{N}_1^{CD}$ : Lực dọc (N)

$Q, Q_m, \overline{Q}_k$ : Lực cắt (N)

$q$ : Cường độ lực phân bố (N/m)

$R, R_1, R_2$ : Vectơ ứng lực và chỉ số (N)

$R_0, R_1, R_2$ : Điện trở ( $\Omega$ )

$T, \Delta T, T_{res}, T_0, \Delta T_{ave}, T_g, T_m$ : Nhiệt độ (K)

$t^p, t^c$ : Độ dày lớp lần lượt của polyme và silic (m)

$V_{in}, V_{out}, V, V_a, V_b$ : Điện áp (V)

$Z, Z_1, Z_2$ : Vectơ chuyển vị và các chỉ số (m)

$V, \Delta V$ : Thể tích ( $m^3$ )

$\alpha, \alpha_T, \alpha_{\perp}^p, \alpha^p, \alpha_{\perp}^c, \alpha^c, \alpha_{app}, \alpha_{stack}$ : Hệ số dẫn nở nhiệt ( $K^{-1}$ )

$\rho_{Al}$ : Điện trở suất của nhôm ( $\Omega.m$ )

$e, e_{ij}, e_{ij}^p, e_{ij}^c$ : Biến dạng

$\sigma_{ij}, \sigma_{ij}^p, \sigma_{ij}^c, \sigma_{kk}^p, \sigma_{kk}^c$ : Ứng suất

$\delta_{ij}$ : Hệ thống Kronecker

$\delta, \delta_1, \delta_2, k_x$ : Độ dẫn nở (m)

$\phi$ : Tỷ lệ thể tích của thành phần polyme

$\rho, \Delta\rho$ : Điện trở suất và độ biến thiên điện trở suất ( $\Omega m$ )

$\nu, \nu^p, \nu^c$ : Hệ số Poát- xông

$\eta$ : Hệ số phụ thuộc hình dạng mặt cắt ngang

## **B. Bảng các chữ viết tắt**

<b><i>3D</i></b>	Three-dimensional
<b><i>AlN</i></b>	Aluminum nitride
<b><i>Bi-CMOS</i></b>	Bipolar junction transistors and CMOS technology
<b><i>CAD</i></b>	Computer Aid Design
<b><i>CCD</i></b>	Charge Coupled Device
<b><i>CMOS</i></b>	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
<b><i>CTE</i></b>	Coefficient Thermal Expansion
<b><i>DAC</i></b>	Digital-to-Analog Converter
<b><i>DC</i></b>	Direct Current
<b><i>DIMES</i></b>	Delft Institute of Microsystems and Nanoelectronics
<b><i>DLC</i></b>	Diamond like Carbon
<b><i>DRIE</i></b>	Deep Reactive Ion Etching
<b><i>ESD</i></b>	ElectroStatic Discharge
<b><i>FEM</i></b>	Finite Element Method
<b><i>KOH</i></b>	Potassium hydroxide
<b><i>LSB</i></b>	Least Significant Bit
<b><i>MEMS</i></b>	Micro-Electro-Mechanical Systems
<b><i>MOSFET</i></b>	Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor
<b><i>NMOS</i></b>	N-channel Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor
<b><i>PID</i></b>	Proportional Integral Derivative
<b><i>PMOS</i></b>	P-channel Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor

<b><i>PSRR</i></b>	Power supply rejection ratio
<b><i>PTAT</i></b>	Proportional to Absolute Temperature
<b><i>PZT</i></b>	Lead Zirconate Titanate
<b><i>SEM</i></b>	Scanning Electron Microscope
<b><i>SMA</i></b>	Shape Memory Alloys
<b><i>SiO<sub>2</sub></i></b>	Silicon dioxide
<b><i>SOI</i></b>	Silicon On Insulator
<b><i>SPICE</i></b>	Simulation Program Integrated Circuit Emphasis
<b><i>TC</i></b>	Temperature Coefficients
<b><i>UVLO</i></b>	Under Voltage Lock-Out
<b><i>VCM</i></b>	Voice Coil Motor
<b><i>ZnO<sub>2</sub></i></b>	Zinc dioxide

## DANH MỤC HÌNH ẢNH

---

Hình 1.1 Sơ đồ đề xuất của cơ cấu chấp hành tĩnh điện [30].....	7
Hình 1.2 Mô hình của một vi gấp tĩnh điện bản cực song song hay răng lược ngang [16] .....	8
Hình 1.3 Các cấu trúc của cơ cấu chấp hành tĩnh điện với các hình dạng răng lược [27]	9
Hình 1.4 Sơ đồ đề xuất cơ cấu chấp hành tĩnh điện gồm kết nối nhiều tầng [31].....	10
Hình 1.5 Sơ đồ cơ cấu vi gấp tĩnh điện gồm nhiều bản cực song song [32].....	11
Hình 1.6 Sơ đồ thiết kế của vi gấp nhiệt điện [37] .....	12
Hình 1.7 Một thanh chấp hành vi gấp nhiệt điện 3 lớp [46] .....	13
Hình 1.8 Cấu trúc vi gấp với hai chế độ hoạt động [51, 52] .....	14
Hình 1.9 Cấu trúc vi gấp khí nén [57] .....	16
Hình 1.10 Đáp ứng của vi gấp khí nén ở các giá trị áp suất khác nhau [58].....	16
Hình 1.11 Sơ đồ thiết kế của vi gấp điện tử [60].....	17
Hình 1.12 Sơ đồ nguyên lý của vi gấp sử dụng SMA [65] .....	18
Hình 1.13 Sơ đồ của một cơ cấu kim loại - cách li khi bị uốn cong [68] .....	19
Hình 1.14 Hình ảnh dưới kính hiển vi điện tử của vi gấp nhiều cánh tay [69] .....	20
Hình 1.15 Hình chụp hoạt động của cấu trúc vi gấp không dây ở (a) nhiệt độ phòng, (b) ở nhiệt độ 43 °C, (c) và (d) trên một con sâu róm đang sống [71] .....	21
Hình 1.16 Hình vẽ khối chức năng của vi gấp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến [86].....	22
Hình 1.17 Sơ đồ thiết kế vi gấp tích hợp cảm biến lực điện dung [97] .....	24
Hình 1.18 Ảnh chụp SEM của (a) các áp trở, (b) một phần cấu trúc răng lược của bộ chấp hành và (c) tổng thể cấu trúc vi gấp [86] .....	28
Hình 1.19 Hoạt động của vi gấp: (a) vị trí ban đầu của các đầu kẹp; (b) khi cấp nguồn điện 4,5 V cho cả hai cánh tay; (c) trước khi kẹp vào đối tượng; và (d) với đối tượng đã được kẹp [86] .....	30
Hình 1.20 Kết quả mô phỏng và đo đạc chuyển vị của đầu kẹp với điện áp nguồn [87]31	
Hình 1.21 Chuyển vị của đầu kẹp với công suất tiêu thụ [86] .....	32
Hình 1.22 Chuyển vị của đầu kẹp với nhiệt độ trung bình của hệ thống [86] .....	33
Hình 1.23 Điện áp lỗi ra của cảm biến lực với điện áp nguồn cấp cho cơ cấu chấp hành nhiệt điện [86].....	33



Hình 1.24 Điện áp lỗi ra của cảm biến lực với chuyển vị của đầu kẹp [86] .....	34
Hình 1.25 Lực tác động giữa má kẹp và đối tượng gấp với điện áp đầu vào [11] .....	35
Hình 1.26 Đáp ứng tần số của vi gấp [11] .....	36
Hình 1.27 Đáp ứng chuyển vị của vi gấp[11] .....	36
Hình 2.1 Hình chiếu đứng cánh tay vi gấp với các ký hiệu hình học của nó.....	40
Hình 2.2 Hình chiếu bằng và hình chiếu đứng của vi gấp để phân tích đặc tính nhiệt ..	41
Hình 2.3 Kết quả tính toán phân bố nhiệt độ trên cơ cấu chấp hành.....	45
Hình 2.4 Mô hình cơ hệ để phân tích vi gấp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến	46
Hình 2.5 Biến dạng của cấu trúc.....	47
Hình 2.6 Biểu đồ mômen uốn khi $Z_1=1$ .....	47
Hình 2.7 Biểu đồ mômen uốn khi $Z_2=1$ .....	48
Hình 2.8 Cơ hệ sử dụng để xác định lực chấp hành .....	50
Hình 2.9 Chuyển vị của các đầu kẹp ở trạng thái cân bằng với nhiệt độ hoạt động trung bình của hệ thống.....	51
Hình 2.10 Phân bố nhiệt độ hoạt động trên cơ cấu chấp hành vi gấp.....	53
Hình 2.11 Các phương án thay đổi về cấu trúc trên cơ cấu chấp hành.....	55
Hình 2.12 Kết quả mô phỏng phân bố nhiệt độ trên cơ cấu chấp hành của phương án D so với cấu trúc nguyên bản.....	56
Hình 2.13 Kết quả mô phỏng phân bố nhiệt độ (Phương án 1).....	59
Hình 2.14 Kết quả mô phỏng phân bố nhiệt độ (Phương án 2).....	60
Hình 2.15 Kết quả mô phỏng phân bố nhiệt độ (Phương án 3).....	61
Hình 2.16 Thay đổi cấu trúc của cơ cấu chấp hành để tối ưu nhiệt độ hoạt động a) cắt bớt silic tiếp giáp giữa cơ cấu chấp hành và giá đỡ, b) sắp xếp lại các nguồn nhiệt, c) kéo dài đầu kẹp .....	63
Hình 2.17 Kết quả mô phỏng của các cấu trúc.....	64
Hình 3.1 Sơ đồ khối của hệ điều khiển khép kín.....	68
Hình 3.2 Mạch điều khiển công suất .....	70
Hình 3.3 Kết quả mô phỏng đáp ứng của cơ chế điều khiển mở .....	72
Hình 3.4 Đáp ứng của hệ điều khiển khép kín theo cơ chế điều khiển P .....	73
Hình 3.5 Đáp ứng của hệ điều khiển PD.....	74
Hình 3.6 Đáp ứng của hệ điều khiển PI.....	75
Hình 3.7 Đáp ứng của hệ thống PD và so sánh với hệ điều khiển mở .....	76

Hình 3.8 Mô hình về mặt điện của hệ thống vi gấp tích hợp cảm biến .....	80
Hình 3.9 Sơ đồ khối của hệ thống điều khiển cho vi gấp .....	82
Hình 3.10 Mạch tạo điện áp chuẩn tham chiếu với a) không beta-booster, b) emitter-follower beta-booster, và c) op-amp beta-booster .....	83
Hình 3.11 Thiết kế chi tiết của mạch tạo điện áp chuẩn tham chiếu .....	85
Hình 3.12 Kết quả mô phỏng mạch tạo điện áp tham chiếu a) với sự thay đổi điện áp nguồn tại nhiệt độ 25 °C và b) với sự thay đổi nhiệt độ khi điện áp nguồn $V_{in} = 12V$ .....	86
Hình 3.13 Bộ ổn áp nguồn nội bộ và cách mạch phụ trợ.....	87
Hình 3.14 Kết quả mô phỏng của Vreg với $V_{in}$ (điện áp nguồn) .....	89
Hình 3.15 Mạch phát hiện quá nhiệt.....	89
Hình 3.16 Kết quả mô phỏng của mạch phát hiện quá nhiệt .....	90
Hình 3.17 Mạch khóa điện áp thấp.....	90
Hình 3.18 Kết quả mô phỏng khối chức năng UVLO .....	91
Hình 3.19 Mạch tạo điện áp nguồn nội bộ và các mạch chức năng .....	93
Hình 3.20 Cấu trúc DAC với các tầng R-2R.....	95
Hình 3.21 Cấu hình của mỗi đơn vị của dãy R-2R: a) không bù và b) có bù điện áp ....	95
Hình 3.22 Thiết kế bộ DAC 8-bit .....	96
Hình 3.23 Kết quả mô phỏng của bộ DAC: điện áp lỗi ra và các giá trị lỗi vào.....	97
Hình 3.24 Mạch khuếch đại tín hiệu cảm biến.....	99
Hình 3.25 Kết quả mô phỏng của mạch khuếch đại tín hiệu cảm biến.....	100
Hình 3.26 Mạch điều khiển trung tâm .....	102
Hình 3.27 Sơ đồ mạch chi tiết của toàn hệ thống điều khiển vi gấp .....	104
Hình 3.28 Kết quả mô phỏng toàn hệ thống .....	105

## DANH MỤC CÁC BẢNG

---

Bảng 1-1 Kết quả mô phỏng [37] .....	12
Bảng 2-1 Thông số vật lý và các ký hiệu hình học của vi gấp .....	40
Bảng 2-2 So sánh kết quả mô phỏng giữa các phương án .....	55
Bảng 2-3 Bố trí nguồn nhiệt tại các vị trí (Phương án 1).....	58
Bảng 2-4 Bố trí nguồn nhiệt tại các vị trí (Phương án 2).....	59
Bảng 2-5 Bố trí nguồn nhiệt tại các vị trí (Phương án 3).....	61

## MỞ ĐẦU

---

Hệ thống vi cơ điện tử (MEMS- Microelectromechanical Systems) đã và đang phát triển mạnh mẽ trong những năm gần đây. Cùng với xu hướng đó, việc nghiên cứu, thiết kế và chế tạo các vi gấp đóng vai trò rất quan trọng. Nhờ những tiến bộ trong công nghệ bán dẫn và polyme, một cấu trúc mới về vi gấp sử dụng vật liệu silic-polyme đã được đề xuất và chế tạo để khắc phục những hạn chế của các loại vi gấp trước đó. Hệ thống này cho độ chuyển vị, lực tương tác và tần số hoạt động cao, mặt khác nó hoạt động ở điện áp thấp và tương thích với công nghệ chế tạo vi mạch bán dẫn (CMOS). Do đó, hệ thống này có thể ứng dụng rộng rãi trong các hệ thống vi thao tác, vi rôbot, các hệ thống gấp tế bào sống, mổ nội soi, v.v.. Tuy nhiên, để đáp ứng yêu cầu khắt khe trong lĩnh vực y sinh cũng như nhiều lĩnh vực khác, linh kiện này cần được tính toán một cách cẩn trọng và tối ưu theo từng tiêu chí riêng như nhiệt độ hoạt động, độ chuyển vị hay công suất tiêu thụ.

Luận án này sẽ trình bày về mô phỏng, tính toán, tối ưu cấu trúc vi gấp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến. Tiếp theo, việc thiết kế hệ điều khiển tích hợp cho vi gấp này được đề cập. Mục tiêu của luận án là hoàn chỉnh mô hình mô phỏng cùng công thức toán học cho vi gấp, từ đó có thể tối ưu nhiệt độ hoạt động của vi gấp, và kết hợp với vi mạch điều khiển tích hợp để tạo thành một hệ thống hoàn chỉnh.

Đầu tiên, hệ thống vi gấp được phân tích và tính toán về mặt cơ học và nhiệt độ. Song song với đó là nâng cấp mô hình hóa phần tử hữu hạn sử dụng phần mềm COMSOL Multiphysics để mô phỏng xác nhận kết quả tính toán và kết quả đo đạc từ phiên bản đã chế tạo của vi gấp. Các thay đổi về cấu trúc và phân bố lại nguồn nhiệt được thực hiện để tối ưu nhiệt độ hoạt động của vi gấp này. Cuối cùng là thiết kế và mô phỏng hệ điều khiển tích hợp để tạo thành một hệ thống vi gấp hoàn chỉnh.

## Tính cấp thiết của đề tài

MEMS là hệ thống tích hợp giữa phần vi cơ, vi điện tử bao gồm vi cảm biến, vi chấp hành trên cùng một hệ thống. MEMS hứa hẹn cuộc cách mạng hóa cho rất nhiều danh mục sản phẩm khi đưa công nghệ vi điện tử và vi cơ vào cùng một hệ thống. MEMS cho phép phát triển các sản phẩm thông minh bằng cách tăng thêm khả năng kết nối điện tử với các cảm biến, điều khiển và vi chấp hành. Tuy nhiên hiện nay vẫn còn thiếu các công cụ thao tác hay gắp các vi vật thể (có kích thước trong vùng micro mét) trực tiếp bằng máy móc hay cánh tay của rôbốt. Do đó, việc phát triển các vi công cụ để thực hiện nhiệm vụ này trong dây chuyền sản xuất, hệ thống rôbốt siêu nhỏ vẫn là một thách thức lớn về mặt công nghệ, ví dụ như thao tác với các tế bào sống.

Sử dụng vi gắp truyền thống để thao tác với các vi vật thể thường có một camera để giám sát về hình ảnh. Theo cách này thì kết quả thu được là các hình ảnh hai chiều. Độ chính xác của phép đo phụ thuộc vào chiều sâu của trường ảnh, do đó rất khó để đạt được kết quả chính xác và tốc độ cao [4]. Hơn nữa phương pháp này chỉ xác định được chuyển vị mà không có thông tin về lực tiếp xúc. Vi gắp tích hợp cảm biến lực và chuyển vị được sử dụng để khắc phục hạn chế trên, nhờ đó nó có thể gắp các vật thể một cách mềm mại và không ảnh hưởng đến đối tượng gắp.

Trong những năm gần đây, một số thiết kế vi gắp tích hợp cảm biến lực đã được giới thiệu [5-9]. Tuy nhiên, các thiết bị này vẫn còn một số hạn chế như kích thước hệ thống lớn và không thích hợp với các vật thể siêu nhỏ hoặc công nghệ chế tạo không tương thích với công nghệ CMOS và/hoặc cần có mạch điện tử điều khiển phức tạp.

Luận án này sẽ tập trung tính toán, mô phỏng và tối ưu cấu trúc của vi gắp tích hợp cảm biến dựa trên cơ cấu chấp hành điện nhiệt silic-polyme và thanh dầm cảm biến lực áp trở. Mục tiêu là giảm nhiệt độ và công suất tiêu thụ của hệ thống trong khi vẫn giữ được chuyển vị và lực kẹp so với phiên bản đầu tiên. Tiếp theo là thiết kế và mô phỏng mạch điều khiển tích hợp cho hệ thống này nhằm đạt được độ chính xác, tin cậy cũng như thời gian đáp ứng nhanh hơn so với khi không ghép nối với hệ điều khiển. Khi thao tác với vi vật thể, sự chính xác và tốc độ của hệ thống được khắc phục

đáng kể vì xác định được lực tác động lên đối tượng trong thời gian thực. Vi gấp này đóng vai trò quan trọng trong lĩnh vực thao tác với các tế bào sống, mổ xâm lấn tối thiểu, các ứng dụng cho vi rôbốt và dây chuyền sản xuất siêu nhỏ.

### **Ý nghĩa khoa học và thực tiễn**

Việc nghiên cứu, hoàn thiện thiết kế, tính toán, mô phỏng và xây dựng hệ điều khiển cho một loại vi gấp mới sử dụng vật liệu silic-polyme đã khắc phục nhiều hạn chế của các loại vi gấp trước đó. Với nhiều ưu điểm như chuyển vị, lực kẹp lớn và thời gian đáp ứng nhanh, mặt khác chỉ hoạt động ở điện áp thấp và công nghệ chế tạo hoàn toàn tương thích với công nghệ chế tạo vi mạch bán dẫn (CMOS). Nhờ đó, hệ thống vi gấp này có thể ứng dụng rộng rãi trong các hệ thống vi thao tác, vi rôbốt, các hệ thống để gấp tế bào sống, mổ nội soi, v.v..

### **Đối tượng và mục đích nghiên cứu**

Đối tượng nghiên cứu của luận án là vi gấp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến với nhiều ưu điểm vượt trội so với các cấu trúc vi gấp khác. Mục tiêu là tạo ra một mô hình mô phỏng và công thức tính toán tổng quát cho cấu trúc vi gấp. Sử dụng mô hình và công thức tính toán này để tối ưu về nhiệt độ và công suất hoạt động của cả hệ thống sao cho phù hợp với các ứng dụng có yêu cầu khắt khe như trong lĩnh vực y sinh. Tiếp theo là thiết kế và mô phỏng vi mạch điều khiển tích hợp cho vi gấp để tạo thành một hệ thống hoàn chỉnh.

### **Phương pháp và phạm vi nghiên cứu**

Các phương pháp tính toán cơ học cổ điển và truyền nhiệt được sử dụng để tìm ra phương trình toán học tổng quát cho vi gấp. Bên cạnh đó là thực hiện mô phỏng ở môi trường máy tính nhờ mô hình mô phỏng ba chiều với các thông số vật lý thực và cơ chế chuyển đổi năng lượng của vi gấp.

Tiếp theo là đối chiếu để cải tiến và xác nhận tính chính xác của công thức tính toán và mô hình mô phỏng so với các kết quả đo đạc thực nghiệm trên phiên bản vi gấp đã được chế tạo. Từ mô hình toán học và mô phỏng đã thành lập được, phương pháp mô phỏng thử nghiệm và sàng lọc kết quả được sử dụng để lựa chọn phương án

tối ưu cho nhiệt độ hoạt động của vi gấp. Cuối cùng là phân tích và mô hình hóa về mặt điện cho cấu trúc vi gấp, từ đó lựa chọn cơ chế điều khiển, tính hàm điều khiển, thiết kế và mô phỏng vi mạch điều khiển tích hợp cho toàn hệ thống vi gấp này.

### **Cấu trúc của luận án**

Luận án sẽ gồm ba chương chính.

Chương 1: Giới thiệu về thiết kế của các loại vi gấp và các loại cảm biến đã được nghiên cứu. Từ đó nêu lý do tại sao chọn vi gấp nhiệt điện silicon-polyme tích hợp cảm biến để nghiên cứu và phát triển tiếp. Cuối cùng là giới thiệu các kết quả đã có của vi gấp nhiệt điện silicon-polyme tích hợp cảm biến này.

Chương 2: Trình bày về nâng cấp mô hình mô phỏng, phân tích tính toán phân bố nhiệt độ trên cơ cấu chấp hành, chuyển vị và lực kẹp bằng phương pháp cơ học cổ điển và mô hình truyền nhiệt đối với vi gấp nhiệt điện silicon-polyme tích hợp cảm biến. Tiếp theo sẽ đề cập đến các bước điều chỉnh trong thiết kế của vi gấp nói trên sao cho giảm được nhiệt độ và công suất hoạt động trong khi vẫn giữ được giá trị chuyển vị và lực kẹp như ở phiên bản đầu tiên.

Chương 3: Trình bày việc xây dựng cơ chế điều khiển và hàm điều khiển PID cho hệ vi gấp vi gấp. Mô hình vi gấp theo các đáp ứng điện. Mô phỏng và thiết kế vi mạch điều khiển tích hợp cho hệ thống vi gấp nói trên.

Cuối cùng là kết luận và đề xuất hướng nghiên cứu tiếp theo.

# Chương 1. TỔNG QUAN

## 1.1 Vi gấp và cảm biến dùng cho vi gấp

### 1.1.1 Định nghĩa vi gấp

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.

Trong hơn hai thập kỷ vừa qua, việc nghiên cứu và phát triển công cụ vi gấp thu hút được rất nhiều nguồn lực do nhu cầu phát triển quy trình sản xuất, lắp ráp và thao tác với các vi vật thể ngày càng tăng trong nhiều lĩnh vực khác nhau. Trong các lĩnh vực đó, vi gấp đóng vai trò chính để thao tác với các đối tượng có kích thước rất bé như tế bào sống, các bộ phận của vi vật thể, v.v.. Hay nói cách khác, công nghệ vi cơ điện tử (MEMS) cho phép phát triển các công cụ thu nhỏ với kích thước cỡ mili mét để thao tác với các vi vật thể (kích thước nằm trong dải micro mét) nhằm đạt được nhiều lợi thế như kích thước nhỏ gọn, giá rẻ hay có tần suất hoạt động cao.

Nhiều hệ thống vi gấp đã được giới thiệu cho nhiều ứng dụng trong hơn hai thập kỷ vừa qua. Do sử dụng các hiệu ứng khác nhau trong cơ cấu hoạt động, từng loại vi gấp sẽ có tính chất khác nhau và phù hợp với một số ứng dụng cụ thể. Ví dụ, vi gấp điện tử với cấu trúc đơn giản có thể tạo ra chuyển vị lớn trong môi trường nhiệt độ hoạt động thấp với độ trễ không đáng kể. Đặc biệt, hai biến thể khác nhau của cấu trúc răng lược dọc và răng lược ngang có thể đáp ứng yêu cầu về độ chính xác cao và chuyển vị lớn. Bên cạnh đó, vi gấp nhiệt điện hoạt động ở dải điện áp thấp có thể tạo ra lực kẹp và chuyển vị lớn nhờ hiệu ứng giãn nở nhiệt của các vật liệu khác nhau. Lực kẹp lớn, chuyển vị chính xác và đáp ứng nhanh cũng là các điểm mạnh của cơ cấu chấp hành áp điện. Ngoài ra, cơ cấu chấp hành điện từ và khí nén cũng có thể tạo ra lực kẹp và chuyển vị rất lớn.

### 1.1.2 Cảm biến dùng cho vi gấp

Trong thực tế, hệ thống vi gấp gồm có cả cơ cấu chấp hành và cảm biến là rất quan trọng. Các cảm biến được dùng 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. Chúng có thể được tích hợp trên vi gấp hoặc sử dụng song song với cấu trúc vi gấp. Những năm gần đây, các nhà nghiên cứu đã quan tâm nhiều tới việc phát triển cảm biến có độ phân giải và độ nhạy rất cao. Cảm biến lực và chuyển vị tích hợp như cảm biến áp điện, cảm biến áp trở và cảm biến điện dung đã được thiết kế nhằm thu thập thông tin theo thời gian thực để đạt được độ tin cậy và an toàn trong các thao tác.

## 1.2 Giới thiệu các loại vi gấp

### 1.2.1 Phân loại vi gấp

Các vi gấp đã và đang được nghiên cứu trong lĩnh vực vi cơ điện tử rất phong phú và đa dạng. Việc phân loại hoặc phân nhóm các loại vi gấp để khái quát, so sánh ưu và nhược điểm của chúng là điều cần thiết. Tuy nhiên tính đến thời điểm hiện tại, chưa có một sự phân nhóm hay phân loại một cách chính thức đối với các đối tượng này. Theo tác giả, các hệ vi gấp có thể được phân loại theo các tiêu chí sau:

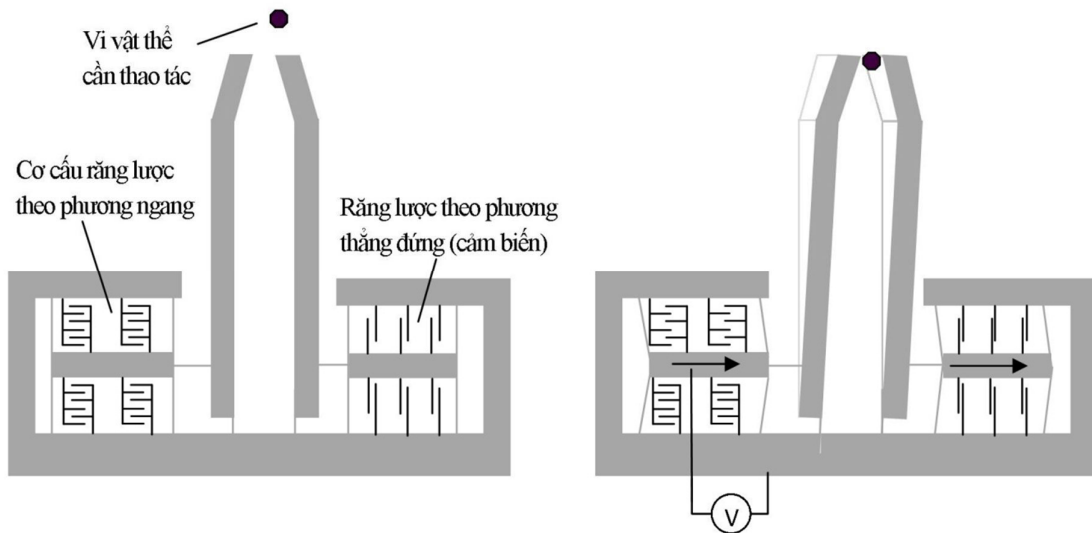
- Phân loại theo chức năng/lĩnh vực ứng dụng: phân nhóm y sinh, phân nhóm vi rô bốt, phân nhóm vi sản xuất, v.v.;
- Phân loại theo dải kích thước của hệ vi gấp hoặc dải kích thước của đối tượng gấp: dải micro mét, dải nano mét, v.v.;
- Phân loại theo công suất hoạt động hoặc công suất tiêu thụ: dải nano  $W$ , dải  $mW$ , dải  $\mu W$ , dải  $nW$  v.v.;
- Phân loại theo giá trị lực kẹp mà vi gấp có thể tạo ra: dải nano  $N$ , dải micro  $N$ , dải mili  $N$ , v.v.;
- Phân loại theo cơ chế phát động lực: tĩnh điện, nhiệt điện, áp điện, khí nén, v.v..

Trong mục giới thiệu về các loại vi gấp này, tác giả lựa chọn cách phân loại theo cơ chế phát động lực.

### 1.2.2 Vi gấp tĩnh điện

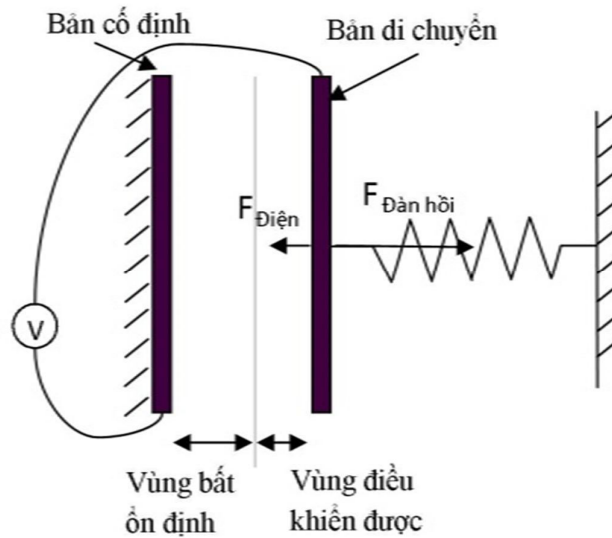
Vi gấp tĩnh điện đã được ứng dụng rộng rãi trong các hệ thống MEMS. Cấu trúc của loại vi gấp này gồm nhiều răng lược xếp xen kẽ nhau có chức năng tương tự như các bản cực song song của tụ điện. Với một bản cực được cố định và bản cực còn lại di động được, khi một điện áp đặt vào giữa chúng, một lực tĩnh điện sẽ được sinh ra và

làm di chuyển phân di động, từ đó tạo nên chuyển vị của đầu vi gấp (Xem Hình 1.1). Về mặt lý thuyết, tác giả Kim đã giới thiệu cấu trúc vi gấp silic điện cơ vào năm 1991 [13], tuy nhiên đến năm 1992, vi gấp tĩnh điện đó mới có thể gấp được hạt polystyrene có đường kính 2,7  $\mu\text{m}$ , tế bào hồng cầu và một số vi khuẩn [14].



**Hình 1.1** Sơ đồ đề xuất của cơ cấu chấp hành tĩnh điện [30]

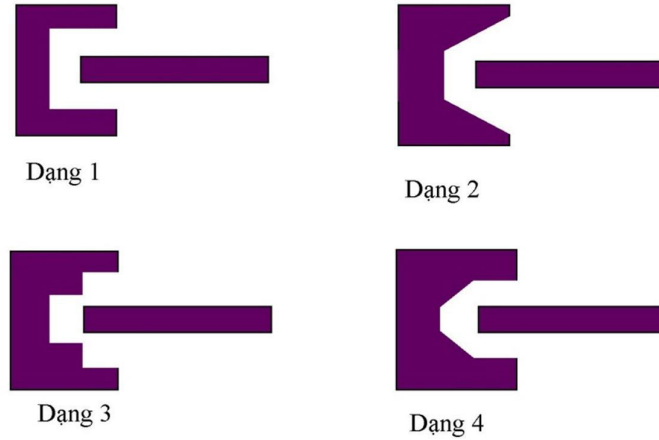
Trong nhiều ứng dụng thì độ mở má kẹp của vi gấp rất quan trọng, nhiều nhà nghiên cứu đã giới thiệu cấu trúc cong để tăng chuyển vị của má kẹp [12-15]. Một phương pháp khác để đạt được mục đích này là tăng phạm vi di chuyển của các răng lược. Tuy nhiên, có một số vấn đề nảy sinh như dải động phi tuyến và các thông số hệ thống biến thiên theo từng thiết bị cần được khắc phục. Từ đó, hệ thống điều khiển chủ động để ổn định cơ cấu chấp hành và cho phép bán cực di chuyển trong hầu hết khe hở giữa các răng lược đã được giới thiệu [16] như trên Hình 1.2.



Hình 1.2 Mô hình của một vi gắp tĩnh điện bản cực song song hay răng lược ngang [16]

Nhiều nghiên cứu cho thấy mối quan hệ giữa độ rộng khe hở của hai bản cực và điện áp đặt vào vi gắp răng lược ngang là phi tuyến. Lực tĩnh điện biến thiên theo hằng số âm và lực đàn hồi biến thiên theo hằng số dương. Khoảng cách khả dụng giữa bản cực di động và bản cực cố định bị giới hạn bởi “vùng bất ổn định pull-in” và “điện áp pull-in”. Nếu điện áp đặt vào vượt quá ngưỡng điện áp pull-in, các bản cực sẽ chạm vào nhau. Chi tiết được mô tả tại [16-24], chuyển vị của bản cực di động sẽ mất tính đàn hồi tại vùng bất ổn định pull-in. Thí nghiệm được thực hiện bởi Chan và các đồng sự cho thấy khoảng cách di chuyển đã tăng từ 0,3  $\mu\text{m}$  đến 0,6  $\mu\text{m}$  trên tổng khe hở là 1,0  $\mu\text{m}$  [22]. Tuy nhiên, thiết kế này không ổn định. Do đó, các nghiên cứu tập trung vào phương pháp điều khiển điện tích [25] và điều khiển dòng điện [26]. Mặt khác, do vấn đề rò dòng điện, vị trí của cơ cấu chấp hành vượt quá điểm pull-in sẽ không duy trì được (chỉ ổn định trong vài giây) hoặc phải cấp một dòng điện nạp liên tục [16]. Để khắc phục vấn đề trên, ứng dụng của bộ điều khiển tự thích ứng đã tăng được phạm vi chuyển vị của các bản cực song song lên 4  $\mu\text{m}$  trên khoảng cách tối đa 4,5  $\mu\text{m}$  mà không bị ảnh hưởng bởi hiệu ứng pull-in. Do đó, tỉ lệ biên độ chuyển vị của cơ cấu chấp hành đã cải thiện từ 30% lên 80% trên tổng khe hở. Chi tiết về cơ chế điều khiển

này có thể xem tại [16]. Một đề xuất khác để tăng chuyển vị cũng được trình bày tại [17].



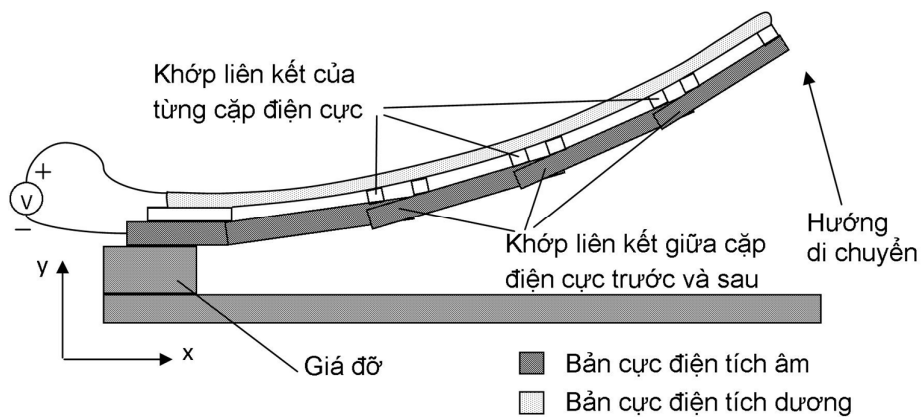
**Hình 1.3** Các cấu trúc của cơ cấu chấp hành tĩnh điện với các hình dạng răng lược [27]

Với vi gấp có cấu trúc ngang, do ràng buộc giữa lực truyền động và các bản cực là phi tuyến nên việc điều khiển vi gấp tại gần điểm pull-in rất khó. Còn cấu trúc dọc có ràng buộc tuyến tính nên việc điều khiển đơn giản hơn, do đó vi gấp tĩnh điện cấu trúc răng lược dọc được ưu tiên lựa chọn [27]. Các dạng cấu trúc dọc khác nhau dành cho vi gấp tĩnh điện được giới thiệu trên Hình 1.3.

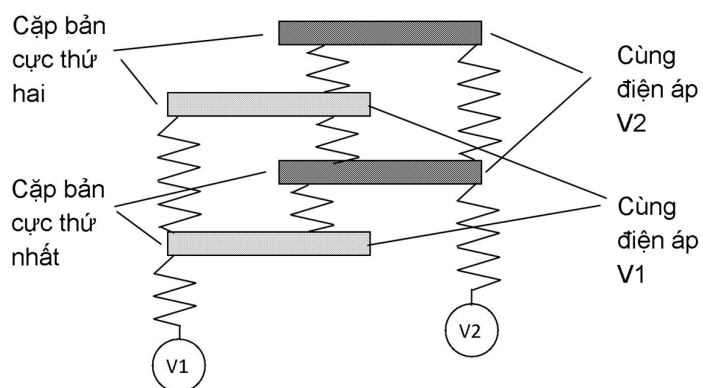
Một vấn đề khác của vi gấp tĩnh điện là cần điện áp cao mới đạt được chuyển vị như mong muốn. Ví dụ, các thí nghiệm tại [27-30] cho thấy khi đặt điện áp 80 V vào các bản cực ở cấu trúc 1020 răng lược thì tạo ra chuyển vị 20  $\mu\text{m}$ , còn với cấu trúc 2904 răng lược thì đạt được chuyển vị 25  $\mu\text{m}$ . Do đó để thiết kế được một vi gấp có khoảng cách chuyển vị lớn ở điện áp thấp trong khi số lượng răng lược nhỏ gặp nhiều khó khăn. Một số hình dạng răng lược đã được đề xuất và kiểm chứng tại [27]. Đặc biệt, có ba hình dạng răng lược (dạng 2, dạng 3, và dạng 4) đã được chọn và so sánh với hình dạng vuông ban đầu (dạng 1). Lực phát động được xác định bằng cả hai phương pháp tính toán và mô phỏng. Kết quả thí nghiệm cho thấy hình dạng răng lược hình vuông cần điện áp 25 V để di chuyển được 6  $\mu\text{m}$ . So sánh với các hình dạng khác, điện áp nhỏ nhất có thể giảm xuống giá trị 14 V với 28 răng lược mà vẫn tạo ra được

sự chuyển vị tương đương. Như vậy, hình dạng răng lược và hốc làm giảm điện áp hoạt động và số răng lược.

Bên cạnh các nghiên cứu trên, một số sáng chế về cơ cấu chấp hành tĩnh điện đã được đăng ký bảo hộ. Ví dụ, bằng độc quyền sáng chế [31] đề xuất một vi gấp tĩnh điện gồm bản cực đầu tiên cơ động, các bản cực tiếp theo được gắn sao cho di chuyển được so với bản cực trước đó. Khi điện tích được nạp, bản cực đứng sau tạo nên lực kéo với bản cực trước đó và dẫn đến chuyển vị cho các cặp bản cực liền sau đó. Như được mô tả ở Hình 1.4, các cấu trúc kết nối khác nhau của thiết bị có thể tạo ra chuyển vị theo các phương khác nhau. Bên cạnh đó, sáng chế [32] giới thiệu một vi gấp tĩnh điện với nhiều cặp bản cực kết nối song song như trên Hình 1.5. Với cơ cấu này, tổng diện tích của các bản cực có diện tích lớn, và khi chúng tích điện sẽ tạo ra lực rất lớn. Theo đó, nhờ tổng hợp chuyển vị của từng cặp bản cực thành phần, chuyển vị tổng thể của toàn bộ cơ cấu là rất lớn. Ngoài ra, một cấu trúc mới được đề xuất và chế tạo sử dụng răng lược dọc với duy nhất một lớp vật liệu [34]. Ở cấu trúc này, chuyển vị theo chiều dọc đo được là 4,81  $\mu\text{m}$  tại điện áp 150 V.



Hình 1.4 Sơ đồ đề xuất cơ cấu chấp hành tĩnh điện gồm kết nối nhiều tầng [31]



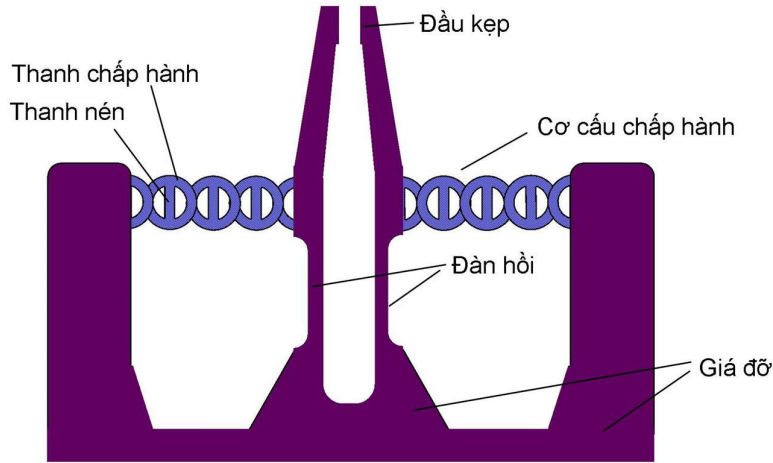
Hình 1.5 Sơ đồ cơ cấu vi gáp tĩnh điện gồm nhiều bản cực song song [32]

Ngoài các loại vi gáp tĩnh điện kể trên, các biến thể khác cũng được giới thiệu như cơ cấu chấp hành đa hướng [35] hoặc tích hợp thêm bộ rung để thao tác với vi vật thể dễ dàng hơn [36].

### 1.2.3 Vi gáp nhiệt điện

Vi gáp nhiệt điện cũng là một trong những chủng loại được ứng dụng rộng rãi. Nhìn chung, vi gáp này tạo ra lực kẹp lớn ở điện áp thấp. Khi đặt điện áp vào hai đầu của một vật liệu dẫn như kim loại, nhiệt lượng sẽ sinh ra và dẫn đến hiệu ứng giãn nở vật liệu khác bên cạnh. Cấu trúc của vi gáp này được thiết kế sao cho hướng giãn nở điều khiển được và tạo ra chuyển vị như mong muốn. Ví dụ ở Hình 1.6 là một thiết kế đặc trưng của dạng vi gáp này [37]. Vi gáp được chế tạo bằng công nghệ khắc laser và kích thước của nó khá gọn nhờ cấu trúc nguyên khối. Cụ thể là sử dụng cấu trúc nhiều tầng [38, 39] được sắp xếp theo hướng đối diện nhau. Các cơ cấu chấp hành được nối tiếp với nhau ở hai bên của vi gáp. Mỗi cơ cấu gồm một thanh nén và hai thanh chấp hành hình cung. Thanh chấp hành sẽ mỏng hơn và có trở kháng lớn hơn thanh nén, do đó, độ giãn nở của thanh chấp hành sẽ lớn hơn. Khi được nung nóng thì các thanh kể trên có xu hướng giãn nở về mọi phía, tuy nhiên thanh nén sẽ hạn chế sự giãn nở theo chiều dọc và chỉ cho phép chuyển vị theo phương ngang. Do đó, các đầu kẹp của vi gáp sẽ di chuyển theo hướng mong muốn. Cấu trúc này đã được kiểm chứng qua mô phỏng, kết quả ở Bảng 1-1. Cấu trúc này cũng đã được chế tạo bằng công nghệ khắc laser với sai số 5,5 %. Kết quả thử nghiệm cho thấy chuyển vị cực đại của đầu kẹp là

28,8  $\mu\text{m}$  ở điện áp 1,9 V và dòng điện 0,84 A. Tuy nhiên, nhiệt độ hoạt động của vi gắp này ở trạng thái dừng là rất cao.



Hình 1.6 Sơ đồ thiết kế của vi gắp nhiệt điện [37]

Bảng 1-1 Kết quả mô phỏng [37]

Điện áp (V)	Biên độ dịch chuyển ( $\mu\text{m}$ )	Nhiệt độ cao nhất ( $^{\circ}\text{C}$ )
1	4,14	166,3
2	13,84	575,1
3	30,02	1256,2

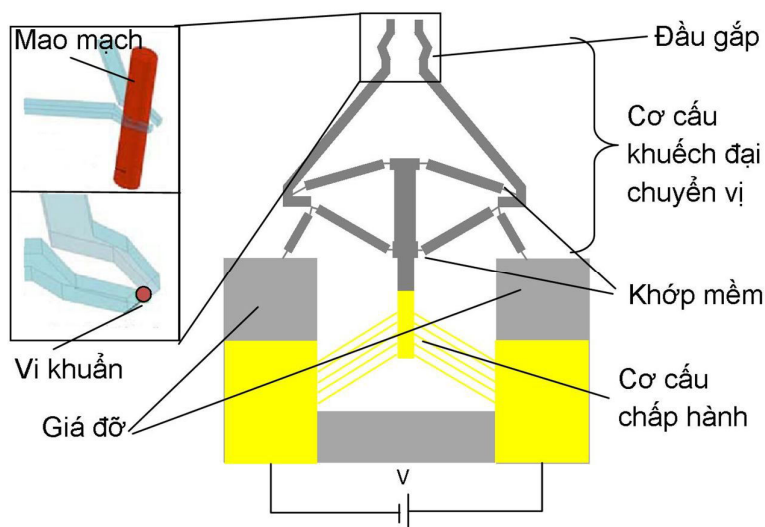
Bên cạnh cấu trúc trên, cơ cấu có nhiều lớp vật liệu với độ giãn nở nhiệt khác nhau đã được đề xuất, ví dụ ở [40-45]. Một vi gắp nhiệt điện 3 lớp đã được thiết kế với tính chất tốt hơn về độ uốn, dải điện áp hoạt động, và khả năng điều khiển [46]. Như mô tả tại Hình 1.7, lớp trên cùng, lớp giữa và lớp dưới cùng của thanh dầm được chế tạo bởi titan, silic ôxít, và poly silic. Titan được chọn làm lớp trên cùng vì vật liệu này tạo ra độ uốn cong lớn nhất dưới tác động của nhiệt độ. Khi điện áp đặt vào các đầu của lớp titan, nhiệt độ tăng lên do hiệu ứng Jun và sự giãn nở xảy ra. Từ số liệu đo đạc, độ dày khác nhau của các lớp này ảnh hưởng đến vùng điều khiển và độ uốn cong của cơ cấu. Để đạt được ổn định cao thì độ uốn cong cần giảm xuống mức hợp lý. Kết quả tốt nhất thu được với độ dày của Ti, SiO<sub>2</sub>, và Poly Si lần lượt là 1, 0,5 và 3  $\mu\text{m}$ .



**Hình 1.7 Một thanh chấp hành vi gấp nhiệt điện 3 lớp [46]**

Bên cạnh đó, nhờ những ưu điểm của vật liệu SU-8 (là một chất cản quang âm dòng epoxy [112]) có các tính chất hóa học và cơ học phù hợp cho việc thiết kế các vi gấp nhiệt điện silic-polyme như hệ số giãn nở nhiệt cao ( $52 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ) [47], suất đàn hồi lớn [48, 49], nhiệt độ hoạt động thấp. Ví dụ, bài báo [50] giới thiệu một vi gấp kết hợp giữa các cánh tay liên kết với nhau tạo thành hình chữ U. Khi cấp nguồn điện, cánh tay “nóng” với trở kháng thấp sẽ tạo ra độ giãn nở nhiệt nhiều hơn cánh tay “nguội”. Ở cấu trúc này [50], vi gấp gồm lớp Cr/Au mỏng hơn 67 lần so với lớp SU-8. Cấu trúc này có độ cứng cao theo chiều dọc nên hạn chế được sự chuyển vị lệch khỏi mặt phẳng thi hành. Kết quả thử nghiệm về nhiệt độ hoạt động trung bình ở mức thấp hơn  $32^\circ\text{C}$  do hệ số giãn nở nhiệt cao của SU-8. Ở cấu trúc này, chuyển vị  $11 \mu\text{m}$  đã được tạo ra với giá trị điện áp thấp hơn mức điện phân. Do đó cơ cấu vi gấp này hoạt động tốt trong môi trường chất lỏng [50]. Thực tế cũng cho thấy vi gấp nhiệt điện sử dụng SU-8 hoàn toàn tương thích với các ứng dụng trong lĩnh vực y sinh.





**Hình 1.8 Cấu trúc vi gấp với hai chế độ hoạt động [51, 52]**

Trong ví dụ khác, vi gấp sử dụng SU-8 như Hình 1.8 [51, 52] với cơ cấu chấp hành nhiệt điện hình chữ V. So sánh với nhóm vi gấp sử dụng cánh tay nóng-nguội, cấu trúc này không dựa vào chênh lệch nhiệt độ ở các phần khác nhau mà hoạt động bằng cách cộng dồn các chuyển vị thành phần. Cấu trúc ba lớp xen kẽ (Đồng-SU-8-Đồng) được sử dụng để triệt tiêu sự chuyển vị lệch khỏi mặt phẳng thi hành. Kết quả thử nghiệm cho thấy vi gấp này có chuyển vị  $71,5 \mu\text{m}$  tại điện áp  $195 \text{ mV}$  và nhiệt độ chỉ thay đổi  $53,7 \text{ }^\circ\text{C}$  trên cơ cấu chấp hành. Thời gian đáp ứng của vi gấp khoảng  $0,23$  giây trong cả hai chu trình đóng và mở má kẹp. Thiết kế đầu kẹp của vi gấp này khá đặc biệt, cho phép thao tác với các vi vật thể ở hai vùng kích thước khác nhau.

Khi so sánh với các vi gấp nhiệt điện khác như dạng thanh chữ U [53-55], vi gấp nhiệt điện dạng chữ V có kích thước và điện áp hoạt động thấp hơn nhiều. Thêm vào đó, nó tạo ra lực kẹp và chuyển vị lớn do cơ cấu có tính chất khuếch đại [55]. Chẳng hạn như vi gấp được báo cáo tại [55] có thể tạo ra chuyển vị  $65 \mu\text{m}$  tại điện áp  $10 \text{ V}$ . Tuy nhiên kích thước của cả hệ thống này rất lớn (cỡ vài mm ở mỗi chiều) và công nghệ chế tạo khá phức tạp.

Một hướng phát triển khác của vi gấp nhiệt điện là sử dụng ống nano các bon có độ uốn dẻo và dẫn điện cao tạo ra chuyển vị không liên tục và đáp ứng nhanh [56]. Tuy nhiên, việc sử dụng ống nano các-bon vào cơ cấu vi gấp chỉ thực hiện được các

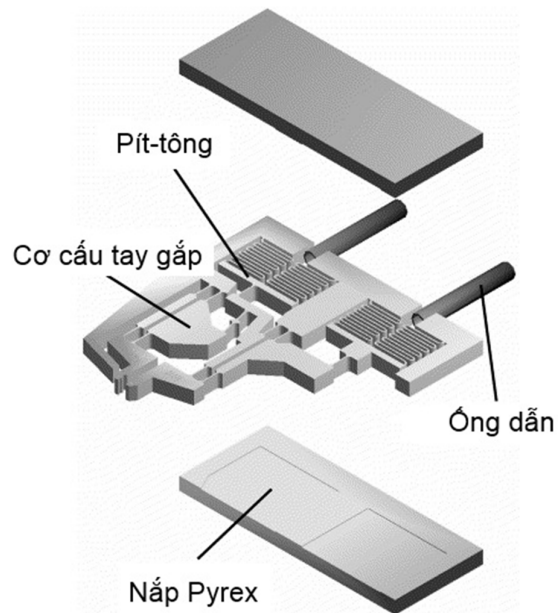
thao tác đơn giản. Mặt khác quy trình chế tạo gặp khó khăn khi cần tích hợp số lượng lớn ống nano cac-bon lên các điện cực.

Đáng chú ý hơn cả, một vi gắp tích hợp cảm biến áp trở với cơ cấu chấp hành gồm các ngăn xếp silic-polyme được sắp xếp nối tiếp theo phương ngang đã được giới thiệu, chế tạo và đo đạc các thông số hoạt động [11]. Thiết bị này bao gồm ba vật liệu: một lớp kim loại mỏng, một khung silic có độ dẫn nhiệt cao và một loại polyme với một hệ số dẫn nở nhiệt lớn. Khi vận hành, nhiệt được truyền hiệu quả từ bộ gia nhiệt tới polyme nhờ độ dẫn nhiệt cao của khung silic, và khung silic có giao diện tiếp xúc lớn với polyme xung quanh. Lớp polyme bị ràng buộc giữa hai tấm silic nên độ dẫn nở nhiệt của polyme có ràng buộc lớn hơn ba lần theo phương ngang so với không có ràng buộc [11]. Sự dẫn nở của lớp polyme sẽ dẫn đến chuyển vị của đầu kẹp.

Cấu trúc vi gắp này [11] được sản xuất dựa trên công nghệ vi khối, và các quy trình polyme, hoàn toàn tương thích với quy trình sản xuất CMOS. Các thông số của vi gắp này cho thấy nó có thể cho phép thao tác với các vi hạt hiệu quả hơn, chính xác hơn so với các cấu trúc vi gắp đã phát triển trước đó. Chuyển vị của vi gắp lên tới 32  $\mu\text{m}$  và nhiệt độ hoạt động trung bình là 176  $^{\circ}\text{C}$  tại điện áp 4,5 V. Vi gắp này có thể thao tác với các vi hạt có kích thước từ 8 đến 40  $\mu\text{m}$ .

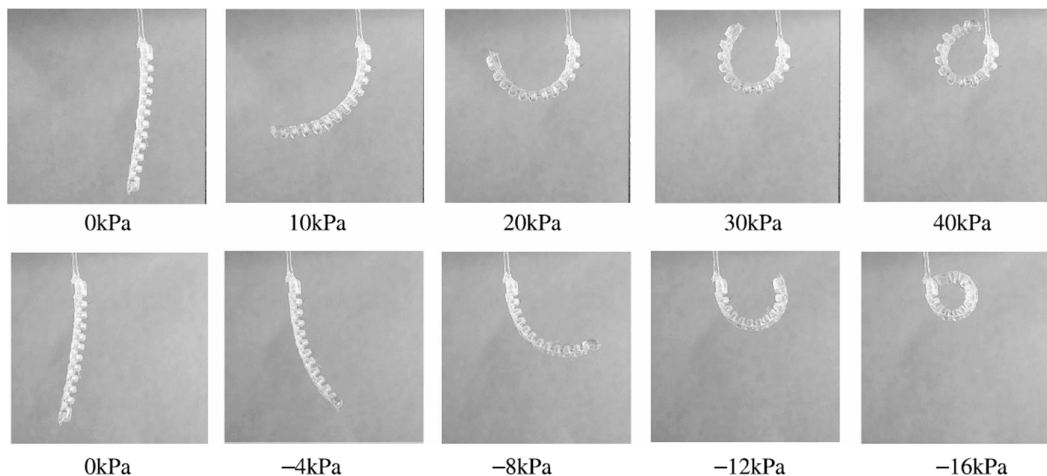
#### 1.2.4 Vi gắp khí nén

Vi gắp khí nén sử dụng năng lượng khí nén để hoạt động. Loại vi gắp này có các ưu điểm nổi bật như mật độ năng lượng cao, khoảng cách chuyển vị lớn, lực kẹp lớn và do sử dụng một số chất lỏng làm phương tiện truyền lực nên rất phù hợp cho các ứng dụng vi phẫu thuật [57]. Cấu trúc cơ bản của vi gắp gồm một pít tông nối với cơ gắp qua các bộ phận đàn hồi. Khi đặt áp suất khí nén vào pít-tông, các phần đàn hồi cho phép pít-tông di chuyển và tạo ra lực cản với môi trường xung quanh giống như một ống thổi. Phần đầu và cuối của ống trụ tròn được chế tạo từ Pyrex wafer. Khe hở giữa các nắp Pyrex và cấu trúc đóng khoảng vài micro mét để tạo ra sự dịch chuyển giữa pít tông và các bộ phận đàn hồi. Kết quả thử nghiệm [57] chỉ ra cấu trúc này có thể tạo ra sự chuyển vị 600  $\mu\text{m}$  với áp suất  $1,2 \times 10^4$  Pa.



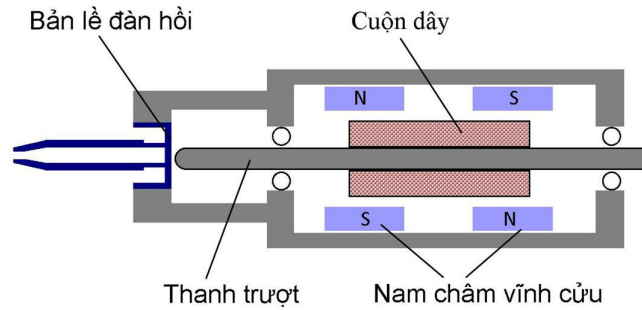
**Hình 1.9 Cấu trúc vi gấp khí nén [57]**

Một cơ cấu sử dụng khí nén khác được chế tạo từ silicon và cao su cũng được giới thiệu [58]. Với cấu tạo đơn giản gồm một chuỗi các hốc thông nhau và ống dẫn khí nén, cấu trúc này có thể uốn cong theo cả hai hướng sử dụng áp suất hút và đẩy. Tương tự như các loại vi gấp sử dụng khí nén khác, cần áp lực rất cao để tạo ra chuyển vị (lên đến 40 kPa).



**Hình 1.10 Đáp ứng của vi gấp khí nén ở các giá trị áp suất khác nhau [58]**

### 1.2.5 Vi gấp điện từ



Hình 1.11 Sơ đồ thiết kế của vi gấp điện từ [60]

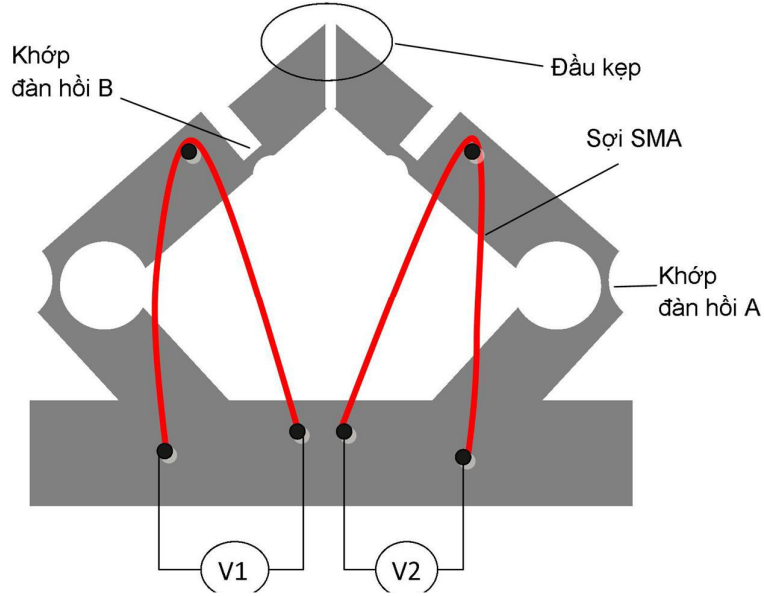
Trong các nghiên cứu gần đây, mô tơ cuộn dây di động (VCM) được sử dụng để điều khiển tuyến tính chính xác [59]. So sánh với các loại khác, vi gấp này có kích thước khá lớn và rất khó để thu nhỏ, tuy nhiên nó cũng có một số ưu điểm. Ví dụ, vi gấp này có thể gấp được vật lớn hàng trăm micro mét. Đặc tuyến tuyến tính của vi gấp này tốt hơn rất nhiều so với vi gấp áp điện, cho phép điều khiển dễ dàng, mạch điện đơn giản và kinh tế. Như mô tả trên Hình 1.11, vi gấp gồm VCM, bản lề đàn hồi, càng đẩy, và cánh tay gấp [60]. Vi gấp hoạt động do lực Lorentz tạo ra bởi dòng điện chạy qua từ trường. Áp dụng điện áp vào cơ cấu chấp hành dẫn đến sự di chuyển tuyến tính của càng đẩy. Tiếp theo, bản lề đàn hồi bị bóp méo làm các má kẹp mở ra. Kết quả thực nghiệm [60] cho thấy thiết bị có thể thao tác với vật thể kích thước 300  $\mu\text{m}$  với lực kẹp là 18 mN.

Một cấu trúc vi gấp điện từ khác nhỏ gọn hơn được giới thiệu khi bố trí một phần lò xo xoắn nằm trong từ trường [61]. Cấu trúc này sử dụng từ trường bé hơn nhưng lại tạo được chuyển vị lớn hơn so với cấu trúc sử dụng lò xo thông thường.

### 1.2.6 Hợp kim định hình

Hợp kim định hình (SMA) là cơ cấu chấp hành lý tưởng cho vi gấp khi ưu tiên mật độ năng lượng hơn tốc độ [62]. Hiệu ứng nhớ của các hợp kim tồn tại do cấu trúc tinh thể của vật liệu thay đổi khi có tác động của nhiệt độ giữa pha mềm và pha cứng [63]. Tại nhiệt độ thấp (martensitic phase), cơ cấu chấp hành SMA dễ dàng bị bóp méo, và sẽ trở lại hình dạng ban đầu khi ở nhiệt độ cao (austenitic phase). Ví dụ, một

vi gấp dựa vào hiệu ứng này gồm hai cánh tay, một cơ cấu chấp hành SMA, và một cấu trúc đàn hồi song song tạo ra phản lực để định hướng chuyển vị của cánh tay [64]. Ở nhiệt độ thấp, thanh chấp hành bị uốn cong do lực đàn hồi. Khi gia nhiệt, thanh chấp hành trở về hình dạng ban đầu của nó và tạo ra chuyển vị cho cánh tay chấp hành. Vi gấp này có thể thao tác với vật thể có chiều ngang 60  $\mu\text{m}$  trong môi trường chất lỏng.



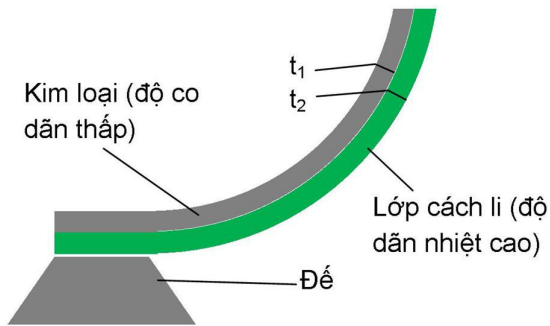
**Hình 1.12** Sơ đồ nguyên lý của vi gấp sử dụng SMA [65]

Nhiều vi gấp khác được thiết kế sử dụng dây SMA [62, 65, 67]. Ví dụ, vi gấp như Hình 1.12 hoạt động theo nguyên lý như sau. Khi các sợi dây SMA được cấp vào một điện áp, nhiệt lượng tỏa ra và làm nó co lại kéo theo di chuyển của đầu kẹp. Các bản lề dẻo tạo ra lực đàn hồi, khi ngắt dòng điện qua các sợi dây SMA thì các đầu kẹp sẽ trở về vị trí ban đầu [65].

SMA hiện được ứng dụng các lĩnh vực vi gấp hay vi bơm trong lĩnh vực y tế, với kích thước từ màng mỏng đến kích thước rất lớn [66]. Mặc dù mang một số tính năng hữu ích, vi gấp SMA có một số nhược điểm. Nhược điểm lớn nhất là SMA chỉ định hình tại một nhiệt độ cụ thể, do đó giá trị chuyển vị và lực kẹp không linh hoạt. Dẫn đến ứng dụng của dạng vi gấp này rất hạn chế.

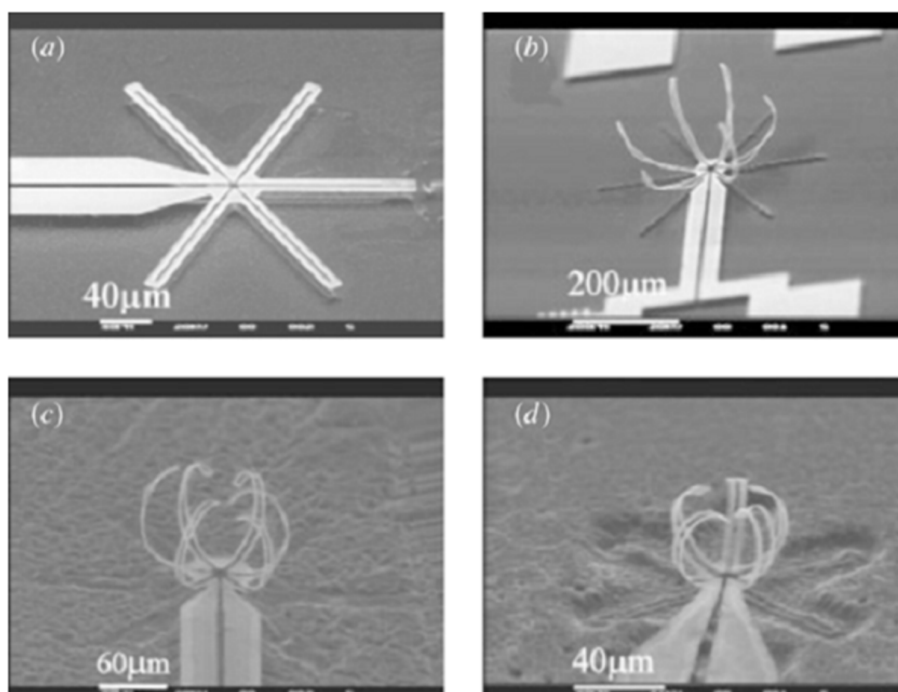
### 1.2.7 Các loại vi gấp khác

Cấu trúc vi gấp dựa trên sức căng đã được thiết kế nhằm hạn chế chuyển vị theo hướng không mong muốn bằng cách giảm sức căng giữa các màng mỏng có độ dẫn khác nhau [68]. Cho phép ứng dụng các vi gấp này trong lĩnh vực mà bắt buộc thiết bị MEMS phải tiếp xúc trực tiếp với môi trường bên ngoài. Khi năng lượng đạt đến điểm giải phóng, một lớp sẽ uốn cong, giãn nở về thể tích và dẫn đến sự hiệu ứng kẹp như mong muốn. Tuy nhiên, nếu các lớp đó bị bao phủ bởi màng mỏng khác có ứng suất nén hay ứng suất căng bé, thì lớp phía trên cùng sẽ uốn cong cả hai lớp phía dưới [68]. Trường hợp này được mô tả tại Hình 1.13.



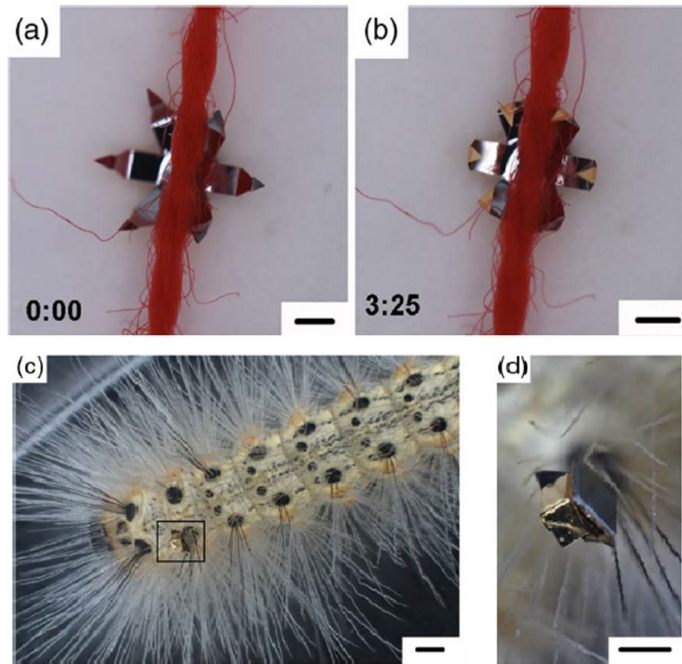
Hình 1.13 Sơ đồ của một cơ cấu kim loại - cách li khi bị uốn cong [68]

Một cấu trúc khác gồm nhiều cánh tay kép [69] được biểu diễn trên Hình 1.14. Ưu điểm của cấu trúc này là có thể giữ và gấp các vi vật thể mà không cần tác động lực trực tiếp lên đối tượng đó, vì vậy sẽ tránh được hư hại cho đối tượng. Cấu trúc này sẽ ở trạng thái thường mở và cần nhiệt độ rất cao để các cánh tay khép lại. Vi gấp giới thiệu tại [70] cũng sử dụng nhiều lớp tạo thành cánh tay cong. Tuy nhiên, sức căng không đủ để nó đóng lại hoàn toàn khi được kích hoạt. Thông thường đường kính của các cánh tay dài hơn 500  $\mu\text{m}$ . Để khắc phục hạn chế trên, cấu trúc carbon giống kim cương (DLC) và Ni kép phủ trên các cánh tay có chiều dài khoảng 18  $\mu\text{m}$  tạo thành một cơ cấu gấp đã được thiết kế [69], xem Hình 1.14. Lớp DLC sẽ kéo căng lớp Ni kép để tạo nên độ cong cho các cánh tay. Cấu trúc mới này gấp được các vi vật thể có kích thước khoảng 20-50  $\mu\text{m}$ . Thiết bị này có thể mở ra một góc 90° với công suất tiêu thụ thấp hơn 20 mW tại nhiệt độ 430 °C.



**Hình 1.14** Hình ảnh dưới kính hiển vi điện tử của vi gấp nhiều cánh tay [69]

Phương pháp quang khắc để chế tạo vi gấp được sử dụng rộng rãi [71, 72] nhờ có độ chính xác cao và cho phép tích hợp nhiều cơ cấu trong một hệ thống để sử dụng cho nhiều ứng dụng song song [73, 75]. Vi gấp đề cập tại [71] biểu diễn khả năng gấp và mang vật thể trên các sợi di động hoặc sợi lông của một con sâu róm đang sống mà không cần nối dây hay nguồn điện (xem Hình 1.15). Vi gấp này được thiết kế ở chế độ thường mở và chỉ đóng lại khi được nung nóng. Các cấu trúc không dây này [76-80] rất quan trọng trong nhiều ứng dụng y học hay giám sát từ xa. Tuy nhiên, khi các vi gấp được ứng dụng trong lĩnh vực y sinh, các yêu cầu nghiêm ngặt về nhiệt độ và điện áp hoạt động được đặt ra. Nguyên nhân là do nhiệt độ và điện áp cao có thể phá hủy các tế bào sống, vì vậy hầu như không ứng dụng được vi gấp cho lĩnh vực này.



Hình 1.15 Hình chụp hoạt động của cấu trúc vi gấp không dây ở (a) nhiệt độ phòng, (b) ở nhiệt độ 43 °C, (c) và (d) trên một con sâu róm đang sống [71]

### 1.3 Giới thiệu các loại cảm biến dùng cho vi gấp

#### 1.3.1 Cảm biến quang học

Để tăng độ chính xác khi điều khiển hoạt động của vi gấp, cảm biến quang học được phát triển để giám sát hình ảnh của các vi cấu trúc cũng như tạo tín hiệu phản hồi cho hệ thống điều khiển. Việc ứng dụng cảm biến quang học làm tăng hiệu quả hoạt động của các vi công cụ, quan trọng nhất là nhìn thấy hoạt động chi tiết của chúng, gồm dữ liệu chuyển động, bộ hình ảnh [72], v.v.. Trong các nghiên cứu đó, các hệ thống như máy đo giao thoa chớp, vi ảnh kỹ thuật số, và máy đo xung động laser-doppler đã được phát triển [73]. Tuy nhiên, các hệ thống trên bị hạn chế trong nhiều ứng dụng do giá thành và kích thước của chúng, nhiều tác giả đã đề xuất hệ thống đo đặc tính động của cơ cấu chấp hành và chuyển vị của đầu kẹp bằng phương pháp hội tụ quang học [72].

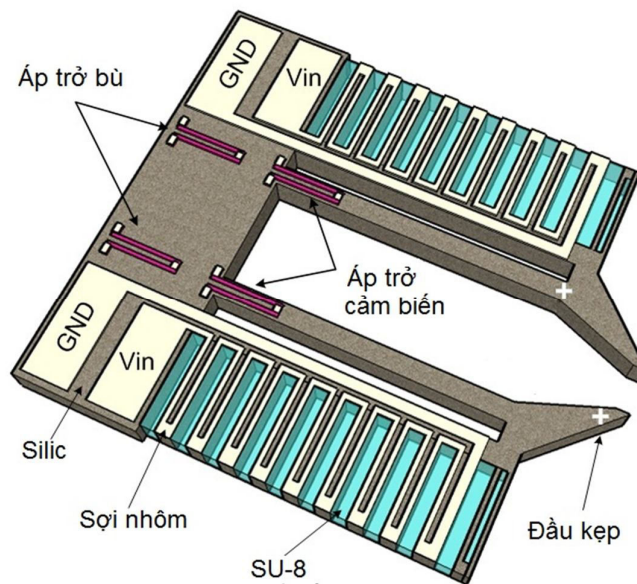
Các vi vật thể có thể thấy được bằng hình ảnh kỹ thuật số của kính hiển vi trong ứng dụng hội tụ quang học [74]. Vì độ sâu trường ảnh hẹp nên hình ảnh của vi gấp có



thể bị mờ đi khi chuyển động, một phương pháp có độ tin cậy cao hơn đã được phát triển để khắc phục vấn đề này. Mặc dù cơ cấu chuyển động liên tục và thu thập nhiều hình ảnh để xác định điểm hội tụ tốt nhất, chỉ một số ít trường hợp sử dụng trong thực tế. Phương pháp nội suy đề cập tại [72] có thể sử dụng để tính chiều sâu trường ảnh chính xác. Một tính năng khác của phương pháp này là chuyển vị của đầu kẹp có thể tính toán được dựa trên hình ảnh. Cũng giống như các hệ thống cảm biến quang học khác, phương pháp này cần thiết bị phức tạp, kích thước lớn, đặc biệt là giá thành cao nên tính khả dụng không cao.

### 1.3.2 Cảm biến lực áp trở

Cảm biến lực đóng vai trò rất quan trọng trong quá trình gấp vật thể. Nó cung cấp thông tin theo thời gian thực về lực tác động lên đối tượng nhằm tăng độ tin cậy của cơ chế điều khiển và giảm ảnh hưởng tới đối tượng đó. Vi gấp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến áp trở đã được đề xuất [11, 84, 85]. Cấu trúc này có thể xác định được chuyển vị, lực gấp và nhiều ưu điểm khác, xem Hình 1.16 [86].



**Hình 1.16** Hình vẽ khối chức năng của vi gấp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến [86]

Vi gấp gồm cơ cấu chấp hành nhiệt điện silic-polyme [87] và thanh dầm cảm biến lực áp trở [88]. Cấu trúc rãnh lược silic và cánh tay gấp được thiết kế để tạo ra độ

giãn nở nhiệt tối ưu. Khi nhiệt lượng tỏa ra, hiệu ứng giãn nở nhiệt làm cả hai cánh tay của vi gấp và thanh dầm đỡ cảm biến bị uốn cong và điện trở của áp trở thay đổi. Sự chuyển vị cũng được giám sát thông qua điện áp ra của cầu Wheatstone được cấu hình từ 4 thanh áp trở. Lực tương tác giữa đầu má kẹp với vật thể được xác định thông qua vị trí chuyển vị và độ cứng của cánh tay chấp hành [86]. Cơ cấu chấp hành bao gồm một lớp nhôm phía trên các răng lược silic và đóng vai trò là nguồn nhiệt khi có điện áp cung cấp vào hai đầu. SU-8 polyme được xếp xen kẽ vào giữa các răng lược silic. Khi sợi nhôm được cấp điện, nhiệt lượng tạo ra và khuếch tán hiệu quả xuống các lớp polyme phía dưới nhờ cấu trúc xương silic. Các lớp polyme giãn nở theo phương ngang và uốn cong cánh tay hay dịch chuyển đầu kẹp. Chuyển vị cực đại của vi gấp này là 32  $\mu\text{m}$  và nhiệt độ hoạt động trung bình là 176  $^{\circ}\text{C}$  tại điện áp nguồn 4,5 V. Độ nhạy của cảm biến lực đạt tới 1,7 nN/m và độ chính xác của bước đo chuyển vị là 1,5 mV/ $\mu\text{m}$  [86 - 89].

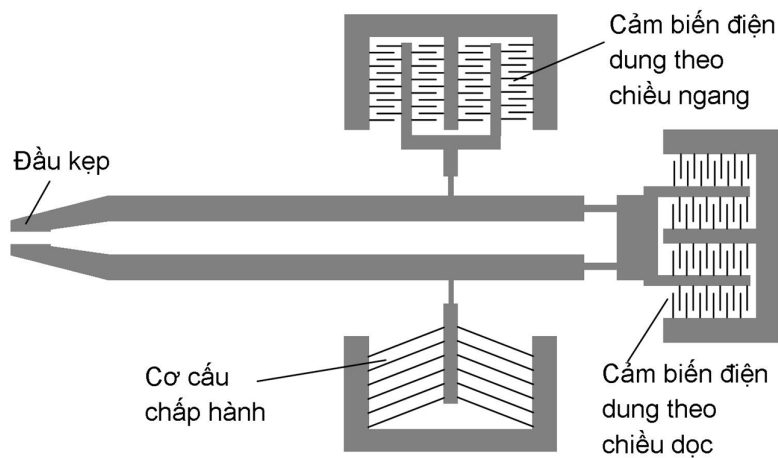
### 1.3.3 Cảm biến lực điện dung

Mặc dù cảm biến lực áp điện tích hợp [92] và phương pháp quang học [93] được phát triển để đo lực, vấn đề chính của các thiết bị này là quy trình chế tạo và quá trình đo đặc phức tạp. Để khắc phục nhược điểm trên, một vi gấp điện từ tích hợp cảm biến lực điện dung được giới thiệu vào năm 2007 [12], xem Hình 1.1. Cấu trúc nguyên khối gồm cảm biến lực và cơ cấu chấp hành với quy trình chế tạo đơn giản và hạ giá thành sản phẩm. Công nghệ chế tạo dựa trên công nghệ phát triển cho cảm biến lực điện dung đa chiều [12, 94, 95]. Cơ cấu chấp hành sử dụng cơ chế phát động răng lược ngang và cảm biến lực điện dung theo chiều dọc. Khi đặt một điện áp vào cơ cấu chấp hành, lực đẩy được tạo ra làm cánh tay kẹp di chuyển lên trên. Khi đối tượng được gấp, lực kẹp chuyển sang cấu trúc răng lược theo chiều dọc. Tín hiệu điện áp từ các tụ điện này được đọc bởi chip MS3110 từ MicroSensors [12]. Vi gấp này hoạt động trong khoảng từ 0 đến 100  $\mu\text{m}$  với dải điện áp vào là 0-150 V.

Bên cạnh đó, sáng chế [96] mô tả một hệ thống vi gấp bao gồm cả mạch điều khiển. Vi gấp này gồm một cảm biến lực điện dung và hai cánh tay chấp hành. Mạch điều khiển gồm ba phần chính: một mạch đo lực phản hồi, một mạch điều khiển điện

áp ra, và một mạch xử lý trung tâm. Vi gắp này có nhiều ưu điểm như độ chính xác cao, nhỏ gọn và cấu trúc đơn giản.

Một bằng độc quyền sáng chế khác [97] như trên Hình 1.17 đề cập đến một thiết kế và phương pháp vi chế tạo cho vi gắp có khả năng thao tác với các vật thể kích thước micro và nano mét và khả năng giám sát lực kẹp chính xác cao theo cả hai phương x và y.



Hình 1.17 Sơ đồ thiết kế vi gắp tích hợp cảm biến lực điện dung [97]

## 1.4 So sánh các loại vi gắp và cảm biến dùng cho vi gắp

### 1.4.1 So sánh giữa các loại vi gắp

Với các loại vi gắp đã được đề cập theo phân loại về cơ chế phát động chuyển vị ở trên, mỗi loại đều có ưu và nhược điểm riêng.

- Vi gắp tĩnh điện: Các vi gắp hoạt động theo cơ chế tĩnh điện thường tạo ra chuyển vị lớn mà không có độ trễ và hoạt động ở nhiệt độ thấp với cấu trúc khá đơn giản. Hạn chế lớn nhất của vi gắp này là phải sử dụng điện áp cao. Nhiều nhóm nghiên cứu đã tìm cách để hạ điện áp hoạt động của loại vi gắp này bằng cách tăng số lượng các răng lược, tuy nhiên điều này dẫn đến cấu trúc của vi gắp lớn hơn và quy trình chế tạo phức tạp hơn so với cấu trúc trước đó. Bên cạnh đó, chuyển vị của đầu kẹp cũng có thể tăng lên bằng cách thay đổi hình dạng của răng lược hoặc tìm cách tăng khoảng cách dịch

chuyển của bản cực di động trong phạm vi cho phép mà không bị ảnh hưởng bởi hiệu ứng pull-in.

- Vi gấp nhiệt điện: Các vi gấp trong nhóm này có thể tạo ra lực kẹp và chuyển vị lớn với điện áp hoạt động thấp. Quy trình chế tạo của chúng cũng khá đơn giản so với các loại vi gấp khác. Tuy nhiên, do bản chất của việc chuyển đổi năng lượng ở vi gấp này là phải cung cấp nhiệt để tạo ra sự giãn nở, dẫn đến nhiệt độ hoạt động của các hệ thống này tăng lên đáng kể. Khi vi gấp này can thiệp vào với đối tượng y sinh như tế bào sống trong môi trường chất lỏng, nhiệt độ cao có thể ảnh hưởng tới đối tượng và cần phải có thêm các bộ phận cách nhiệt trong các ứng dụng thực tiễn. Một nhược điểm khác của loại vi gấp này là sự giãn nở phi tuyến do nhiệt độ cao.
- Vi gấp điện từ và vi gấp khí nén: Các vi gấp sử dụng cơ chế điện từ hoặc khí nén thường cho lực kẹp và chuyển vị rất lớn. Tuy nhiên hạn chế chủ yếu của các loại vi gấp này là có kích thước lớn và quy trình chế tạo rất phức tạp, điều này dẫn đến việc không thể ứng dụng chúng trong phạm vi micro và nano mét.
- Các loại vi gấp khác:
  - o Vi gấp áp điện có thể tạo ra lực kẹp lớn và chuyển vị có độ chính xác rất cao. Chuyển vị tuyến tính và độ đàn hồi cao cũng là một ưu thế của loại vi gấp này. Hạn chế của vi gấp áp điện là cho chuyển vị nhỏ, quy trình chế tạo rất đắt và có độ trễ rất lớn.
  - o Các vi kẹp sử dụng cấu trúc SMA có thể tạo ra một xung lực lớn với hệ điều khiển điện tử đơn giản. Quy trình chế tạo của chúng đơn giản và giá thành sản phẩm rẻ. Tuy nhiên, đáp ứng chậm và hiệu suất năng lượng thấp là những hạn chế lớn của loại vi gấp này.

#### **1.4.2 So sánh giữa các loại cảm biến dùng cho vi gấp**

Bên cạnh các cấu trúc cảm biến chuyển vị đã được ứng dụng rộng rãi cho các loại vi gấp, cảm biến lực theo thời gian thực đóng vai trò rất quan trọng trong các thao tác với vi vật thể. Nó có thể xác định được lực tác động giữa đầu má kẹp với đối tượng gấp trong quá trình chuyển động của cơ cấu vi gấp, đặc biệt đối với các vi vật thể dễ vỡ và để ngăn ngừa các lỗi có thể xảy ra.

- Cảm biến quang học: Trước khi cảm biến lực và cảm biến chuyển vị được áp dụng, các phương pháp giám sát bằng quang học đã được nghiên cứu rộng

rãi. Tuy nhiên độ nhạy và phân giải của chúng thường thấp, giá thành hệ thống cao và kích thước hệ thống lớn. Bên cạnh đó, do hiệu ứng phản xạ và khúc xạ ánh sáng, phương pháp quang học không phù hợp cho các ứng dụng trong môi trường chất lỏng.

- Cảm biến áp điện: Độ phân giải của cảm biến áp điện khá cao. Tuy nhiên, các vi gắp tích hợp cảm biến áp điện cần phải sử dụng quy trình chế tạo phức tạp và đắt.
- Cảm biến áp trở: Cấu trúc cảm biến và mạch điện điều khiển đơn giản là ưu điểm dễ thấy của loại cảm biến này. Bên cạnh đó là độ nhạy và độ phân giải cao. Tuy nhiên, cảm biến dễ bị ảnh hưởng bởi các yếu tố khác như nhiệt độ môi trường, sai số của quy trình chế tạo v.v., dẫn đến hạn chế tính khả dụng cho một số trường hợp cụ thể.
- Cảm biến điện dung: Việc sử dụng cảm biến điện dung có thể thu được độ nhạy và độ phân giải cao. Quy trình chế tạo cũng khá đơn giản và giá thành sản xuất thấp. Cảm biến điện dung cũng có thể thiết kế theo các phương khác nhau để xác định được lực và chuyển vị theo các hướng nhằm bảo vệ vi gắp và đối tượng được thao tác. Tuy nhiên, do bản chất của cấu trúc cảm biến này đã hạn chế chúng ở các ứng dụng trong môi trường chất lỏng. Mặt khác, kích thước của hệ cảm biến này khá lớn.

### **1.4.3 Lựa chọn đối tượng nghiên cứu của đề tài**

Từ các so sánh giữa các cơ cấu chấp hành của vi gắp cùng với so sánh giữa các loại cảm biến đã được nghiên cứu, có thể thấy hệ thống vi gắp sử dụng cơ chế nhiệt điện sử dụng vật liệu silic-polyme và tích hợp cảm biến áp điện giới thiệu tại [11] đáp ứng hài hòa giữa các tính năng cơ bản dành cho một hệ vi gắp. Nhờ sử dụng cấu trúc xếp tầng các đơn vị ngăn xếp silic-polyme, vi gắp này tạo ra chuyển vị và lực kẹp lớn, đáp ứng nhanh trong khi sử dụng điện áp và công suất tiêu thụ thấp. Công nghệ sản xuất vi gắp này đơn giản và quy trình chế tạo hoàn toàn tương thích với các công nghệ CMOS. Bên cạnh đó, vi gắp này tích hợp được cả cảm biến lực và cảm biến chuyển vị nhờ sắp xếp các thanh áp trở theo một cấu trúc đặc biệt, cho độ chính xác cao cũng như giá trị điện áp phản hồi lớn.

Cấu trúc cảm biến tích hợp trên vi gắp trên sử dụng bốn (4) áp trở được kết nối theo sơ đồ cầu Wheatstone và bố trí hai (2) áp trở trên thanh đỡ cảm biến. Tín hiệu phản hồi sẽ là vi sai điện trở ở hai điểm giữa của kết nối cầu Wheatstone. Nhờ vào thiết kế này, hệ cảm biến có thể xác định được đồng thời chuyển vị, lực kẹp tác động lên đối tượng thao tác (theo các hướng khác nhau) [11, 86] khi chuyển mạch kết nối điện giữa các thanh điện trở. Bên cạnh đó, cấu trúc cảm biến này cho độ chính xác cao do đã triệt tiêu được các tín hiệu nhiễu từ bên ngoài, sự chênh lệch về nhiệt độ. Hệ thống vi gắp nhiệt điện silic-polyme giới thiệu tại tài liệu [11] có nhiều ưu điểm nổi bật nhất trong nhóm này.

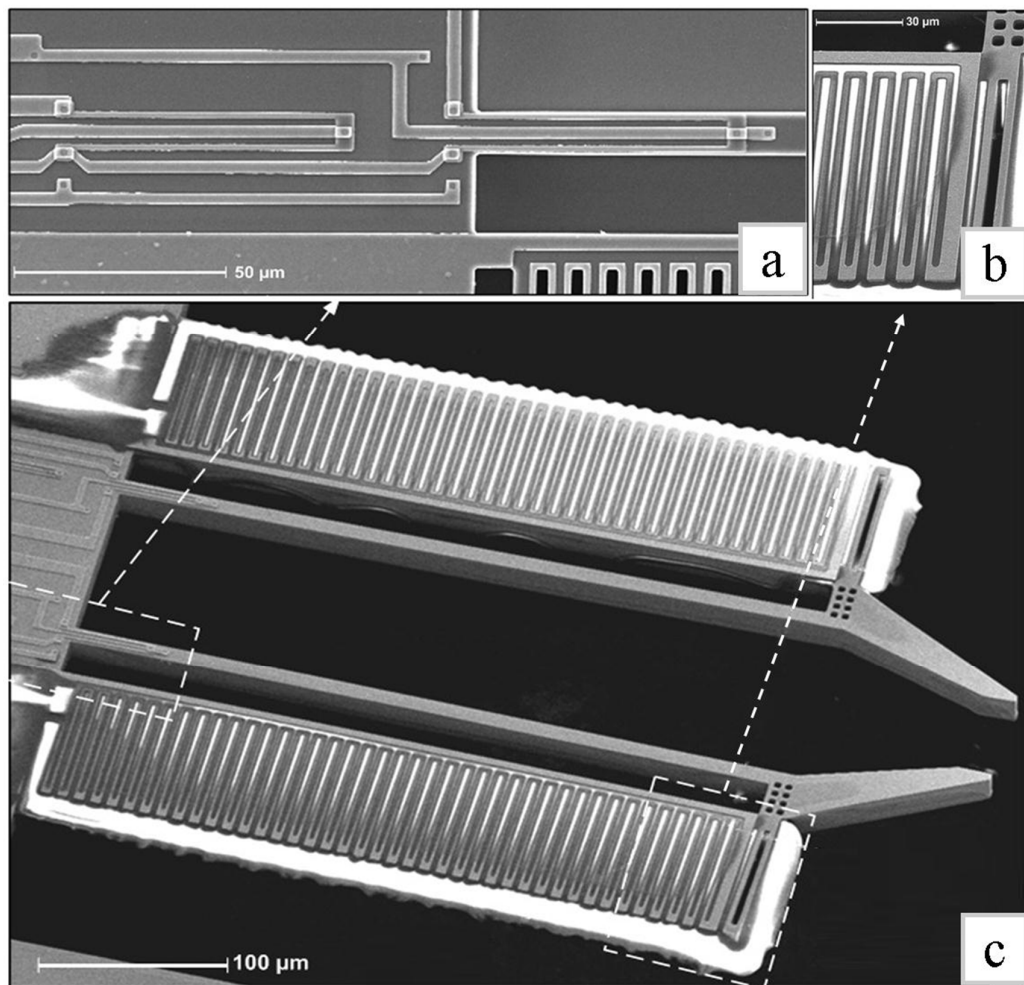
## **1.5 Vi gắp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến**

Với các tính chất khái quát kể trên, vi gắp nhiệt điện silic-polyme hứa hẹn sẽ được áp dụng rộng rãi cho nhiều ứng dụng khác nhau. Tuy nhiên, với các kết quả ban đầu [11], một số nghiên cứu cần được tiếp tục để tối ưu hoạt động của thiết bị nói trên về các thông số nhiệt học, cơ học và bài toán điều khiển khép kín cho phù hợp với các ứng dụng thực tiễn. Để thuận tiện cho các nghiên cứu tiếp theo cho vi gắp này trong luận án, chi tiết của nó được trình bày dưới đây.

### **1.5.1 Thiết kế**

Vi gắp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến gồm cơ cấu chấp hành nhiệt điện và thanh dầm cảm biến áp trở [86]. Sơ đồ nguyên lý của vi gắp được biểu diễn ở Hình 1.16. Cơ cấu chấp hành được thiết kế ở chế độ thường mở, sử dụng các ngăn xếp silic-polyme xếp nối tiếp. Tính toán cơ bản về độ dẫn nở của ngăn xếp đã được thực hiện và áp dụng kích thước có độ dẫn nở cao nhất [100]. Sự sắp xếp này cứng và chắc chắn hơn cấu trúc vi gắp dựa trên cấu hình ống xoắn [86]. Các áp trở cảm biến được cấu hình theo cầu Wheatstone, có khả năng đo được chuyển vị và lực kẹp theo cả hai phương thẳng đứng và phương ngang [88] khi vi gắp hoạt động nhờ vào vi sai trở kháng giữa các cặp áp trở.

Khi cơ cấu chấp hành nhiệt điện được kích hoạt, các thanh dầm cảm biến bị uốn cong đồng thời. Điều này dẫn đến sai lệch áp lực và thay đổi trở kháng của các áp trở nằm trên thanh dầm cảm biến đó. Việc giám sát chuyển vị của đầu kẹp thông qua giá trị vi sai điện áp ở các lối ra của cầu Wheatstone. Lực tác động giữa má kẹp và đối tượng được xác định dựa vào chuyển vị và độ cứng của cánh tay vi gấp. Cấu hình cầu Wheatstone giảm thiểu ảnh hưởng của nhiệt độ tới điện áp lối ra, vì cả hai áp trở đặt trên thanh cảm biến đều có cùng một sự thay đổi nhiệt độ. Hai điện trở khác nằm ngoài thanh cảm biến nhằm thu được tín hiệu phản hồi nhạy hơn do triệt tiêu các can nhiễu từ bên ngoài như biến thiên của nhiệt độ môi trường [11].



Hình 1.18 Ảnh chụp SEM của (a) các áp trở, (b) một phần cấu trúc răng lược của bộ chấp hành và (c) tổng thể cấu trúc vi gấp [86]

Vi gấp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến được chế tạo và biểu diễn ở Hình 1.18. Thiết bị này có tổng chiều dài  $490 \mu\text{m}$ , rộng  $350 \mu\text{m}$ , dày  $30 \mu\text{m}$  và khoảng cách thường mở giữa hai đầu kẹp là  $40 \mu\text{m}$ . Thanh cảm biến áp trở có chiều dài  $390 \mu\text{m}$ , độ rộng  $10 \mu\text{m}$  với 4 áp trở được đặt trên bề mặt. Công nghệ chế tạo dựa trên quy trình DIMES (Delft Institute of Microsystem and Nanoelectrics) và quy trình chế tạo silic-polyme [11]. Hai quy trình này được phát triển một cách độc lập, tuy nhiên cả hai đều tương thích với công nghệ CMOS và rất dễ dàng để kết hợp lại thành một công nghệ duy nhất [11].

### 1.5.2 Mô phỏng và đo đạc

Để mô phỏng hoạt động và đánh giá các đặc tính khác của cấu trúc này, một phần mềm mô phỏng cùng với mô hình mô phỏng của vi gấp đã được sử dụng. Tuy nhiên mô hình mô phỏng này mới chỉ dừng lại ở cấu trúc hai chiều và thể hiện chuyển đổi nhiệt lượng thành cơ năng. Nhiệt lượng được tính toán từ điện trở của lớp nhôm và điện áp nguồn. Từ đó các thông số này được lấy làm tham số đầu vào cho chương trình mô phỏng [86].

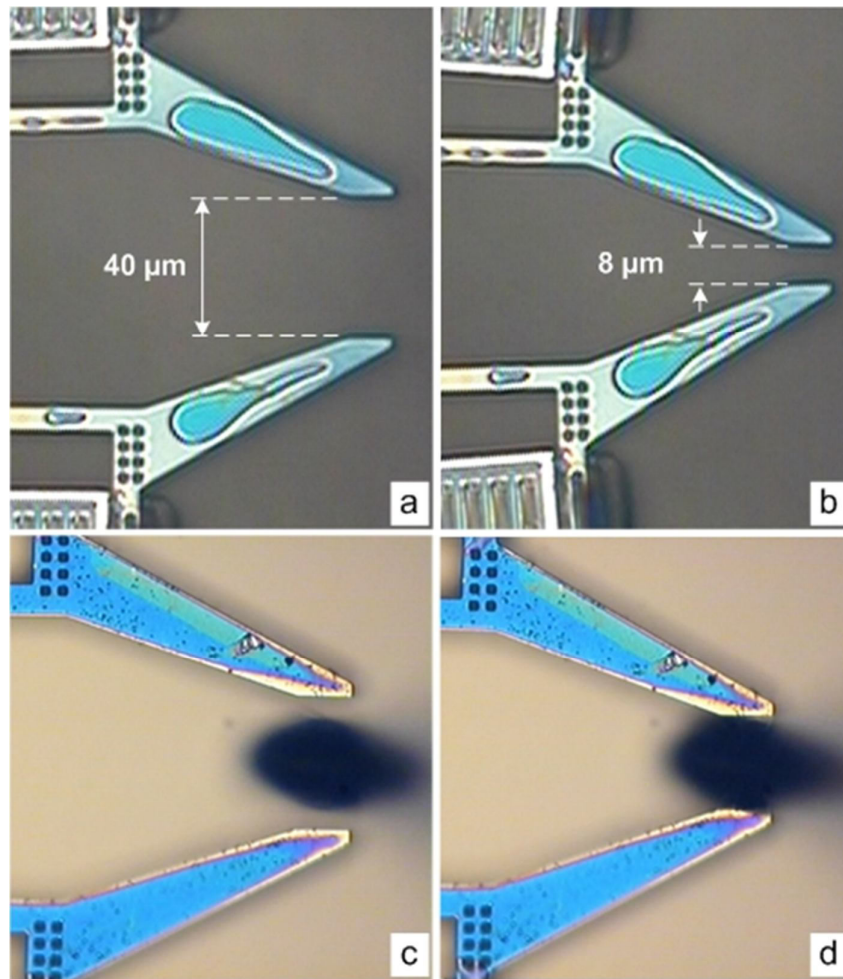
Phiên bản đầu tiên của vi gấp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến được chế tạo và đo đạc bằng Cascade probe station (Cascade Microtech, Inc.) với kính hiển vi tích hợp để đo chuyển vị. Các thông số khác về điện của vi gấp được cấp nguồn, đo đạc và đánh giá nhờ bộ phân tích thông số vi mạch bán dẫn HP4155A (Agilent Technologies, Inc.). Điện áp nguồn cung cấp cho vi gấp hoạt động được tăng từng bước từ 0 đến 5 V, mỗi bước 0,1 V. Chuyển vị của đầu kẹp được giám sát qua camera CCD nằm trên probe station bằng cách so sánh vị trí trên hình ảnh. Nhiệt độ trung bình của hệ thống được giám sát thông qua điện trở của lớp nhôm. Bên cạnh đó, hoạt động của cơ cấu chấp hành cũng được đo đạc và đánh giá bằng cách cấp nguồn nhiệt từ bên ngoài cho vi gấp. Khoảng nhiệt độ dùng để kiểm tra từ 20 đến 120 °C với mỗi bước 20 °C và có sai số  $\pm 0,1$  °C. Nguồn nhiệt bên ngoài gây ra giãn nở tại các ngăn xếp silic-polyme và chuyển vị của đầu kẹp [11, 86].

Nhìn chung, kết quả mô phỏng và đo đạc thực tế ở phiên bản này khá tương đồng, sai số có thể chấp nhận được với độ sai lệch giữa hai phương pháp dưới 10% cho tất cả các thông số. Lý do sự sai lệch này có thể giải thích được đối với mô hình



mô phỏng là chưa được hoàn thiện, mặc định một số tham số đầu vào và các điều kiện biên như bao quanh là chân không, nhiệt độ bao quanh đặt ở nhiệt độ phòng lý tưởng. Với các phép đo đặc thực nghiệm thì chỉ đo được nhiệt độ trung bình hay cấp nhiệt trung bình vào cấu trúc, không đo được một cách chính xác nhiệt độ ở từng vị trí gần xếp silic-polyme do kích thước của chúng quá nhỏ [11].

### 1.5.3 Tính chất của vi gấp

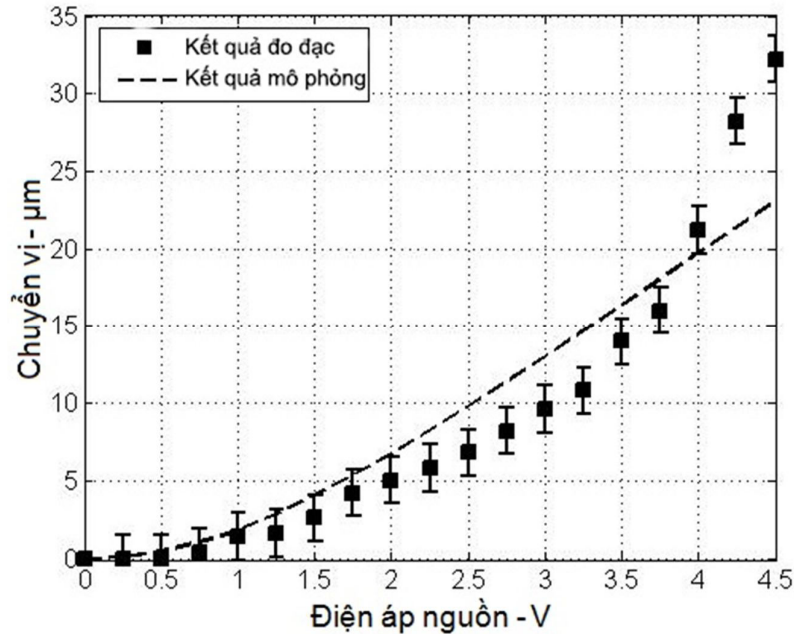


**Hình 1.19** Hoạt động của vi gấp: (a) vị trí ban đầu của các đầu kẹp; (b) khi cấp nguồn điện 4,5 V cho cả hai cánh tay; (c) trước khi kẹp vào đối tượng; và (d) với đối tượng đã được kẹp [86]

Hình 1.19 là hình ảnh của một số vị trí thông thường của đầu kẹp trong quá trình hoạt động. Hình 1.19(a) thể hiện vị trí ban đầu và khoảng cách mặc định  $40\ \mu\text{m}$  giữa hai đầu kẹp có thể nhìn thấy được. Khoảng cách giữa hai đầu kẹp chỉ còn  $8\ \mu\text{m}$  khi cấp

điện áp 4,5 V cho cả hai cánh tay chấp hành (xem Hình 1.19(b)). Hình 1.19(c) và (d) mô tả quá trình gấp sợi dây nối có đường kính 23  $\mu\text{m}$ .

Hình 1.20 biểu diễn chuyển vị của các đầu kẹp trong môi trường không khí khi cấp điện áp cho cơ cấu chấp hành nhiệt điện. Chuyển vị đo bằng tổng dịch chuyển của cả hai đầu kẹp khi chúng đều được cấp nguồn như nhau. Mặc dù có chung đặc tuyến, các giá trị đo đạc có sự sai lệch với giá trị mô phỏng đáng kể. Chuyển vị lớn nhất là 32  $\mu\text{m}$  khi sử dụng điện áp vào là 4,5 V. Do vậy, vi gấp này có khả năng thao tác với các vật thể có kích thước nằm trong khoảng 8 đến 40  $\mu\text{m}$ .



Hình 1.20 Kết quả mô phỏng và đo đạc chuyển vị của đầu kẹp với điện áp nguồn [87]

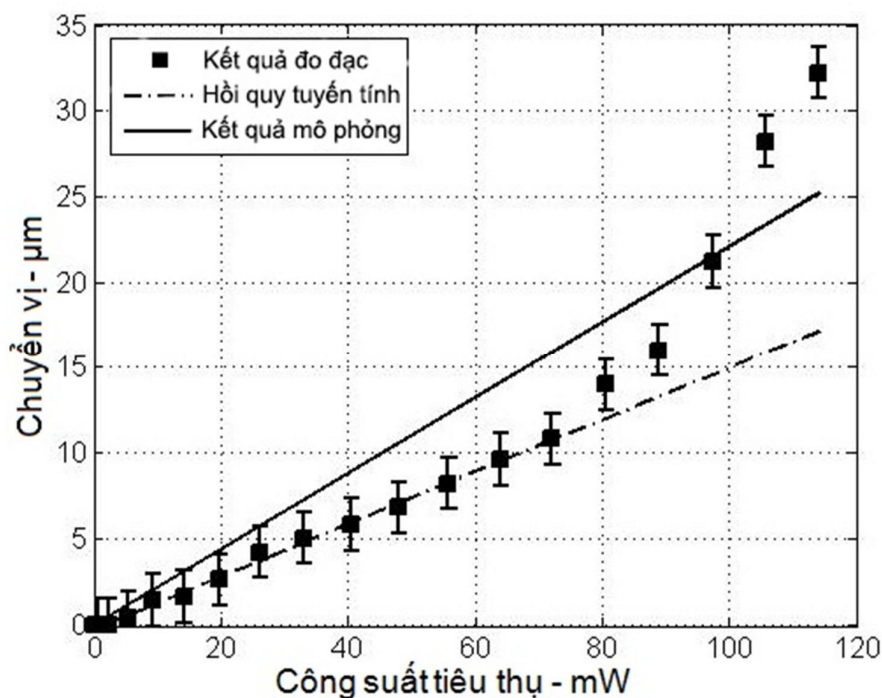
Công suất tiêu thụ được tính bởi giá trị điện áp nguồn và dòng điện tiêu thụ của vi gấp nhiệt điện. Hình 1.21 chỉ ra mối liên hệ giữa chuyển vị đầu kẹp với công suất tiêu thụ. Từ đồ thị cho thấy, thiết bị cần trung bình khoảng 5 mW cho 1  $\mu\text{m}$  chuyển vị đầu kẹp.

Nhiệt độ trung bình trên cơ cấu chấp hành  $\Delta T_{ave}$  có thể tính được từ trở kháng sợi nhôm theo công thức [11]:

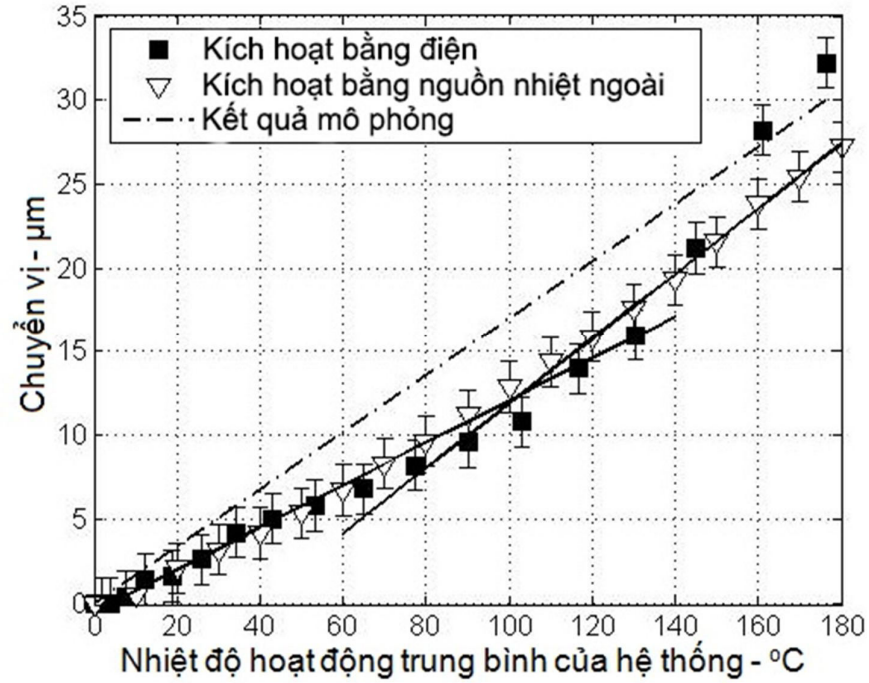
$$\Delta T_{ave} = \frac{R_{act}(\Delta T_{res}) - R_{act}(\Delta T_0)}{R_{act}(T_0)} \times \frac{1}{\rho Al} \quad (1.1)$$

Trong đó  $\rho Al$  là điện trở suất của lớp nhôm,  $R_{act}(T_0)$  là điện trở của cơ cấu chấp hành nhiệt điện (200  $\Omega$  tại nhiệt độ phòng),  $R_{act}(\Delta T_{res})$  là điện trở của cơ cấu chấp hành nhiệt điện khi nhiệt độ trung bình của cơ cấu thay đổi giá trị  $\Delta T_{res}$ .

Sự thay đổi điện trở lớn nhất của cơ cấu chấp hành là 72 % tại điện áp đầu vào là 4,5 V (nhiệt độ trung bình của hệ thống thay đổi 176 °C). Hình 1.22 mô tả mối liên hệ giữa chuyển vị của má kẹp và nhiệt độ hoạt động trung bình của hệ thống. Các giá trị thực nghiệm với hai cách thức: sử dụng nguồn nhiệt từ bên ngoài và sử dụng điện áp để áp vào cấu trúc vi kẹp. Kết quả mô phỏng cũng có được bằng cách đặt vào cấu trúc nguồn nhiệt có giá trị công suất tương đương với thực nghiệm.

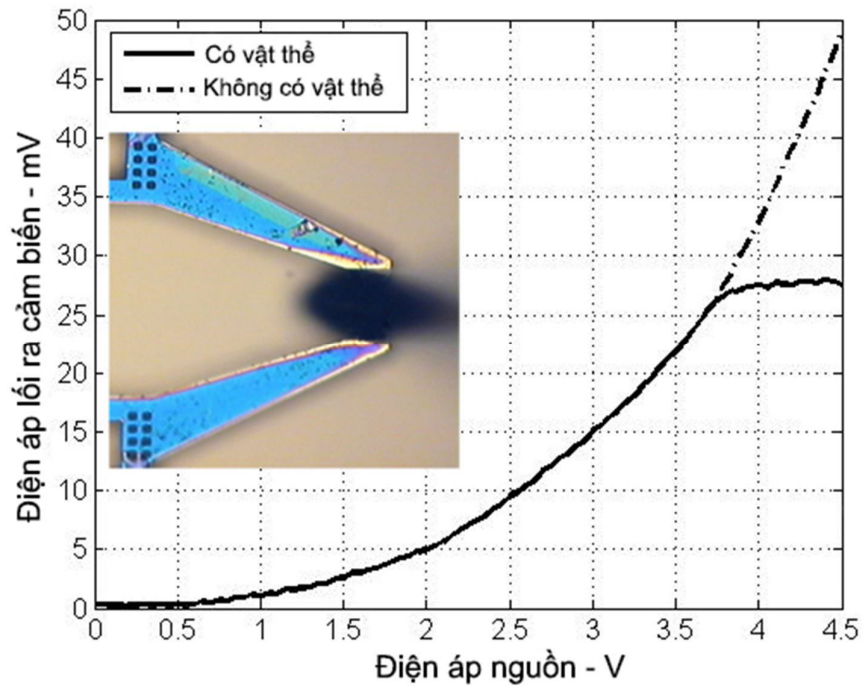


Hình 1.21 Chuyển vị của đầu kẹp với công suất tiêu thụ [86]



Hình 1.22 Chuyển vị của đầu kẹp với nhiệt độ trung bình của hệ thống [86]

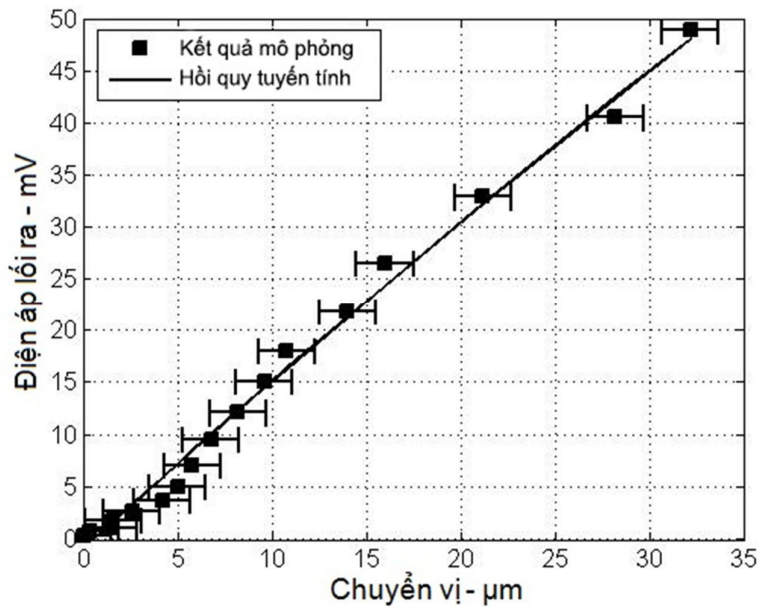
#### 1.5.4 Tính chất của cảm biến



Hình 1.23 Điện áp lõi ra của cảm biến lực với điện áp nguồn cấp cho cơ cấu chấp hành nhiệt điện [86]

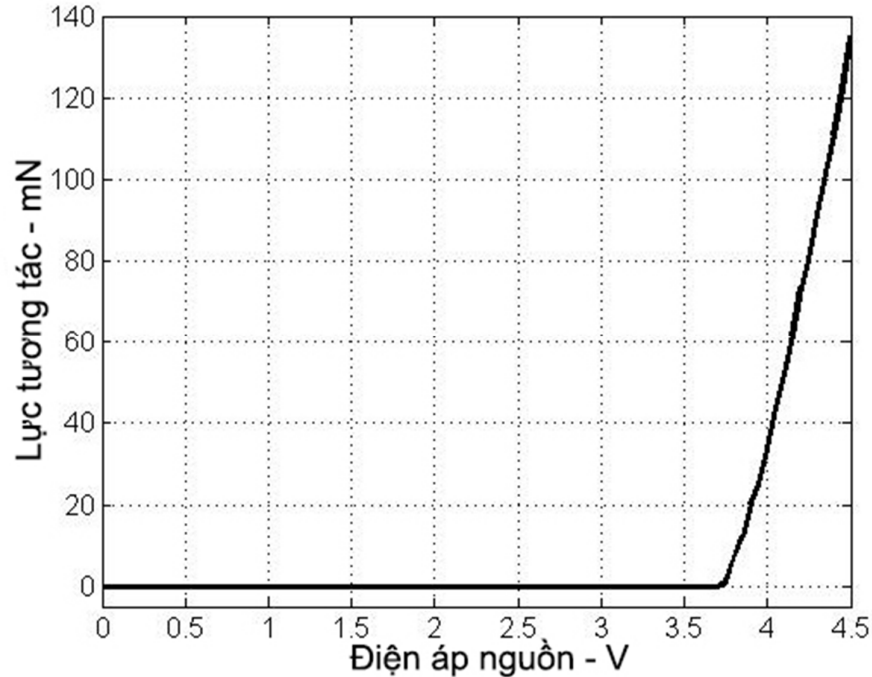
Hình 1.23 biểu diễn mối liên hệ giữa điện áp lối ra của cầu Wheatstone với điện áp cấp cho cơ cấu chấp hành hoạt động. Giá trị điện trở của các áp điện khi không có lực tác động tại nhiệt độ phòng là  $39\text{ k}\Omega$ . Điện áp phân cực một chiều cho cầu Wheatstone là  $1\text{ V}$ . Điện áp lối ra đạt giá trị cực đại là  $49\text{ mV}$  khi sử dụng điện áp nguồn  $4,5\text{ V}$  để kích hoạt vi gấp. Hình 1.23 cũng biểu thị điện áp lối ra của cảm biến khi vi gấp gấp một vật thể có đường kính là  $23\text{ }\mu\text{m}$ . Các đầu kẹp chuyển động một cách đều đặn trước khi kẹp vào vật thể và dừng lại.

Mối liên hệ giữa điện áp lối ra và chuyển vị của đầu kẹp được biểu diễn ở Hình 1.24. Độ nhạy của cảm biến chuyển vị trên vi gấp này được tính từ đặc tuyến là  $1,5\text{ mV}/\mu\text{m}$ .



Hình 1.24 Điện áp lối ra của cảm biến lực với chuyển vị của đầu kẹp [86]

Lực tác động giữa các đầu kẹp với đối tượng gấp có thể ước tính bằng chuyển vị như trong Hình 1.24 và độ cứng cánh tay của vi gấp, trong trường hợp này có giá trị là  $1,8\text{ kN/m}$ . Hình 1.25 biểu diễn kết quả tính toán lực tác động của vi gấp đối với vật thể. Lực tác động là bằng không cho đến khi đầu kẹp chạm vào vật thể với điện áp đầu vào khoảng  $3,75\text{ V}$ . Lực tác động tăng lên đến  $135\text{ mN}$  tại điện áp đầu vào là  $4,5\text{ V}$ .



Hình 1.25 Lực tác động giữa má kẹp và đối tượng gấp với điện áp đầu vào [11]

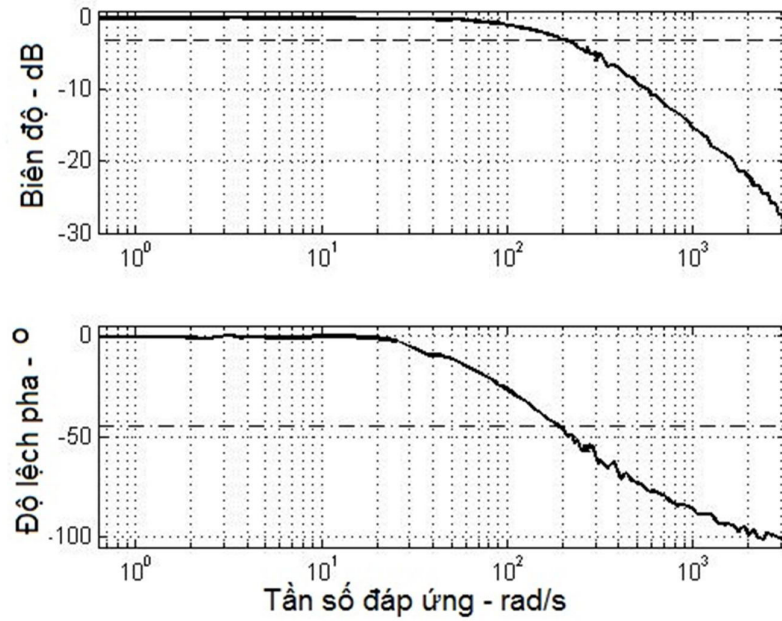
Vi gấp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến này có khả năng xác định đường kính của đối tượng gấp cũng như lực tương tác giữa đầu kẹp và đối tượng đó. Chức năng này rất quan trọng đối với các hệ thống điều khiển trong các ứng dụng vi chế tạo, vi rôbốt, vi phẫu thuật và phân lập tế bào sống.

### 1.5.5 Đáp ứng tần số của vi gấp

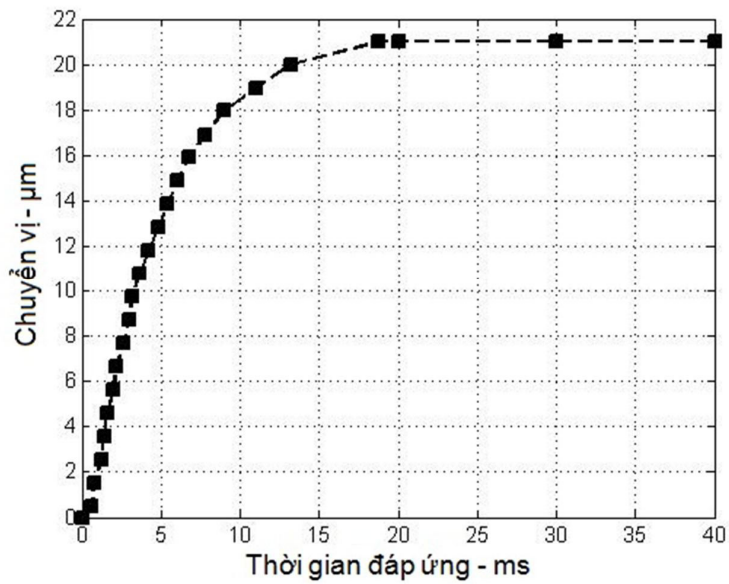
Đáp ứng tần số biểu diễn phụ thuộc của biên độ và pha của đầu kẹp như là một hàm của tần số. Nhờ vào đáp ứng tần số này, chúng ta có thể tính toán hàm điều khiển cũng như hàm truyền tổng thể của hệ thống khi đặt hệ vi gấp vào hệ thống điều khiển khép kín.

Hình 1.26 biểu diễn đáp ứng tần số của vi gấp. Kết quả đo đạc cho thấy tần số cắt của vi gấp nhiệt điện này là 29 Hz. Đáp ứng chuyển vị của vi gấp cũng được thể hiện ở Hình 1.27. Thời gian di chuyển (là thời gian cần thiết để đầu kẹp vi gấp di chuyển từ 10 % đến 90 % của giá trị cuối cùng) và thời gian cân bằng (là khoảng thời gian cần có để vi gấp đạt được giá trị cân bằng cuối cùng từ khi được kích hoạt) lần lượt là khoảng 13 và 18 ms.





Hình 1.26 Đáp ứng tần số của vi gấp [11]



Hình 1.27 Đáp ứng chuyển vị của vi gấp[11]

## 1.6 Kết luận chương 1

Chương này trình bày một cách tổng quan về các loại vi gấp và hệ thống cảm biến sử dụng cho các loại vi gấp đã được nghiên cứu và phát triển trong những năm

gần đây. So sánh các ưu nhược điểm của từng loại vi gấp và cảm biến này. Từ đó cho thấy vi gấp cảm biến nhiệt điện silic-polyme có nhiều ưu điểm vượt trội: công nghệ sản xuất từ wafer silic nguyên khối và tương thích với công nghệ CMOS hiện có, hoạt động ở dải điện áp thấp, đáp ứng nhanh, cho tạo ra lực kẹp lớn, cảm biến tích hợp có thể đo được chuyển vị và lực kẹp, v.v..

Trình bày các tính năng cơ bản của đối tượng nghiên cứu đã được phát triển và đo đạc ở các công trình trước đó. Những kết quả này là tiền đề để thực hiện mục tiêu nghiên cứu trong phạm vi luận án này: phân tích tính toán mô hình tổng quát, lập mô hình mô phỏng, tối ưu cấu trúc và thiết kế hệ điều khiển tích hợp cho hệ vi gấp silic-polyme tích hợp cảm biến.



## Chương 2.

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

### 2.1 Giới thiệu

Vi gấp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến có nhiều ưu điểm hơn các cấu trúc vi gấp khác như tạo ra chuyển vị lớn, thời gian đáp ứng nhanh, điện áp hoạt động thấp và quy trình chế tạo của nó tương thích với công nghệ CMOS. Tuy nhiên, cấu trúc này chưa được phân tích một cách tổng quát theo mô hình toán học và mô hình mô phỏng chưa tích hợp đầy đủ các thông số vật lý và cơ chế chuyển đổi năng lượng. Do vậy, ngoại trừ phương pháp sản xuất thử nghiệm tốn kém, việc tối ưu hay thay đổi vi gấp này dựa trên tính toán hay mô phỏng bằng phần mềm cho phù hợp với từng ứng dụng cụ thể gặp phải khó khăn.

Chương này sẽ trình bày về cách cải tiến mô hình mô phỏng, phân tích tính toán và tối ưu cấu trúc vi gấp kể trên. Đầu tiên, giới thiệu một hình mô phỏng mới có cấu trúc ba chiều và gồm đầy đủ các thông số vật lý cũng như đầy đủ cơ chế chuyển đổi năng lượng. Tiếp theo, phân tích, tính toán phân bố nhiệt độ và chuyển vị của vi gấp khi hoạt động dựa trên mô hình dẫn nhiệt, đối lưu nhiệt và mô hình cơ học cổ điển. Từ đó xác định được phương trình tổng quát về 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 nhằm giảm nhiệt độ và công suất hoạt động xuống cho phù hợp với các ứng dụng trong lĩnh vực y sinh, 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 cơ chế chuyển đổi năng lượng: năng lượng điện thành nhiệt và sau đó từ nhiệt thành chuyển động cơ học. Trong mô hình mô phỏng đầu tiên [11], tác giả mới chỉ lập được mô hình chuyển đổi từ nhiệt năng sang cơ năng (chuyển vị và lực kẹp), các nguồn nhiệt được ước tính và đặt vào chương trình

mô phỏng như các thông số ban đầu [11]. Mô hình này cũng chỉ ở dạng hai chiều, tức là chỉ thể hiện được cấu trúc của vi gắp trên một mặt phẳng.

Trong nội dung nghiên cứu của luận án này, chương trình COMSOL Multiphysics được sử dụng để nâng cấp mô hình mô phỏng hoạt động của hệ vi nói trên. Môi trường mô phỏng COMSOL Multiphysics cho phép dựng mô hình và mô phỏng một hệ vật lý. Từ xác định kích thước hình học, chọn vật liệu và xác định tính chất vật liệu, chia lưới, tới cài đặt các điều kiện nguồn và điều kiện biên cho hệ vật lý cụ thể và sau đó tính toán cho ra kết quả để hình dung. Mô hình mô phỏng được thiết lập nhanh chóng nhờ giao diện trực quan cho các hệ vật lý sẵn có trong các ứng dụng khác nhau, từ dòng chảy, cơ chế truyền nhiệt cho đến kết cấu cơ khí và các thông số điện. Giao diện người dùng COMSOL Multiphysics cung cấp các tùy chọn để xác định phương trình đạo hàm riêng hoặc thông thường của hệ vật lý và liên kết chúng với các giao diện vật lý khác.

Cấu trúc ba chiều (3D) được dựng lên với các kích thước và thông số vật lý của từng lớp vật liệu đúng như bản thiết kế của vi gắp. Các điều kiện của môi trường xung quanh vi gắp cũng được thiết lập (mặc định là môi trường không khí ở nhiệt độ phòng). Chuyển đổi năng lượng trong mô hình này thể hiện qua hai giai đoạn, giai đoạn một là từ điện năng thành nhiệt năng, giai đoạn hai là nhiệt lượng làm giãn nở các lớp polyme để tạo ra chuyển vị của đầu kẹp. Hay nói cách khác, với mô hình này thì độ đàn hồi, chuyển vị, phân bố nhiệt độ, công suất tiêu thụ hay lực kẹp sẽ được xác định khi đặt một điện áp vào hai đầu của sợi nhôm của vi gắp.

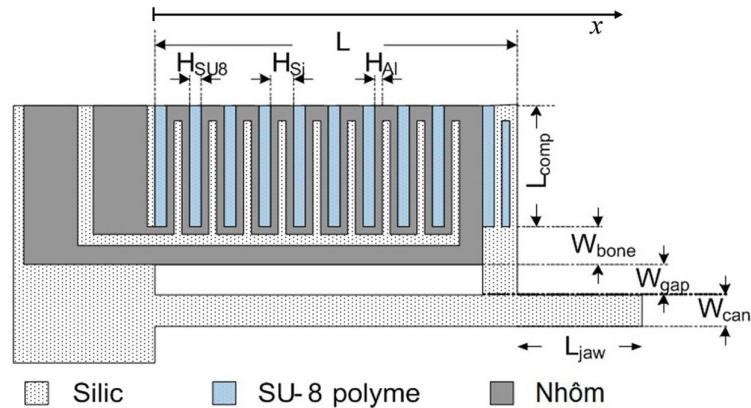
Sau khi mô hình được dựng trong phần mềm, các kết quả mô phỏng của nó được so sánh với kết quả đo đạc thực nghiệm trước đó của hệ vi gắp để xác nhận tính đúng đắn. Trong các mục tiếp theo, mô hình mô phỏng mới này được sử dụng song song với phương pháp tính toán nhằm tăng độ tin cậy của từng phương pháp nghiên cứu.

### **2.3 Phân tích về mặt nhiệt học**

Toàn bộ cấu trúc chấp hành được nung nóng bởi sợi nhôm ở mặt trên các xương silic và dây được coi là nguồn nhiệt của hệ thống. Khi các đầu của sợi nhôm này được nối vào một nguồn điện, nhiệt sẽ tỏa ra theo định luật Joule-Lenz. Trong trường hợp này, nhiệt lượng truyền xuống các khối ngăn xếp silic-polyme. Các khối ngăn xếp silic-

polyme này sau khi được gia nhiệt sẽ giãn nở theo phương  $x$ , tạo nên sự uốn cong cho cơ cấu chấp hành cũng như chuyển vị của đầu kẹp. Nhìn chung, có ba cơ chế chuyển động của nhiệt lượng trong cấu trúc vi gấp này, đó là truyền dẫn, đối lưu và phát xạ nhiệt. Vi gấp hoạt động trong môi trường không khí nên hai cơ chế truyền dẫn và đối lưu cần phải đề cập đến. Vì nhiệt độ hoạt động của hệ thống này thấp hơn  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  nên sự phát xạ hầu như không có và được bỏ qua [102].

Một cánh tay của vi gấp được thể hiện trên Hình 2.1 cùng với các ký hiệu hình học được sử dụng để phân tích hoạt động của nó. Ngoài ra, Bảng 2-1 cũng thể hiện các thông số vật lý cụ thể của vi gấp này.



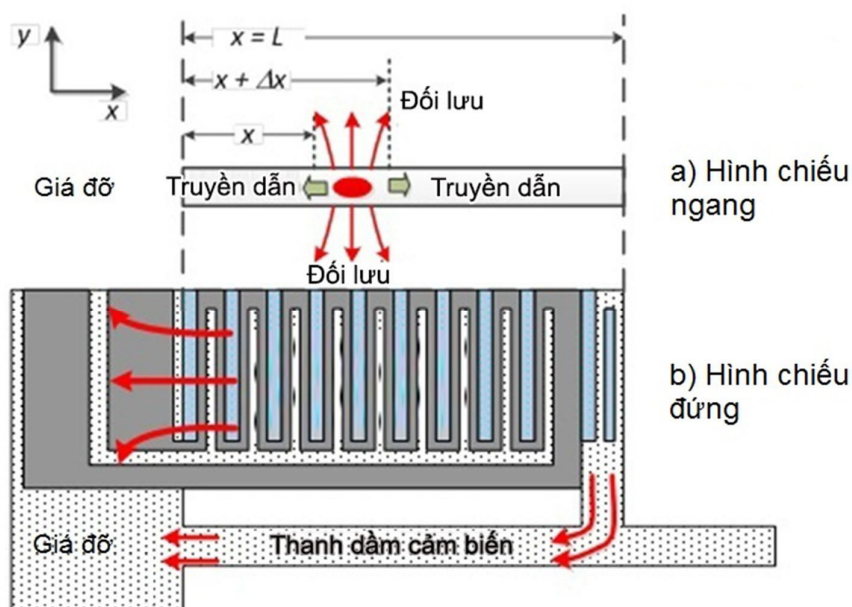
Hình 2.1 Hình chiếu đứng cánh tay vi gấp với các ký hiệu hình học của nó

Bảng 2-1 Thông số vật lý và các ký hiệu hình học của vi gấp

Thông số vật lý/hình học	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Chiều dài cơ cấu chấp hành/dầm cảm biến	$L$	390	$\mu\text{m}$
Chiều dày cơ cấu chấp hành/dầm cảm biến	$y$	30	$\mu\text{m}$
Chiều rộng của khung Silic	$H_{Si}$	6	$\mu\text{m}$
Chiều rộng của lớp SU-8	$H_{SU8}$	3	$\mu\text{m}$
Chiều rộng của sợi nhôm	$H_{Al}$	2	$\mu\text{m}$
Chiều rộng của răng lược	$W_{comb}$	75	$\mu\text{m}$
Chiều rộng của xương Silic	$W_{bone}$	10	$\mu\text{m}$
Khoảng cách giữa cơ cấu chấp hành và thanh dầm cảm biến	$W_{gap}$	22	$\mu\text{m}$

Chiều rộng của thanh dầm cảm biến	$W_{can}$	12	$\mu\text{m}$
Chiều dài của đầu kẹp	$L_{jaw}$	100	$\mu\text{m}$
Độ dày của lớp nhôm	$T_{Al}$	0,6	$\mu\text{m}$
Công suất phát nhiệt của cơ cấu chấp hành	$C$		$\text{J/kg.K}$
Tỉ trọng của cơ cấu chấp hành	$\rho$		$\text{kg/m}^3$
Diện tích mặt cắt	$A$		$\text{m}^2$
Nhiệt độ	$T$		$\text{K}$
Hệ số dẫn nhiệt	$\lambda$		$\text{W/m.K}$
Hệ số đối lưu nhiệt	$\alpha$		$\text{W/m}^2\text{K}$
Nguồn nhiệt	$Q$		$\text{J}$

Hình 2.2 mô tả chi tiết hình chiếu bằng và hình chiếu đứng của vi gấp nhiệt điện silic-polyme để phân tích đặc tính nhiệt của nó ở trạng thái cân bằng. Vi gấp được đặt mặc định trong môi trường không khí. Một phần nhiệt năng trên cơ cấu chấp hành truyền dẫn vào phần giá đỡ thông qua phần tiếp giáp giữa chúng. Một phần nhiệt khác cũng truyền dẫn vào giá đỡ thông qua thanh cảm biến. Ngoài việc dẫn nhiệt, một phần nhiệt lượng thất thoát do đối lưu của không khí bao quanh.



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

Thất thoát nhiệt trên cơ cấu chấp hành chủ yếu do truyền nhiệt vào giá đỡ và đối lưu nhiệt vào không khí. Nhiệt độ có thể được xem là đồng nhất theo chiều dày của cơ cấu vì kích thước của nó rất nhỏ so với chiều dài và chiều rộng của vi gấp, do đó khi phân tích cấu trúc này ta có thể xem như trên một mặt phẳng hai chiều. Tóm lại, việc phân tích và tính toán chỉ thực hiện theo trục  $x$ , còn trục  $y$  được bỏ qua.

Ở trạng thái cân bằng, nhiệt lượng lưu giữ giữa  $x$  và  $x+\Delta x$  được thể hiện qua công thức sau đây [101], [103]:

$$Q_G = \int_x^{x+\Delta x} q_G \cdot y \cdot dx \quad (2.1)$$

Trong đó  $q_G$  là công suất tỏa nhiệt trên cơ cấu chấp hành, do sợi nhôm tỏa ra khi có dòng điện chạy qua, đơn vị  $W/m^2$ ,  $y$  là chiều cao của cấu trúc thanh dầm.

Nhiệt lượng bị thất thoát về phía phải và trái của một đơn vị silic-polyme là [101]:

$$Q_C = \lambda \cdot t \cdot y \cdot \left[ \frac{\partial T(x + \Delta x)}{\partial x} - \frac{\partial T(x)}{\partial x} \right] \quad (2.2)$$

Trong đó  $\lambda$  là hệ số dẫn nhiệt của silic, đơn vị  $W/m.K$ ,  $t$  là nhiệt độ (đơn vị  $K$ ).

Nhiệt lượng thất thoát do sự đối lưu cũng được thể hiện ở công thức 2.3 [103, 105, 106], với  $\alpha$  là hệ số đối lưu nhiệt của không khí, và  $T_0$  là giá trị nhiệt độ phòng:

$$Q_{conv} = -2\alpha(T(x) - T_0) \cdot y \cdot \Delta x \quad (2.3)$$

Áp dụng định luật bảo toàn năng lượng, ta có:

$$Q_G + Q_C + Q_{conv} = 0 \quad (2.4)$$

Đưa các biểu thức (2.1), (2.2) và (2.3) vào phương trình (2.4), ta thu được:

$$T''(x) - \frac{2\alpha}{\lambda t} T(x) = -\frac{q_G + 2\alpha T_{air}}{\lambda t} = -\frac{q_G + 2\alpha T_0}{\lambda t} \quad (2.5)$$

Trong đó  $T_{air}$  là nhiệt độ của không khí bao quanh cơ cấu vi gấp, được coi là có giá trị bằng nhiệt độ phòng.

Đây là phương trình vi phân bậc hai có nghiệm dạng:

$$T(x) = C_1 \cdot e^{\sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda t}}x} + C_2 \cdot e^{-\sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda t}}x} + C_3 \quad (2.6)$$

Chèn phương trình (2.5) vào phương trình (2.6), ta thu được:

$$C_3 = T_0 + \frac{q_G}{2\alpha} \quad (2.7)$$

Áp điều kiện biên:  $T(0)=T_0$

Do vậy

$$C_1 + C_2 + C_3 = T_0 \quad (2.8)$$

Vì gặp còn bao gồm thanh cảm biến [86] và có sự truyền nhiệt giữa các đơn vị silic-polyme với thanh cảm biến này:

$$\lambda \frac{dT(x=L)}{dx} = -q_{cond} \quad (2.9)$$

Với  $q_{cond}$  là nhiệt lượng được truyền giữa các đơn vị silic-polyme với thanh cảm biến.

Phương trình trở thành:

$$C_1 \sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda t}} e^{\sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda t}}L} - C_2 \sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda t}} e^{-\sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda t}}L} = -\frac{q_{cond}}{\lambda} \quad (2.10)$$

Với các hệ số  $C_1, C_2, C_3$  được cho bởi:

$$C_1 = \frac{2 \cdot \left( \frac{q_{cond}}{\lambda \sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda t}}} + \frac{q_G}{2\alpha} \cdot e^{-\sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda t}}L} \right)}{ch \left( \sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda t}}L \right)} \quad (2.11)$$

$$C_2 = \frac{2 \cdot \left( -\frac{q_{cond}}{\lambda \sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda t}}} + \frac{q_G}{2\alpha} \cdot e^{-\sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda t}} L} \right)}{ch \left( \sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda t}} L \right)} \quad (2.12)$$

$$C_3 = T_0 + \frac{q_G}{2\alpha} \quad (2.13)$$

Phân bố nhiệt độ trên thanh silic đỡ cảm biến cũng có thể tính được bởi:

$$T_{can}(x) = \frac{q_{cond}}{\lambda} x + T_0 \quad (2.14)$$

Tại  $x = L$ ,  $T(L) = T_{can}(L)$ , do đó:

$$q_{cond} = \lambda \frac{\frac{q_G}{2\alpha} \left( \frac{1}{ch \left( \sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda t}} L \right)} - 1 \right)}{\frac{1}{\sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda t}}} th \left( \sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda t}} L \right) - L} \quad (2.15)$$

Phân bố nhiệt độ trên cơ cấu chấp hành được tính bằng cách đặt phương trình (2.15) vào các phương trình (2.11), (2.12), (2.13).

$$\text{Cho } \tau = L \sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda t}}$$

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

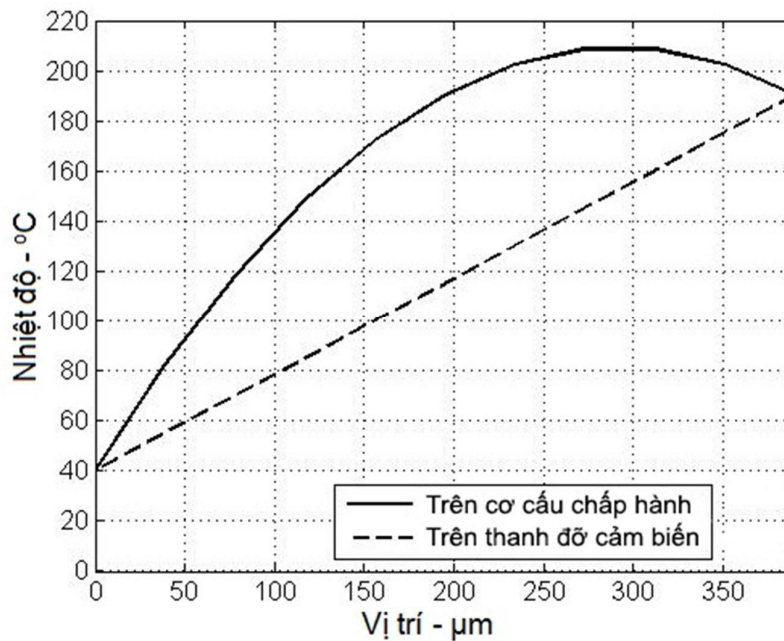
$$C_2 = \frac{q_G}{\alpha} \cdot ch\tau \cdot \left( \frac{\left( \frac{1}{ch\tau} - 1 \right)}{th\tau - \tau} - e^{-\tau} \right) \quad (2.17)$$

Do đó,

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

Trong đó  $C_1, C_2$  được biểu diễn ở phương trình (2.16) và (2.17).

Với các thông số vật lý của vi gắp đã được chế tạo, Hình 2.3 hiển thị phân bố nhiệt độ tương ứng với vị trí (độ dài) trên cơ cấu chấp hành (điện trở của lớp nhôm là  $200 \Omega$ , công suất tỏa nhiệt là  $101 \text{ mW}$  khi cấp điện áp có giá trị  $4,5 \text{ V}$ , và  $q_G \cong 6,94e6 \text{ W/m}^2$  – đây là công suất tỏa nhiệt tính trên tổng diện tích của lớp nhôm).



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

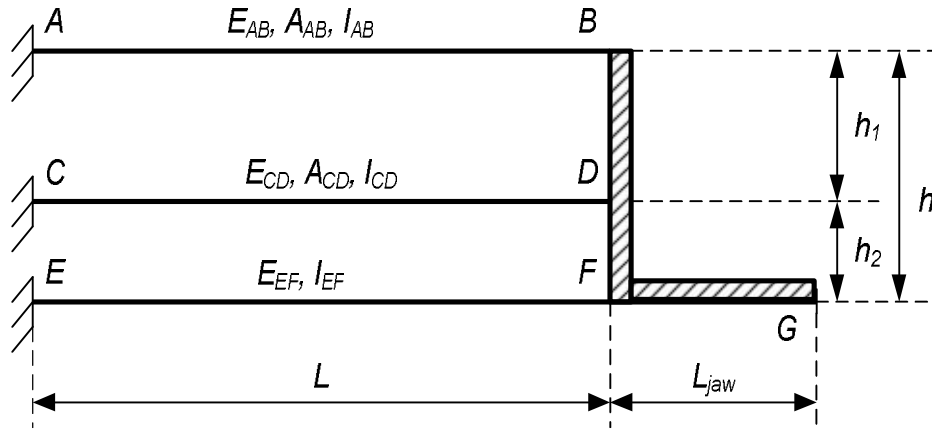
Kết quả phân bố nhiệt độ được biểu diễn trên đồ thị (Hình 2.3), nhiệt độ biên thiên từ gốc đến đầu kẹp theo dạng parabol. Sự phân bố nhiệt trên thanh cảm biến là tuyến tính, nhiệt độ tại đầu cuối cơ cấu chấp hành xấp xỉ  $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$  và tại điểm cực đại là khoảng  $210 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## 2.4 Phân tích cơ học

Mô hình sử dụng để phân tích chuyển vị của vi gắp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến do thay đổi nhiệt độ được thể hiện ở Hình 2.4. Trên hình vẽ, đoạn thẳng  $AB, CD$  và  $EF$  biểu diễn các thanh dầm đại diện theo thứ tự cho các ngăn xếp silic-



polyme, khung xương silic và thanh cảm biến lực áp trở. Các thanh dầm này được cố định một đầu và cùng được 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  $ij$ .



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

Chiều dài đoạn  $AB$  sẽ tăng khi cấp nguồn điện (do các ngăn xếp silic-polyme giãn nở). Giãn nở của các ngăn xếp silic-polyme được phân tích dựa trên áp lực thủy tĩnh tại  $[100]$ . Chú ý rằng, trên đoạn  $AB$ , giá trị tương đương của các thông số trong phần này đã được công nhận tại [86, 101].

Trong phương pháp tính toán này, giả sử thay đổi nhiệt độ trung bình trên các thanh  $AB$  và  $CD$  là  $\Delta T$ .

### 2.4.1 Phân tích chuyển vị

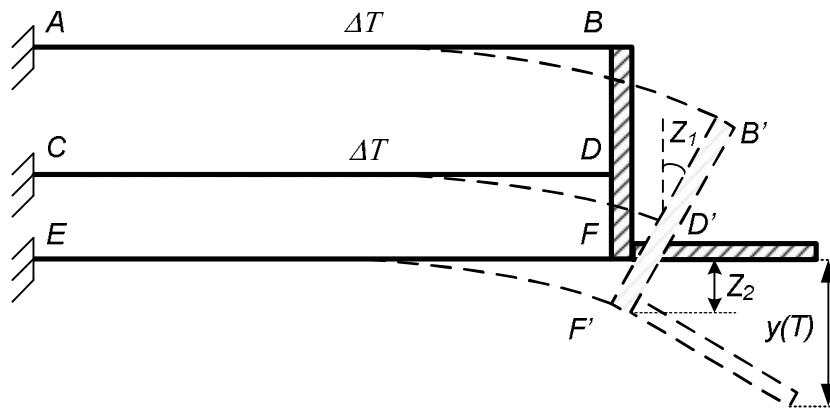
Hình 2.5 thể hiện biến dạng của hệ do biến đổi nhiệt độ trên các dầm  $AB$  và  $CD$ . Trong hình,  $Z_1$  và  $Z_2$  xác định chuyển vị xoay và chuyển vị thẳng chưa biết của thanh cứng  $BDF$ . Ở đây, ta cho rằng dẫn nở theo chiều dọc của dầm  $EF$  là không đáng kể và được bỏ qua. Để tính toán chuyển vị và phản lực tại cảm biến vi gắp, phương pháp chuyển vị trực tiếp được sử dụng [1, 3]. Dưới nhiệt độ thay đổi  $\Delta T$ , phương trình chủ đạo của hệ được cho bởi:

$$KZ(T) = R(T) \quad (2.19)$$

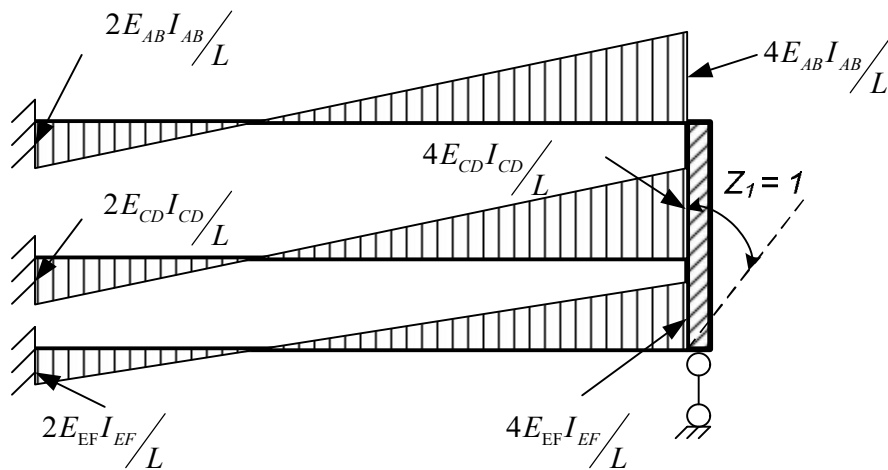
trong đó,

$$K = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix}, Z(T) = \begin{bmatrix} Z_1(T) \\ Z_2(T) \end{bmatrix} \text{ và } R(T) = \begin{bmatrix} R_1(T) \\ R_2(T) \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

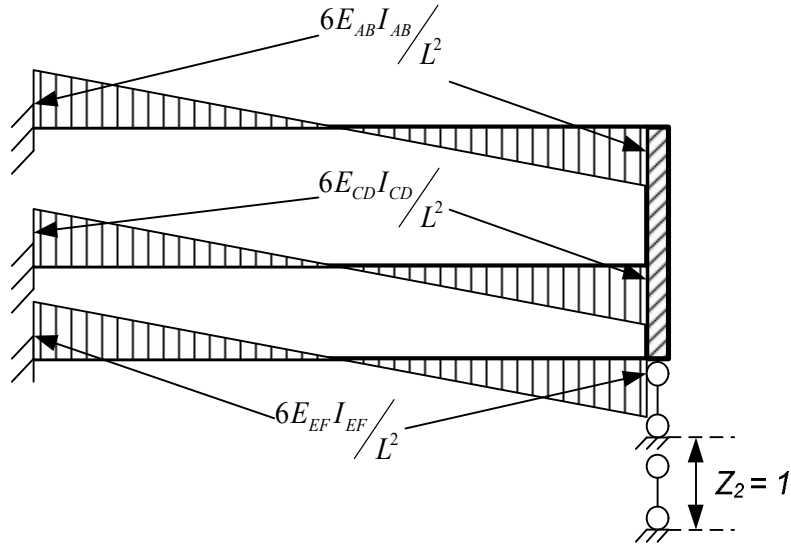
K, Z, và R lần lượt là ma trận độ cứng của hệ thanh, vectơ chuyển vị và vectơ ứng lực. Để xác định các hệ số về độ cứng, các chuyển vị thành phần được sử dụng. Biểu đồ mômen uốn trên các thanh được thể hiện trên Hình 2.6 và Hình 2.7 ứng với các trường hợp  $Z_1=1$  và  $Z_2=1$  [1, 3].



Hình 2.5 Biến dạng của cấu trúc



Hình 2.6 Biểu đồ mômen uốn khi  $Z_1=1$



Hình 2.7 Biểu đồ mômen uốn khi  $Z_2=1$

Lực theo chiều dọc của các thanh  $AB$  và  $CD$  khi áp dụng chuyển vị đơn vị  $Z_1=1$  tạo ra là:

$$\bar{N}_1^{AB} = \frac{\Delta L_{AB} E_{AB} A_{AB}}{L} = \frac{h E_{AB} A_{AB}}{L} \quad (2.21)$$

$$\bar{N}_1^{CD} = \frac{\Delta L_{CD} E_{CD} A_{CD}}{L} = \frac{h_2 E_{CD} A_{CD}}{L} \quad (2.22)$$

Chú ý rằng, lực theo chiều dọc của các thanh  $AB$  và  $CD$  do  $Z_2=1$  gây ra đều bằng không. Dựa trên điều kiện cân bằng của hệ, các hệ số về độ cứng được xác định như sau [1, 3]:

$$\begin{aligned} r_{11} &= \frac{4E_{AB}I_{AB} + 4E_{CD}I_{CD} + 4E_{EF}I_{EF} + h^2E_{AB}A_{AB} + h_2^2E_{CD}A_{CD}}{L} \\ r_{12} = r_{21} &= -\frac{6E_{AB}I_{AB} + 6E_{CD}I_{CD} + 6E_{EF}I_{EF}}{L^2} \\ r_{22} &= \frac{12E_{AB}I_{AB} + 12E_{CD}I_{CD} + 12E_{EF}I_{EF}}{L^3} \end{aligned} \quad (2.23)$$

Các phần tử của véctor ứng lực  $R_1(T)$  và  $R_2(T)$  được xác định dựa trên các ứng lực của thanh  $AB$  và  $CD$  do nhiệt độ thay đổi  $\Delta T$ . Ta có:

$$R_1(T) = \alpha_1 \Delta T E_{AB} A_{AB} h + \alpha_2 \Delta T E_{CD} A_{CD} h_2 \quad (2.24)$$

$$R_2(T) = 0 \quad (2.25)$$

Giải phương trình (2.19), ta được:

$$Z_1(T) = \frac{r_{22} R_1(T)}{\det K} \quad (2.26)$$

$$Z_2(T) = -\frac{r_{12} R_1(T)}{\det K}$$

trong đó  $\det K = r_{11} r_{22} - r_{12}^2$

Chuyển vị thẳng  $y(T)$  của đầu kẹp do sự thay đổi nhiệt độ được xác định bởi:

$$y(T) = Z_1(T) L_{jaw} + Z_2(T) = \frac{R_1(T)}{\det K} (r_{22} L_{jaw} - r_{12}) \quad (2.27)$$

#### 2.4.2 Phân tích lực chấp hành

Hệ cơ học thể hiện trên Hình 2.8 được sử dụng để tính lực tương tác giữa đầu kẹp với đối tượng. Lực  $F$  chưa biết được tính dựa trên điều kiện dưới đây:

$$y(T) + y(F) = h_3 \quad (2.28)$$

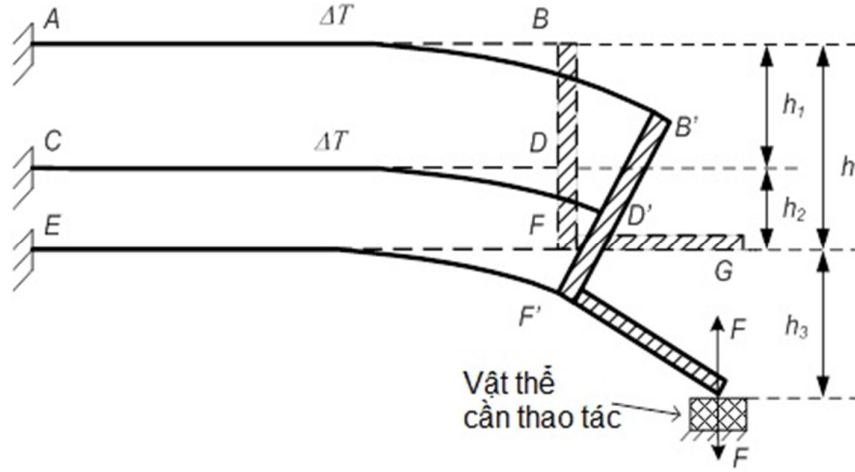
trong đó  $y(F)$  xác định chuyển vị thẳng bởi phản lực  $F$ .

Tương tự các bước ở trên, phương trình chính để tìm ra chuyển vị  $y(F)$  được cho bởi:

$$KZ(F) = R(F) \quad (2.29)$$

Trong đó:

$$\begin{aligned} R_1(F) &= -F L_{jaw} \\ R_2(F) &= -F \end{aligned} \quad (2.30)$$



Hình 2.8 Cơ hệ sử dụng để xác định lực chấp hành

Giải phương trình (2.29), ta được:

$$Z_1(F) = \frac{r_{22}R_1(F) - r_{12}R_2(F)}{\det K} \quad (2.31)$$

$$Z_2(F) = -\frac{r_{12}R_1(F) - r_{11}R_2(F)}{\det K} \quad (2.32)$$

Như vậy, chuyển vị thẳng của đầu kẹp do phản lực  $F$  là:

$$y(F) = Z_1(F)L_{jaw} + Z_2(F) \quad (2.33)$$

$$y(F) = \frac{[r_{11}R_1(F) - r_{12}R_2(F)]L_{jaw} + r_{11}R_2(F) - r_{12}R_1(F)}{\det K} \quad (2.34)$$

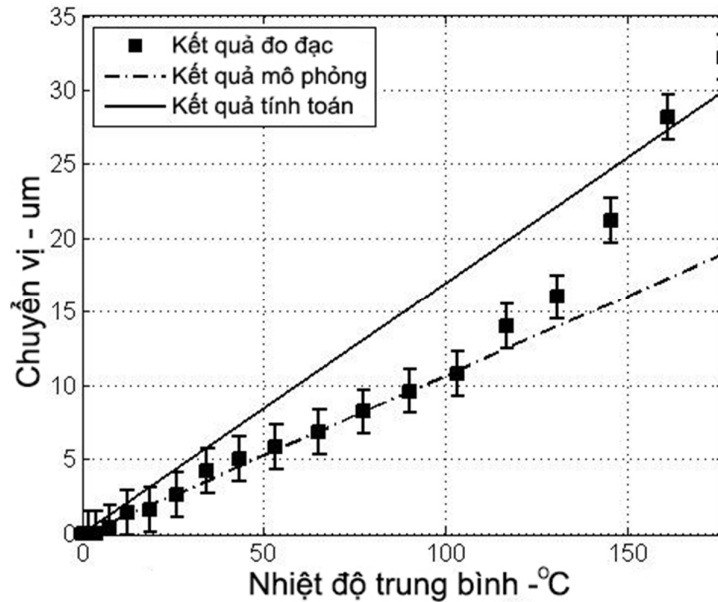
Lấy kết quả từ phương trình (2.28), ta thu được giá trị của lực kẹp là:

$$F = \frac{R_1(T)(r_{22}L_{jaw} - r_{12}) - h_3 \det K}{r_{11} - 2r_{12}L_{jaw} + r_{22}L_{jaw}^2} \quad (2.35)$$

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

Phiên bản thiết kế, chế tạo, đo đạc các thông số và đánh giá ban đầu về đặc điểm của vi gắp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến đã được báo cáo tại [86], các kết quả mô phỏng và tính toán mới đã được thực hiện ở chương này. 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 này được sử dụng song song với nhau để tối ưu hoạt động của thiết bị này cũng như để xác nhận mô hình khi phải thay đổi một số thông số cho phù hợp với từng ứng dụng cụ thể. Ví dụ, khi cần thay đổi cấu trúc cho phù hợp với ứng dụng gấp các tế bào sống thì cần đặt ra yêu cầu về kích thước của vi gấp, dải nhiệt độ hoạt động và điện áp hoạt động; sau đó căn chỉnh lại thiết kế cho phù hợp dựa theo mô hình mô phỏng và công thức tính toán. Sau bước xác nhận này thì mới chuyển sang giai đoạn chế tạo.



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

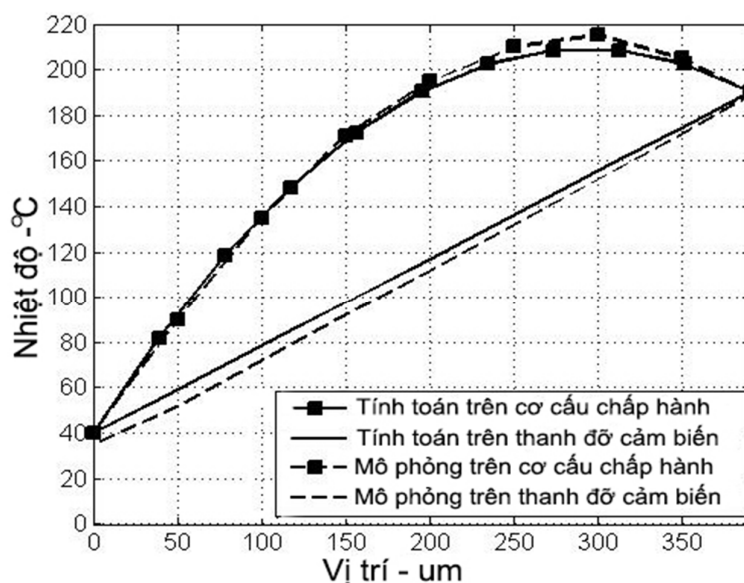
Hình 2.9 biểu diễn kết quả tính toán, mô phỏng và đo đạc thực nghiệm của chuyển vị so với nhiệt độ hoạt động trung bình của vi gấp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến. Như trên đồ thị, với khoảng nhiệt độ trung bình từ 0 đến 125 °C thì các giá trị của kết quả mô phỏng và đo đạc thực nghiệm là tương 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 kết quả của 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.

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.

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, 89], 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.



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

## 2.6 Tối ưu vi gấp

Vi gấp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến có khả năng tạo ra chuyển vị lớn đồng thời cung cấp tín hiệu phản hồi về lực kẹp và chuyển vị của đầu kẹp. Thiết bị này thu hút được nhiều quan tâm vì nó có thể hoạt động tốt trong môi trường chất lỏng và có thể sử dụng được trong các hệ thống tự động thao tác với tế bào sống, vi phẫu thuật và vi rôbốt. Tuy nhiên, nhiệt độ hoạt động tại vị trí đầu kẹp khá 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 làm giảm chuyển vị hay lực kẹp.

### 2.6.1 Tối ưu về mặt cấu trúc

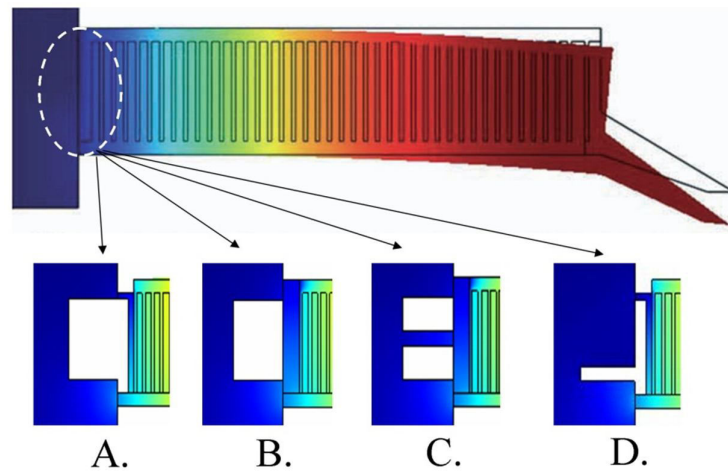
Hình ảnh kết quả mô phỏng và tính toán về nhiệt độ hoạt động của cơ cấu chấp hành vi gấp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến (xem Hình 2.10) cho thấy nhiệt độ cao tập trung vào các ngăn xếp silic-polyme ở gần phía đầu kẹp, còn các khối ở gần giá đỡ (đế) có nhiệt độ thấp hơn nhiều. Hiện tượng này xảy ra bất kể kích thước của sợi nhôm phía trên là đồng đều, có nghĩa là 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. Ta có thể thấy chuyển vị của đầu kẹp chủ yếu do giãn nở của các ngăn xếp có nhiệt độ cao ở gần đầu kẹp, các khối ở gần giá đỡ không đóng góp nhiều.

Từ phương pháp tính toán về phân bố nhiệt độ trên cơ cấu chấp hành (xem phương trình (2.2) và (2.18)), ta thấy phương trình toán học chỉ thể hiện cơ chế bên trong cấu trúc vi gấp, còn phần tiếp giáp với đế chi xem là một điều kiện biên (xem phương trình (2.8)) khi mặc định 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. Bên cạnh đó, theo phương trình (2.2) thì để giảm thiểu sự truyền nhiệt giữa cơ cấu chấp hành và giá đỡ, ta phải giảm tối đa thể tích kết nối silic giữa chúng. Do vậy, bước đầu tiên trong quá trình tối ưu nhiệt độ hoạt động của vi gấp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến là phải sử dụng phương pháp thử nghiệm và sàng lọc kết quả thông qua chương trình mô phỏng với mô hình mô phỏng đã được xây dựng cho hệ thống này.

Việc giảm thể tích kết nối giữa phần giá đỡ và cơ cấu chấp hành có thể thực hiện được theo rất nhiều cách khác nhau, ví dụ như giảm độ dày, giảm diện tích tiếp xúc hoặc kết hợp cả hai phương pháp trên ở phần silic tiếp giáp. Tuy nhiên phương án giảm độ dày không khả thi vì liên quan đến quy trình chế tạo khi phải thêm một số bước dẫn đến tăng giá sản phẩm. Tác giả đã chọn phương án đơn giản hơn đó là giảm diện tích tiếp xúc và rất nhiều hình dạng cắt bỏ phần silic này được thử nghiệm. Hình 2.11 chỉ ra một số cách cắt bỏ một phần silic ở vùng tiếp giáp để giảm cơ chế truyền nhiệt.



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

Các phương án thay đổi kể trên lần lượt được mô phỏng với cùng một điều kiện như nhau. Phần giá đỡ được coi là có cùng nhiệt độ với môi trường xung quanh.

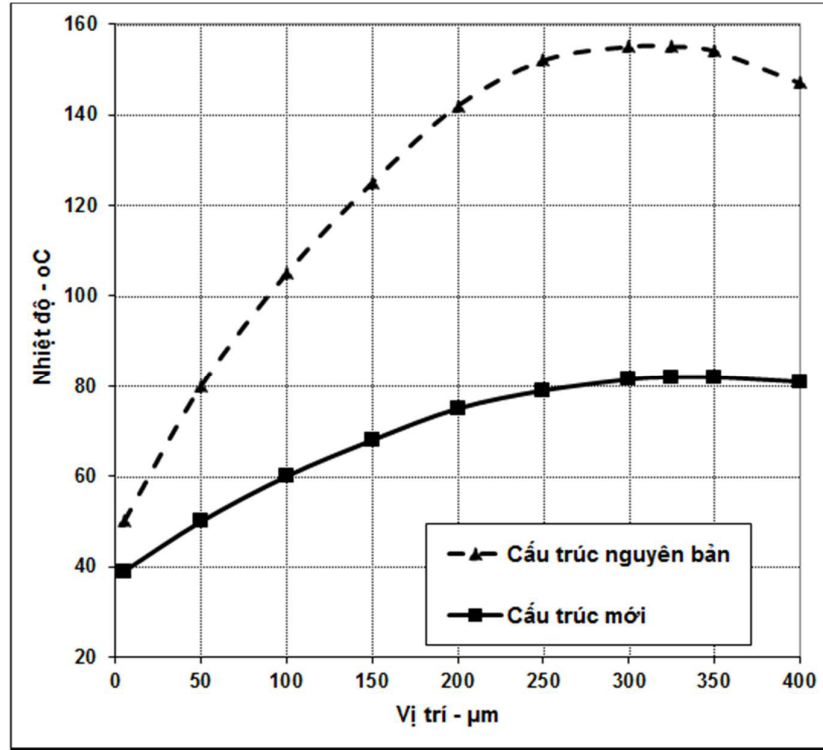
Bảng 2-2 So sánh kết quả mô phỏng giữa các phương án

Phương án	Nhiệt độ cao nhất ( $^{\circ}\text{C}$ )	Chuyển vị ( $\mu\text{m}$ )
Nguyên gốc	155	3,02
A	86	3,91
B	87,6	3,86
C	91,2	3,76
D	82	4,05

Kết quả trong Bảng 2-2 cho thấy nhiệt độ cực đại trên cơ cấu chấp hành ở trạng thái hoạt động cân bằng đã được khắc phục đáng kể khi giảm cơ chế truyền nhiệt giữa cơ cấu chấp hành và giá đỡ. Phương án D có kết quả tốt nhất theo phương diện giảm nhiệt độ hoạt động (nhiệt độ ở cao nhất giảm xuống còn  $82^{\circ}\text{C}$  so với  $155^{\circ}\text{C}$  của cấu trúc ban đầu – giảm 47%). Thêm vào đó, chuyển vị của đầu kẹp cũng tăng lên 30% (từ  $3,02\ \mu\text{m}$  đến  $4,05\ \mu\text{m}$ ).

Từ rất nhiều phương án thử nghiệm, tác giả chọn ra bốn phương án khả quan và so sánh với cấu trúc nguyên bản để đánh giá. Đến thời điểm hiện tại, phương án D được xem là phương án tốt nhất cho mục tiêu giảm sự thất thoát nhiệt ra bên ngoài. Bên cạnh đó, sự thay đổi này không làm thay đổi bản chất của vi gấp và không ảnh hưởng đến kết nối cơ khí giữa cơ cấu chấp hành và giá đỡ. Mặt khác sự thay đổi này

không làm phát sinh thêm các thay đổi trong quy trình chế tạo của vi gấp ban đầu. Hình 2.12 so sánh phân bố nhiệt độ giữa hai cơ cấu, cơ cấu đầu tiên và cơ cấu đã được chỉnh sửa (phương án D).



Hình 2.12 Kết quả mô phỏng phân bố nhiệt độ trên cơ cấu chấp hành của phương án D so với cấu trúc nguyên bản

### 2.6.2 Tối ưu về mặt nhiệt độ

Thay đổi nhỏ ở phần tiếp giáp giữa giá đỡ và cấu trúc chấp hành của vi gấp đã khắc phục được khá nhiều vấn đề phân bố nhiệt độ không đồng đều, tuy nhiên nhiệt độ vẫn có xu hướng cao hơn về phía đầu kẹp (xem Hình 2.12). Mặc dù nguồn nhiệt tại vị trí các ngăn xếp silic-polyme có giá trị như nhau, phân bố nhiệt độ trên cơ cấu chấp hành hoạt động ở trạng thái cân bằng vẫn chưa đạt được yêu cầu đặt ra do cơ chế truyền nhiệt không đồng đều về các hướng. Mục tiêu của tối ưu về mặt nhiệt độ hoạt động của vi gấp là nhiệt độ trung bình của cả cơ cấu phải dưới mức  $100^{\circ}\text{C}$  và quan trọng nhất là nhiệt độ của đầu kẹp phải gần với nhiệt độ phòng. Bên cạnh đó, các thay

đổi không được làm thay đổi tính chất của vi gấp cũng như thay đổi các giá trị khác như chuyển vị và lực kẹp.

Từ công thức tổng quát về phân bố nhiệt độ (2.18), chuyển vị (2.27) 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. Đây là một hạn chế của phương pháp tính toán vì đã đặt nguồn nhiệt vào hệ thống thông qua giá trị nhiệt độ trung bình cho toàn hệ (thông số đầu vào được mặc định là như nhau tại mọi vị trí). Lý do là nếu áp dụng hàm biến thiên về nhiệt độ của thanh nhôm và hàm phân bố nhiệt độ làm đầu vào cho tính toán chuyển vị và lực thì gặp khó khăn trong việc tìm ra phương trình tổng quát cho cả hệ thống. Hay nói cách khác, với hệ phương trình toán học hiện tại, rất khó để tìm được giá trị tối ưu về phân bố nhiệt độ bằng phương pháp toán học.

Bước đầu tiên để có thể 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. Lần lượt thực hiện mô phỏng với cách thức đặt một giá trị nhiệt độ vào từng vị trí ngăn xếp silic-polyme trên cánh tay vi gấp. Kết quả cho thấy, với các vị trí ngăn xếp ở gần phía giá đỡ hơn thì sẽ cho chuyển vị lớn hơn, và đối với khoảng một phần tư các ngăn xếp ở gần phía đầu kẹp thì hầu như không tạo ra được chuyển vị nào. Điều này có nghĩa là nhiệt lượng cung cấp cho 25% các ngăn xếp ở gần phía đầu kẹp là không đóng góp nhiều cho chuyển vị mà chỉ làm cho nền nhiệt độ của toàn vi gấp tăng lên.

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 áp dụng được thay đổi này vào cơ cấu chấp hành thực tế của vi gấp, cần phải tính toán lại kích thước của lớp nhôm trên bề mặt của cơ cấu chấp hành – với vai trò là nguồn cấp nhiệt. Trên các khối

ngăn xếp silic-polymer ở vị trí cần nhiều nhiệt lượng hơn thì điện trở của đoạn nhôm phía trên nó cần phải bé hơn, có nghĩa là bề rộng của lớp nhôm sẽ phải lớn hơn. Điều này sẽ làm cho cấu trúc của cơ cấu chấp hành bị thay đổi khá lớn về mặt cấu trúc và có thể ảnh hưởng tới các đặc điểm cơ học và các tính chất khác của vi gắp. 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 silic-polymer còn lại. Có nghĩa là ta có thể giữ nguyên độ rộng của lớp nhôm, phần không được cấp nhiệt sẽ bị nới tắt về mặt dẫn điện.

Với mục đích đã nêu, cấu trúc vi gắp nhiệt điện silic-polymer đã được thay đổi phần tiếp giáp với giá đỡ (cấu trúc D) được dùng để mô phỏng xác nhận các phương án thay đổi ở phần thanh nhôm cấp nhiệt để tối ưu phân bố nhiệt độ hoạt động. Mức năng lượng cấp cho mỗi vị trí giống nhau với giá trị  $1,5e^{-11} \text{ W/m}^3$ . 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. Thử nghiệm và sàng lọc kết quả từ rất nhiều phương án “tắt/mở” nhiệt lượng tại các vị trí khác nhau cho thấy phân bố nhiệt độ trên cơ cấu chấp hành của vi gắp được khắc phục ở nhiều mức độ khác nhau. Một số phương án điển hình được trình bày chi tiết sau đây.

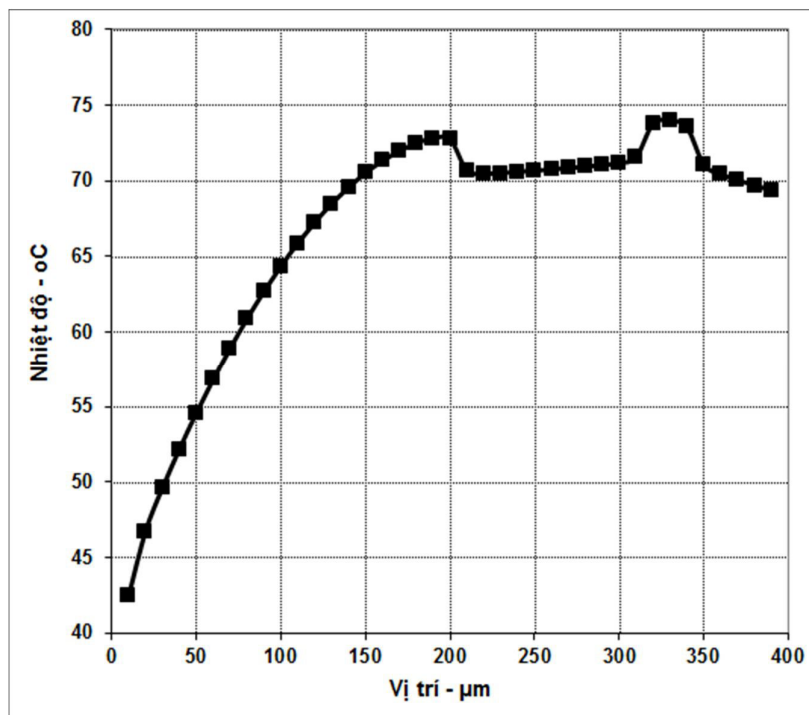
+ Phương án 1: Cung cấp nhiệt cho các vị trí từ 1 đến 19 và từ 31 đến 34, các vị trí khác thụ động.

**Bảng 2-3** Bố trí nguồn nhiệt tại các vị trí (Phương án 1)

Vị trí	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Gia nhiệt	Có	Có	Có	Có	Có	Có	Có	Có	Có	Có
Vị trí	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Gia nhiệt	Có	Có	Có	Có	Có	Có	Có	Có	Có	Không
Vị trí	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Gia nhiệt	Không	Không	Không	Không	Không	Không	Không	Không	Không	Không
Vị trí	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40

Gia nhiệt	Không	Có	Có	Có	Không	Không	Không	Không	Không	Không
-----------	-------	----	----	----	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Trong trường hợp này, nhiệt độ hoạt động ở điểm cao nhất chỉ còn 74 °C, chuyển vị của đầu kẹp đạt được 4,1µm. Với 18 trên 40 ngăn xếp silic-polyme không được cấp nhiệt lượng, có nghĩa là công suất tiêu thụ giảm 45% trong khi vẫn giữ nguyên chuyển vị.



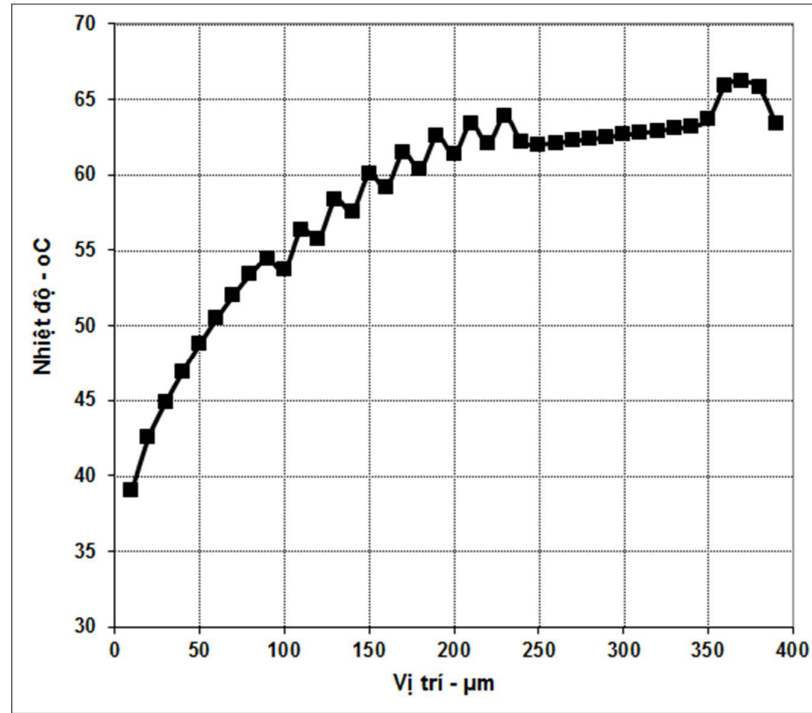
Hình 2.13 Kết quả mô phỏng phân bố nhiệt độ (Phương án 1).

+ Phương án 2: Nhiệt lượng cấp cho các vị trí từ 1 đến 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 36 và 37, trong khi các vị trí khác thụ động.

Bảng 2-4 Bố trí nguồn nhiệt tại các vị trí (Phương án 2)

Vị trí	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Gia nhiệt	Có	Có	Có	Có	Có	Có	Có	Có	Có	Có
Vị trí	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Gia nhiệt	Không	Có	Không	Có	Không	Có	Không	Có	Không	Có

Vị trí	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Gia nhiệt	Không	Có	Không	Có	Không	Có	Không	Không	Không	Không
Vị trí	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Gia nhiệt	Không	Không	Không	Không	Không	Có	Có	Không	Không	Không



Hình 2.14 Kết quả mô phỏng phân bố nhiệt độ (Phương án 2).

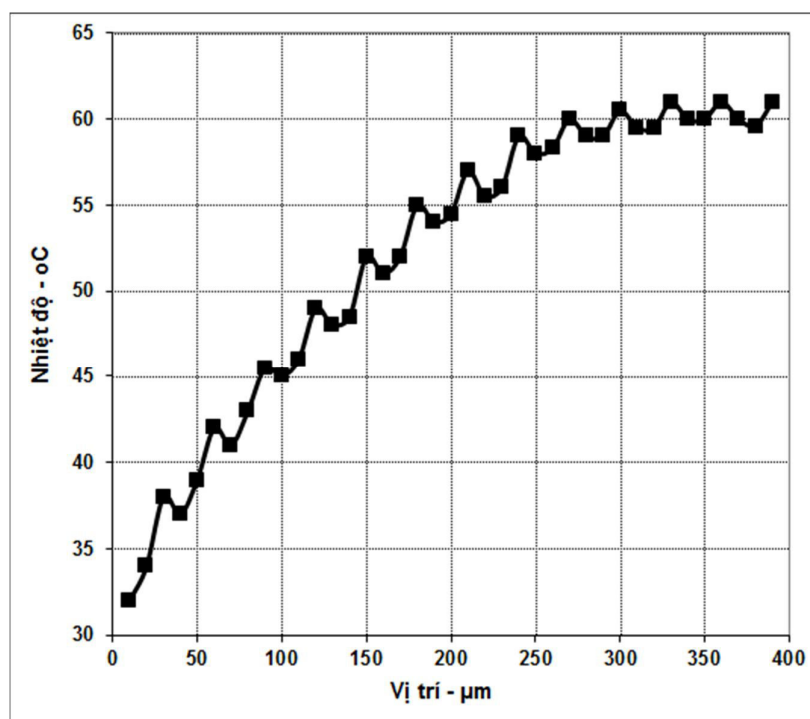
Đối với phương án 2 này, nhiệt độ cao nhất 66,5 °C trên cơ cấu, chuyển vị của đầu kẹp đạt được 3,52  $\mu\text{m}$ . Công suất tiêu thụ giảm 50%.

+ Phương án 3: Nhiệt lượng cấp cho các vị trí 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36 và 39, các vị trí khác thụ động.

Vị trí	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Gia nhiệt	Không	Không	Có	Không	Không	Có	Không	Không	Có	Không
Vị trí	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Gia nhiệt	Không	Có	Không	Không	Có	Không	Không	Có	Không	Không

Vị trí	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Gia nhiệt	Có	Không	Không	Có	Không	Không	Có	Không	Không	Có
Vị trí	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Gia nhiệt	Không	Không	Có	Không	Không	Có	Không	Không	Có	Không

**Bảng 2-5** Bố trí nguồn nhiệt tại các vị trí (Phương án 3)



**Hình 2.15** Kết quả mô phỏng phân bố nhiệt độ (Phương án 3).

Đối với phương án 3, nhiệt độ cao nhất của cơ cấu chấp hành khi hoạt động 61,2 °C và chuyển vị của đầu kẹp 2,61  $\mu\text{m}$ . Trong trường hợp này, vi gấp chỉ sử dụng khoảng 35% công suất so với công suất của cơ cấu trước đó.

Với kết quả mô phỏng của các phương án kể trên, phương án 1 có kết quả tốt nhất khi giảm được nhiệt độ ở điểm lớn nhất thêm 15% (từ 82 xuống 74 °C), phân bố nhiệt độ trên cơ cấu chấp hành đồng đều hơn và khoảng cách chuyển vị của đầu kẹp được giữ nguyên. So sánh với cấu trúc nguyên bản của vi gấp, phân bố nhiệt độ trên cơ cấu chấp hành đã được khắc phục đáng kể. Nhiệt độ tại điểm cao nhất đã giảm từ 176



$^{\circ}\text{C}$  xuống  $74^{\circ}\text{C}$  (giảm hơn 65%), trong khi chuyển vị của đầu kẹp là không thay đổi. Mặt khác, công suất tiêu thụ của vi gấp mới này cũng giảm gần 50% khi một nửa số vị trí gắn xếp silic-polyme không được cấp nhiệt.

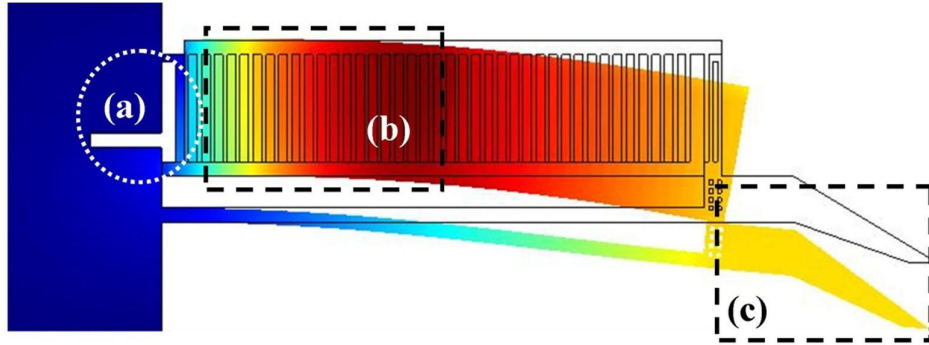
Với phương pháp lựa chọn các vị trí trọng yếu để cấp nhiệt như đã mô tả ở trên, phân bố nhiệt độ trên cánh tay vi gấp và công suất tiêu thụ đã được cải thiện một cách toàn diện trong khi vẫn giữ được chuyển vị so với cấu trúc ban đầu.

### 2.6.3 Kết hợp các tối ưu

Trong các ứng dụng có yêu cầu khắt khe như thao tác với tế bào sống và mô xâm lấn tối thiểu, nhiệt độ tại đầu kẹp rất quan trọng vì giá trị này có thể phá hủy các đối tượng cần được thao tác. Việc giảm thiểu nhiệt độ trên đầu kẹp là một mục tiêu lớn cần đạt được. Tác giả đề xuất thêm một thay đổi là kéo dài phần má kẹp. Thứ nhất, khi má kẹp càng ở xa nguồn nhiệt thì nhiệt độ trên đó càng giảm. Lý do thứ hai là khi má kẹp được kéo dài thêm, việc ứng dụng vi gấp này trong môi trường chất lỏng sẽ trở nên dễ dàng hơn do hạn chế được lực căng bề mặt.

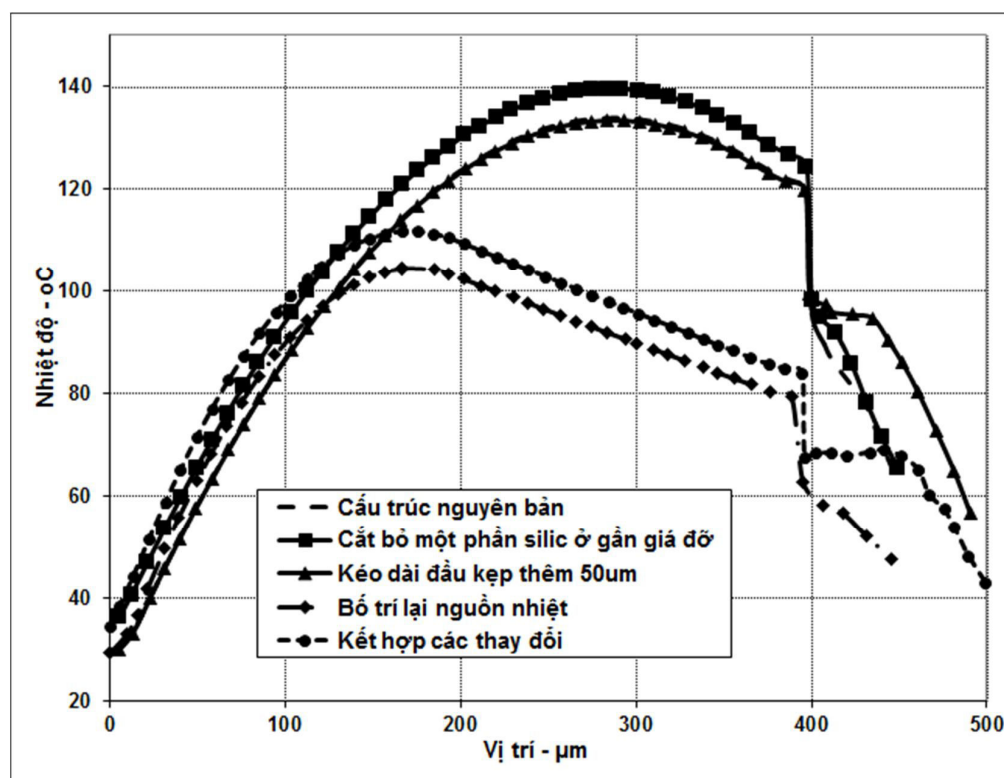
Từ công thức tổng quát của hệ thống về chuyển vị (2.27), dễ dàng nhận thấy khi tăng chiều dài của má kẹp thì chuyển vị tăng theo. Khi chuyển vị tăng thì sẽ tăng vùng hoạt động của vi gấp vì hiện tại cấu trúc vi gấp này được thiết kế ở dạng thường mở và vẫn còn một vùng mà hai đầu kẹp chưa tiến gần được thêm. Tuy nhiên, việc kéo dài này sẽ làm giảm giá trị lực kẹp. Từ công thức về lực kẹp của vi gấp (2.35), dễ dàng nhận thấy khi tăng chiều dài của má kẹp gấp đôi thì giá trị của lực kẹp giảm đi khoảng hai lần. Bên cạnh đó, cấu trúc ban đầu của vi kẹp này tạo ra được lực kẹp rất lớn (dải mN) còn các ứng dụng thao tác với tế bào sống hay các mao mạch chỉ ở vùng  $\mu\text{m}$ . Do đó, từ độ dài má kẹp của cấu trúc ban đầu là  $100\ \mu\text{m}$  tăng thêm khoảng  $200\ \mu\text{m}$  thì vi gấp vẫn đáp ứng được tiêu chí lực kẹp cho các ứng dụng trong lĩnh vực y sinh. Trong mô hình mới, tác giả chọn phương án kéo dài má kẹp thêm  $50\ \mu\text{m}$ . Với giá trị này, nhiệt độ trên nó khi vi gấp hoạt động vừa đủ thấp để đáp ứng mục tiêu đề ra, mặt khác không ảnh hưởng nhiều tới giá trị lực kẹp và các tính chất cơ bản khác của cơ cấu chấp hành.

Hình 2.16(c) mô tả sự thay đổi về độ dài của đầu kẹp bên cạnh các thay đổi đã được mô phỏng ở phần trên: (a) cắt bớt phần silic tiếp giáp giữa cơ cấu chấp hành và giá đỡ, (b) là bố trí lại các nguồn nhiệt, (c) kéo dài đầu kẹp.



**Hình 2.16** Thay đổi cấu trúc của cơ cấu chấp hành để tối ưu nhiệt độ hoạt động a) cắt bớt silic tiếp giáp giữa cơ cấu chấp hành và giá đỡ, b) sắp xếp lại các nguồn nhiệt, c) kéo dài đầu kẹp

Mô phỏng ba cách thức a, b, c và kết hợp của cả ba cách đó vào một cấu trúc được thực hiện. Hình 2.17 biểu diễn phân bố nhiệt độ trên cơ cấu chấp hành của vi gấp khi nhờ các thay đổi cấu trúc đó và so sánh với vi gấp nguyên bản. Các điều kiện mô phỏng cho các trường hợp này là hoàn toàn giống nhau, với trường hợp bố trí lại nguồn nhiệt thì sẽ giữ nguyên công suất tiêu thụ cho toàn hệ thống (có nghĩa là sẽ tăng gấp đôi nhiệt lượng tại vị trí cần cấp nhiệt, nửa số vị trí còn lại không được cấp nhiệt). Kết quả các đường biểu diễn phân bố nhiệt độ trên cánh tay của vi gấp: cấu trúc nguyên bản, cấu trúc đã cắt bớt một phần silic ở phần tiếp giáp giữa cơ cấu chấp hành và giá đỡ, bố trí cấp nhiệt lượng vào 19 vị trí ở phía gần giá đỡ, kéo dài đầu kẹp thêm 50  $\mu\text{m}$  và cuối cùng là tổng hợp các thay đổi lên trên vi gấp cùng lúc.



Hình 2.17 Kết quả mô phỏng của các cấu trúc

So sánh các kết quả mô phỏng, mỗi thay đổi đều cho dẫn đến cải thiện đáng kể. Khi kết hợp các yếu tố này lại với nhau 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 và không ảnh hưởng nhiều tới giá trị lực kẹp. Có thể nói, các bước thay đổi trên đã đạt được mục tiêu tối ưu nhiệt độ hoạt động của vi gấp cho phù hợp với ứng dụng trong lĩnh vực y sinh.

## 2.7 Kết luận chương 2

Chương này đã đề cập đến xây dựng và nâng cấp mô hình mô phỏng của hệ vi gấp sao cho sát với hoạt động thực tế của nó. Mô hình 3D với hai sự chuyển đổi năng lượng được thiết lập cùng các điều kiện môi trường bao quanh hệ vi gấp.

Các phương pháp phân tích, tính toán tổng quát cho hệ thống vi gấp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến cũng được trình bày: theo mô hình nhiệt học và theo

mô hình cơ học cổ điển. Kết quả tính toán được so sánh với kết quả mô phỏng và đo đạc thực nghiệm trên phiên bản vi gấp đã chế tạo. Dữ liệu cho thấy sự phù hợp giữa ba phương pháp.

Từ liên hệ giữa các phương pháp toán học, mô phỏng và thực nghiệm, chúng ta có thể sử dụng một trong những phương pháp này để kiểm tra sự chuẩn xác của phương pháp kia và ngược lại. Đây là một yếu tố quan trọng trong việc tối ưu hay cải tiến vi gấp cho phù hợp với từng ứng dụng cụ thể. Hơn nữa, các phương pháp này đồng thời được sử dụng để thực hiện tối ưu vi gấp theo một tiêu chí rõ ràng. Ví dụ, một cấu trúc vi gấp mới có tầm hoạt động (chuyển vị) tương đương cấu trúc nguyên bản, nhưng hoạt động ở nhiệt độ thấp hơn một giá trị cụ thể có thể thiết kế được. Đầu tiên là xác định kích thước của cơ cấu chấp hành (số ngăn xếp silic-polyme và độ dài của đầu kẹp) sử dụng phương trình chuyển vị của hệ thống. Sau đó tiến hành mô phỏng với kích thước đó để xác nhận thiết kế trước khi chuyển qua giai đoạn chế tạo.

Việc tối ưu cấu trúc của vi gấp về mặt nhiệt độ hoạt động bao gồm các thay đổi nhỏ về cấu trúc và phân bố nhiệt không đồng đều trên các ngăn xếp silic-polyme cũng đã được thực hiện và mô phỏng. Những thay đổi này hầu như không ảnh hưởng nhiều tới đặc điểm cơ khí hay đáp ứng của vi gấp. Đầu tiên là cắt bỏ một phần silic tiếp giáp giữa cơ cấu chấp hành và giá đỡ để giảm thiểu sự truyền nhiệt vào giá đỡ. Sử dụng phương pháp thử nghiệm và sàng lọc cho các phương án đề xuất để chọn ra phương án tốt nhất. Động tác này đã cải thiện đáng kể phân bố nhiệt trên cơ cấu chấp hành của vi gấp, mặt khác không ảnh hưởng tới chuyển vị của đầu kẹp. Phương án tốt nhất đã được chọn để thực hiện tiếp các mô phỏng về thay đổi cách cấp nhiệt cho từng đơn vị ngăn xếp silic-polyme trên cơ cấu chấp hành. Chuyển vị của đầu kẹp và phân bố nhiệt độ khi vi gấp hoạt động đã được khắc phục hơn nữa sau bước này. Bước cuối cùng là giảm thêm nhiệt độ của má kẹp bằng cách kéo dài phần tay kẹp. Tổng hợp của các phương án thay đổi trên vào một mô hình vi gấp mới có thể gọi là tối ưu về mặt nhiệt độ đã được đánh giá và so sánh với cấu trúc nguyên bản đầu tiên. Kết quả là đã giảm nhiệt độ hoạt động tại điểm cao nhất của cấu trúc xuống 65% (từ nhiệt độ cao nhất 200 °C xuống còn 74 °C – cho cùng một điều kiện đầu vào), trong khi chuyển vị của đầu

kep không đổi. Nhiệt độ của đầu kẹp cũng giảm xuống gần bằng nhiệt độ phòng. Mặt khác, do không cấp nhiệt cho các ngăn xếp silic-polyme ở vị trí kém hiệu quả, công suất tiêu thụ của vi gấp cũng giảm đi 50%. Điều này có nghĩa là có thể giảm một nửa điện áp đầu vào khi cần một chuyển vị như nhau.

## **Chương 3. THIẾT KẾ MẠCH ĐIỀU KHIỂN TÍCH HỢP**

### **3.1 Giới thiệu**

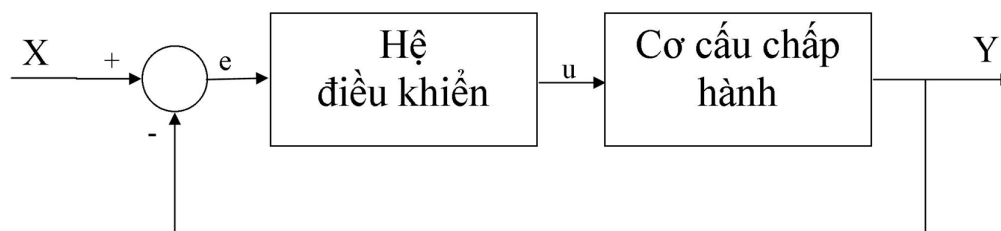
Với cấu trúc có nhiều ưu điểm, vi gắp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến cần có thêm một hệ thống điều khiển nhằm tăng tốc độ, sự chính xác, tin cậy và cho phép ghép nối hệ vi gắp này với cấp điều khiển cao hơn trong dây chuyền vi chế tạo. Bộ cảm biến áp trở cho phép giám sát chuyển vị và lực kẹp, do đó việc kết nối với hệ thống giám sát và điều khiển trở nên dễ dàng hơn so với các loại vi gắp khác. Bên cạnh đó hệ thống điều khiển tích hợp lên cùng một đế là hoàn toàn có thể được do công nghệ chế tạo của vi gắp này tương thích với công nghệ chế tạo vi mạch bán dẫn CMOS. Việc tích hợp này cho phép thu nhỏ kích thước của cả hệ thống vi gắp một cách tối đa, giảm giá thành sản phẩm, nâng cao độ chính xác và độ tin cậy khi hoạt động.

Chương này trình bày cơ chế điều khiển vi gắp và thiết kế hệ thống điều khiển tích hợp cho vi gắp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến từ tổng thể đến chi tiết mạch chức năng.

### **3.2 Thiết lập hàm điều khiển PID cho hệ thống**

#### **3.2.1 Cơ chế điều khiển**

Nhiều cơ chế điều khiển có thể áp dụng được cho cơ cấu vi gắp nhiệt điện silicon-polyme tích hợp cảm biến. Tuy nhiên do quy trình chế tạo của công cụ này tương thích với công nghệ CMOS, nên việc tích hợp hệ điều khiển lên cùng một đế với vi gắp trong cùng một công nghệ chế tạo mang lại rất nhiều ưu điểm. Hệ điều khiển khép kín cho hệ thống này được mô tả ở Hình 3.1. Như trên hình, cơ cấu chấp hành là một hệ thống vật lý điều khiển được bao gồm mạch công suất và cấu trúc vi gắp, bộ điều khiển sẽ tính toán và chỉ thị cho cơ cấu chấp hành thực hiện thao tác để đạt được kết quả như mong muốn.



**Hình 3.1** Sơ đồ khối của hệ điều khiển khép kín

Hàm truyền của hệ điều khiển Tỉ lệ tích phân đạo hàm (PID controller) được cho bởi:

$$K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s = \frac{K_D s^2 + K_p s + K_I}{s} \quad (3.1)$$

Trong đó  $K_p$  là hằng số tỉ lệ,  $K_I$  là hằng số tích phân, và  $K_D$  là hằng số đạo hàm.

Biến số  $e$  là sai lệch giữa giá trị đầu vào  $X$  (vị trí hay một thông số nào đó của hệ vật lý) và giá trị đầu ra  $Y$ . Tín hiệu sai lệch  $e$  sẽ được đưa tới hệ điều khiển PID và nó có nhiệm vụ tính toán để đưa ra tín hiệu  $u$  theo công thức:

$$u = K_p \cdot e + K_I \int e \cdot dt + K_D \frac{e}{dt} \quad (3.2)$$

Tín hiệu  $u$  sẽ được truyền đến cơ cấu chấp hành để tạo tín hiệu lối ra  $Y$ . Một giá trị mới của  $Y$  sẽ được phản hồi để xác định tín hiệu  $e$  khác. Hệ điều khiển lại tính toán dựa trên tín hiệu mới này và quy trình cứ thế lặp lại. Ứng dụng mô hình điều khiển trên vào hệ thống vi gấp, biến số  $e$  là sự sai khác giữa điện áp tham chiếu (tín hiệu điều khiển) và điện áp phản hồi về từ lối ra của bộ cảm biến.

### 3.2.2 Hàm truyền của vi gấp

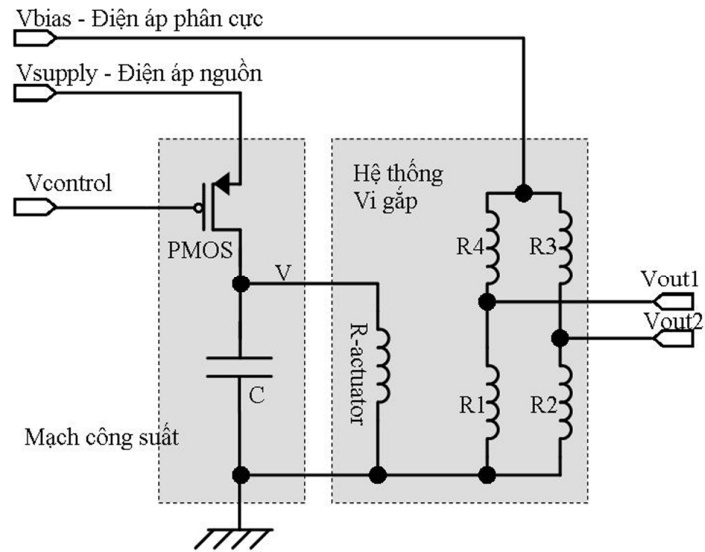
Hình 1.26 chỉ ra đáp ứng tần số của vi gấp, hay nói cách khác là biểu diễn hệ số khuếch đại điện áp và độ dịch pha của vi gấp khi tần số thay đổi. Tần số cắt của hệ thống vi gấp này đo được là 29 Hz ( $\omega_p = 200 \text{ rad/s}$ ). Do đó, hàm truyền của vi gấp này ở miền  $s$  sẽ là [110, 111]:

$$H_1(s) = \frac{1}{\frac{1}{\omega_p} s + 1} = \frac{1}{0,005s + 1} \quad (3.3)$$

### 3.2.3 Mạch điều khiển công suất

Để điều khiển hệ thống vi gấp, một điện áp cần được tạo ra từ hệ điều khiển với dòng điện đủ lớn cho sợi nhôm tỏa nhiệt. Một bộ điều khiển công suất là cần thiết trong trường hợp này. Có nhiều giải pháp để thực hiện được yêu cầu trên, tuy nhiên với hệ thống vi gấp này thì chỉ cần điều khiển một linh kiện tích cực nối tiếp với lõi ra (hai đầu của sợi nhôm trên vi gấp). Linh kiện này có thể là một transistor trường hoặc transistor lưỡng cực, nhưng do hệ thống vi gấp tương thích với CMOS nên chắc chắn phải sử dụng một MOSFET. Điện áp đặt vào vi gấp sẽ được điều khiển thông qua linh kiện này. Có hai loại MOSFET: NMOS và PMOS. Nếu sử dụng NMOS thì điện áp lõi ra bị giới hạn bởi giá trị điện áp nguồn nuôi trừ đi điện áp ngưỡng  $V_T$  (khoảng 0,7 V) trong trường hợp điện áp điều khiển vào cực Gate đạt giá trị cao nhất là điện áp nguồn nuôi. Vì vậy nếu muốn đạt được hiệu quả điều khiển cao nhất với NMOS thì cần có một bộ tăng áp hoặc phải có thêm một điện áp nguồn nuôi cho linh kiện công suất này. Với PMOS thì điện áp lõi ra có thể đạt tới điện áp nguồn nuôi, do đó chỉ cần sử dụng một nguồn điện cho hệ thống. mạch điện đề xuất cho phần điều khiển công suất cho vi gấp này được đề xuất tại Hình 3.2.





**Hình 3.2 Mạch điều khiển công suất**

Hoạt động của mạch điều khiển công suất này có thể được coi như một mạch RC cơ bản (PMOS đóng vai trò như một biến trở) [111] và lúc đó, hàm truyền của mạch này có dạng [110]:

$$H_2(s) = \frac{1}{R_{DS} \cdot C \cdot s + 1} \quad (3.4)$$

Trong đó  $R_{DS}$  là điện trở từ cực Drain đến cực Source.

Hệ vi gấp gồm hai sợi nhôm với điện trở khoảng 200  $\Omega$ . Bên cạnh đó, điện áp một chiều áp dụng vào hệ thống vi gấp là 5 V cho điều khiển ở trạng thái cân bằng. Do vậy, dòng điện cực đại mà mạch điều khiển công suất cần tạo ra là 2,5 mA. Về lý thuyết, kích thước của PMOS càng lớn thì càng tốt (điện trở  $R_{DS}$  nhỏ đồng nghĩa với việc công suất bị tiêu tán trên nó càng nhỏ). Tuy nhiên kích thước càng lớn thì cần diện tích cho linh kiện này nhiều hơn. Trên thực tế, giá trị  $R_{DS} = 5 \Omega$  là hợp lý, vì với giá trị này, công suất tiêu thụ trên thành phần nối tiếp chỉ bằng khoảng 2% so với tổng công suất dành cho vi gấp và kích thước thiết kế của linh kiện này là phù hợp. Tụ C đóng vai trò như một bộ lọc thông thấp, nếu giá trị càng cao thì hệ thống sẽ ổn định hơn, tuy nhiên lại có sự ràng buộc bởi kích thước. Do hệ thống điều khiển và vi gấp

cùng được sản xuất trên một đế và một quy trình công nghệ nên kích thước và giá trị điện dung của tụ điện này rất quan trọng. Trong trường hợp này thì giá trị  $C = 0,1 \mu\text{F}$  là hợp lý (giá trị này sẽ không ảnh hưởng tới thời gian đáp ứng của hệ thống). Cuối cùng, ta có hàm truyền cho mạch điều khiển công suất [110]:

$$H_2(s) = \frac{1}{5 (\Omega).1. 10^{-7}(F).s + 1} = \frac{1}{0,00005.s + 1} \quad (3.5)$$

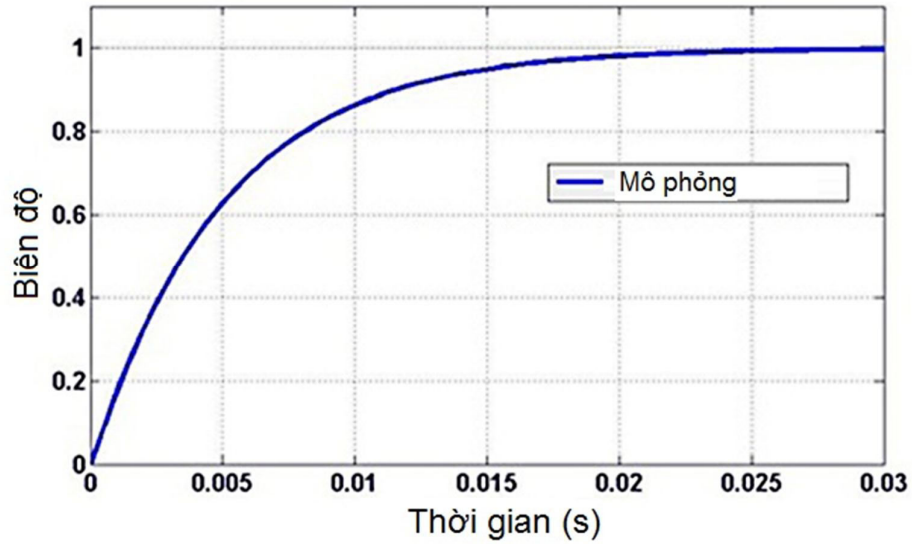
### 3.2.4 Điều khiển mở

Trong hệ thống này, hai thành phần là hệ điều khiển và cơ cấu chấp hành được nối tiếp với nhau, với hàm truyền của mỗi thành phần đã biết là  $H_1(s)$  và  $H_2(s)$ , do đó hàm truyền điều khiển mở của hệ vi gấp là:

$$H(s) = H_1(s).H_2(s) = \frac{1}{0,005.s + 1} \cdot \frac{1}{0,00005.s + 1} \quad (3.6)$$

$$H(s) = \frac{1}{0,00000025.s^2 + 0,00505.s + 1} \quad (3.7)$$

Kết quả đáp ứng của hệ thống điều khiển mở được biểu diễn tại Hình 3.3. Hệ số khuếch đại một chiều của hàm truyền là 1/1 (tại  $s = 0$ ), do vậy 1 là giá trị cuối cùng của lối ra khi hệ thống cân bằng. Nhìn vào đồ thị ta có thể thấy, thời gian tăng khoảng 10 ms (từ 10% tới 90% của sườn dốc tăng), và thời gian thiết lập là 25 ms. So sánh kết quả mô phỏng này với kết quả đo đạc thực nghiệm của vi gấp, các số liệu hoàn toàn khớp với nhau (xem Hình 1.27 và Hình 3.3).



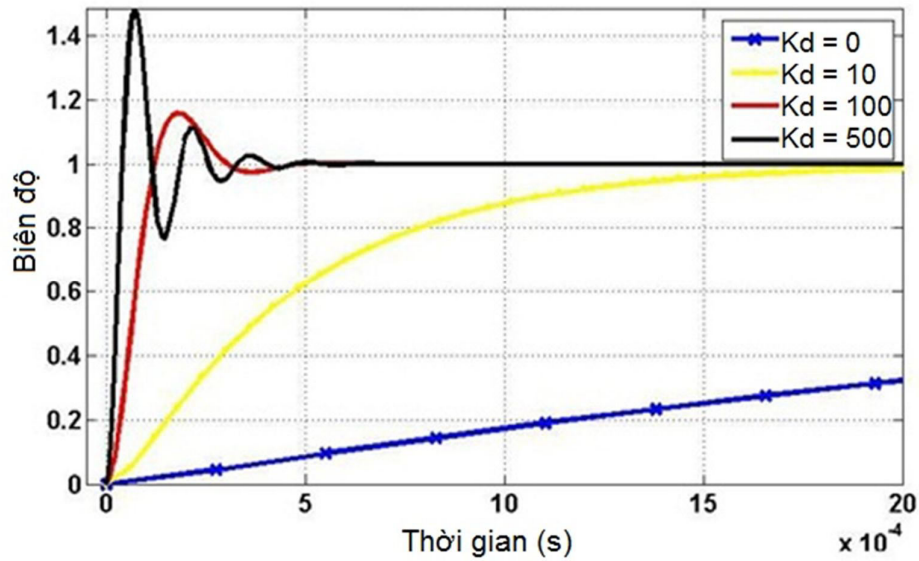
Hình 3.3 Kết quả mô phỏng đáp ứng của cơ chế điều khiển mở

### 3.2.5 Điều khiển Tỷ lệ (P)

Điều khiển khép kín cho hệ thống này với cơ chế điều khiển P có hàm truyền như sau [110]:

$$H_P(s) = \frac{K_P}{0,00000025 \cdot s^2 + 0,00505 \cdot s + 1 + K_P} \quad (3.8)$$

Đáp ứng của hệ thống điều khiển P này được thể hiện ở Hình 3.4 với các giá trị  $K_P$  khác nhau. Từ các đường biểu diễn cho thấy, bộ điều khiển P làm giảm thời gian đáp ứng của tín hiệu lỗi ra, khi giá trị này lớn hơn một giá trị nhất định thì sẽ xuất hiện các xung giao động vượt quá giá trị ổn định. Giá trị  $K_P$  càng cao thì số lần dao động càng nhiều và biên độ xung vọt lên càng cao. Ví dụ, khi  $K_P = 10$ , thời gian đáp ứng của hệ thống giảm xuống còn 2 ms; khi  $K_P = 100$ , thời gian đáp ứng khoảng 1,5 ms nhưng có xuất hiện xung vọt lên của tín hiệu lỗi ra (khoảng 1,17) và phải 2 lần dao động qua vị trí cân bằng mới đạt được ổn định trong khoảng 5 ms; khi  $K_P = 500$ , số giá trị tăng vọt của lỗi ra lên đến gần 1,5 và tạo ra 5 lần dao động trước khi đạt cân bằng, thời gian tăng vọt chỉ khoảng 1 ms tuy nhiên để cân bằng được thì vẫn khoảng 5 ms.



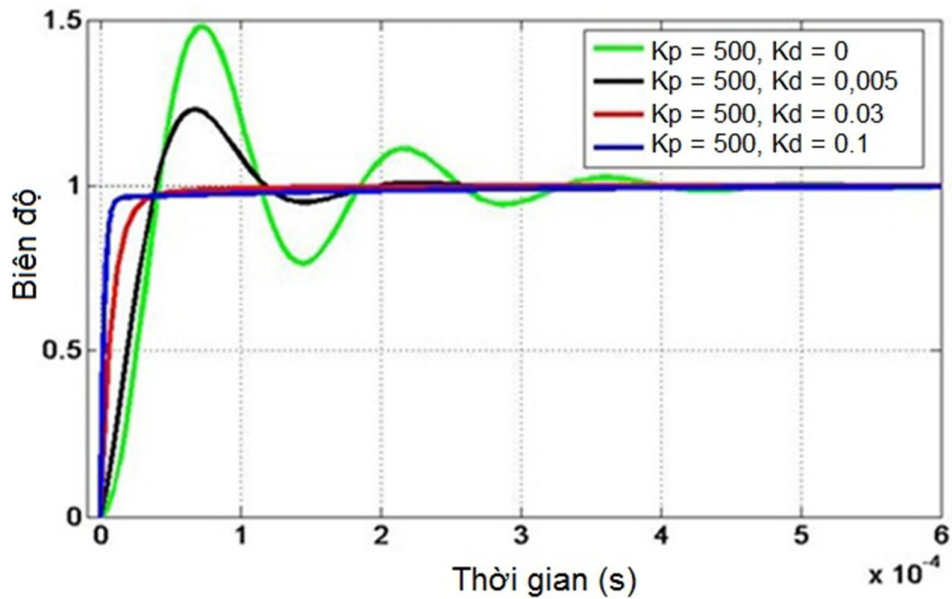
Hình 3.4 Đáp ứng của hệ điều khiển khép kín theo cơ chế điều khiển P

### 3.2.6 Điều khiển Tỷ lệ đạo hàm (PD)

Hàm truyền của cơ chế điều khiển PD được thể hiện ở phương trình sau:

$$H_{PD}(s) = \frac{K_D \cdot s + K_P}{0,00000025 \cdot s^2 + (0,00505 + K_D) \cdot s + K_P + 1} \quad (3.9)$$

Kết quả mô phỏng khi cố định  $K_P = 500$  và thay đổi giá trị của  $K_D$  được biểu diễn ở Hình 3.5. Khi tăng giá trị của hằng số  $K_D$  thì biên độ đáp ứng của tín hiệu đầu ra vượt quá giá trị cân bằng càng giảm xuống và số lần dao động trước khi thiết lập được điểm ổn định sẽ giảm đi. Tuy nhiên khi hằng số này vượt quá một giá trị xác định nào đó, đáp ứng của hệ thống chậm đi (thời gian đáp ứng bị kéo dài). Kết quả phù hợp trong trường hợp này là  $K_D = 0,03$  với thời gian tăng tín hiệu lỗi ra là 20 ns, thời gian đáp ứng là 50 ns mà không tạo ra sự dao động trước khi đạt mức cân bằng.



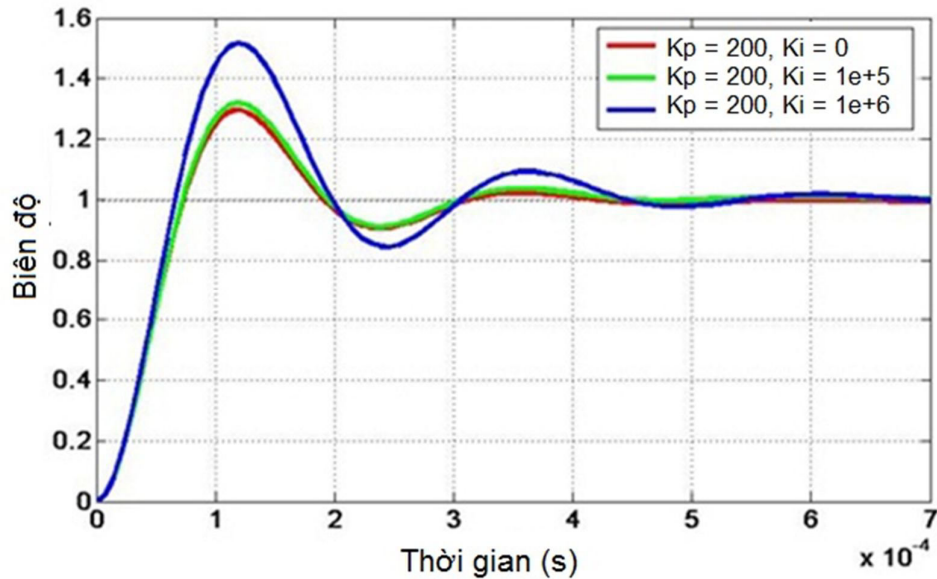
Hình 3.5 Đáp ứng của hệ điều khiển PD

### 3.2.7 Điều khiển Tỷ lệ tích phân (PI)

Trước khi thiết lập được hàm truyền PID, cần phải đánh giá vai trò của hệ số tích phân  $K_I$  trong hệ thống này. Hàm truyền cơ chế điều khiển PI của hệ thống này như sau:

$$H_{PI}(s) = \frac{K_p \cdot s + K_I}{0,00000025 \cdot s^3 + 0,00505 \cdot s^2 + (1 + K_p) \cdot s + K_I} \quad (3.10)$$

Cố định hệ số  $K_p$  và thay đổi giá trị của hệ số  $K_I$ , ta thu được kết quả biểu diễn trên Hình 3.6. Dễ dàng nhận thấy khi tăng hệ số tích phân thì thời gian đáp ứng giảm và số lần dao động trước khi cân bằng tăng lên.



Hình 3.6 Đáp ứng của hệ điều khiển PI

### 3.2.8 Điều khiển Tỷ lệ tích phân đạo hàm (PID)

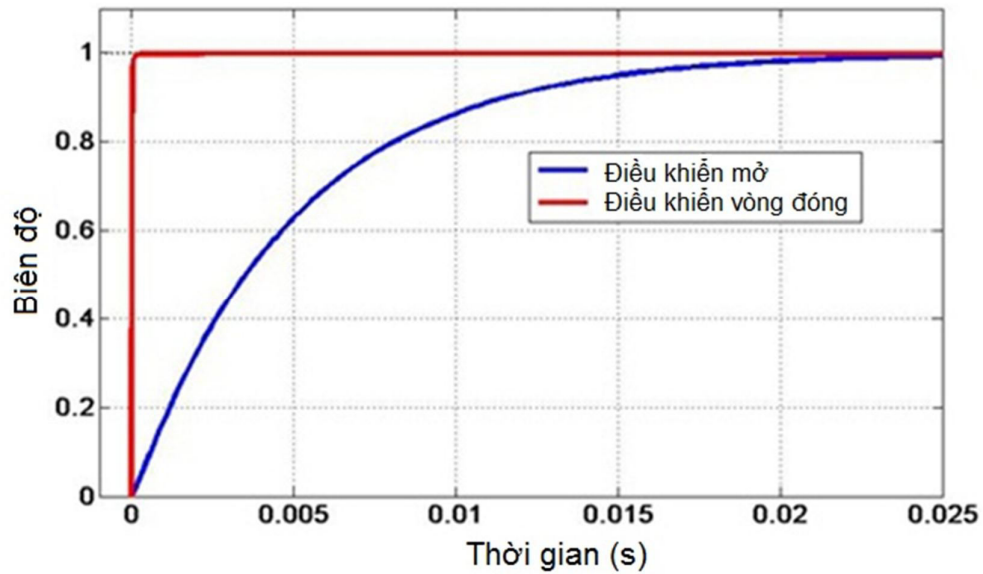
Đối với hệ điều khiển PID, hàm truyền cho cả hệ thống sẽ có dạng như sau:

$$H_{PID}(s) = \frac{K_D \cdot s^2 + K_P \cdot s + K_I}{0,00000025 \cdot s^3 + (0,00505 + 1) \cdot s^2 + (1 + K_P) \cdot s + K_I} \quad (3.11)$$

Tuy nhiên, theo phân tích đối với hệ số  $K_I$ , để có được sự đóng góp đối với đáp ứng ở lối ra, hệ số này phải rất lớn. Điều này có nghĩa là trong thiết kế mạch, nếu sử dụng cơ chế tích phân thì phải trang bị một bộ khuếch đại có hệ số rất lớn. Mặt khác, khi không có hệ số  $K_I$  thì hệ thống ở cơ chế PD có đáp ứng lối ra phù hợp với mục tiêu là giúp hệ thống đáp ứng nhanh hơn rất nhiều lần mà vẫn giữ được độ ổn định. Do đó, hệ số tích phân có thể bỏ qua, và hệ điều khiển trở thành cơ chế PD. Sử dụng giá trị  $K_P = 500$  và  $K_D = 0,03$ , hàm truyền cuối cùng sẽ là:

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

Đáp ứng của hệ thống điều khiển khép kín theo cơ chế PD được thể hiện trên Hình 3.7 khi so sánh với đáp ứng của hệ thống điều khiển mở.



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

Từ đồ thị đáp ứng, khi sử dụng cơ chế điều khiển khép kín PD, cả thời gian đáp ứng và thời gian thiết lập của lỗi 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 dao động nào ở lỗi ra.

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

#### **3.3.1 Lựa chọn công nghệ**

Ưu điểm quan trọng của vi gắp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến là tương thích với công nghệ CMOS nên có thể tích hợp hệ thống vi mạch điều khiển lên cùng một đế với vi gắp. Sự kết hợp công nghệ sản xuất này được gọi là công nghệ CMOS-MEMS. Công nghệ CMOS-MEMS có thể chia làm hai loại, một là cho phép chế tạo các linh kiện MEMS trước các CMOS và hai là ngược lại. Những công nghệ này có các ưu điểm và nhược điểm riêng, tuy nhiên trong chương này không đề cập đến lĩnh vực này mà chỉ quan tâm đến việc lựa chọn công nghệ CMOS phù hợp để thiết kế mạch điều khiển.

Với hệ thống điều khiển, các mạch điện tích hợp sẽ gồm cả mạch tương tự và mạch tín hiệu số, có khả năng hoạt động ở điện áp cao và dòng tiêu thụ lớn. Công nghệ Bi-CMOS 1,2  $\mu\text{m}$  điện áp cao tiêu chuẩn với twin well (n-well), hai lớp poly, hai lớp kim loại của nhà sản xuất TSMC được lựa chọn. Công nghệ này có những ưu điểm như có linh kiện hoạt động ở dải điện áp cao (lên đến 40 V) và cả linh kiện hoạt động ở dải điện áp thấp (5 V). Dải điện áp hoạt động của các linh kiện là hoàn toàn phù hợp với hệ thống vi gắp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến. Mặt khác, công nghệ này cũng đã được kiểm chứng là có độ ổn định cao, có 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 có độ tin cậy cao. Bên cạnh các thông số vật lý hoàn chỉnh, các biến thiên về kích thước cũng như tính năng hoạt động ở các điều kiện tốt nhất và kém nhất (Best case và Worst case) cũng được tích hợp vào mô hình này. Các quy định chặt chẽ về layout linh kiện cùng cách nối dây dẫn (Design rule) cũng được cung cấp đầy đủ.

### **3.3.2 Chương trình mô phỏng**

Chương trình chuyên dụng phổ biến nhất để mô phỏng cấp độ vi mạch bán dẫn là SPICE ('Simulation Program, Integrated Circuit Emphasis'), và các phiên bản thương mại khác nhau của nó như PSPICE, HSPICE, v.v.. SPICE được phát triển lần đầu tiên tại Đại học Berkeley, California và đầu những năm 1970, và nó dựa trên mô hình tín hiệu nhỏ tương đương của các linh kiện điện tử chủ động và thụ động. Theo đó, từ các tính chất vật lý, đặc điểm lõi ra tín hiệu của từng linh kiện, và tập trung chủ yếu vào đặc tính phi tuyến của các linh kiện chủ động (transistors). Các điểm hoạt động (dòng và điện áp) của các linh kiện phi tuyến thay đổi, nên mô hình tín hiệu nhỏ tương đương cũng thay đổi theo, và do đó cần phải có một chương trình đủ mạnh như SPICE để có thể đảm nhiệm được một số lượng lớn các phép tính với hàng triệu điểm hoạt động khác nhau khi dòng điện và điện áp thay đổi.

Để hoạt động, chương trình mô phỏng SPICE cần có các thông tin như sau:



- Chi tiết kết nối mạch điện;
- Các giá trị  $R$ ,  $C$ ,  $L$  của tất cả các linh kiện tuyến tính và kết nối mạch của nó;
- Chi tiết thông số của tất cả các linh kiện phi tuyến (transistor, diodes và có thể là các tụ đơn);
- Các điện áp nguồn;
- Tín hiệu đầu vào của mạch;
- Chỉ rõ tín hiệu đầu ra nào hoặc các chi tiết khác mà chương trình phải tính toán hoặc hiển thị.

Một tính chất thể hiện ưu thế của SPICE là không cần phải định nghĩa cho từng điểm hoạt động của mỗi linh kiện phi tuyến và không cần phải đưa ra các giá trị tín hiệu nhỏ tương đương ở mỗi điểm hoạt động. Thay vào đó, chương trình sẽ tự tính toán điểm hoạt động đầu tiên theo các phương trình đã biết của linh kiện đó và các thông tin về đầu vào của mạch điện đã được cung cấp, sau đó chương trình sẽ tự tính toán và xác định các điểm hoạt động tiếp theo dựa trên mô hình tín hiệu nhỏ tương đương.

Do tất cả các tính chất và hoạt động về điện của các linh kiện chủ động và các thông số khác của mạch điện đều có thể đưa vào trong mô phỏng của SPICE, kết quả mô phỏng chi tiết có thể đạt được và độ chính xác của việc mô phỏng chỉ phụ thuộc vào sự chính xác của các mô hình. Cách thức mô phỏng mạch tương tự và mạch số có sự khác biệt đáng kể, tuy nhiên trong hệ thống này phân tín hiệu số không nhiều. Vì vậy, việc mô phỏng cả hệ thống có thể sử dụng chung một phương pháp với các mạch tương tự. Phiên bản HSPICE được sử dụng để mô phỏng thiết kế mạch điều khiển cho hệ thống vi gấp này.

### **3.4 Mô hình hóa vi gấp theo các thông số điện**

Để có thể thiết kế và mô phỏng hệ thống điều khiển hoạt động cho hệ thống cơ học và cảm biến phản hồi, đầu tiên cần phải thiết lập được mô hình về mặt điện cho toàn bộ cơ cấu vi gấp và hệ cảm biến của nó. Mô hình của vi gấp xét về mặt điện từ

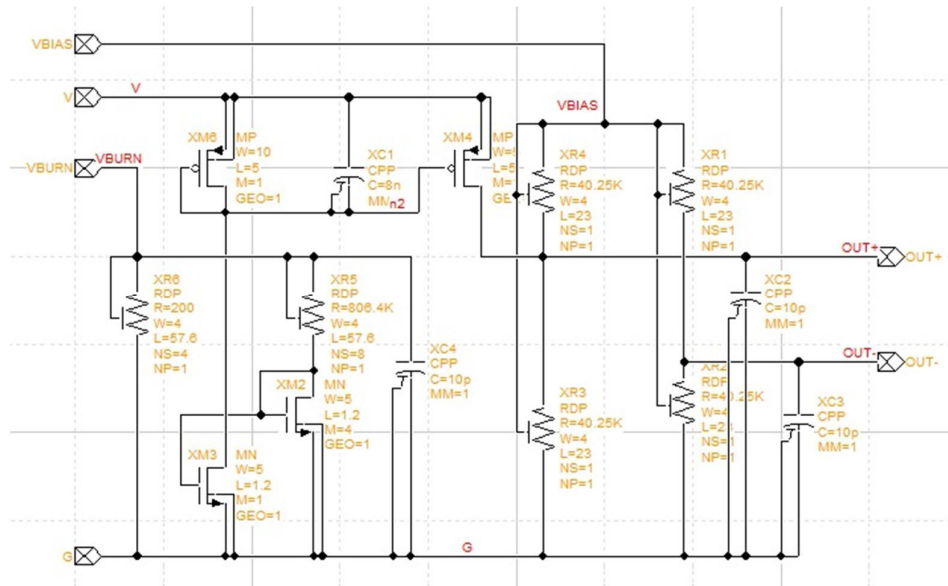
cần đảm bảo các yếu tố sau: (a) Đáp ứng tần số phù hợp với số liệu đo đạc thực tế; (b) Mối liên quan giữa điện áp lối vào và điện áp lối ra từ các đầu cảm biến cũng như dải điện áp phù hợp với thực tế; và (c) các thông số công suất đúng với đo đạc thực nghiệm (công suất thay đổi khi nhiệt độ hoạt động biến thiên do điện trở của sợi nhôm thay đổi theo nhiệt độ).

Đối với đáp ứng tần số của hệ thống, căn cứ vào số liệu đo đạc (Hình 1.26) và hàm truyền của hệ thống (3.3), dễ dàng nhận thấy hệ thống vi gấp là một mạch RC với giá trị hoàn toàn có thể tính được do giá trị của R đã được xác định (tổng điện trở của khối chấp hành – sợi nhôm trên bề mặt của các ngăn xếp silic-polyme).

Đề cập đến phần cảm biến, điện áp lối ra là vi sai điện áp của hai điểm trên cầu Wheatstone với giá trị của các điện trở này là  $39\text{ k}\Omega$  cho mỗi thanh áp trở [86]. Mặt khác phần này được điện áp phân cực ổn định ở giá trị 1 V nên cần phải có một chân nguồn cấp điện áp này. Điện áp vi sai ở hai lối ra sẽ tỉ lệ với điện áp nguồn cấp cho vi gấp theo đặc tuyến giữa điện áp nguồn với điện áp lối ra của cảm biến (Hình 1.23). Mặt khác, dải điện áp lối vào từ 0-5 V trong khi dải điện áp vi sai là từ 0-40 mV. Để kết nối được sự liên hệ này, một bộ nguồn dòng điện gương được áp dụng để lấy thông tin từ điện áp nguồn cấp cho sợi nung (bằng giá trị điện áp trên điện trở) và ánh xạ nguồn dòng này vào cấu trúc cầu Wheatstone để tạo ra điện áp vi sai.

Liên quan đến điện trở sợi nhôm thay đổi với sự biến thiên điện áp nguồn đã được đo đạc tại [86], tính chất này cần được đưa vào trong mô hình mô phỏng về điện của hệ thống vi gấp. Thật trùng hợp là trong công nghệ Bi-CMOS  $1,2\text{ }\mu\text{m}$  được sử dụng để thiết kế mạch điều khiển tích hợp có sẵn một loại điện trở có các tính chất như mô tả.

Từ những phân tích ở trên, một mô hình cho hệ vi gấp và cảm biến được thiết lập ở Hình 3.8. Kết quả mô phỏng phù hợp với các tiêu chí đặt ra.



Hình 3.8 Mô hình về mặt điện của hệ thống vi gấp tích hợp cảm biến

### 3.5 Sơ đồ khối toàn hệ thống

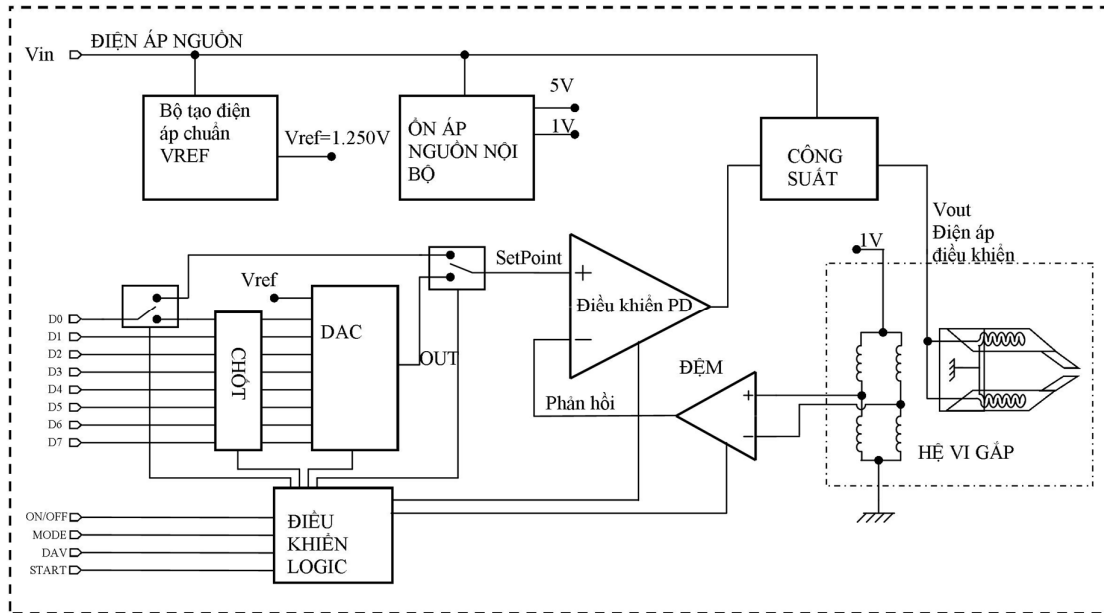
Hệ thống vi gấp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến cùng với bộ điều khiển tích hợp sẽ đáp ứng đủ các chức năng cho một hệ thống vi gấp tự động. Cả hai phần chính của hệ thống là vi gấp và mạch điều khiển tích hợp đều được chế tạo trên một đế. Yêu cầu đối với hệ thống điều khiển này là có vòng điều khiển đóng, hoạt động ổn định và có thể hoạt động như một hệ thống độc lập. Hệ thống có thể hoạt động với thông tin đầu vào là một giá trị điện áp đặt sẵn hoặc tín hiệu số 8 bit tương ứng với giá trị của chuyển vị.

Mục tiêu đặt ra là điều khiển chuyển vị của vi gấp đến vị trí được yêu cầu với tốc độ nhanh nhất và giữ nguyên tại trạng thái đó. Do vậy bộ điều khiển cần phải giám sát tín hiệu phản hồi từ hệ cảm biến và tín hiệu tham chiếu rồi cấp nguồn cho cơ cấu chấp hành một cách liên tục. Để thực hiện được điều này, có thể sử dụng hệ vi điều khiển số hóa lập trình được. Tuy nhiên giải pháp này khá phức tạp, kích thước và giá thành sản phẩm sẽ rất cao. Hơn nữa, giải pháp điều khiển số hóa sẽ gây ra sai số cũng như độ trễ nhất định khi phải lấy mẫu và so sánh theo từng xung. Việc lấy mẫu và gửi lệnh cho cơ cấu thi hành lại cần đến chuyển đổi tương tự số và ngược lại. Với các lý do trên, phần chính của bộ điều khiển được lựa chọn thiết kế hoàn toàn theo điện tử tương tự với rất

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 đề xuất sơ đồ khối của hệ thống mạch điều khiển, bao gồm một vòng điều khiển đóng 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 vị trí chuyển vị cho đầu kẹp được thiết kế để có thể hoạt động được với hai chế độ: tín hiệu tương tự và tín hiệu số 8 bit. Có nghĩa là chuyển vị của đầu kẹp sẽ được đặt qua các tín hiệu ở đầu vào của hệ thống, có thể bằng tín hiệu tương tự hoặc bằng tín hiệu số. Do vậy, hệ thống với bộ điều khiển này có thể ghép nối để hoạt động với hệ điều khiển khác thông qua cổng kết nối này hoặc có thể hoạt động một cách độc lập.

Khi nhận được lệnh kích hoạt, mạch điều khiển sẽ giám sát các tín hiệu ở lối ra của hệ cảm biến và so sánh với tín hiệu mà người dùng đã đặt ra để gửi tín hiệu điều khiển tới bộ công suất tạo ra điện áp cho cơ cấu chấp hành hoạt động. Nếu chuyển vị của đầu kẹp thấp hơn tín hiệu điều khiển, tín hiệu lối ra của bộ so sánh sẽ cao hơn nhằm cung cấp nhiều hơn dòng điện cho cơ cấu chấp hành, và do đó, đầu kẹp sẽ gia tăng sự dịch chuyển. Khi tín hiệu từ cảm biến cho thấy chuyển vị đã đến mức định trước, tín hiệu điều khiển sẽ giảm xuống để giữ nguyên vị trí chuyển vị đó của vi gắp cho đến khi bộ điều khiển nhận được một lệnh nhả ra.



Hình 3.9 Sơ đồ khối của hệ thống điều khiển cho vi gắp

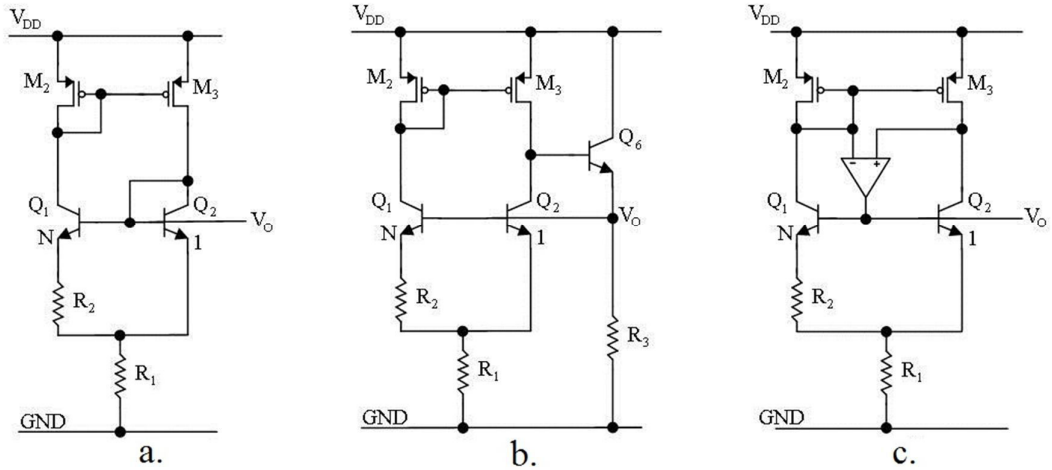
### 3.6 Thiết kế mạch chi tiết

#### 3.6.1 Mạch tạo điện áp chuẩn tham chiếu

Điện áp chuẩn tham chiếu là điện áp có giá trị luôn không đổi khi nhiệt độ hoạt động của vi mạch hay điện áp nguồn nuôi thay đổi. Đây là một thông số quan trọng trong các mạch tương tự. Để tạo ra được một điện áp đẳng nhiệt và đẳng áp, tác giả đã sử dụng tổng của hai đại lượng có hệ số biến đổi nhiệt (TC) ngược chiều nhau để tạo nên một đặc tuyến đẳng nhiệt (TC=0). Ví dụ, với hai điện áp  $V_1$  và  $V_2$  biến đổi ngược chiều theo nhiệt độ, ta chọn hai hằng số  $\alpha_1$  và  $\alpha_2$  sao cho  $\alpha_1 \frac{\partial V_1}{\partial T} + \alpha_2 \frac{\partial V_2}{\partial T} = 0$  để tạo ra điện áp chuẩn tham chiếu  $V_{REF} = \alpha_1 \cdot V_1 + \alpha_2 \cdot V_2$  với giá trị TC bằng không.

Bộ tạo điện áp chuẩn tham chiếu dùng công nghệ Bi-CMOS được mô tả trên Hình 3.10. Các phiên bản thay thế của bộ tạo điện áp chuẩn tham chiếu ngoại trừ emitter follower, Q6, hoặc thay thế nó với các dạng khác nhau của bộ khuếch đại thuật toán. Cấu trúc emitter follower hay khuếch đại thuật toán không cộng thêm các can nhiễu về tần số hay sự biến thiên của điện áp ra, trong khi giảm bớt các hiệu ứng khác,

ví dụ như trở kháng lối ra và các dòng base. Cấu trúc mạch càng có chất lượng đồng nghĩa với việc cần nhiều công suất tiêu thụ và diện tích hơn.



Hình 3.10 Mạch tạo điện áp chuẩn tham chiếu với a) không beta-booster, b) emitter-follower beta-booster, và c) op-amp beta-booster

Chúng ta có cùng phân tích đối với các mô hình cơ bản trên khi tính toán giá trị điện áp chuẩn tham chiếu. Hai dòng điện gương qua  $M_1$  và  $M_3$  có nhiệm vụ giữ cho  $I_{Q1} = I_{Q2}$  với:

$$I_{Q1} = N \cdot I_s \cdot e^{V_{BE1}/V_T} \quad (3.13)$$

$$I_{Q2} = I_s \cdot e^{V_{BE2}/V_T} \quad (3.14)$$

do đó

$$V_{BE1} - V_{BE2} = V_T \cdot \ln N \quad (3.15)$$

Đồng thời, từ trên mạch, ta có:

$$V_{REF} = V_{BE2} + V_{R1} \quad (3.16)$$

$$V_{R1} = I_{R1} \cdot R_1 = 2 \cdot I_{R2} \cdot R_1 = 2 \frac{V_{R2}}{R_2} \cdot R_1 \quad (3.17)$$

$$V_{R2} = V_{BE2} - V_{BE1} = \Delta V_{BE} = V_T \cdot \ln N \quad (3.18)$$

$$V_{REF} = V_{BE2} + 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot V_T \cdot \ln N \quad (3.19)$$

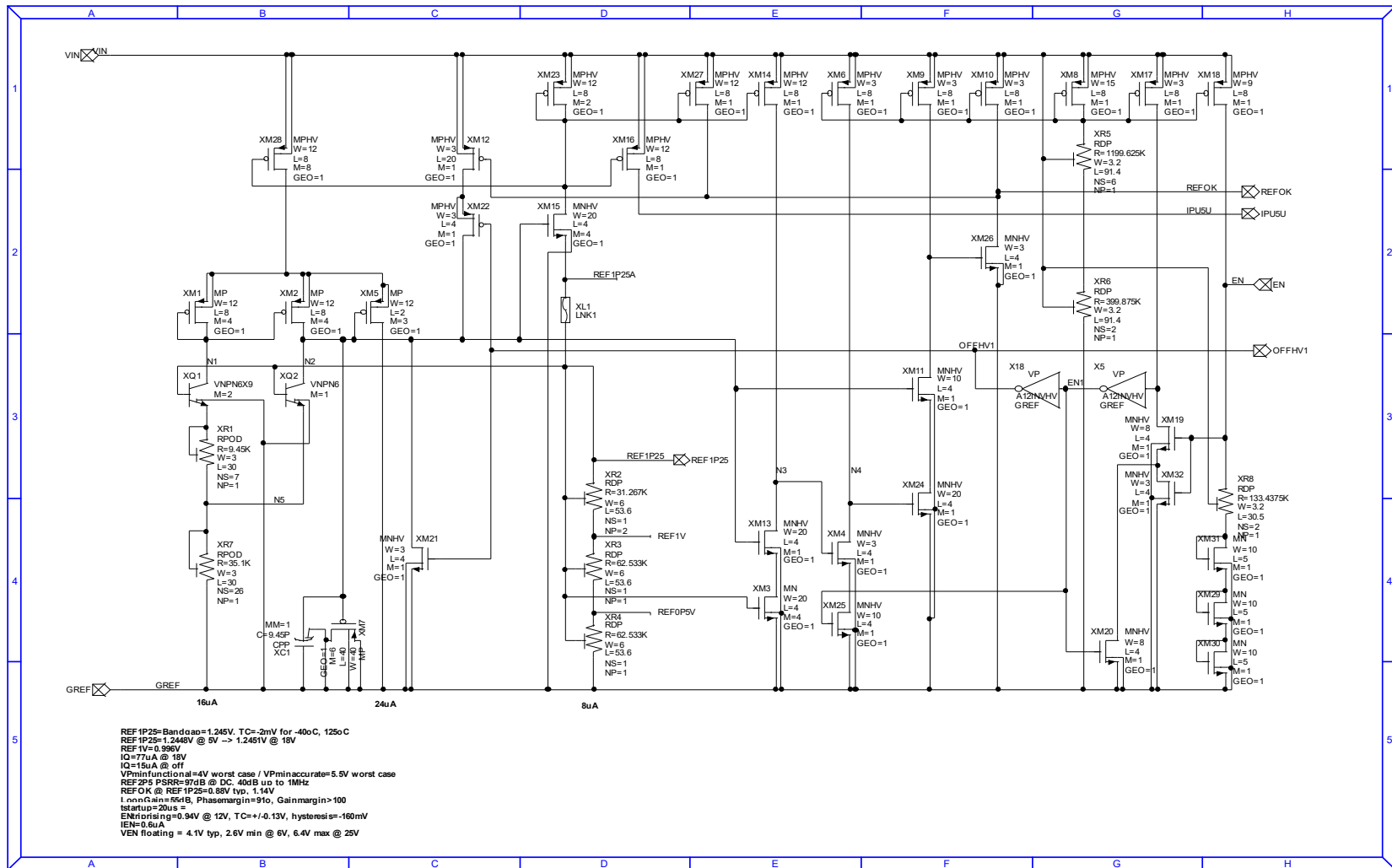
Với  $V_T = \frac{kT}{q} = 0,026 \text{ V}$  tại  $T = 300 \text{ }^\circ\text{K}$  và do đó  $V_T$  tỉ lệ thuận với nhiệt độ với hệ số  $C = 8,62 \cdot 10^{-5}$ . Giá trị  $V_{BE}$  giảm theo nhiệt độ với tỉ lệ khoảng  $-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ . Những thay đổi này bù cho nhau khi nhiệt độ thay đổi. Lấy vi phân phương trình 3.19 theo nhiệt độ, ta được:

$$2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot \ln N = \frac{0,002}{8,62 \cdot 10^{-5}} \quad (3.20)$$

do đó

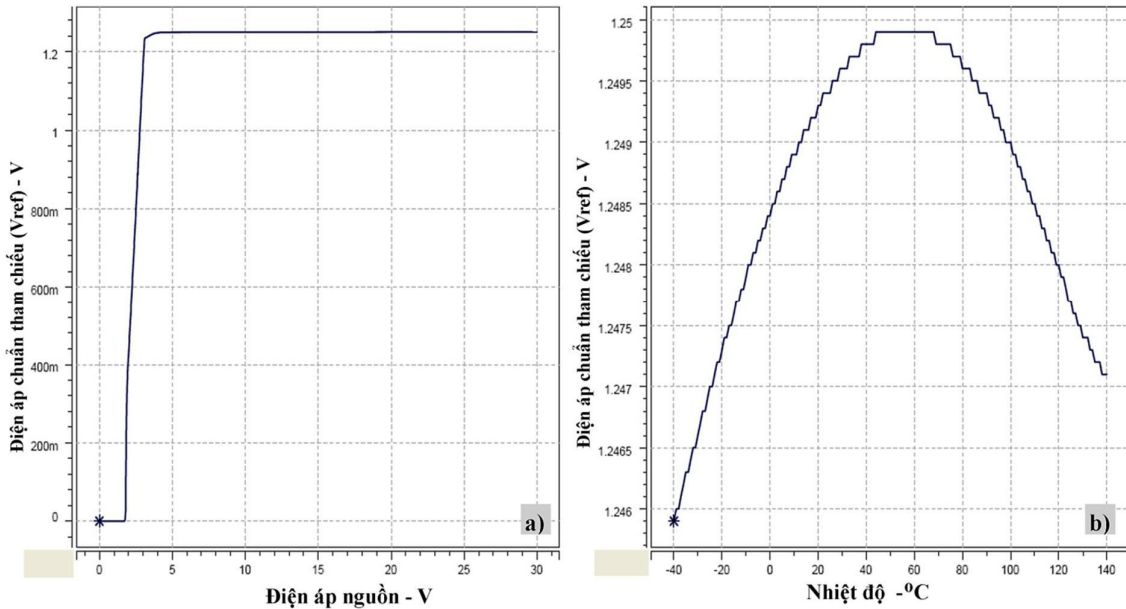
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{11,6}{\ln N} \quad (3.21)$$

Mô hình mạch b) trên Hình 3.10 sẽ được chọn để sử dụng cho hệ thống này vì nó có thiết kế đơn giản và ít bị can nhiễu nhất. Một ưu điểm của mạch này là dòng điện phân cực PTAT (proportional to absolute temperature) chung với điện trở  $R_2$ , điều này cũng giảm bớt giá trị cũng như can nhiễu vào  $R_2$  đi một nửa so với cấu trúc khác. Ngược lại, nhược điểm của mạch này là có cấu trúc đơn giản và bị ảnh hưởng bởi điện áp nguồn, và cần phải có cơ cấu khởi động. Những nhược điểm này có thể khắc phục bởi một số thay đổi về cấu trúc. Chi tiết của mạch này được thiết kế tại Hình 3.11 và kết quả mô phỏng ở Hình 3.12.



Hình 3.11 Thiết kế chi tiết của mạch tạo điện áp chuẩn tham chiếu





**Hình 3.12** Kết quả mô phỏng mạch tạo điện áp tham chiếu a) với sự thay đổi điện áp nguồn tại nhiệt độ 25 °C và b) với sự thay đổi nhiệt độ khi điện áp nguồn  $V_{in} = 12V$

Từ những đặc tuyến trên đồ thị của kết quả mô phỏng, điện áp chuẩn tham chiếu sẽ đạt được mức cân bằng với điện áp nguồn trên 4 V, giá trị là 1,248 V. Bên cạnh đó, giá trị điện áp tham chiếu sẽ ổn định và chỉ biến đổi trong khoảng  $\pm 0,2 \%$  khi nhiệt độ thay đổi từ  $-40 \text{ }^{\circ}\text{C}$  đến  $125 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Mạch điện chỉ tiêu thụ dòng điện (tiêu chuẩn bằng  $55 \mu\text{A}$ ). Ngoài ra các giá trị khác liên quan đến độ ổn định của mạch cũng được mô phỏng, hệ số bù pha  $> 90$  độ cho tất cả các trường hợp, tỉ lệ cách li nguồn (PSRR = 97 dB), v.v..

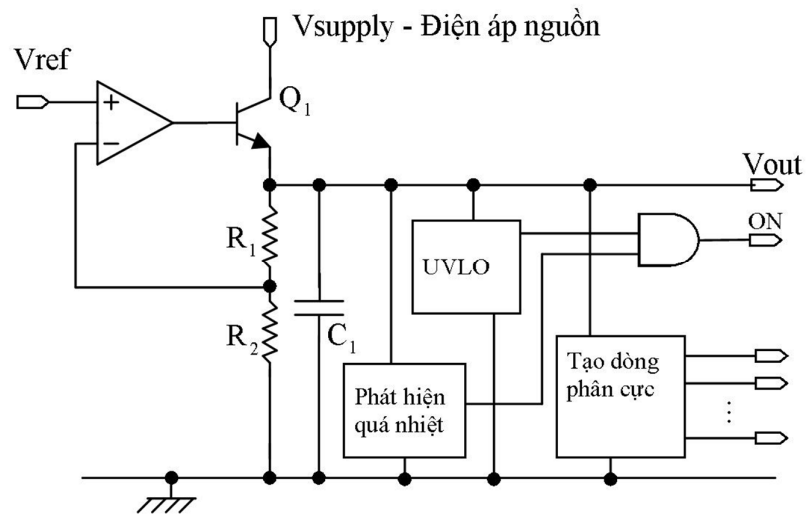
Khi được chế tạo trong thực tế, điện áp chuẩn tham chiếu sẽ bị ảnh hưởng bởi hai thay đổi. Thứ nhất là sai lệch tính chất của các linh kiện khi chúng nằm ở các vị trí khác nhau trên chip, vấn đề này sẽ được hạn chế bằng cách tăng điện tích của linh kiện cũng như áp dụng các kỹ thuật layout theo từng cặp. Thay đổi thứ hai là do sai khác của công nghệ chế tạo, các sai số này ta chỉ có thể sử dụng kỹ thuật cắt tỉa.

### 3.6.2 Mạch tạo điện áp và nguồn dòng nội bộ

Hệ thống điều khiển vi gấp được thiết kế để hoạt động trong dải điện áp nguồn từ 7 V đến 40 V. Trang bị một mạch tạo điện áp nguồn nội bộ ổn định có điện áp thấp để

cấp cho các khối chức năng khác hoạt động với nhiều lý do. Thứ nhất, các mạch hoạt động ở điện áp thấp thì chỉ sử dụng các linh kiện điện áp thấp, từ đó tiết kiệm được nhiều diện tích của vi mạch. Lý do thứ hai là nhờ bộ ổn áp nội bộ, các mạch này sẽ không phụ thuộc vào thay đổi điện áp nguồn chính, do đó sẽ hoạt động chính xác và ổn định hơn. Điện áp nội bộ này được thiết kế cho giá trị 5 V, tải cực đại 10 mA và cho phép sai số 10% khi điện áp nguồn và tải thay đổi.

Bộ ổn áp tuyến tính được sử dụng để tạo điện áp nội bộ. Transistor NPN được sử dụng nối tiếp với tải như một điện trở. Điện áp lối ra của mạch này sẽ được điều chỉnh ở vòng lặp kín để nó luôn ở một giá trị cố định. Thiết kế được thể hiện trên Hình 3.13 với cách ghép nối tiếp Darlington để hạn chế dòng điều khiển và cần khoảng cách ít nhất là 2 V giữa điện áp nguồn và điện áp nội bộ (có nghĩa là điện áp nguồn phải lớn hơn 7 V). Ngoài ra trong khối này còn trang bị thêm các chức năng phụ khác nhưng cũng không kém phần quan trọng cho cả hệ thống, đó là mạch tạo các nguồn dòng phân cực cho cả hệ thống, mạch bảo vệ quá nhiệt, và mạch khóa khi điện áp nguồn quá thấp (UVLO).



Hình 3.13 Bộ ổn áp nguồn nội bộ và các mạch phụ trợ

Bộ tạo điện áp nguồn nội bộ sử dụng điện áp tham chiếu (1,25 V) để so sánh với tín hiệu phản hồi điện áp lối ra thông qua cặp điện trở, sự sai khác của hai giá trị sẽ được bộ khuếch đại nhân lên để điều khiển cặp transistor Darlington công suất. Khi hệ

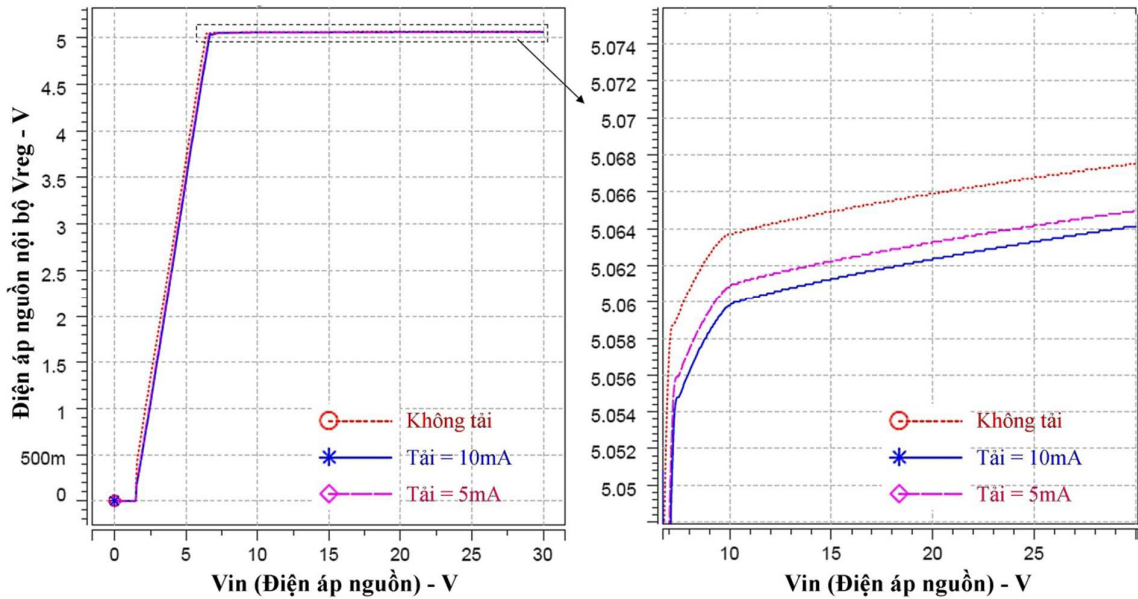
thông đạt được cân bằng, giá trị điện áp ở hai lối vào các cực của bộ khuếch đại thuật toán là bằng nhau, do đó giá trị của điện áp lối ra là:

$$V_{REG} = V_{REF} \cdot \frac{(R_1 + R_2)}{R_2} \quad (3.22)$$

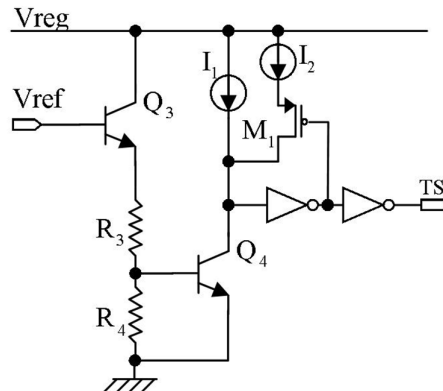
Bộ ổn áp tuyến tính với transistor công suất NPN sẽ khá đơn giản trong việc giữ ổn định. Mặc dù hệ số khuếch đại của vòng lặp lớn (với tổng trở kháng lối ra khoảng 4 MΩ) mạch ổn áp này được giữ ổn định bằng một tụ bù có giá trị 3 pF. Với cấu trúc này, giá trị tải ở lối ra bằng dòng điện qua transistor công suất. Do đó, với tải tối đa là 10 mA, hay công suất tiêu thụ của các mạch nội bộ là 0,05 W thì công suất tiêu tán trên transistor này là 0,35 W (với điện áp nguồn cao nhất là 40 V). Công suất này chủ yếu chuyển thành nhiệt năng và là một nhược điểm của bộ ổn áp tuyến tính. Do vậy, đây sẽ là một điểm có nhiệt độ cao trên vi mạch và sẽ làm các phần mạch khác nóng lên theo.

Kết quả mô phỏng điện áp nguồn nội bộ thể hiện ở đồ thị Hình 3.14. Điện áp nguồn nội bộ đạt được giá trị yêu cầu khi điện áp nguồn lớn hơn 6 V. Sự biến thiên của điện áp nguồn nội bộ nằm trong phạm vi cho phép 10% khi tải và điện áp nguồn nuôi thay đổi.

Hệ thống vi gắp tích hợp bộ điều khiển này sẽ có ba vị trí tỏa nhiệt lớn: tại transistor công suất của bộ ổn áp nội bộ, transistor công suất điều khiển cơ cấu chấp hành và trên cơ cấu chấp hành của vi gắp. Để bảo vệ cho hệ thống, một bộ mạch phát hiện quá nhiệt được tích hợp nhằm tạo ra một tín hiệu dừng hoạt động toàn bộ hệ thống khi nhiệt độ trên bề mặt của nó vượt quá 145 °C. Thiết kế của phần mạch này thể hiện ở Hình 3.15.

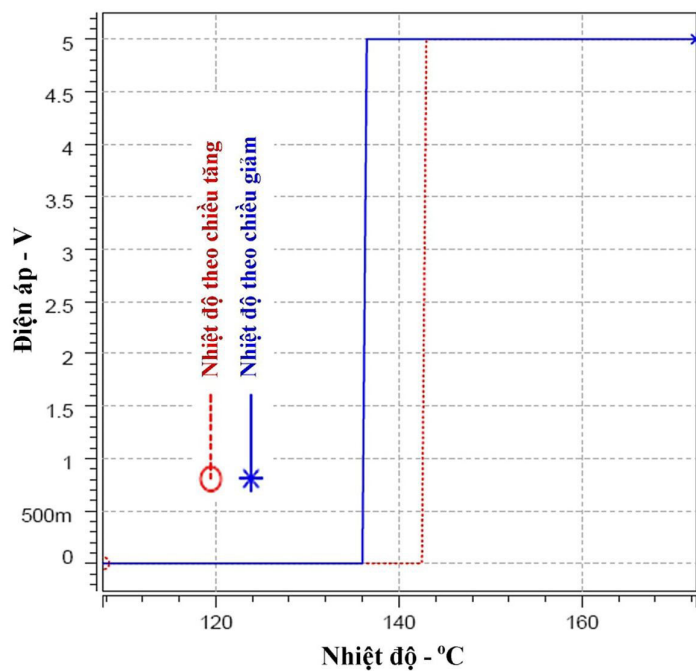


Hình 3.14 Kết quả mô phỏng của  $V_{reg}$  với  $V_{in}$  (điện áp nguồn)

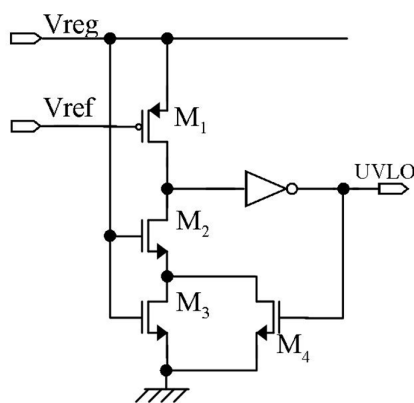


Hình 3.15 Mạch phát hiện quá nhiệt

Khi nhiệt độ thấp hơn  $145^{\circ}\text{C}$ , điện áp tại cực gốc của  $Q_4$  thấp hơn điện áp ngưỡng  $V_{be}$  của chính nó và  $Q_4$  ngắt mạch. Nhưng khi nhiệt độ lên tới  $145^{\circ}\text{C}$ , hai điện áp kể trên có giá trị bằng nhau và  $Q_4$  sẽ đóng mạch, kéo toàn bộ nguồn dòng xuống – điện áp trên cực phát sẽ bằng 0 V. Do vậy, khi bề mặt vi mạch quá nóng, tín hiệu  $TS$  sẽ nằm ở mức cao và sẽ ngắt hoạt động của toàn hệ thống. Khi nhiệt độ giảm xuống  $135^{\circ}\text{C}$ , tín hiệu  $TS$  trở về trạng thái thấp do tác dụng của transistor  $M_1$ .



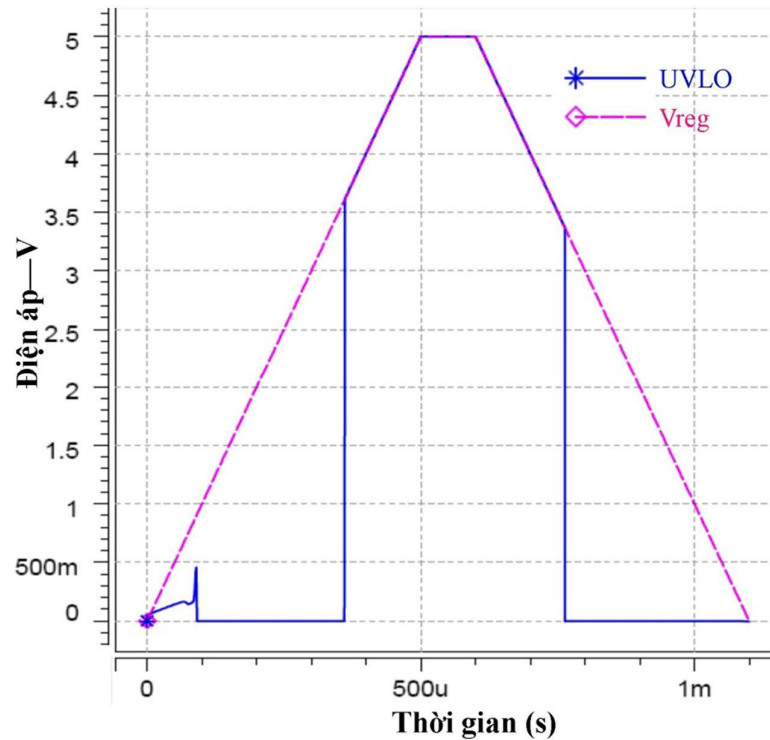
Hình 3.16 Kết quả mô phỏng của mạch phát hiện quá nhiệt



Hình 3.17 Mạch khóa điện áp thấp

Ngoài ra, để ngăn hệ thống rơi vào các trạng thái hoạt động bất định khi điện áp nguồn ở mức quá thấp, mạch khóa điện áp thấp (UVLO – undervoltage lockout) được tích hợp thêm vào hệ thống và trình bày tại Hình 3.17 với 4 transistor và một cổng NOT. Điện áp lỗi ra của mạch này sẽ được sử dụng để cho phép các mạch chức năng khác hoạt động khi điện áp Vreg lớn hơn Vref cộng với điện áp ngưỡng của M1 và điện áp ngưỡng của M2 và M3; M4 dùng để tạo ra một khoảng an toàn nhằm tránh

nhiều loạn trong quá trình tắt/bật (cấp nguồn/ngắt nguồn) hệ thống. Hệ thống điều khiển sẽ hoạt động bình thường khi điện áp  $V_{reg}$  có giá trị khoảng 5 V, do đó ngưỡng UVLO khoảng 3 V với biên độ an toàn 200 mV. Kích thước và tỉ lệ độ rộng/dài kênh ( $W/L$ ) của các transistor M1, M2 và M3 cần phải rất nhỏ để tăng điện áp ngưỡng của chúng và giảm thiểu dòng điện tiêu thụ. Kết quả mô phỏng tại Hình 3.18 khi thay đổi điện áp  $V_{reg}$  cho thấy giá trị điện áp ngưỡng UVLO là 3,6 V và khoảng an toàn là 200 mV. Khi ở trạng thái hoạt động thông thường, điện áp đầu ra của UVLO sẽ bằng điện áp  $V_{reg}$ .

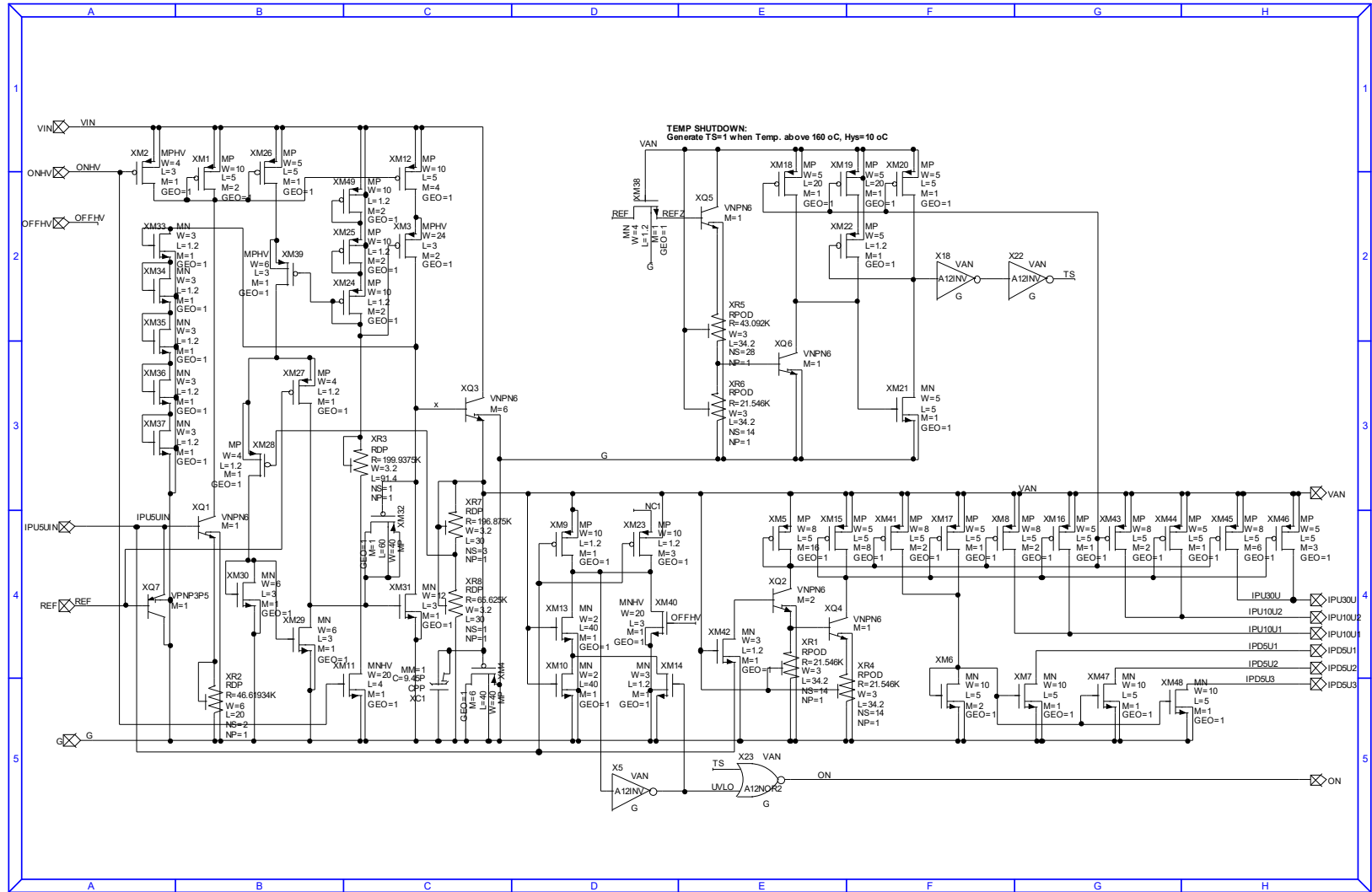


**Hình 3.18** Kết quả mô phỏng khối chức năng UVLO

Các mạch chức năng khác như bộ điều khiển PD trung tâm, DAC, bộ đệm tín hiệu cảm biến, v.v., cần điện áp phân cực hoặc dòng điện phân cực để hoạt động. Trong hệ thống này, ước tính diện tích dành cho phần mạch là khá lớn (khoảng 0,8 mm<sup>2</sup>), do đó sử dụng dòng điện phân cực sẽ an toàn và ổn định hơn so với điện áp phân cực (giảm thiểu ảnh hưởng của điện trở dây dẫn, can nhiễu). Nguồn dòng phân cực dựa trên cấu trúc dòng điện gương, tuy nhiên yêu cầu nguồn dòng không bị ảnh

hưởng bởi điện áp  $V_{reg}$  và nhiệt độ. Dòng điện phân cực được tạo ra bằng cách chia  $V_{ref}$  cho một điện trở, nhưng có một vấn đề nảy sinh là không có điện trở nào có hệ số biến thiên nhiệt độ ( $TC$ ) bằng 0. Từ đó, phải tạo ra một điện trở có giá trị  $TC = 0$  bằng cách nối tiếp hai điện trở có giá trị  $TC$  ngược nhau theo một tỉ lệ nhất định.

Thiết kế chi tiết của mạch tạo điện áp nguồn nội bộ được thể hiện trên Hình 3.19.



Hình 3.19 Mạch tạo điện áp nguồn nội bộ và các mạch chức năng



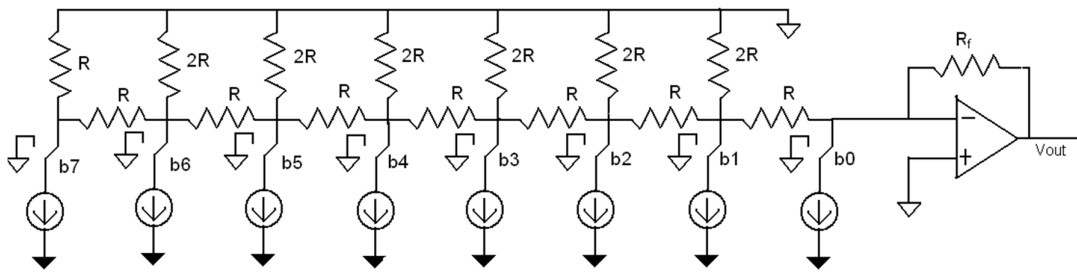
### 3.6.3 Mạch chuyển đổi tín hiệu số tương tự (DAC)

Hệ thống điều khiển vi gáp cho phép người dùng có thể đặt chuyển vị của đầu kẹp theo hai cách. Cách thứ nhất là thông qua tín hiệu điện áp tương tự được nối trực tiếp vào chân  $D_0$  và chuyển vị của đầu vi gáp sẽ tương ứng theo giá trị điện áp này. Chế độ thứ hai là chuyển vị được đặt thông qua công tín hiệu số 8 bit – thường là ghép nối với máy tính hoặc bộ điều khiển khác. Ở chế độ này, dải hoạt động (chuyển vị) của đầu vi gáp sẽ được chia tương ứng với các giá trị từ nhỏ nhất đến lớn nhất của 8 bit. Bản chất hoạt động của nó là chuyển đổi giá trị đó thành giá trị điện áp tương ứng để so sánh với tín hiệu từ cảm biến. Do đó, cần thiết phải trang bị một bộ DAC trong hệ thống.

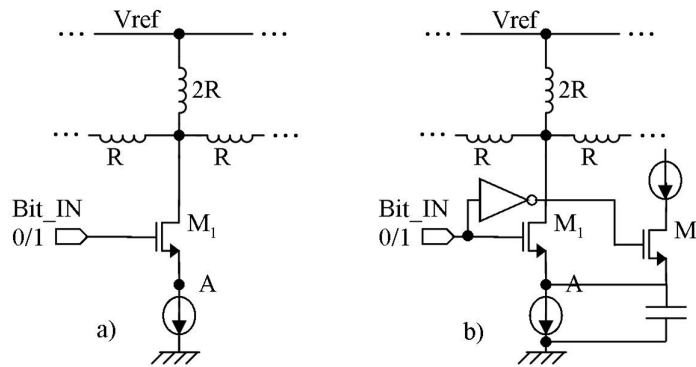
Bộ 8-bit DAC bao gồm một chuỗi thang điện trở được cấp bởi các nguồn dòng có giá trị bằng nhau, và một bộ cộng giá trị các dòng điện đó để chuyển thành giá trị điện áp đầu ra. Việc sử dụng cấu trúc thang điện trở R-2R là rất hiệu quả trong việc cộng nhĩ phân dòng điện. Tỷ lệ giá trị các điện trở độc lập với số bit và có độ chính xác cao. Do giá trị trở kháng của cấu trúc R-2R cần phải giống hệt nhau (cần độ chính xác 0,01% đối với LSB của 8-bit DAC) cũng như tỷ lệ nguồn dòng qua các chuyển mạch phải chính xác tuyệt đối nên cách thức thực hiện được chuyển sang phương án sử dụng các nguồn dòng bằng nhau qua các chuyển mạch. Thiết kế này sẽ có tốc độ hoạt động thấp hơn, tuy nhiên sẽ ổn định và tin cậy hơn. Bên cạnh đó, với yêu cầu và cách thức hoạt động của hệ thống này, tốc độ của bộ chuyển đổi DAC có tốc độ cao là không cần thiết.

Nguyên lý hoạt động cơ bản của DAC sử dụng cấu trúc R-2R là chia các dòng điện tham chiếu bằng nhau thông qua các khóa chuyển mạch. Các transistor loại N được sử dụng để tạo ra các nguồn dòng theo nguyên lý dòng điện gương, với giá trị  $10 \mu\text{A}$  mỗi nhánh. Điện trở high poly (R) có giá trị  $40 \text{ k}\Omega$ . Do điện áp lỗi ra của bộ DAC này sẽ được kết nối trực tiếp với lối vào của bộ so sánh vi sai – cực gate của một transistor MOSFET có trở kháng rất cao – do đó bộ khuếch đại thuật toán mô tả trên Hình 3.20 là không cần thiết. Dải điện áp lỗi ra được đặt trong khoảng từ 1 V đến 5 V

tương đương với dải điện áp ra của bộ đệm tín hiệu cảm biến, và giá trị này sẽ tương đương với toàn bộ vùng chuyển vị của đầu kẹp. Điều này cho phép thay đổi bộ chuyển mạch 3 cực thành 2 cực trong cơ chế chuyển mạch dòng điện như đã mô tả ở Hình 3.20. Cấu hình của các chuyển mạch này được mô tả như tại Hình 3.21(a) và (b). Với cấu trúc tại Hình 3.21(a), điện áp tại điểm A sẽ thay đổi một cách đột ngột khi Bit-IN thay đổi trạng thái và tạo ra các xung điện áp nhảy vọt ở điện áp lõi ra của bộ DAC. Để giải quyết vấn đề này, cấu trúc được thay đổi như trên Hình 3.21(b).

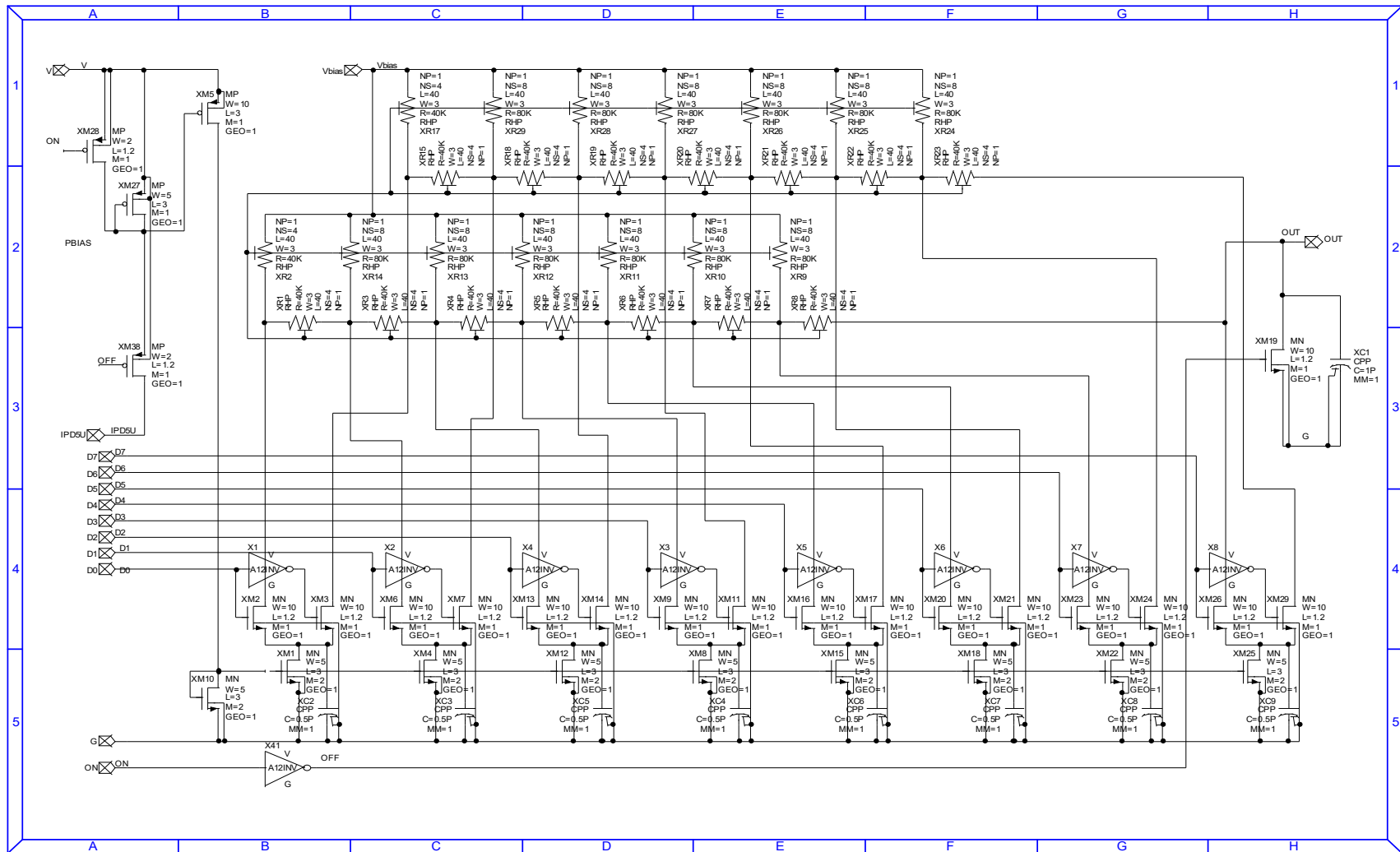


**Hình 3.20** Cấu trúc DAC với các tầng R-2R

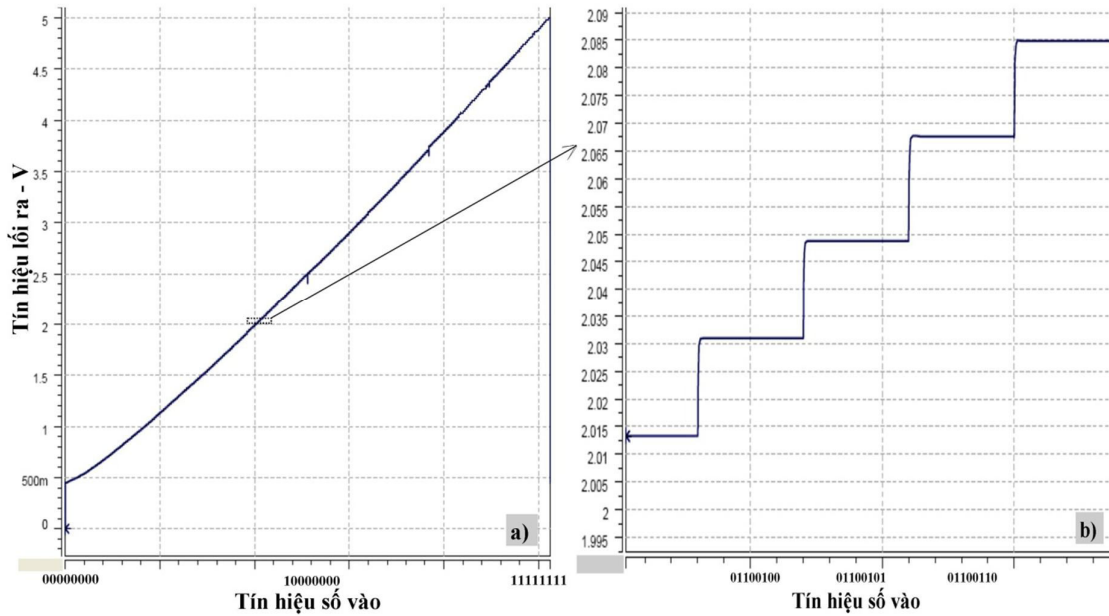


**Hình 3.21** Cấu hình của mỗi đơn vị của dãy R-2R: a) không bù và b) có bù điện áp

Thiết kế chi tiết của bộ DAC và kết quả mô phỏng được trình bày trong Hình 3.22 và Hình 3.23 dưới đây.



Hình 3.22 Thiết kế bộ DAC 8-bit



Hình 3.23 Kết quả mô phỏng của bộ DAC: điện áp lõi ra và các giá trị lõi vào

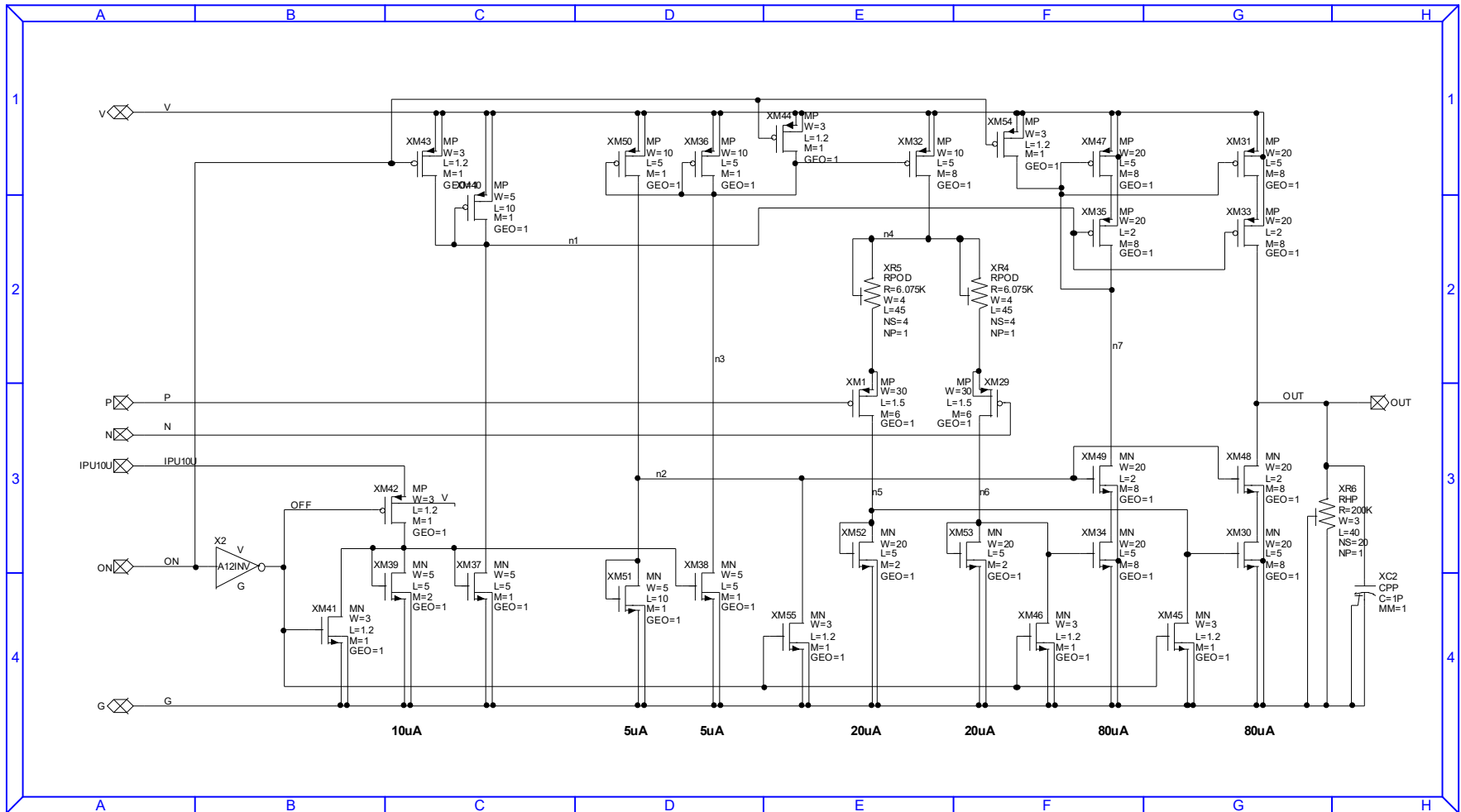
### 3.6.4 Mạch khuếch đại tín hiệu cảm biến

Vi gắp nhiệt điện silic-polyme tích hợp cảm biến này có khả năng xác định được kích thước của đối tượng và lực kẹp tác dụng lên đối tượng đó nhờ hệ thống cảm biến áp trở. Hình 1.24 hiển thị điện áp lõi ra của cầu Wheatstone với chuyển vị của vi gắp. Điện áp ra cực đại của cảm biến là 50 mV với trở kháng cao (là chênh lệch điện áp giữa hai điểm), nên điện áp một chiều 0,5 V tại điện áp phân cực là 1 V. Để đưa được tín hiệu phản hồi này từ cảm biến về bộ so sánh trung tâm, cần có một bộ đệm kiêm khuếch đại tín hiệu này. Liên quan đến điện áp do người dùng áp đặt để lệnh cho vi gắp di chuyển tới một vị trí cụ thể, điện áp phản hồi từ cảm biến cũng cần phải ở cùng khoảng hoạt động để có thể so sánh (từ 0 tới 5 V).

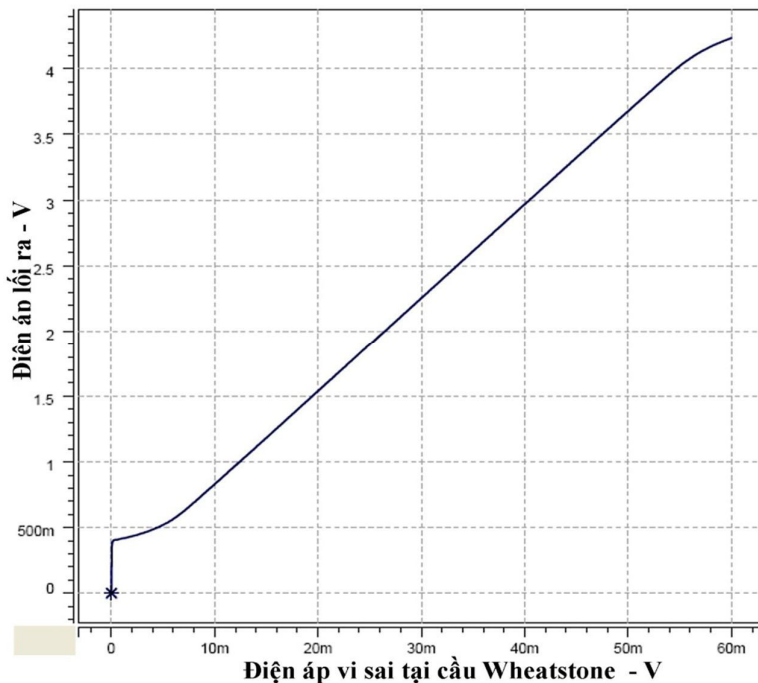
Vi điện áp lõi ra cảm biến có trở kháng cao, bộ khuếch đại tín hiệu đo lường được cân nhắc sử dụng, tuy nhiên cấu trúc này khá phức tạp khi cần sử dụng đến 3 bộ khuếch đại thuật toán và nhiều điện trở khác. Giải pháp khác là thêm hai điện trở vào phía trên của tầng khuếch đại của một bộ khuếch đại vi sai. Nhờ đó, chức năng khuếch đại cũng như đệm tín hiệu cảm biến được đáp ứng. Giải pháp này đã

giảm kích thước layout của khối chức năng này đi 70% so với giải pháp sử dụng mô hình đầu tiên. Thiết kế chi tiết của mạch đệm và khuếch đại tín hiệu cảm biến được thể hiện trên Hình 3.24 cùng kết quả mô phỏng của nó trên Hình 3.25.

Từ kết quả mô phỏng của mạch khuếch đại tín hiệu cảm biến, điện áp lỗi ra tuyến tính trong dải từ 0,5 V đến 4 V khi điện áp đầu ra của cầu Wheatstone thay đổi từ 5 mV tới 55 mV (điện áp vi sai giữa cực P và N). Kết quả này là phù hợp với hoạt động của vi gáp, điện áp lỗi ra của cảm biến gần như bằng không khi đầu kẹp mở và tăng lên đến giá trị cực đại (50 mV) khi hoạt động ở vị trí chuyển vị tối đa.



Hình 3.24 Mạch khuếch đại tín hiệu cảm biến



Hình 3.25 Kết quả mô phỏng của mạch khuếch đại tín hiệu cảm biến

### 3.6.5 Mạch điều khiển trung tâm

Mạch điều khiển trung tâm có nhiệm vụ so sánh giữa điện áp tham chiếu (từ DAC hoặc tín hiệu điện áp điều khiển bởi người dùng) với điện áp phản hồi từ hệ cảm biến để lệnh cho bộ điều khiển công suất kích hoạt hay đóng cơ cấu chấp hành (Xem Hình 3.1 Sơ đồ khối của hệ điều khiển kín). Đây chính là mạch cụ thể của cơ chế điều khiển PD như đã phân tích cho hệ thống với hàm truyền đã được xác định theo công thức (3.12) ở miền  $s$ . Nếu quy chiếu hàm truyền này vào miền thời gian, sự sai lệch giữa tín hiệu phản hồi từ cảm biến và mức điện áp tham chiếu để đặt chuyển vị đầu ra là  $e$ , còn tín hiệu điện áp lỗi ra của phần mạch công suất chính là tín hiệu  $u$ , ta có phương trình:

$$u = K_p \cdot e + K_D \frac{e}{dt} \quad (3.23)$$

Để hiện thực phương trình trên vào trong mạch điều khiển, giải pháp bộ khuếch đại thuật toán bằng mạch CMOS được lựa chọn với hệ số khuếch đại đúng bằng hệ số  $K_p$ , hai đầu vào tín hiệu  $P$  và  $N$  để so sánh sự sai lệch từ tín hiệu cảm biến và điện áp

tham chiếu. Còn hệ số  $K_D$  được thực hiện bằng một tụ điện nối từ lối ra đến tín hiệu  $N$  (xem Hình 3.26).

Hệ số khuếch đại của bộ khuếch đại vi sai được tính bởi [113]:

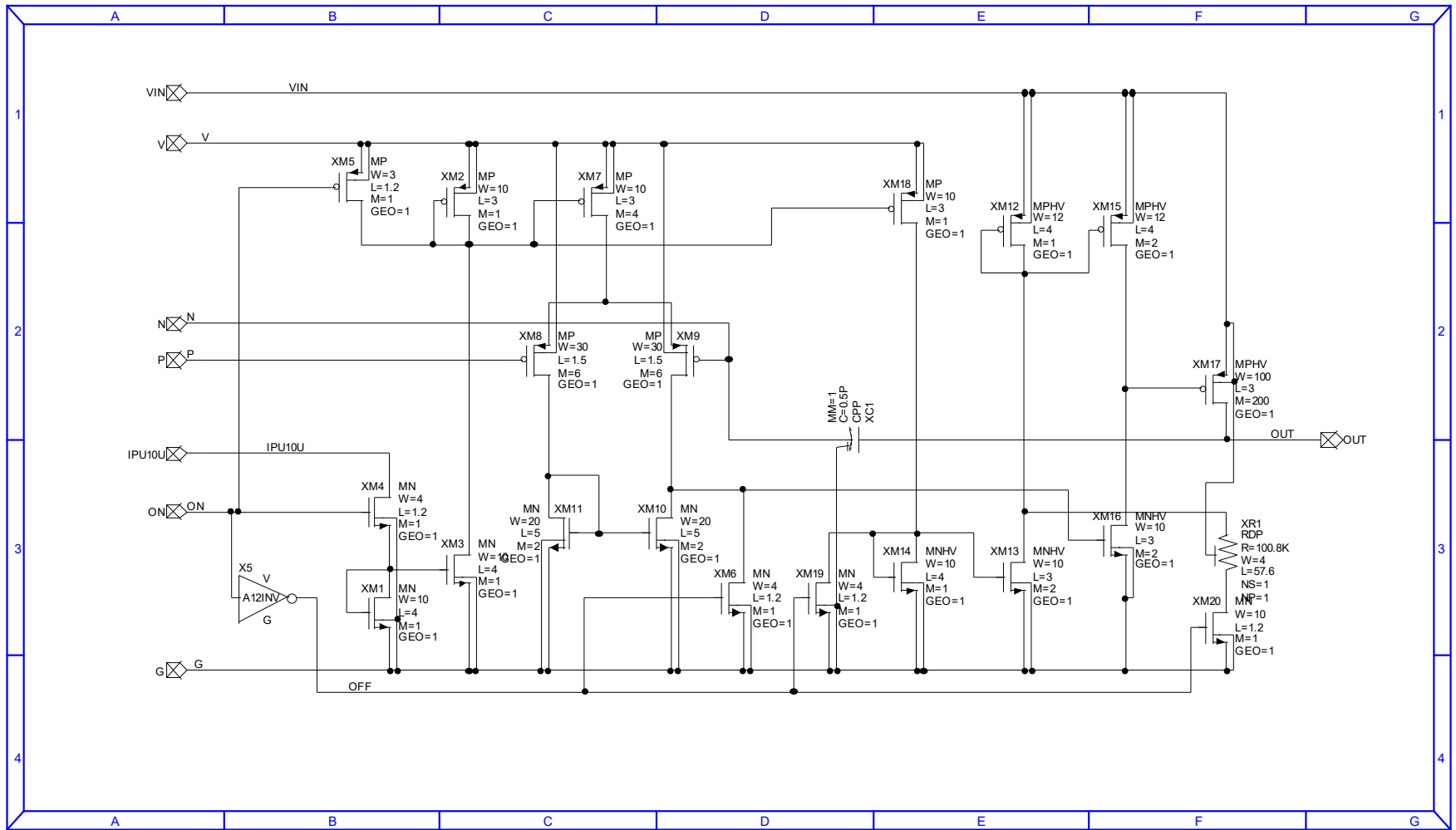
$$A_V = g_{XM8}(r_{ds9} \parallel r_{ds10}) \quad (3.24)$$

Trong đó  $g_{XM8}$  là hệ số dẫn của transistor XM8,  $r_{ds9}$  và  $r_{ds10}$  là điện trở của các transistor XM9 và XM10. Các hệ số trên được tính từ giá trị W/L của nó cũng các thông số đã cho của công nghệ sản xuất đã cho.

Có thể giải thích hoạt động của mạch điều khiển trung tâm như sau: Khi điện áp từ cảm biến thấp hơn điện áp tham chiếu, tương đương với chuyển vị chưa đạt đến điểm mong muốn, điện áp lối ra của bộ khuếch đại sẽ giảm xuống và kích hoạt transistor công suất (loại P) để cấp nguồn cho cơ cấu chấp hành. Do được cấp dòng điện, cơ cấu chấp hành sẽ dịch chuyển và tín hiệu cảm biến cũng thay đổi theo. Nếu điện áp ở hai lối vào của bộ điều khiển bằng nhau, tín hiệu lối ra của nó sẽ dẫn ngắt sự hoạt động của phần công suất, và giữ cho chuyển vị ở nguyên vị trí như đã định trước bởi điện áp tham chiếu.

Transistor công suất được xem là một điện trở nối tiếp với đầu vào của cơ cấu chấp hành. Giá trị điện trở này được quyết định bởi tín hiệu lối ra từ bộ so sánh. Bộ điều khiển sẽ tùy thuộc vào sự sai lệch giữa hai tín hiệu điện áp tham chiếu và điện áp phản hồi từ cảm biến để thay đổi giá trị của điện trở nối tiếp đó. Khi điện áp phản hồi thấp hơn điện áp tham chiếu (vị trí chuyển vị chưa đến được vị trí định trước), giá trị điện trở sẽ nhỏ đi hay dòng điện cung cấp cho cơ cấu chấp hành sẽ tăng lên. Khi hai giá trị điện áp phản hồi và tham chiếu bằng nhau, giá trị điện trở sẽ lớn đến giá trị nhất định nào đó để giữ cơ cấu chấp hành ở trạng thái cân bằng. Vòng lặp cứ thế tiếp diễn cho đến khi bộ điều khiển logic nhận được tín hiệu nhả tay kẹp hoặc dừng lại việc thao tác với vật thể. Ngoài ra cơ chế hoạt động của vòng lặp kín này cũng phải được bù pha bằng các linh kiện phụ trợ khác để có thể hoạt động một cách tin cậy. Hình 3.26 mô tả chi tiết mạch điều khiển trung tâm này của hệ thống.





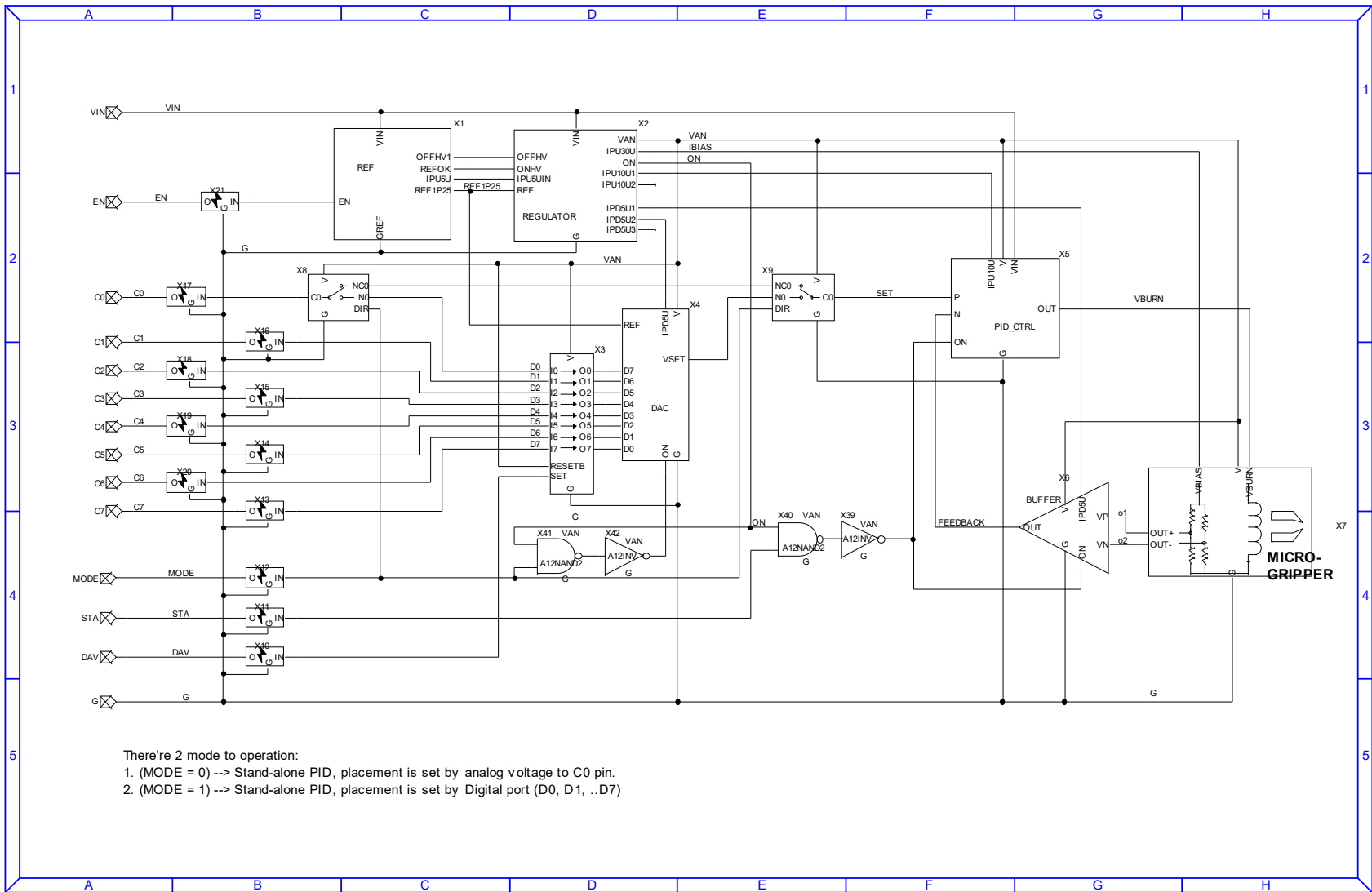
Hình 3.26 Mạch điều khiển trung tâm

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

### 3.7.1 Thiết kế chi tiết toàn hệ thống

Sơ đồ thiết kế chi tiết của hệ thống điều khiển vi gấp được thể hiện ở Hình 3.27 với các mạch chức năng đã trình bày cùng kết nối của chúng. Hệ thống có thể hoạt động với dải điện áp nguồn đầu vào rộng, từ 7 đến 40 V và người dùng chỉ cần truyền tín hiệu điều khiển về vị trí 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 bằng tín hiệu tương tự thông qua 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.

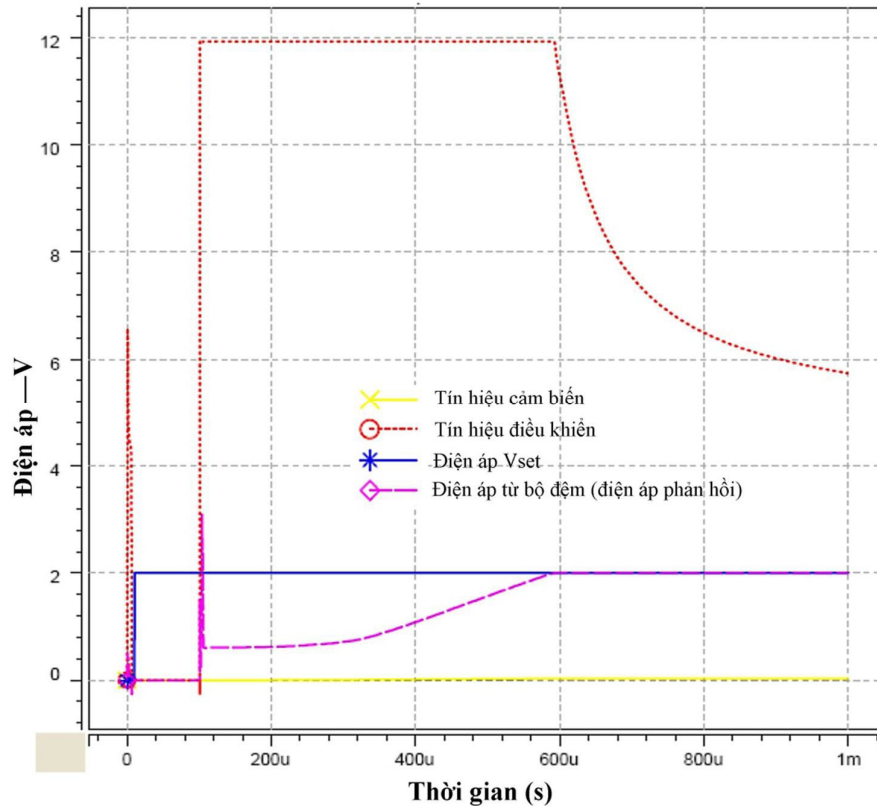
Hệ thống chỉ có thể hoạt động khi tín hiệu EN=1 hoặc được thả nổi; giá trị tín hiệu DAV=1 để báo cho hệ thống biết là các số liệu trên cổng 8 bit tín hiệu số đã sẵn sàng; tín hiệu STA=1 để bắt đầu tiến hành gấp vật thể và STA=0 khi nhả vật thể đó ra. Tất cả các chân tín hiệu này đều được nối với các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



Hình 3.27 Sơ đồ mạch chi tiết của toàn hệ thống điều khiển vi gắp

### 3.7.2 Kết quả mô phỏng hoạt động của toàn hệ thống

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



Hình 3.28 Kết quả mô phỏng toàn hệ thống

Như trên đồ thị, ta có thể thấy hệ thống cần 10  $\mu$ s để ổn định từ khi được cấp nguồn 12 V; đây là khoảng thời gian để mạch tạo điện áp chuẩn tham chiếu, mạch tạo điện áp nguồn nội bộ khởi động và đạt được trạng thái cân bằng. Trên đồ thị ta cũng có thể thấy được các xung điện áp không mong muốn đột ngột vọt lên trong khoảng thời gian này này. Tuy nhiên do đã có các cơ chế bảo vệ nên hệ thống không rơi vào trạng thái lỗi.

Khi tín hiệu STA được đặt lên 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. Cấu trúc 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 là điện áp phản hồi bằng điện áp tham chiếu (giá trị đặt trước là 2 V). Quá trình từ khi bắt đầu kích hoạt cho đến khi đạt được đích chuyển vị là khoảng 500  $\mu$ s. Nếu tăng điện áp nguồn nuôi 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  $\mu$ s.

Như vậy, với sự hiện diện của mạch điều khiển, chỉ cần đặt các tín hiệu lệnh là hệ thống tự động phản hồi cho đến khi đạt được vị trí của đầu kẹp mong muốn. 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 được tăng lên gấp nhiều lần so với khi không có bộ điều khiển.

### **3.8 Kết luận chương 3**

Chương này đã trình bày về hệ thống điều khiển tích hợp cho hệ vi gấp nhiệt điện silic-polyme có cảm biến trên cùng một công nghệ sản xuất từ việc xây dựng hàm truyền điều khiển đến lựa chọn công nghệ và thiết kế chi tiết từng khối chức năng cho cả hệ thống.

Đầu tiên, hàm truyền điều khiển khép kín cho hệ thống được tính toán và thiết lập cho hệ vi gấp này. Cụ thể là hệ điều khiển PD và sau khi áp dụng cơ chế điều khiển này, kết quả mô phỏng cho thấy đáp ứng của lỗi 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 phù hợp được đề xuất để thiết kế là Bi-CMOS 1,2  $\mu$ m tiêu chuẩn của TSMC. Với lựa chọn này, hệ thống có thể hoạt động trong dải điện áp nguồn từ 7 đến

40 V. Mô hình các linh kiện trong công nghệ này được cung cấp đầy đủ cho chương trình mô phỏng chuyên dụng trong các thiết kế vi mạch bán dẫn HSPICE.

Để mô phỏng hoạt động cho cả hệ thống về mặt điện, hệ vi gấp tích hợp cảm biến được mô hình hóa bằng sơ đồ mạch điện tương đương với đáp ứng về tần số, công suất tiêu thụ, điện áp lỗi ra của cảm biến theo điện áp nguồn đặt vào.

Từ việc lựa chọn công nghệ, hàm truyền hệ điều khiển và mô hình của hệ vi gấp, một hệ thống điều khiển khép kín đã được thiết kế từ tổng thể đến chi tiết từng mạch chức năng. Với thiết kế này, hệ thống có thể hoạt động một cách độc lập khi nhận tín hiệu về chuyển vị. Việc định trước vị trí chuyển vị có thể thông qua một điện áp tương tự hoặc qua cổng tín hiệu số 8 bit. Kết quả mô phỏng cho thấy, toàn hệ thống hoạt động ổn định và thời gian đáp ứng giảm xuống còn 200  $\mu$ s ở điện áp nguồn nuôi là 30 V, có nghĩa là giảm thời gian đáp ứng của vi gấp đi khoảng 120 lần (25 ms) so với điều khiển mở.

Như vậy, tích hợp mạch điều khiển cho hệ vi gấp cho phép đáp ứng của hệ thống khép được tăng lên đáng kể, có độ chính xác và ổn định cao. Bên cạnh đó, hệ vi gấp có thể hoạt động độc lập hoặc kết nối dễ dàng với lớp điều khiển cao hơn thông qua các cổng tín hiệu số.

## 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 gấp 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 gấp 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 gấp mới cho một ứng dụng cụ thể.

Việc tích hợp hệ thống vi gấp 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 gấp 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.

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

---

- i. **Phan Huu Phu**, Chu Duc Trinh (2011), Temperature profile optimization for Silicon-Polymer Electrothermal Microgripper, *International Conference on Advance Technologies for Communications*, Danang, Vietnam, pp.311-314.
- ii. **Phan Huu Phu**, Chu Duc Trinh, Nguyen Tien Dung (2011), 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.
- iii. Nguyen Ngoc Viet, Nguyen Minh Ngoc, **Phan Huu Phu**, Chu Duc Trinh (2012), Optimized heater source silicon-polymer electrothermal microgripper, *The 6th Vietnam Conference on Mechatronics*, pp.853-857.
- iv. **Phan Huu Phu**, Nguyen Ngoc Viet, Nguyen Minh Ngoc, Vu Ngoc Hung, Chu Duc Trinh (2012), Simulation and Optimization of a Silicon-Polymer Bimorph microgriper, *Vietnam Journal of Mechanics*, VAST, Vol. 34, No. 4, pp. 247 – 259.
- v. **Phan Huu Phu**, Chu Duc Trinh (2013), 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.
- vi. **Phan Huu Phu**, Nguyen Ngoc Viet, Nguyen Minh Ngoc, Chu Duc Trinh (2015), Analytical modeling of a silicon-polymer electrothermal microactuator, *Microsystem Technologies*, DOI :10.1007/s00542-015-2700-7, ISSN: 0946-7076.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

---

### **Tiếng Việt**

- [1] Đặng Việt Cường (2008), Sức bền vật liệu toàn tập, *Nhà xuất bản khoa học và kỹ thuật*, tr. 383- 390.
- [2] Nguyễn Đình Đức, Đào Như Mai (2012), Sức bền vật liệu và kết cấu, *Nhà xuất bản Đại học Quốc gia Hà Nội*, tr. 157- 188.
- [3] Thái Thế Hùng (2009), Sức bền vật liệu, *Nhà xuất bản khoa học và kỹ thuật*, tr. 207- 230.
- [4] Lều Thọ Trình (2006), *Cơ học kết cấu*, Tập 1 và Tập 2, *Nhà xuất bản khoa học và kỹ thuật*.

### **Tiếng Anh**

- [5] M.C. Carrozza, P. Dario, L. P. S. Jay (2003), “Micromechanics in surgery”, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 25, no. 4, pp. 309-327.
- [6] A.Menciassi, A. Eisinger, M.C. Carrozza, P. Dario (2003), “Force sensing microinstrument for measuring tissue properties and pulse in microsurgery”, *Trans. Mechatronics*, vol. 8, no. 1, pp. 10-17.
- [7] D.H. Kim, M.G. Lee, B. Kim, Y. Sun (2005), “A superelastic alloy microgripper with embedded electromagnetic actuators and piezoelectric force sensors a numerical and experimental study”, *Smart Mater. Struct.* vol. 14, pp. 1265-1272.
- [8] G. Greitmann, R.A. Busser (1996), “Tactile microgripper for automated handling of microparts”, *Sensors and actuators A*, vol. 53, pp. 410-415.
- [9] K. Molhave, O. Hansen (2005), “Electro-thermally actuated microgrippers with integrated force-feedback”, *J. Micromech. Microeng.* vol. 15, pp. 1256-1270.
- [10] F. Beyeler, A. Neild, S. Oberti, D. J. Bell, Y. Sun, J. Dual, B.J. Nelson (2007), “Monolithically fabricated microgripper with integrated force sensor for manipulating microobjects and biological cells aligned in an ultrasonic field”, *J. MEMS*, vol. 16, no. 1, pp. 7-15.
- [11] Chu Duc Trinh (2008), “Sensing Microgripper for Microparticle handling”, *Ph.D. Thesis Delf University of Technology*.

- [12] Beyeler F, Neild A, Oberti S, Bell DJ, Sun Y, Dual J, et al. (2007), "Monolithically fabricated microgripper with integrated force sensor for manipulating microobjects and biological cells aligned in an ultra-sonic field." *J Microelectromech Syst.*, Vol. 16(1), pp. 7-15.
- [13] Kim CJ (1991), "Silicon electromechanical microgrippers". *Ph.D. dissertation*, University of California, Berkeley, CA.
- [14] Kim CJ, Pisano AP. (1992), "Silicon-processed overhanging microgripper", *J Microelectromechanical Syst.*, Vol.1(1), pp. 31-36.
- [15] Chen L, Liu B, Chen T, Shao B. (2009), "Design of hybrid-type MEMS microgripper", *Proceedings of the International Conference on Manufacturing Automation*, HongKong. pp. 2882-2887.
- [16] Piyabongkarn D, Sun D, Rajamani D, Sezen A, Nelson BJ. (2005), "Travel range extension of a MEMS electrostatic microactuator", *IEEE Trans Control Syst Technol*, 13(1): pp. 138-145.
- [17] Mohammad Olfatnia, Siddharth Sood, Jason J. Gorman, Shorya Awtar (2013), "Large Stroke Electrostatic Comb-Drive Actuators Enabled by a Novel Flexure Mechanism", *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 22, no. 2, pp. 483-494.
- [18] Burns DM, Bright VM. (1997), "Nonlinear flexure for stable deflection of an electrostatically actuated micromirror", *Proceedings of the SPIE: Microelectronics Structures and MEMS for Optical, Processing III*, pp.125-135.
- [19] Seeger JI, Crary SB. (1997), "Stabilization of electrostatically actuated mechanical devices", *Proceedings of the Transducers*. Chicago, USA, pp.1133-1136.
- [20] Seeger JI, Crary SB. (1998), "Analysis and simulation of MOS capacitor feedback for stabilizing electrostatically actuated mechanical devices", *Proceeding of Microsim II on Comput. Mech.*, Vol. 31, pp. 199-208.
- [21] Seeger JI, Boser BE. (1999), "Dynamics and control of parallelplate actuators beyond the electrostatic instability", *Proceedings of the Transducers*. Sendai, Japan, pp. 474-477.
- [22] Chan EK, Dutton RW. (2000), "Electrostatic micromechanical actuator with extended range of travel", *J Microelectromech Syst.*, Vol. 9(3), pp. 321-328.
- [23] Hung ES, Senturia SD. (1999), "Extending the travel range of analogtuned electrostatic actuators", *J Microelectromech Syst.*, Vol. 8(4): 497-505.

- [24] Chu PB, Pister KSJ. (1994), "Analysis of closed-loop control of parallel-plate electrostatic microgrippers", *Proceedings of the IEEE Conference on Robotics Automation*, San Diego, CA, Vol.1, pp. 820-825.
- [25] Senturia SD. (2001), "Microsystem Design". *Norwell, Kluwer Academic Publishers*: Boston, MA.
- [26] Nadal-Guardia R, Dehe A, Aigner R, Castaner LM. (2002), "Current drive methods to extend the range of travel of electrostatic microactuators beyond the voltage pullin point", *J Microelectromech Syst.*, Vol. 11(3), pp.255-263.
- [27] Kalaiarasi AR, Thilagar SH. (2012), "Design and modeling of electrostatically actuated microgripper", *Proceedings of IEEE/ASME International Conference on Mechatronics and Embedded Systems and Applications*, pp. 7-11.
- [28] Volland BE, Heerlein H, Rangelow IW. (2002), "Electrostatically driven microgripper", *Microelectron Eng*, Vol. 61, pp. 1015-1023.
- [29] Chen T, Sun L, Chen L, Rong W, Li X. (2010), "A hybrid-type electrostatically driven Microgripper with an integrated vacuum tool", *Sensor Actuator A-Phys*, Vol. 158, pp. 320-327.
- [30] Khan F, Bazaz SA, Sohail M. (2010), "Design, implementation and testing of electrostatic SOI MUMPs based microgripper", *Microsystem Technology*, Vol. 16, pp. 1957-1965.
- [31] Dabbaj, R.H. (2004), "Electrostatic device", Patent US2004056742.
- [32] Keller, C.G. (2004), "Electrostatic actuator with a multiplicity of stacked parallel plates", Patent US2004140733.
- [33] Lee, K.B. (2009), "Electrostatic microactuator". Patent US2009322260.
- [34] Hailu, Zewdu; He, Siyuan; Ben Mrad, Ridha (2014), "A novel vertical comb-drive electrostatic actuator using a one layer process", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Volume 24, Issue 11, pp.1462-1465.
- [35] Hao Ren, Weimin Wang, Fenggang Tao, Jun Yao (2013), "A Bi-Directional Out-of-Plane Actuator by Electrostatic Force", *Micromachines*, Vol. 4, pp. 431-443.
- [36] Hamed Demaghsi, Hadi Mirzajani, Habib Badri Ghavifekr (December 2014), "A novel electrostatic based microgripper (cellgripper) integrated with contact sensor and equipped with vibrating system to release particles actively", *Microsystem Technologies*, Volume 20, Issue 12, pp. 2191-2202.

- [37] Bordatchev EV, Nikumb SK. Microgripper (2003), “Design, finite element analysis and laser microfabrication”. *Proceedings of the International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems*. Banff, Alberta, Canada, pp. 308-313.
- [38] Bordatchev EV, Nikumb SK, Hsu WS. (2002), “Fabrication of long-stretch microdrive for MEMS applications by ultra precision laser micro-machining”, *Proceedings of the Canada-Taiwan Workshop on Advanced Manufacturing Technologies*. London, Ontario, Canada, pp. 243-251.
- [39] Hsu C, Tai WC, Hsu W. (2002), “Design and analysis of an electrothermally driven longstretch micro drive with cascaded structure”, *Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress*. New Orleans, Louisiana, pp. 235-240.
- [40] Lott CD, McLain TW, Harb JN, Howell LL. (2002), “Modeling the thermal behaviour of a surface-micromachined linear-displacement thermomechanical microactuator”, *Sensor Actuator A-Phys*, Vol. 101, pp. 239-250.
- [41] Cheng CH, Chan CK, Cheng TC, Hsu CW, Lai GJ. (2008), “Modeling, fabrication and performance test of an electrothermal microactuator”, *Sensor Actuator A-Phys*, Vol. 143, pp. 360-369.
- [42] Jiang J, Hilleringmann U, Shui X. (2007), “Electrothermomechanical analytical modeling of multilayer cantilever microactuator”, *Sensor Actuator A-Phys*, Vol. 137, pp. 302-307.
- [43] Huang CS, Cheng YT, Chung J, Hsu W. (2009), “Investigation of Ni-based thermal bimaterial structure for sensor and actuator application”, *Sensor Actuator A-Phys*, Vol. 149, pp. 298-304.
- [44] Huang S, Zhang X. (2007), “Gradient residual stress induced elastic deformation of multilayer MEMS structures”, *Sensor Actuator A-Phys*, Vol. 134, pp. 177-185.
- [45] Serrano JR, Phinney LM, Rogers JW. (2009), “Temperature amplification during laser heating of polycrystalline silicon microcantilevers due to temperature-dependent optical properties”, *J Heat Mass Transf*, Vol. 52, pp. 2255-2265.
- [46] Bharali AK, Patowari PK, Baishya S. (2010), “Design and analysis of multi-layer electrothermal actuator of MEMS”, *Proceedings of the 2nd International Conference on Mechanical and Electronics Engineering*, Kyoto, Japan, Vol.1, pp. 127-131.

- [47] Lorenz H, Laudon M, Renaud P. (1998), "Mechanical characterization of a new high-aspect-ratio near UV-photoresist", *Microelectron Eng*, Vol. 41-42, pp. 371-374.
- [48] Lorenz H, Despont M, Fahrnl N, LaBianca N, Renaud P, Vettiger P. (1997), "SU-8 A low-cost negative resist for MEMS". *J Micromech Microeng*, Vol.7, pp. 121-124.
- [49] Dellmann L, Roth S, Beuret C, Racine GA, Lorenz H, Despont M, et al. (1997), "Fabrication process of high aspect ratio elastic structures for piezoelectric motor applications", *Proceedings of Int. Conf. Solid-State Sens. Actuators*. Chicago, IL, pp. 641-644.
- [50] Chronics N, Lee LP. (2005), "Electrothermally actived SU-8 microgripper for single cell manipulation in solution", *IEEE/ASME J Microelectromech Syst*, Vol. 14, pp. 857-863.
- [51] Zhang R, Chu JK, Wang HX, Chen ZP. (2013), "A multipurpose electrothermal microgripper for biological micromanipulation", *Microsyst Technol*, Vol. 19(1), pp. 89-97.
- [52] Chu J, Zhang R, Chen Z. (2011), "A novel SU-8 electrothermal microgripper based on type synthesis of kinematic chain method and stiffness matrix method", *J Micromech Microeng*, 21(5): 054030.
- [53] Ivanova K, Ivanov T, Badar A, Volland BE, Rangelow IW, Andri-jasevic D, et al. (2006), "Thermally driven microgripper as a tool for micro assembly", *Microelectron Eng*, Vol. 83, pp. 1393-1395.
- [54] Henneken VA, Tichem M, Sarro PM. (2008), "Improved thermal U-beam actuators for microassembly", *Sensor Actuator A-Phys*, Vol. 142, pp. 298-305.
- [55] Kim K, Liu X, Zhang Y, Sun Y. (2008), "Micronewton force-controlled manipulation of biomaterials using a monolithic MEMS microgripper with two-axis force feedback", *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Pasadena, CA, pp. 3100-3105.
- [56] Qingwei Li, Changhong Liu, Yuan-Hua Lin, Liang Liu, Kaili Jiang, and Shoushan Fan (2015), "Large-Strain, Multifunctional Movements from Designable Electrothermal Actuators Based on Large Highly Anisotropic Carbon Nanotube Sheets", *ACS Nano*, 9 (1), pp. 409-418.
- [57] Butefisch S, Seidemann V, Buttgenbach S. (2002), "Novel micropneumatic actuator for MEMS", *Sensor Actuator A-Phys*, Vol. 97-98, pp. 638-645.

- [58] Shuichi Wakimoto, Koichi Suzumori, Keiko Ogura (2011), "Miniature Pneumatic Curling Rubber Actuator Generating Bidirectional Motion with One Air-Supply Tube", *Advanced Robotics* 25, pp. 1311–1330.
- [59] Lee MG, Gweon DG, Kim SM. (1997), "Modelling and optimal design of a fine actuator for optical heads", *Mechatronics*, Vol. 7, pp. 573-588.
- [60] Kim DH, Lee MG, Kim B, Sun Y. (2005), "A superelastic alloy microgripper with embedded electromagnetic actuators and piezoelectric force sensors: A numerical and experimental study", *Smart Mater Struct*, Vol. 14(6), pp. 1265-1272.
- [61] Dae Geon Seo, Won Han, Young-Ho Cho (2015), "A compact electromagnetic micro-actuator using the meander springs partially exposed to magnetic field", *Technical Paper, Microsystem Technologies*, Volume 21, Issue 6, pp. 1233-1239.
- [62] Lin CM, Fan CH, Lan CC. (2009), "A shape memory alloy actuated microgripper with wide handling ranges", *Proceedings of International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Singapore, pp. 12-17.
- [63] Krulevitch P, Lee AP, Ramsey PB, Trevino JC, Hamilton J, Northrup MA. (1996), "Thin film shape memory alloy microactuators", *J Microelectromech Syst*, Vol. 5(4), pp. 270-282.
- [64] Zhang H, Bellouard Y, Burdet E, Clavel R, Poo AN, Hutmacher DW. (2004), "Shape memory alloy microgripper for robotic microassembly of tissue engineering scaffolds", *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*. New Orleans, LA, Vol. 5, pp. 4918-4924.
- [65] Kyung JH, Ko BG, Ha YH, Chung GJ. (2008), "Design of a microgripper for micromanipulation of microcomponents using SMA wires and flexible hinges", *Sensor Actuator A-Phys*, Vol. 141(1), pp. 144-150.
- [66] Mohammad Amri Zainal, Shafishuhaza Sahlan, Mohamed Sultan Mohamed Ali (2015), "Micromachined Shape-Memory-Alloy Microactuators and Their Application in Biomedical Devices", *Micromachines*, Vol. 6, pp. 879-901.
- [67] Houston K, Eder C, Sieber A, Menciassi A, Carrozza MC, Dario P. (2007), "Polymer sensorised microgrippers using SMA actuation", *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*. Roma, Italy, pp. 820-825.
- [68] Moiseeva E, Senousy YM, McNamara S, Harnett CK. (2007), "Single-mask microfabrication of three-dimensional objects from strained bimorphs", *J Micromech Microeng*, Vol. 17(9), pp. N63-N68.



- [69] Luo JK, He JH, Fu YQ, Flewitt AJ, Spearing SM, Fleck NA, et al. (2005), “Fabrication and characterization of diamond-like carbon Ni bimorph normally closed microcages”, *J Micromech Microeng*, Vol.15(8), pp. 1406-1413.
- [70] Ok J, Chu M, Kim CJCJ. (1999), “Pneumatically driven microcage for micro-objects in biological liquid”, *Proceedings of the International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*. Orlando, FL, pp. 459-463.
- [71] Laflin KE, Morris CJ, Bassik N, Jamal M, Gracias DH. (2011), “Tetherless microgrippers with transponder tags”, *J Microelectromech Syst*, Vol. 20(2), pp. 505-511.
- [72] Bassika N, Abebec BT, Laflina KE, Gracias DH. (2010), “Photolithographically patterned smart hydrogel based bilayer actuators”, *Polymer*, Vol. 51(26), pp. 6093-6098.
- [73] Jackman RJ, Brittain ST, Adams A, Wu H, Prentiss MG, Whitesides S, et al. (1999), “Three-dimensional metallic microstructures fabricated by soft lithography and microelectrodeposition”, *Langmuir*, Vol. 15(3), pp. 826-836.
- [74] Leong TG, Benson BR, Call EK, Gracias DH. (2008), “Thin film stress driven selffolding of microstructured containers”, *Small*, Vol. 4(10), pp. 1605-1609.
- [75] Leong TG, Lester PA, Koh TL, Call EK, Gracias DH. (2007), “Surface Tension-Driven Self-Folding Polyhedra”, *Langmuir*, Vol. 23(17), pp. 8747-8751.
- [76] Randhawa JS, Leong TG, Bassik N, Benson BR, Jochmans MT, Gracias DH. (2008), “Pick-and-place using chemically actuated microgrippers”, *J Am Chem Soc*, Vol. 130 (51), pp. 17238-17239.
- [77] Gultepe E, Randhawa JS, Kadam S, Yamanaka S, Selaru FM, Shin EJ, et al. (2013), “Biopsy with thermally-responsive untethered microtools”, *Adv Mater*, Vol. 25(4), pp. 514-519.
- [78] Shahinpoor M, Bar-Cohen Y, Simpson JO, Smith J. (1998), “Ionic polymer-metal composites (IPMCs) as biomimetic sensors, actuators, and artificial muscles - a review”, *Smart Mater Struct*, Vol. 7(6), pp. R15-R30.
- [79] Guan J, He H, Hansford DJ, Lee LJ. (2005), “Self-folding of three-dimensional hydrogel microstructures”, *J Phys Chem B*, Vol. 109(49), pp. 34-37.
- [80] Feinberg AW, Feige A, Shevkoplyas SS, Sheehy S, Whitesides GM, Parker KK. (2007), “Muscular thin films for building actuators and powering devices”, *Science*, Vol. 317 (5843), pp. 1366-1370.

- [81] Miao L, Dong Z, Chan H. (2004), "Displacement measurement of a thermally actuated polymer micro robotic gripper using the optical focus method", *Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation*. Shenyang, China, Vol. 5, pp. 3800-3804.
- [82] Rembe C, Kant R, Muller RS. (2001), "Optical measurement methods to study dynamic behavior in MEMS", *Proceedings of the SPIE*. Munich, Germany, Vol. 4400, pp. 127-137.
- [83] Nayar SK, NaKagawa Y. (1994), "Shape from focus", *IEEE Trans Pattern Anal Mach Int*, Vol. 16(8), pp. 824-831.
- [84] Greitmann G, Buser RA. (1996), "Tactile microgripper for automated handling of microparts", *Sensor Actuator A-Phys*, Vol. 53(1), pp. 410-415.
- [85] Molhave K, Hansen O. (2005), "Electrothermally actuated microgrippers with integrated force-feedback", *J Micromech Microeng*, Vol. 15(6), pp. 1256-1270.
- [86] Chu Duc T, Lau GK, Creemer JF, Fredrik Creemer J, Sarro PM. (2008), "Electrothermal microgripper with large jaw displacement and integrated force sensors", *J Microelectromech Syst*, Vol. 17(6), pp. 1546-1555.
- [87] Chu Duc T, Lau GK, Sarro PM. (2008), "Polymeric thermal microactuator with embedded silicon skeleton: Part II - Fabrication, characterization, and application for 2-DOF microgripper", *J Microelectromech Syst*, Vol. 17(4), pp. 823-831.
- [88] Chu Duc T, Creemer JF, Sarro PM. (2007), "Piezoresistive cantilever beam for force sensing in two dimensions", *IEEE Sensor J*, Vol. 7(1), pp. 96-104.
- [89] Lau GK, Goosen JFL, Keulen F, Chu Duc T, Sarro PM. (2008), "Polymeric thermal microactuator with embedded silicon skeleton: Part I - Design and analysis" *J Microelectromech Syst*; Vol. 17(4), pp. 809-822.
- [90] Huang QA, Lee NKS. (1999), "Analysis and design of polysilicon thermal flexure actuator", *J Micromech Microeng*, Vol. 9(1), pp. 64-70.
- [91] Chronis N, Lee LP. (2005), "Electrothermally actived SU-8 microgripper for single cell manipulation in solution", *J Microelectromech Syst*, Vol. 14(4), pp. 857-863.
- [92] Park J, Moon W. (2003), "A hybrid-type microgripper with an integrated force sensor", *Microsyst Technol*; Vol. 9(8), pp. 511-119.

- [93] Zhou Y, Nelson BJ. (1998), “Adhesion force modeling and measurement for micromanipulation”, *Proc SPIE Int. Symp Intell Syst. Adv Manufact*, Vol. 3519, pp. 169-180.
- [94] Sun Y, Nelson BJ, Potasek DP, Enikov E. (2002), “A bulk microfabricated multiaxis capacitive cellular force sensor using transverse com drives”, *J Micromech Microeng*; Vol.12(6), pp. 832-40.
- [95] Sun Y, Fry SN, Potasek DP, Bell DJ, Nelson BJ. (2005), “Characterizing fruit fly flight behavior using a microforce sensor with a new comb drive configuration”, *J Microelectromech Syst*; Vol. 14, pp. 4-11.
- [96] Xin, Z., Guizhang, L., Xiuge, C. (2009), “Microgripper based on MEMS technology and control system”, Patent CN101407060.
- [97] Sun, Y., Kim, K. (2010), “MEMS-based micro and nano grippers with two-axis force sensors”, Patent US2010207411.
- [98] Homeijer, B.D., Bicknell, R.N. (2013), “Calibration of MEMS sensor”, Patent WO2013002809.
- [99] M. F. Ashby (1989), “On the engineering properties of materials”, *Acta Metallurgica*, Vol. 37, pp. 1273.
- [100] T. Chu Duc, G. K. Lau, and P. M. Sarro (2007), “Polymer constraint effect for electrothermal bimorph microactuators”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, no. 10, pp. 101902.1–101902.3.
- [101] A. N. Gent and E. A. Meinecke (1970), “*Polym. Eng. Sci.*”, Vol. 10, pp.48.
- [102] John R. Howell, Robert Siegel, M. Mangul (2011), “Thermal radiation heat transfer”, *CRC Press*, 5<sup>th</sup> edition, pp.38.
- [103] Arfken G. (1985), “Mathematical Methods for Physics”, 3<sup>rd</sup> edition, *Academic Press*.
- [104] Trodden M. (1999), “Methods of Mathematical Physics”, *Lecture Notes, Department of Physics*, Case Western Reserve University.
- [105] Stephen, N.G. (2001), “Discussion: Shear coefficients for Timoshenko beam theory”, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 68(11), pp. 959–960.
- [106] N. Chronis, and L.P. Lee (2005), “Electrothermally activated SU-8 microgripper for single cell manipulation in solution”, *J. MEMS*, vol. 14, no. 4, pp. 857-863.

- [107] N.T. Nguyen, S. S. Ho, and C.L.N. Low (2004), “A polymeric microgripper with integrated thermal actuators”, *J. Micromech. Microeng.* vol. 14, pp. 967-974.
- [108] T. Chu Duc, J.F. Creemer, and P.M. Sarro (2006), “Lateral nano-Newton force sensing piezoresistive cantilever for micro-particle handling”, *J. Micromech. Microeng.*, vol.16, no. 6, pp. 102-106.
- [109] John O. Attia (1999), “Electronics and Circuit analysis using Matlab”, *CRC Press LLC*.
- [110] Website: “Control tutorials for Matlab” at <http://www.engin.umich.edu/group/ctm/PID/PID.html>, The University of Michigan.
- [111] Bang S. Lee (2005), “Understanding the stable range of equivalent series resistance of an LDO regulator”, *Power management*, Texas Instruments, pp. 14-17.
- [112] A. Mata, A.J. Fleishman, and S. Roy (2006), “Fabrication of multi-layer SU-8 microstructures,” *J. Micromech. Microeng.*, vol. 16, pp. 276-284.
- [113] Tony Chan Carusone, David A. Johns, Kenneth W. Martin (2011), “Analog Integrated circuit design”, *second edition*, *John Wiley & Sons, Inc.*, pp. 137.