DEVELOPMENT OF A V-SHAPED ELECTROTHERMAL MICRO ACTUATOR FOR UNIDIRECTIONAL ROTARY MOTOR DRIVING

Pham Hong Phuc[1], Nguyen Tien Dzung[2*], Hoang Trung Kien[3]
[1]Hanoi University of Science and Technology, [2]TNU –University of Technology
[3]Le Quy Don Technical University

ARTICLE INFO

Received: 06/02/2024
Revised: 29/5/2024
Published: 29/5/2024

KEYWORDS

Micro-Electro-Mechanical System
Micro Rotational Motor
V-Shaped Electrothermal Microactuator
Platinum sputter deposition
Ratchet rack

ABSTRACT

This paper presents the development of V-Shaped Electrothermal Micro actuators to design a new rotational micro motor (RMM), which consists of ratchet teeth, an outer ring (or rotor), and four symmetrically V-Shaped Electrothermal Micro actuators. The rotational micro motor has an outer diameter of only 2.5 mm and is thermally calculated using the finite difference method, showing high accuracy compared to simulation results. Force calculations and working voltage conditions are also discussed in detail. An improved bulk - micromachining process using silicon on insulator (SOI) wafer and platinum sputter surface deposition to reduce the driving voltage has been applied successfully. The micromotor samples have been successfully experimentally manufactured. High-resolution images captured by a scanning electron microscope (SEM) showcase remarkable clarity and closely resemble the blueprint. In the near future, the micromotor can be applied in different rotating transmission joints such as micro robot systems, micro - assembly, micro - transportation systems, micro -integrated systems, biochemical analysis system, and other applications.

PHÁT TRIỂN VI CHẤP HÀNH ĐIỆN NHIỆT KIỂU DẦM CHỮ V ĐỂ DẪN ĐỘNG VI ĐỘNG CƠ QUAY MỘT CHIỀU

Phạm Hồng Phúc[1], Nguyễn Tiến Dũng[2*], Hoàng Trung Kiên[3]
[1]Đại học Bách khoa Hà Nội, [2]Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp – ĐH Thái Nguyên, [3]Học viện Kỹ thuật Quân sự

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 06/02/2024
Ngày hoàn thiện: 29/5/2024
Ngày đăng: 29/5/2024

TỪ KHÓA

Công nghệ vi cơ điện tử (MEMS)
Vi động cơ quay
Vi chấp hành điện nhiệt dầm chữ V
Phún xạ bề mặt
Thanh răng cóc

TÓM TẮT

Bài báo phát triển các bộ vi kích hoạt, tính toán, thiết kế cấu trúc vi động cơ quay một chiều sử dụng bốn bộ vi chấp hành điện nhiệt chữ V đặt đối xứng để dẫn động vành răng rotor bên ngoài. Vi động cơ có đường kính ngoài 2,5 mm được tính toán truyền nhiệt dựa trên phương pháp sai phân hữu hạn, cho độ chính xác tương đối cao so với kết quả mô phỏng. Các tính toán về lực và điều kiện điện áp cho vi động cơ có thể làm việc an toàn cũng được đề cập chi tiết. Quy trình chế tạo vi cơ khối cải tiến sử dụng tấm silic kép (silicon on insulator- SOI) và công nghệ phún xạ bề mặt platinum nhằm giảm điện áp dẫn cho linh kiện đã được áp dụng thành công. Kết quả chụp mẫu vi động cơ từ kính hiển vi quét (SEM) cho hình ảnh các cơ cấu có độ sắc nét cao và phù hợp với thiết kế. Vi động cơ có tiềm năng ứng dụng trong các khớp truyền động quay của hệ thống micro robot hoặc trong các hệ thống vi lắp ráp, vi vận chuyển của các hệ thống tích hợp micro.

DOI: https://doi.org/10.34238/tnu-jst.9685

* Corresponding author. *Email: dungnguyentien@tnut.edu.vn*

1. Giới thiệu

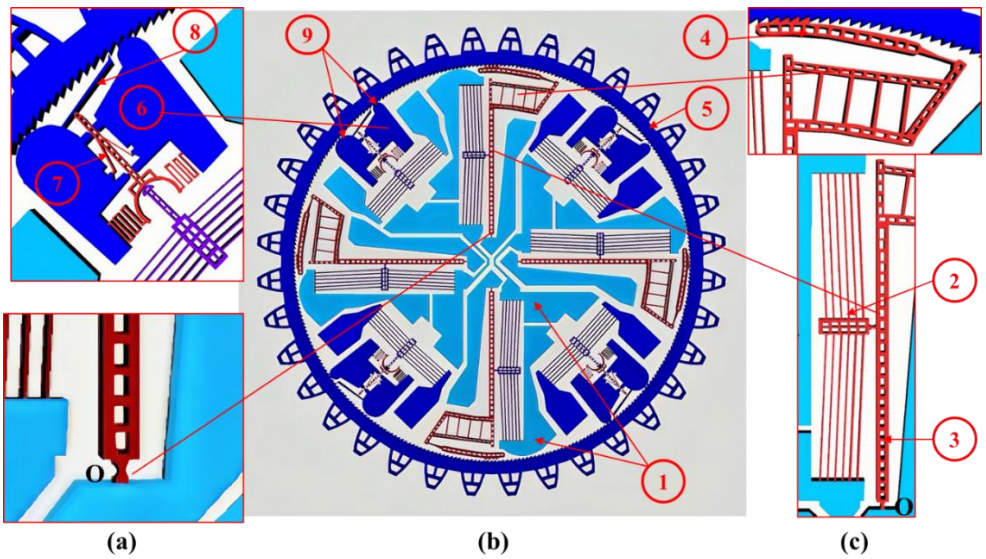
Công nghệ vi cơ điện tử được áp dụng khá phổ biến trong các nghiên cứu về y sinh như phòng thí nghiệm trên chip (lab on a chip), hệ thống vi rô bốt (micro robot) hay vi phẫu (microsurgery) và mang lại nhiều lợi ích thiết thực. Trong một số ứng dụng, các bộ vi chấp hành kích cỡ micro (micro actuator) là thành phần dẫn động quan trọng của các vi động cơ (micro motor) hoặc vi tay gắp, góp phần tạo ra các hệ thống tích hợp như các hệ thống vi vận chuyển, hệ vi phân tích tổng hợp, hệ phân tích sinh hóa, robot sinh học, thiết bị chuyển mạch quang học [1] - [3].

Vi động cơ là bộ chuyển đổi điện năng thành cơ năng với kích thước cỡ micromet. Theo dạng chuyển động, chúng được phân thành vi động cơ tuyến tính, vi động cơ quay hoặc hỗn hợp. Theo hiệu ứng vật lý ta có vi động cơ kiểu tĩnh điện, áp điện, điện từ, giãn nở nhiệt hoặc phối hợp một số hiệu ứng khác nhau. Trong đó, vi động cơ sử dụng hiệu ứng giãn nở nhiệt được phát triển và ứng dụng khá rộng rãi. Ưu điểm nổi bật của vi động cơ này là điện áp làm việc tương đối thấp nhưng vẫn cung cấp lực, mô men đầu ra lớn, tỷ trọng mô men cao hơn hẳn một số vi động cơ khác [4]. Vi động cơ kiểu điện nhiệt chủ yếu sử dụng các bộ vi chấp hành dạng dầm chữ V, Z, U [4] - [9]. Với cùng một điện áp làm việc và kích thước tương tự nhau thì bộ chấp hành dạng chữ V (V-shaped) cho đáp ứng về lực và chuyển vị đầu ra tốt hơn so với dạng chữ U và Z, do đó chúng được sử dụng để dẫn động cả vi động cơ quay và tịnh tiến [6] - [9].

Ở tài liệu [10], các tác giả đã đưa ra thiết kế, tính toán mẫu vi động cơ quay sử dụng bốn bộ vi chấp hành kiểu chữ V. Tuy nhiên, tỷ lệ kích thước giữa các bộ phận chưa được cân đối, việc tính toán lực nhiệt dựa trên phương trình vi phân truyền nhiệt nên độ chính xác chưa cao; quy trình chế tạo chưa cải tiến dẫn đến điện áp làm việc khá cao (19-24V). Trong nghiên cứu này, các tác giả sử dụng các bộ vi chấp hành kiểu chữ V, đã được nghiên cứu, tính toán kỹ lưỡng trước đó [11] - [15] để thiết kế và chế tạo một loại vi động cơ quay một chiều có đường kính 2,5 mm, tính toán nhiệt sử dụng mô hình truyền nhiệt sai phân hữu hạn cho kết quả chính xác hơn, cải tiến công nghệ chế tạo... ưu điểm chính là điện áp làm việc thấp (06-10V), tỷ trọng mô men/diện tích cao hơn một số vi động cơ đã được đề xuất trước đây [4], [5], [7], [10].

2. Tính toán, thiết kế vi động cơ

2.1. Nguyên lý hoạt động của vi động cơ



Hình 1. *Cấu tạo của vi động cơ*

Cấu tạo và nguyên lý hoạt động của vi động cơ được chỉ ra ở Hình 1b, nó bao gồm 04 bộ vi chấp hành điện nhiệt dạng dầm chữ V (2), xen kẽ với 04 bộ chống đảo (6) và vành rotor bên ngoài (5). Cấu trúc của bộ chấp hành điện nhiệt gồm 06 cặp dầm xếp song song dạng chữ V (Hình 1c), được nối với các điện cực cố định (1). Thanh lắc (3) có thể chuyển động lắc quanh điểm đàn hồi O. Thanh răng cóc dẫn dạng răng cưa (4) gắn liền với đầu trên của thanh lắc, dẫn động vành rotor (5) quay theo chiều kim đồng hồ và cho phép trượt tự do khi nó chuyển động ngược lại. Cơ cấu chống đảo (6) gồm thanh cài (7) và tóc chống đảo (8) chỉ cho phép vành rotor quay theo một chiều. Các vấu cố định (9), giúp định tâm cho vành rotor (5) khi quay.

Khi cấp điện áp vào các điện cực cố định (1) của bộ vi chấp hành chữ V. Ở nửa chu kỳ dẫn động, điện áp khác không, dòng điện chạy qua hệ dầm chữ V (2) làm nhiệt độ tăng và dầm dãn nở, đẩy thanh lắc (3) và thanh răng cóc dẫn (4) lắc sang phải, kéo vành rotor (5) chuyển động quay thuận chiều kim đồng hồ. Ở nửa chu kỳ hồi vị, điện áp dẫn giảm về 0, hệ thống dầm chữ V sẽ nguội đi và co lại kéo thanh lắc (3) sang trái đưa hệ thống dẫn động trở về vị trí ban đầu, nhưng vành rotor (5) vẫn đứng yên nhờ cơ cấu chống đảo (6). Với kết cấu này, để rotor quay được thì ở nửa chu kỳ dẫn động, chuyển vị tối thiểu của thanh răng cóc dẫn (4) phải lớn hơn một bước răng cóc p. Sau mỗi chu kỳ điện áp dẫn, vành rotor (5) dịch chuyển một đoạn $s \times p$: với $p = 10\mu m$, $h = 6\mu m$ lần lượt là bước và chiều cao răng cóc; $s = 1,2..$ là số răng cóc dịch chuyển được trong một chu kỳ, phụ thuộc vào độ lớn của điện áp dẫn động.

2.2. Mô hình truyền nhiệt sai phân hữu hạn

Trong thực tế làm việc, quá trình trao đổi nhiệt trên dầm chữ V tương đối phức tạp và phụ thuộc vào nhiều yếu tố. Tuy nhiên, để đơn giản hơn chúng tôi đề xuất một số giả thiết như: bỏ qua truyền nhiệt đối lưu và bức xạ của hệ dầm; bỏ qua truyền nhiệt từ thanh đẩy sang lớp nền qua khe hở không khí, và sử dụng phương pháp sai phân hữu hạn để tính toán. Xét một phân tố dầm có chiều dài là Δx, phương trình cân bằng nhiệt lượng trên phân tố dầm thứ i có dạng như sau:

$$\Delta q_{i+1} + \Delta q_{i-1} + \Delta q_{si} + \Delta q_{ei} = \Delta q_{sti} \quad (1)$$

Trong đó Δq_{i+1} và Δq_{i-1} lần lượt là nhiệt lượng truyền từ các phân tố dầm (i+1) và (i−1) đến phân tố thứ i; Δq_{si} là nhiệt lượng truyền qua khe hở không khí đến lớp nền; Δq_{ei} và Δq_{sti} lần lượt là nhiệt Jul và nhiệt lượng tích trữ trên phân tố dầm i^{th} tại bước thời gian j^{th}. Các đại lượng này được xác định như sau [12]:

$$\Delta q_{i-1} = k_s.A_b \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{\Delta x};\ \Delta q_{i-1} = k_s.A_b \frac{T_i^j - T_{i-1}^j}{\Delta x};\ \Delta q_{lsi} = k_a.S \frac{T_i^j - T_0}{g_a} w_b.\Delta x;$$

$$\Delta q_{ei} = \frac{U^2}{4.\rho.l_b^2} A_b.\Delta x;\ \Delta q_{sti} = C_p.d \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} A_b.\Delta x \quad (2)$$

Trong đó k và k_a là hệ số truyền nhiệt của silic và không khí; T_0 và T_i là nhiệt độ không khí và nhiệt độ trên đoạn dầm thứ i; S là hệ số hình dạng của mặt cắt dầm; C_p, d và ρ lần lượt là nhiệt dung riêng, khối lượng riêng và điện trở suất của silic; Δt là bước thời gian; U là điện áp dẫn; $A_b = t_b.\mathrm{w}_b$ là diện tích mặt cắt ngang dầm.

Ở trạng thái truyền nhiệt ổn định (khi đó $\Delta q_{st} = 0$), từ phương trình (1) và các biểu thức (2) nhiệt độ phân bố trên dầm được xác định theo phương trình:

$$T_{i+1} + \left(\frac{k_a}{k_s} \frac{S.\Delta x^2}{h.g_a} - 2 \right) T_i + T_{i-1} - \frac{k_a}{k_s} \frac{S.\Delta x^2}{h.g_a} T_0 + \left(\frac{\Delta x}{L} \right)^2 \frac{U^2}{4.\rho.k_s} = 0 \quad (3)$$

Độ dãn dài do nhiệt Δl, lực dãn nở nhiệt của một dầm đơn F_b, và tổng lực dãn nở nhiệt F_t của

hệ dầm chữ V tác dụng lên thanh đẩy được xác định [12]: $\Delta l = \sum_i \alpha_l.(T_i - T_0).\Delta x$ (4)

$$F_b = A_b.E.\frac{\Delta l}{l_b} \quad (5) \qquad F_t = 2.n.F_b.\sin\theta = 2.n.A_b.E.\frac{\Delta l}{l_b}.\sin\theta \quad (6)$$

Trong đó, n là số cặp dầm chữ V; α_l là hệ số dãn nở nhiệt của silic; $E = 1.69\times10^5$ (MPa) là mô đun đàn hồi Young của silic; l_b là chiều dài một dầm đơn; θ là góc nghiêng của dầm chữ V theo phương vuông góc với thanh đẩy. Độ cứng của hệ dầm chữ V được xác định theo công thức từ tài liệu [12]:

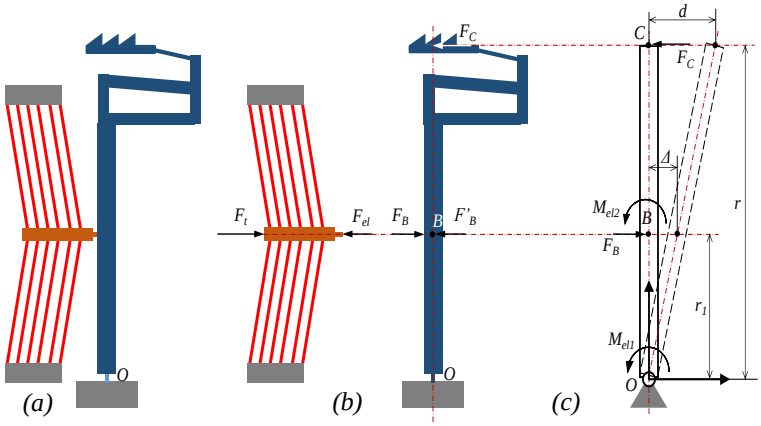
$$k = \frac{2.n.E.(12I_b.\cos^2\theta + A_b.l_b^2.\sin^2\theta)}{l_b^3} \quad (7)$$

Với $I_b = t_b.w_b^3/12$ là mô men quán tính của diện tích mặt cắt ngang dầm. Gọi Δ là chuyển vị của đầu thanh đẩy, khi đó lực đàn hồi của hệ dầm được xác định: $F_{el} = k \cdot \Delta$ (8)

2.3. Phân tích lực kỳ dẫn và hồi vị

2.3.1. Phân tích lực trong kỳ dẫn động

Như mô tả ở Hình 1, vi động cơ được dẫn động bằng bốn bộ chấp hành chữ V đối xứng và hoàn toàn giống nhau, do đó khi phân tích lực ta chỉ cần xét tương tác trong một bộ như trên Hình 2.



a) Sơ đồ một vi chấp hành; b) Phân tích lực tại điểm đàn hồi B; c) Mô hình hoá thanh lắc (3)

Hình 2. *Sơ đồ phân tích lực và chuyển vị của một bộ dẫn động*

Theo Hình 2b, tách điểm đàn hồi B ta có các lực tác dụng lên thanh đẩy gồm:

- Lực dẫn động F_D: $F_D = F_t - F_{el}$ (9)
- $F'_B = F_B$ là phản lực từ thanh lắc tác dụng lại vào thanh đẩy của vi chấp hành.

Phương trình cân bằng lực trên thanh đẩy sẽ là: $F_D - F'_B = 0$ (10)

Theo Hình 2c, các lực và mô men tác dụng lên thanh dẫn gồm: Phản lực F'_B từ thanh đẩy tác dụng lên thanh lắc; Lực cản F_C từ vành rotor tác dụng lên răng cóc dẫn; M_{el1} và M_{el2} lần lượt là các mô men đàn hồi tại cổ đàn hồi O và B: $M_{el1} = k_1.d \cdot r$ (11)

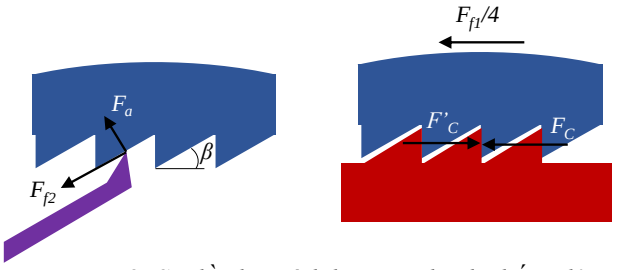
$$M_{el2} = k_2.\Delta.r_1 \quad (12)$$

Trong đó, k_1 và k_2 lần lượt là độ cứng theo phương ox của cổ đàn hồi tại O và B; d là chuyển vị theo phương ox của điểm C trên thanh lắc (hình 2c); r_1 và r là khoảng cách từ cổ đàn hồi O đến điểm B và C. Dựa vào kích thước thanh lắc cho trước, độ cứng k_1 được xác định bằng mô phỏng

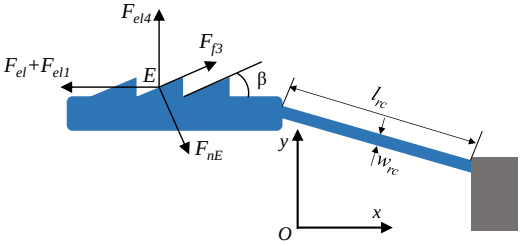
và có giá trị 2,79 μN/μm. Độ cứng k_2 nhỏ hơn rất nhiều so với k_1 do đầu thanh đẩy chuyển động tịnh tiến và uốn ngang rất nhỏ nên M_{el2} có thể bỏ qua.

Phương trình cân bằng mô men trên thanh lắc với điểm O:

$$F_B.r_1 - M_{el1} - F_C.r = 0 \quad (13)$$



Hình 3. *Sơ đồ phân tích lực trên thanh chống đảo và thanh răng cóc dẫn*



Hình 4. *Sơ đồ phân tích lực trong quá trình hồi vị*

Theo Hình 3, hệ lực tác dụng lên vành răng cóc bao gồm: $F'_C = F_C$ là phản lực từ răng cóc dẫn tác dụng lên vành răng cóc; F_{f1} là lực ma sát giữa vành răng cóc và nền:

$$F_{f1} = \mu.m_1.g \quad (14)$$

F_a, F_{f2} lần lượt là phản lực pháp tuyến, lực ma sát giữa vành răng cóc và thanh chống đảo:

$$F_a = k_3\delta_a = \frac{E.t.w_a^3}{4l_a^3}\delta_a \quad (15) \qquad F_{f2} = F_a.\mu \quad (16)$$

Trong đó, m_1 là khối lượng của vành răng cóc; μ là hệ số ma sát giữa bề mặt silic với silic; g là gia tốc trọng trường; k_3 là độ cứng uốn của thanh chống đảo; δ_a là chuyển vị của đầu tóc chống đảo và có giá trị lớn nhất $\delta_a = h = 6\mu m$; t, w_a và l_a lần lượt là chiều dày, bề rộng cổ và chiều dài của tóc chống đảo. Phương trình cân bằng lực trên vành răng cóc theo phương tiếp tuyến của vành răng:

$$F'_C - \frac{F_{f1}}{4} - F_{f2}.\cos\beta - F_a.\sin\beta = 0 \quad (17)$$

Với, β là góc nghiêng của mặt răng cóc so với phương tiếp tuyến của vành răng cóc (hình 3).

Theo (10), (13), (17) ta có: $$F_t - F_{el} - \frac{M_{el1}}{r_1} - \left(\frac{F_{f1}}{4} + F_{f2}.\cos\beta + F_a.\sin\beta\right)\frac{r}{r_1} = 0 \quad (18)$$

Điều kiện về lực để vi động cơ chuyển động được là:

$$F_t \geq F_{el} + \frac{M_{el1}}{r_1} + \left(\frac{F_{f1}}{4} + F_{f2}.\cos\beta + F_a.\sin\beta\right)\frac{r}{r_1} \quad (19)$$

Để vi động cơ hoạt động được thì ngoài điều kiện (19), cần phải đảm bảo điều kiện điện áp dẫn để thanh răng cóc của thanh dẫn sinh lực đẩy vành răng cóc bên ngoài dịch chuyển được ít nhất 1 bước răng, tức là chuyển vị d tại điểm E trên thanh răng cóc dẫn phải lớn hơn ($s.p + g_0$); với s = 1, 2, ... là số bước răng cóc, khi đó điều kiện động học để vi động cơ chuyển động được:

$$d \geq s.p + g_0 \text{ hay } \Delta \geq \frac{r_1}{r}\left(s.p + g_0\right) \quad (20)$$

2.3.2. Phân tích lực trong kỳ hồi vị

Trong quá trình hồi vị, dưới tác dụng của các lực đàn hồi, thanh răng cóc dẫn bị ép và trượt trên bề mặt răng cóc của vành rotor. Sơ đồ phân tích lực quá trình hồi vị như chỉ ra trên Hình 4, hợp lực tác dụng lên răng cóc dẫn quy về điểm E bao gồm: Lực kéo F_{el} của hệ dầm chữ V theo phương ox; Lực kéo do cổ đàn hồi tại O gây ra theo phương x tại E là: $F_{el1} = k_1 d$ (21)

Lực đàn hồi F_{el4} của dầm răng cóc dẫn theo phương *y* quy đổi về điểm *E*:

$$F_{el4} = k_4.\delta_4 = k_4.h \quad (22)$$

Trong đó, k_4 và $\delta_4 = h$ = 6μm lần lượt là độ cứng của dầm răng cóc dẫn và chuyển vị lớn nhất của răng cóc dẫn theo phương *y*. Với kích thước cổ đàn hồi của thanh răng cóc dẫn w_{rc} = 2μm và chiều dài l_{rc} = 220μm (hình 4) ta xác định được độ cứng k_4 = 4,88μN/μm thông qua mô phỏng. Thay vào (22) ta có F_{el4} = 29,28μN. Phản lực và lực ma sát từ vành răng cóc ngoài tác dụng lên răng cóc dẫn lần lượt gọi là F_{nE} và F_{f3}: $F_{f3} = \mu.F_{nE}$ (23)

Cân bằng hệ lực trên hai phương *x* và *y* ta được: $F_{f3}\cos\beta + F_{nE}\sin\beta - F_{el} - F_{el1} = 0$ (24)

$$F_{el4} + F_{f3}\sin\beta - F_{nE}\cos\beta = 0 \quad (25)$$

Theo (23), (24) và (25), ta có: $F_{nE} = \dfrac{F_{el} + F_{el1}}{\mu\cos\beta + \sin\beta}$ (26)

$$F_{el4} - F_{nE}(\cos\beta - \mu\sin\beta) = 0 \quad (27)$$

Theo (26) và (27) điều kiện để răng cóc dẫn hồi được về vị trí ban đầu sẽ là:

$$F_{el4} \le (F_{el} + F_{el1})\left(\frac{\cos\beta - \mu\sin\beta}{\mu\cos\beta + \sin\beta}\right) \quad (28)$$

Với chuyển vị lớn nhất của điểm *E* theo phương *y:* $\delta_4 = h = 6\ \mu m$, góc β = 30°, hệ số ma sát μ = 0,3. Ta tính được hợp lực vế bên trái của (28): $(F_{el} + F_{el1})\left(\dfrac{\cos\beta - \mu\sin\beta}{\mu\cos\beta + \sin\beta}\right) = 396,5\mu N$ luôn lớn hơn lực đàn hồi $F_{el4} = 29,28\mu N$. Tức là thanh răng cóc dẫn sẽ luôn bị trượt về vị trí ban đầu.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Mô phỏng kiểm chứng và xác định điều kiện điện áp để vi động cơ hoạt động an toàn

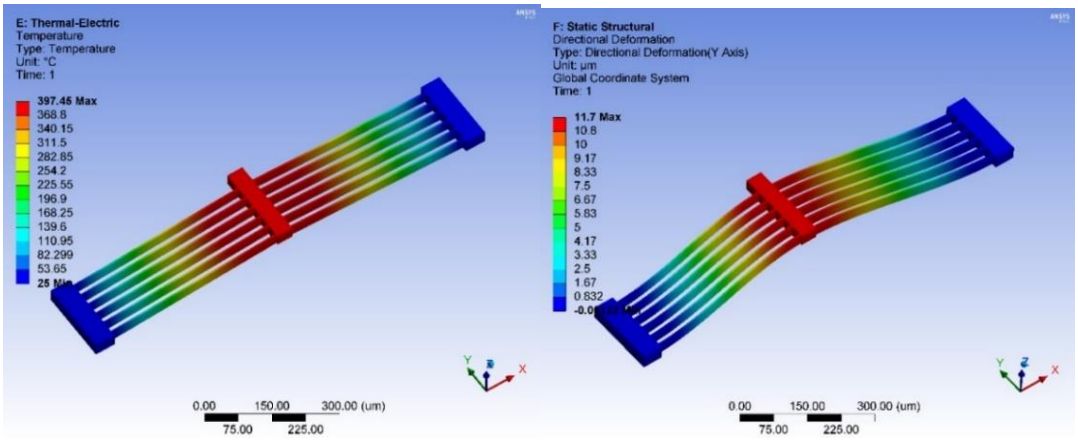
Bộ vi chấp hành điện nhiệt dạng chữ V được thiết kế với các kích thước hình học: $l_b = 450\ \mu m$, $t_b = t_s = 30\ \mu m$, $w_b = 4,5\ \mu m$, $g_a = 4\ \mu m$, $\alpha = 2^0$, $n = 6$ dầm, $l_s = 125\ \mu m$, $w_s = 40\ \mu m$ và các thông số tính chất vật liệu của Silic d=2330 kg/m^3, E=1,69×10^5 MPa, k_a=0,0257 $W/m.K$, C_p=712 $J/kg.K$, ρ_0=148×10^{-6} $\Omega.m$, λ=1,25×10^{-3} $1/K$ [14].

Mô hình 3D của vi chấp hành chữ V cùng với các kích thước, tính chất vật liệu như trên đã được mô phỏng trong phần mềm ANSYS. Kết quả mô phỏng phân bố nhiệt độ và chuyển vị của vi chấp hành tại điện áp 10V được trình bày như trong Hình 5.

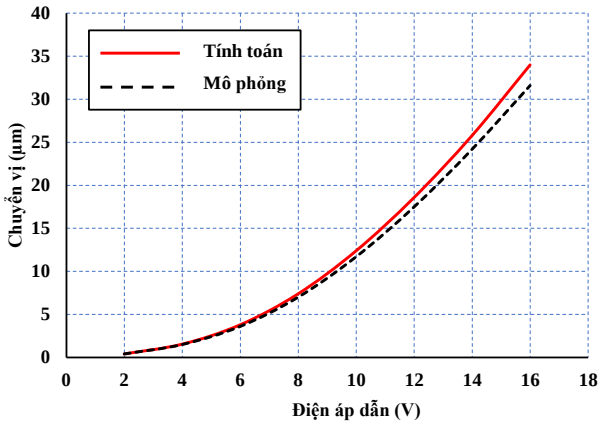
Kết quả so sánh chuyển vị của vi chấp hành giữa phương pháp sai phân hữu hạn và mô phỏng được trình bày như trên Hình 6. Theo đồ thị, sai số chuyển vị trong hai trường hợp là không đáng kể, nhất là ở vùng điện áp làm việc (U<10V). Điều này chứng minh độ chính xác tương đối cao của mô hình truyền nhiệt sai phân hữu hạn đã được xây dựng ở trên so với mô phỏng. Tuy nhiên, trong tính toán ta bỏ qua quá trình đối lưu, bức xạ nhiệt, việc lớp platinum phún xạ trên bề mặt khi mô phỏng ta chỉ khai báo sự thay đổi về điện trở suất, còn các thông số vật liệu khác cơ bản vẫn sử dụng của vật liệu "gốc" (silic)... dẫn đến sự sai lệch như trên.

Điều kiện điện áp dẫn tối thiểu được tính toán theo các điều kiện về lực (19) và chuyển vị (20). Với các số liệu và yêu cầu như trên ta có thể xác định được, khi bước răng dịch chuyển s = 1 sẽ là U_{min1} = 7,46V và khi s=2 ta tìm được là U_{min2} = 9,71V.

Giả sử dùng điện áp dẫn U = 10V lớn hơn U_{min2} ở trên, sử dụng công thức (3) ta tính được nhiệt độ lớn nhất trên dầm T_m = 408°C, còn theo mô phỏng T_{sm} = 397°C. Như vậy, khi điện áp đặt vào lớn hơn các điện áp theo điều kiện chuyển vị là U_{min1} và U_{min2} thì nhiệt độ lớn nhất trên dầm vẫn đảm bảo điều kiện ổn định nhiệt như đã chỉ ra trong [13], tức là: $T_{dầm} < T_{cr}$ = 1200°C.

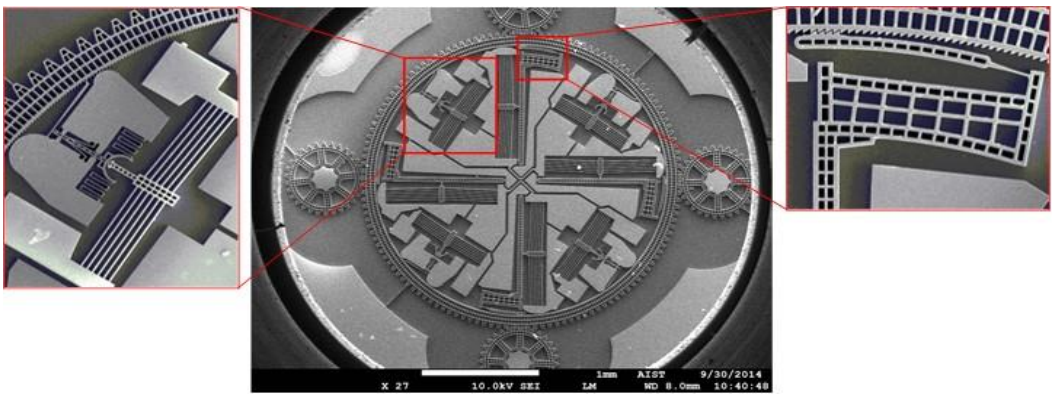


Hình 5. *Mô phỏng nhiệt độ và chuyển vị của vi chấp hành chữ V tại U = 10V*



Hình 6. *So sánh chuyển vị giữa tính toán và mô phỏng*

3.2. Kết quả chế tạo vi động cơ



Hình 7. *Ảnh SEM của vi động cơ điện nhiệt sau khi chế tạo bằng công nghệ SOI-MEMS*

Vi động cơ được chế tạo bằng quy trình công nghệ vi cơ khối truyền thống SOI-MEMS, bao gồm 6 bước chính: làm sạch tấm SOI, quang khắc và hiện hình, ăn mòn ion hoạt hóa sâu, phủ lớp cảm quang bảo vệ và cắt chip, làm sạch và ăn mòn hơi HF, phún xạ phủ Platinum (chi tiết được giới thiệu trong [14]). Bước phún xạ được sử dụng nhằm giảm điện trở của hệ dầm chữ V, tại bước này vi động cơ được phủ một lớp platinum lên bề mặt bằng công nghệ phún xạ. Lớp phủ

platinum trên bề mặt vi động cơ sau khi phún xạ có chiều dày từ 50 đến 100 nm tùy thuộc vào thời gian phún xạ trong khoảng từ 3 đến 6 phút [14], [15]. Ảnh chụp qua kính hiển vi điện tử quét (SEM) được thể hiện trên Hình 7.

4. Kết luận

Bài báo này kế thừa các kết quả tính toán, chế tạo bộ vi chấp hành điện nhiệt kiểu chữ V, để thiết kế, phân tích lực, mô phỏng kiểm chứng chuyển vị và chế tạo thành công một mẫu vi động cơ quay một chiều. Các điều kiện điện áp để vi động cơ hoạt động và không bị quá nhiệt đã được phân tích, tính toán kỹ lưỡng. Quy trình chế tạo vi cơ khối dựa trên vật liệu tấm silic kép SOI (Silicon on Insulator) bổ sung bước phún xạ cũng đã được đề xuất cụ thể. Bước đầu các cấu trúc vi động cơ bằng silic với đường kính ngoài khoảng 2,5 mm đã được chế tạo thành công. Việc đo đạc và kiểm tra hoạt động của vi động cơ này sẽ được thực hiện ở giai đoạn tiếp theo.

Tương lai vi động cơ điện nhiệt có nhiều tiềm năng ứng dụng trong các khớp truyền động quay của hệ thống micro robot hoặc trong các hệ thống vi lắp ráp, vi vận chuyển của các hệ thống tích hợp micro.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

[1] A. S. Algamili, M. H. M. Khir, J. O. Dennis, *et al.*, "A Review of Actuation and Sensing Mechanisms in MEMS-Based Sensor Devices," *Nanoscale Res Lett*, vol. 16, 2021, Art. no. 16.

[2] P. Pattanaik and M. Ojha, "Review on challenges in MEMS technology," *Materials Today: Proceedings*, vol. 81, Part 2, pp. 224-226, 2023.

[3] S. Iqbal and A. Malik, "A review on MEMS based micro displacement amplification mechanisms," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 300, 2019, Art. no. 111666.

[4] A. Potekhina and C. Wang, "Review of Electrothermal Actuators and Applications," *Actuators*, vol. 8, no. 4, 2019, Art. no. 69.

[5] T. Shan, X. Qi, L. Cui, *et al.*, "Thermal behavior modeling and characteristics analysis of electrothermal microactuators," *Microsyst Technol.*, vol. 23, pp. 2629–2640, 2017.

[6] J.-S. Park *et al*., "Bent-Beam Electrothermal Actuators - Part II: Linear and Rotary Microengines," *J. of MicroElectroMechanical Sys.*, vol. 10, no. 2, pp. 255-262, 2001.

[7] M. J. Sinclair, "A high force low area MEMS thermal actuator," *In ITHERM 2000. The Seventh Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, (Cat. No. 00CH37069), vol. 1, pp. 127-132, 2000.

[8] J. M. Maloney, D. S. Schreiber, and D. L. DeVoe, "Large-force electrothermal linear micromotors," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 14, pp. 226–234, 2004.

[9] Y. Lai, J. McDonald, M. Kujath, and T. Hubbard, "Force, deflection and power measurements of toggled microthermal actuators," *J. Micromech. Microeng*, vol. 14, pp. 49-56, 2004.

[10] V. Q. Tran, H. N. Bui, and T. D. Nguyen, "Electro - Thermal micro-motor Fabricated by MEMS Technology," *TNU Journal of Sciences and Technology*, vol. 120, no. 6 , pp. 141-146, 2014.

[11] T. D. Nguyen, H. P. Pham, Q. D. Nguyen, and D. P. Nguyen, "Iterative Learning Control for V-Shaped Electrothermal Microactuator," *Electronics*, vol. 8, no. 12, 2019, Art. no. 1410.

[12] K. T. Hoang, D. T. Nguyen, and P. H. Pham, "Impact of design parameters on working stability of the electrothermal V-shaped actuator," *Microsystem Technologies*, vol. 26, no. 5, pp. 1479-1487, 2020.

[13] K. T. Hoang and P. H. Pham, "Safe working condition and optimal dimension of the electrothermal V-shaped actuator," *Microsystem Technologies*, vol. 28, no. 7, pp. 1673-1685, 2022.

[14] T. D. Nguyen, K. T. Hoang, and P. H. Pham, "Larger displacement of silicon electrothermal V-shaped actuator using surface sputtering process," *Microsystem Technologies*, vol. 27, no. 5, pp. 1985-1991, 2021.

[15] T. D. Nguyen, P. H. Pham, and K. T. Hoang, "Improving displacement of silicon V-shaped electrothermal microactuator using platinum sputter deposition process," *Microelectronics International*, vol. 40, no. 4, pp. 239-245, 2023.