

THIẾT KẾ, CHẾ TẠO VI ĐỘNG CƠ QUAY KIỂU ĐIỆN NHIỆT DỰA TRÊN CÔNG NGHỆ MEMS

DESIGN AND FABRICATION OF A ROTARY MICROMOTOR USING ELECTROTHERMAL ACTUATOR ON MEMS TECHNOLOGY

Nguyễn Tiến Dũng

TT Thực nghiệm - Trường ĐH Kỹ thuật Công nghiệp

TÓM TẮT

Bài báo trình bày thiết kế, mô phỏng và chế tạo một mẫu vi động cơ quay sử dụng bộ kích hoạt nhiệt điện dạng chữ V. Vi động cơ có kích thước ngoài 2,5mm, hoạt động với điện áp dẫn tối thiểu $U_{\min}=17,5V$ trong dải tần số hàng trăm Hz. Ưu điểm nổi bật của loại vi động cơ này là tiêu thụ năng lượng ít (điện áp dẫn động thấp), hệ thống điều khiển đơn giản, có thể chế tạo hàng loạt dễ dàng dựa trên công nghệ vi cơ khối (Bulk-micromachining).

Từ khóa: Vi động cơ; Bộ kích hoạt nhiệt điện; Công nghệ vi cơ khối...

ABSTRACT

We report a design, simulation and fabrication of a new Micro Rotational Motor (MRM) using **V-shaped** Electro-thermal Actuator. It has overall diameter of 2.5 mm, is operated at minimum 17,5V with different frequencies range up to hundreds of Hz. The outstanding advantage of this type motor consumes less energy (low driving voltage), simple control system, can be fabricated easily by Bulk-micromachining technology.

Keywords: Micromotor; Electro-thermal Actuator; Bulk-micromachining Technology...

1. Giới thiệu

Trong khoảng 15 năm trở lại đây, với sự phát triển nhanh chóng của công nghệ MEMS, các bộ vi kích hoạt, vi động cơ đã được nghiên cứu, khai thác và ứng dụng rất rộng rãi. Kích thước và kết cấu của các vi động cơ ngày càng nhỏ gọn, đơn giản trong khi lực tác động, vận tốc và hiệu suất ngày càng nâng cao [1-2].

Các vi động cơ tuyến tính đã được nghiên cứu, ứng dụng rất thành công trên thực tế [3-8]. Tuy nhiên việc chế tạo và phát triển các vi động cơ quay vẫn gặp nhiều khó khăn. Động cơ bước tĩnh điện truyền thống với rotor chuyển động tự do quanh trục stator là các điện cực cố định đã được đề cập đến trong các tài liệu [9-11]. Gần đây các tác giả đã sử dụng bộ kích hoạt răng lược để chế tạo thành công vi động cơ quay 1 chiều sử dụng hiệu ứng tĩnh điện [12-14]. Các vi động cơ này có điện áp dẫn tương đối cao (80 ÷ 100V) mà tỷ trọng công suất lại nhỏ (công suất sinh ra tính trên một đơn thể tích).

Các vi động cơ ứng dụng hiệu ứng giãn nở nhiệt có thể đạt được tỷ trọng công suất cao hơn nhiều so với các hiệu ứng dẫn động khác và có điện áp dẫn thấp hơn. Một số mẫu động cơ quay sử dụng hiệu ứng này cũng đã được công bố [15, 16]. Tuy nhiên kết cấu và công nghệ chế tạo tương đối phức tạp. Trong bài báo này, nhóm tác giả đề xuất một mẫu vi động cơ quay một chiều ứng dụng hiệu ứng giãn nở nhiệt có thể chế tạo bằng công nghệ vi cơ khối chỉ sử dụng 1 mặt nạ giúp giảm giá thành khi gia công hàng loạt và tăng độ chính xác. Bốn bộ kính hoạt hệ dầm chữ V kết hợp với các lẫy đàn hồi sử dụng để dẫn động vành răng bên ngoài, song song với đó là bốn cơ cấu chống đảo giữ vành răng trong chu kỳ hồi vị. Mẫu vi động cơ này có tỷ trọng công suất lớn, điện áp dẫn nhỏ, điều khiển đơn giản, tăng khả năng chống trượt răng cóc.

2. Cấu tạo và hoạt động của vi động cơ

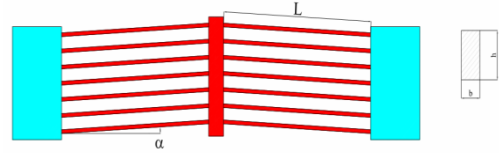
Hình 1 chỉ ra nguyên tắc hoạt động của vi động cơ dựa trên lý thuyết giãn nở nhiệt với trung tâm là bốn bộ kích hoạt nhiệt dầm chữ V (1). Khi cấp điện cho các điện cực

trên bộ kích hoạt, các dầm của bộ kích hoạt giãn nở và đẩy đỉnh dầm chuyển động tịnh tiến làm cho thanh (3) quay quanh ổ đàn hồi O. Thông qua các cơ cấu truyền chuyển động (4) được gắn trên dầm (3) sẽ đẩy bánh răng dẫn (5) quay thuận chiều kim đồng hồ. Khi điện áp dẫn bằng không, nhờ lực đàn hồi ở ổ dầm O và lực đàn hồi của bộ kích hoạt nhiệt (1), lò xo đàn hồi (8) bị nén và thanh răng cóc dẫn (9) hồi về vị trí ban đầu. Bánh răng dẫn không quay ngược trở lại nhờ cơ cấu chống đảo (2). Sau mỗi chu kỳ đẩy của bộ kích hoạt nhiệt (1), răng cóc dịch chuyển một đoạn $i \times p$: với p là bước của răng cóc ứng với chiều cao răng cóc h , i phụ thuộc vào chuyển vị của thanh răng cóc, tức là phụ thuộc vào độ lớn của điện áp dẫn. Ngoài ra tốc độ của vi động cơ có thể thay đổi theo tần số điện áp dẫn.

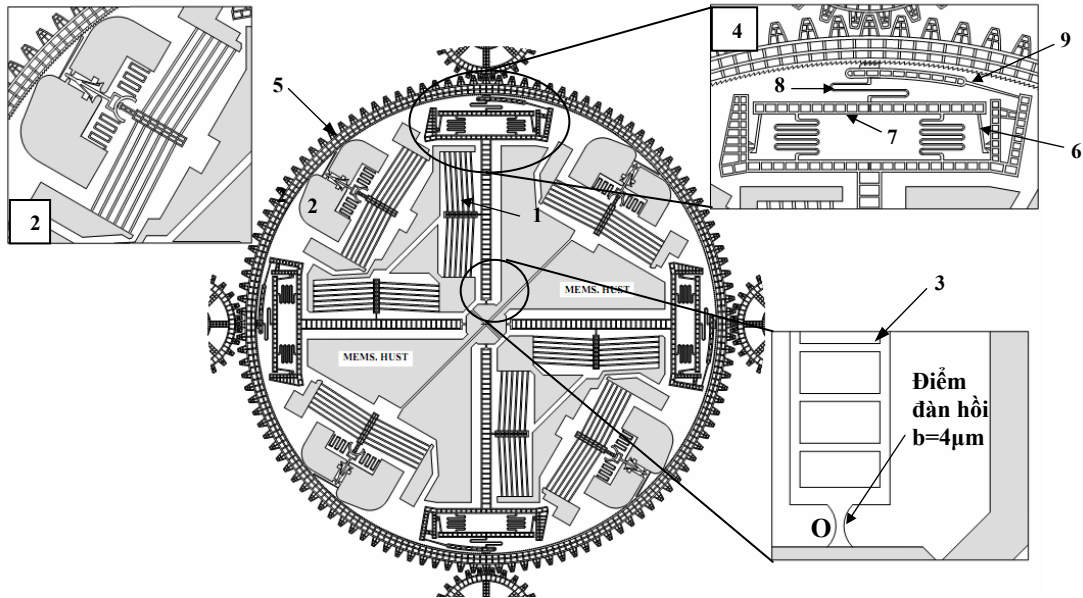
Nguyên lý hoạt động của cơ cấu truyền chuyển động: tác động vào lẫy cài (7) làm cho chân hãm (6) vào vị trí khóa, lò xo đàn hồi (8) luôn giữ cho các răng của thanh dẫn răng cóc (9) luôn tiếp xúc với răng của vành răng ngoài, do đó chúng di chuyển cùng nhau trong suốt hành trình.

Bài báo trình bày tính toán, thiết kế vi động cơ quay có kích thước ngoài 2,5mm sử dụng bộ kích hoạt nhiệt dạng chữ V dẫn động với các thông số kích thước chính: số

cặp dầm: $n = 6$, chiều dài mỗi dầm đơn $L = 300 \mu\text{m}$, chiều rộng $b = 5 \mu\text{m}$, chiều sâu $h = 30 \mu\text{m}$, góc nghiêng của dầm so với phương dịch chuyển của đỉnh dầm $\alpha = 2^\circ$ (xem hình 2).



Hình 2. Mô hình dầm nhiệt chữ V



Hình 1. Cấu tạo vi động cơ

3. Tính toán nhiệt và chuyển vị của dầm chữ V

3.1. Tính phân bố nhiệt và lực đẩy của dầm chữ V

Phương trình truyền nhiệt dạng thu gọn:

$$k \frac{d^2 T}{dx^2} + J^2 \rho = 0 \quad (1)$$

Trong đó J là mật độ dòng điện, ρ là điện trở suất của dầm, k là hệ số dẫn nhiệt.

Giải phương trình (1) ta thu được phương trình phân bố nhiệt bên trong dầm chữ V:

$$T(x) = T_s + \frac{B}{A^2} + C_1 e^{Ax} + C_2 e^{-Ax} \quad (2)$$

Trong đó: $B = \frac{U^2}{l^2 \rho_0 k}$, $A^2 = B\lambda$ và $l = 2L$;

$$C_1 = -\frac{1}{\lambda} \frac{(-e^{-2AL} + 1)}{(e^{2AL} - e^{-2AL})}; \quad C_2 = -\frac{1}{\lambda} \frac{(e^{2AL} - 1)}{(e^{2AL} - e^{-2AL})};$$

$T_s = 20^\circ\text{C}$; ρ_0 là điện trở suất tại T_s (nhiệt độ môi trường xung quanh) và λ là hệ số nhiệt độ tuyến tính. Từ (2) ta có độ giãn dài của dầm đơn:

$$\Delta L = \int_0^l \alpha(T) [T(x) - T_s] dx = \alpha \left[\frac{B}{A^2} L + \frac{C_1}{A} (e^{AL} - 1) - \frac{C_2}{A} (e^{-AL} - 1) \right] \quad (3)$$

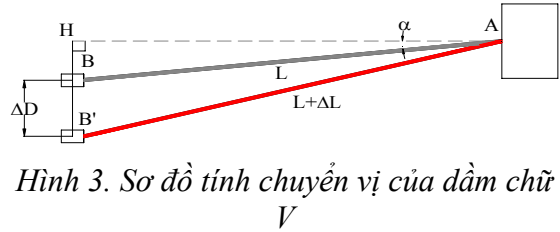
Lực đẩy của dầm theo phương dịch chuyển là: $\Sigma F_{thermal} = 2nAE \frac{\Delta L}{L} \sin \alpha \quad (4)$

Trong đó: n là số cặp dầm của mỗi bộ kích hoạt; A là tiết diện mặt cắt ngang của dầm đơn (μm^2); E là mô đun đàn hồi của vật liệu Silicon.

3.2. Tính chuyển vị ΔD của đỉnh dầm chữ V

Chuyển vị ΔD (hình 3) được tính theo công thức sau:

$$\begin{aligned} \Delta D &= B'H - BH = \sqrt{AB'^2 - AH^2} - BH \\ &= \sqrt{(L + \Delta L)^2 - (L \cos \alpha)^2} - L \sin \alpha \end{aligned} \quad (5)$$



Hình 3. Sơ đồ tính chuyển vị của dầm chữ V

Ứng với các giá trị điện áp dẫn $U=15 \div 25(\text{V})$, $n=6$, $A=5 \times 30 \mu\text{m}^2$, $E=169.10^9 \text{ Pa}$, $L=300 \mu\text{m}$, $\alpha=4.10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\lambda=1,25.10^{-3}$, $\rho_0=1200 \Omega.\text{m}$, $k=1,56.10^{-4} \text{ W}\mu\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ (tại 300 độ K). Ta thu được bảng thông số:

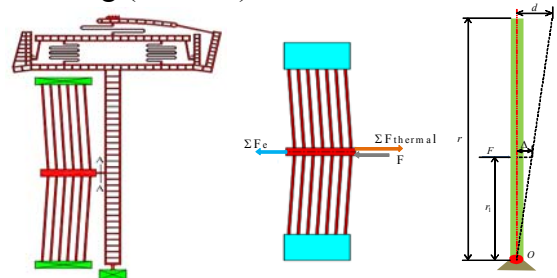
Bảng 1: Bảng thông số tính toán nhiệt và chuyển vị của dầm chữ V

Điện áp U(V)	ΔL (μm)	T_{\max} ($^\circ\text{C}$)	ΔD (μm)	$\Sigma F_{thermal}$ (mN)
15	0.12	200.9	3	4.2
17.5	0.18	278.3	4.3	6.4
20	0.28	370.2	6.1	9.7
22.5	0.39	494.5	8.1	13.9
23	0.42	526.4	8.6	14.9
25	0.55	659.8	10.5	19.4

4. Phân tích lực trong hệ thống vi động cơ

4.1. Quá trình dẫn

Vi động cơ được dẫn động bằng bốn bộ kích hoạt nhiệt dầm chữ V được bố trí đối xứng (hình 4.a).



Hình 4.a

Hình 4.b

Hình 4.c

Hình 4. Sơ đồ tính lực dẫn động

Xét riêng một bộ kích hoạt nhiệt dầm chữ V. Các lực tác dụng lên dầm như hình vẽ 4.b

$$\Sigma F_{thermal} - F - \Sigma F_e = 0 \Rightarrow F = \Sigma F_{thermal} - \Sigma F_e$$

$$\Rightarrow F = \Sigma F_{thermal} - n.k.\Delta \quad (6)$$

Với: Δ là chuyển vị của đỉnh dầm chữ V khi dẫn động (luôn có $\Delta < \Delta D$; $F_{thermal}$ là lực giãn nở nhiệt của một cặp dầm chữ V; n là số cặp dầm chữ V; F_e là lực đàn hồi của một cặp dầm chữ V; F là nội lực xuất hiện tại mặt cắt A-A trên phần dẫn động dầm chữ V; $k = 233,05 \mu N / \mu m$ là độ cứng của một cặp dầm chữ V.

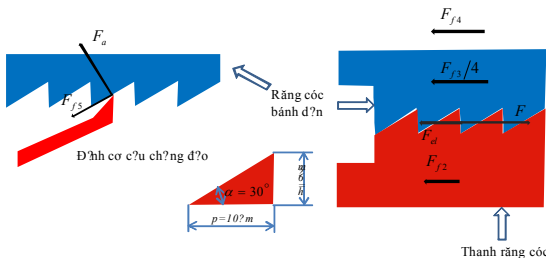
Gọi d là chuyển vị của thanh răng, đơn giản hóa dầm dầm quay để tính toán chuyển vị tại phần đặt lực dẫn động F (hình 4.c).

Trong đó: $r_1 = 440 \mu m$ là khoảng cách từ điểm đàn hồi đến đỉnh dầm bộ kích hoạt dạng chữ V; $r = 1040 \mu m$ là khoảng cách từ điểm đàn hồi đến răng cóc.

Thế vào (6) ta có:

$$F = \Sigma F_{thermal} - n.k.\Delta = \Sigma F_{thermal} - n.k.d.\frac{r_1}{r} \quad (7)$$

Đối với thanh răng và vành răng dẫn động, các lực tác động được thể hiện trong hình 5:



Hình 5. Phân tích lực quá trình dẫn động

Trong đó: F đóng vai trò là lực dẫn động (lực sinh ra để dẫn động motor khi đặt điện áp U). F_e là lực đàn hồi của dầm (quanh điểm đàn hồi); F_{f2} là lực ma sát giữa răng cóc dẫn và nền Si; F_{f3} là lực ma sát giữa bánh răng dẫn và nền; F_a là lực đàn hồi của cơ cấu chống đảo; F_{f5} là lực ma sát giữa đỉnh của dầm chống đảo và bề mặt răng cóc.

Trong trường hợp vi động cơ được dẫn động bởi thanh răng cóc, khoảng dịch chuyển d của thanh răng cóc thỏa mãn điều

kiện sau: $d = i.p$. Trong đó: i là số nguyên $i=1,2,3,\dots, p=10\mu m$

Qui các lực trên về mô men dẫn và mô men cản để tăng độ chính xác tính toán.

Mô men dẫn động của vi động cơ được xác định bởi công thức sau:

$$M_d = M_F - M_{f2} - \frac{M_{f3}}{4} - M_{f4} - M_{f5} \quad (8)$$

Để cơ cấu có thể hoạt động được, mô men dẫn M_d phải lớn hơn M_{el} : $M_d \geq M_{el}$ (9)

Trong đó: M_d là mô men của lực dẫn động F ; M_{fi} ($i=2,3,4$) là mô men của các lực ma sát kể trên (tính quanh điểm đàn hồi). Các mô men được tính theo các biểu thức sau:

$$M_F = F.r_1; M_{f2} = f.m_2.G.r; M_{f3} = f.m_3.G.r_2;$$

$$M_{f4} = f.m_4.G.r_3; F_a = k_r.h;$$

$$M_{f5} = f.F_a.\cos\alpha.r; M_{el} = k_p.d.r = k_p.i.p.r \quad (10)$$

Trong đó: G là gia tốc trọng trường ($G = 9,81.10^6 (\mu m / s^2)$); $f = 0,3$ là hệ số ma sát giữa Silicon-Silicon; m_2, m_3, m_4 lần lượt là khối lượng của thanh răng cóc, bánh răng dẫn và bánh răng bị dẫn; $k_p = 2,88 \mu N / \mu m$ là độ cứng của dầm quay cổ đàn hồi; $h = 6 \mu m$ là chiều cao của răng cóc; $r_3 = 1220 \mu m$: khoảng cách từ điểm đàn hồi (cổ đàn hồi) đến điểm tiếp xúc giữa bánh răng dẫn và bánh răng bị dẫn; $k_r = 21,19 \mu N / \mu m$ là độ cứng của cơ cấu chống đảo; $\alpha = 30^\circ$: góc nghiêng của răng cóc; $r_2 = 1180 \mu m$ là khoảng cách từ điểm đàn hồi đến tâm vành bánh răng dẫn.

Dựa vào (8), (9) và (10) ta có:

$$\Sigma F_{thermal} \geq \frac{1}{r_1} \left[M_{f2} + \frac{M_{f3}}{4} + M_{f4} + M_{f5} + k_p.i.p.r \right] + n.k.i.p.\frac{r_1}{r} \quad (11)$$

Vậy với

$$i = 1 \Rightarrow \begin{cases} \Delta = i.p.\frac{r_1}{r} = 10.\frac{440}{1040} = 4,23 \mu m \\ \Sigma F_{thermal} \geq 6,0576 mN \end{cases} \quad (12)$$

$$i = 2 \Rightarrow \begin{cases} \Delta = i.p.\frac{r_1}{r} = 20.\frac{440}{1040} = 8,46\mu m \\ \sum F_{thermal} \geq 12,06mN \end{cases} \quad (13)$$

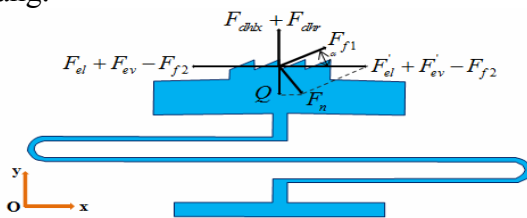
Do chuyển vị thực tế Δ khi dẫn động luôn nhỏ hơn chuyển vị ΔD vậy từ (12) và (13) tra bảng 1, kết quả tính toán chuyển vị và lực đẩy của dầm chữ V như sau:

+ Để hệ thống chuyển động được 1 bước răng cần điện áp tối thiểu là: $U_{min} = 17,5V$

+ Để hệ thống chuyển động được 2 bước răng cần điện áp tối thiểu là: $U_{min} = 23V$

4.2. Quá trình hồi vị

Sơ đồ phân tích lực quá trình hồi vị như hình vẽ 6. Trong quá trình hồi vị (khi điện áp dẫn bằng 0), do ảnh hưởng của lực đàn hồi của các dầm, thanh răng cóc hồi về vị trí ban đầu và tác dụng một lực lên vành răng.



Hình 6. Sơ đồ phân tích lực quá trình hồi vị

Trong đó: F_{ev} là lực đàn hồi của bộ kích hoạt nhiệt dầm chữ V: $F_{ev} = n.k.\Delta$ (F_{ev}' : phản lực đàn hồi: $\overline{F_{ev}'} = -\overline{F_{ev}}$); F_{el} là lực đàn hồi của cổ dầm trên bộ kích hoạt (F_{el}' : phản lực đàn hồi: $\overline{F_{el}'} = -\overline{F_{el}}$); F_n là phản lực đàn hồi theo phương vuông góc với bề mặt răng của thanh răng cóc dẫn; F_{f1} là lực ma sát trượt giữa răng của thanh răng cóc dẫn và vành răng;

$F_{dhlx} = k_s.\Delta y$ là lực đàn hồi của lò xo theo phương y. Với $k_s = 7,43\mu N / \mu m$ là độ cứng của lò xo; $\Delta y = \Delta y_0 + h$ ($\Delta y_0 = 3,5\mu m$ là độ nén của lò xo ban đầu lúc ăn khớp răng cóc)

$F_{dhr} = k_{rc}.\Delta y_r$ là lực đàn hồi của cổ thanh răng cóc dẫn; với $\Delta y_r = 2,5\mu m$ là độ nén lớn nhất của thanh răng cóc dẫn khi trượt hai dây răng cóc. $k_{rc} = 4,88\mu N / \mu m$ là độ cứng của cổ thanh răng cóc dẫn.

Để hệ thống có thể hồi vị về vị trí ban đầu khi ngừng cấp điện áp U thì:

1) Ở thời điểm bắt đầu quá trình hồi vị, lực đàn hồi $F_{el} + F_{ev}$ thắng lực ma sát F_{f1} và F_{f2}

Lực F_{f1} có thể tính theo công thức sau: $F_{f1} = f.F_n = f(F_{el}' + F_{ev}' - F_{f2})\sin\alpha$ (14)

Vì $f.\sin\alpha = 0,3.0,5 = 0,15 < 1$ vậy từ (14) ta có $F_{f1} + F_{f2} < F_{ev}' + F_{el}' = F_{ev} + F_{el}$

2) Thành phần lực Q theo phương y sẽ làm nén lò xo và tạo ra sự trượt của hai dây răng cóc:

$$Q = F_n.\cos\alpha = (F_{el}' + F_{ev}' - F_{f2})\sin\alpha\cos\alpha = \frac{1}{2}(F_{el}' + F_{ev}' - F_{f2})\sin 2\alpha \quad (15)$$

Điều kiện để răng răng cóc có thể hồi về vị trí ban đầu là:

$$Q \geq F_{dhlx} + F_{dhr} + F_{f1}\sin\alpha = F_{dhlx} + F_{dhr} + f(F_{el}' + F_{ev}' - F_{f2})\sin^2\alpha \quad (16)$$

Từ (15) và (16) ta có:

$$i \geq \frac{1}{p} \left(\frac{2(F_{dhlx} + F_{dhr})}{\sin 2\alpha - 2f\sin^2\alpha} + F_{f2} \right) = 0,039.$$

Vậy luôn luôn thỏa mãn (16).

Như vậy ta có: - Điện áp tối thiểu để hệ thống chuyển động được 1 bước răng là: $U_{min} = 17,5V$

- Điện áp tối thiểu để hệ thống chuyển động được 2 bước răng là:

$$U_{min} = 23V$$

5. Chế tạo vi động cơ

Vi động cơ được chế tạo từ 1 phiên SOI (Silicon On Insulator) có bề dày của lớp Si trên cùng, lớp SiO₂ trung gian và lớp đế Si lần lượt là 30 μm , 4 μm , 450 μm .

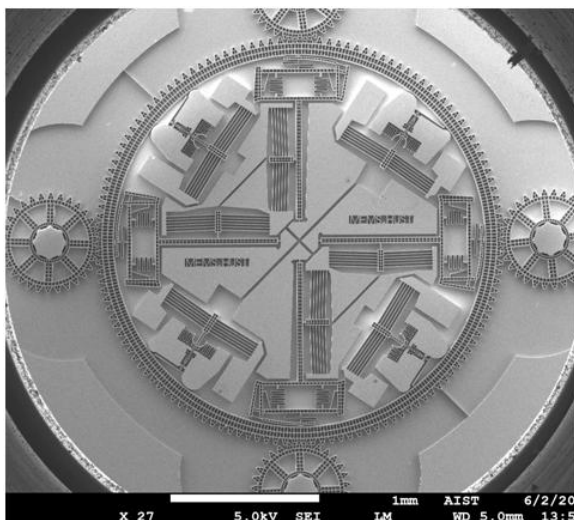
Trước hết, mặt nạ được thiết kế và sử dụng cho quá trình quang khắc (photo – lithography). Cấu trúc của vi động cơ sẽ được “khắc” lên trên bề mặt tấm SOI sau quá trình quang khắc và phát triển (developing).

Tiếp theo, tiến hành quá trình ăn mòn khô sâu (D-RIE) để tạo nên lớp cấu trúc có chiều sâu 30 μm (chạm đến lớp SiO_2 ở giữa, tốc độ ăn mòn khoảng 1,2 μm /phút. Sau đó tấm silicon được cắt để tách thành các chip riêng biệt. Lớp photoresist trên bề mặt của cấu trúc được rửa sạch và tiến hành quá trình ăn mòn bốc bay bằng axit HF để loại bỏ lớp SiO_2 bên dưới tạo nên các phần cấu trúc di động của động cơ.

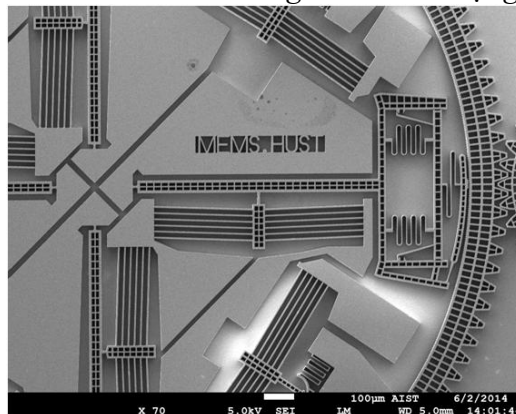
Các hình 7,8 là hình ảnh SEM (Scanning Electron Microscopy) mô tả cấu trúc và các bộ phận quan trọng của vi động cơ.

6. Kết luận

Bài báo đã trình bày nguyên lý hoạt động, tính toán động học và động lực học cấu trúc, mô phỏng, đưa ra quy trình chế tạo và các kết quả sau chế tạo của một mẫu vi động cơ quay, dẫn động bằng các bộ kích hoạt dầm chữ V.



Hình 7: Cấu trúc tổng thể của vi động cơ



Hình 8: Bộ kích hoạt dạng chữ V của vi động cơ

Vi động cơ có thể hoạt động với điện áp dẫn tối thiểu $U_{\min}=17,5\text{V}$ trong dải tần số hàng trăm Hz. Các kết quả mô phỏng trên phần mềm ANSYS tương đối sát với kết quả tính toán. Kết quả chế tạo đã chứng tỏ khả năng chế tạo thành công thông qua quy trình chuẩn, đơn giản và có khả năng chế tạo hàng loạt cao.

Thông qua kết quả tính toán và mô phỏng cho thấy ưu điểm nổi bật của vi động cơ này là điện áp dẫn thấp, đơn giản trong thiết kế và điều khiển, tỷ trọng công suất cao hơn nhiều so với các vi động cơ sử dụng các hiệu ứng kích hoạt khác. Trong tương lai loại vi động cơ này có thể được tích hợp vào trong các khớp quay của vi robot hoặc trong các hệ thống vận chuyển/lắp ráp micro nằm trên chip.

Tài liệu tham khảo

- [1] Phuc Hong Pham, Dzung Viet Dao; “*Micro Transportation Systems: A Review*”; Modern Mechanical Engineering, Vol 1, No 2, 2011, pp 31-37.
- [2] Dang Bao Lam, Vu Ngoc Hung, Pham Hong Phuc; “*Micro mechanisms in the micro robot systems: case studies of the electrostatic micro mechanisms*”; Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ IX, 2012
- [3]. Richard Yeh, Seth Hollar, and Kristofer Pister (2002); *Single Mask, Large Force, and Large Displacement Electrostatic Linear Inchworm Motors*; Journal of Microelectromech. Syst, 11(4), pp. 330-336.
- [4]. Tas N.R. *et al.* (1997); *Surface Micromachined Linear Electrostatic Stepper Motor*; Proc. of International Solid State Sensors and Actuators Conference Transducers 97, Vol. 2, pp. 777-780.
- [5]. Haiwei Lu, Jianguo Zhu, and Youguang Guo (2005); *A Permanent Magnet Linear Motor for Micro Robots*; Proc. Power Electronics and Drives Systems, Vol. 1, pp. 590–595.
- [6]. Gehrking R. *et al.* (2006); *A Micro Linear Motor with Integrated Passive Magnetic Guidance*; IECON 2006 - 32nd Annual IEEE Conference on Industrial Electronics, pp. 1245–50.
- [7]. A Geisberger, D Kadylak and M Ellis (2006); *A silicon electrothermal rotational micro motor measuring one cubic millimeter*; J. Micromech. Microeng., 16, pp. 1943–1950.
- [8]. Jae-Sung Park *et al.* (2001); *Bent-Beam Electrothermal Actuators - Part II: Linear and Rotary Microengines*; J. of MicroElectroMechanical Sys., Vol. 10, No. 2, pp. 255-62.
- [9]. Ghalichechian N. *et al.*; “*Design, Fabrication, and Characterization of a Rotary Micromotor Supported on Microball Bearings*”; Journal of MicroElectroMechanical System, 2008.
- [10]. Sarajlic E. *et al.*; “*Three-Phase Electrostatic Rotary Stepper Micromotor With a Flexural Pivot Bearing*”; Journal of MicroElectroMechanical System, 2010.
- [11]. Stranczl M. *et al.*; “*Modal Analysis and Modeling of a Frictionless Electrostatic Rotary Stepper Micromotor*”; Proceedings of IEEE MEMS 2011, Cancun, MEXICO.
- [12]. Firas N. Sammoura; *Novel Rotary Inchworm Motor*; robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/245/project/Sammoura.pdf
- [13]. Stephen M. Barnes, Samuel L. Miller, M. Steven Rodgers, Fernando Bitsie (2000); *Torsional Ratcheting Actuating System*; Modeling and Simulation of Microsystems 2000, San Diego, CA, 27-29 Mar 2000.
- [14]. Phuc H.P., Dzung V. D., Lam B.D., S. Sugiyama (2012); *Single mask, simple structure micro rotational motor driven by electrostatic comb-drive actuators*; J. of Micromechanics & Microengineering, Vol. 22, No. 1.
- [15]. Ho Nam Kwon *et al.* (2001); *A micromachined thermoelastic inchworm actuator*; Proc. of American Society for Precision Engineering, 2001 Annual meeting, pp. 127-130.
- [16]. Mathew Stevenson *et al.* (2007); *Development of a bidirectional ring thermal actuator*; Journal of Micromech. Microeng. Vol. 17, pp. 2049–2054.