

Giảm thấp điện áp dẫn của bộ vi kích hoạt điện nhiệt dạng dầm chữ V bằng phương pháp phun xạ bề mặt

Vũ Văn Học¹, Nguyễn Tiến Dũng^{2,*}, Dương Thị Thanh Huyền²,
Trương Thị Thanh Tâm³, Giáp Thị Thùy³

¹Đại học Bách khoa Hà Nội;

²Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp, Đại học Thái Nguyên;

³Trường Cao đẳng nghề Công nghệ Việt - Hàn Bắc Giang.

*Email: dungnguyentien@tnut.edu.vn

Nhận bài: 25/3/2023; Hoàn thiện: 25/5/2023; Chấp nhận đăng: 12/12/2023; Xuất bản: 25/12/2023.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.92.2023.21-29>

TÓM TẮT

Bài báo giới thiệu phương pháp giảm điện trở bề mặt của bộ vi kích hoạt điện nhiệt dạng chữ V, từ đó, giảm điện áp dẫn, nâng cao chuyển vị, tỷ trọng công suất của bộ vi kích hoạt. Các bộ vi kích hoạt được chế tạo từ phiên silic kép (SOI- Silicon on Insulator) theo quy trình gia công vi cơ khối (Bulk – micromachining), trong đó có cải tiến bổ sung thêm quy trình phun xạ bề mặt bằng vật liệu platin với các thời gian phun xạ thử nghiệm lần lượt là 1,5; 3 và 6 phút. Kết quả cho thấy điện trở bề mặt của bộ vi kích hoạt giảm đi tương ứng 1,16; 1,55 và 2,4 lần so với khi chưa thực hiện phun xạ. Bằng thực nghiệm cũng xác định được chuyển vị của bộ vi kích hoạt có thể tăng 1,45 lần ở dải điện áp từ 8 ÷ 20 V. Điều đó cho ta xác định hiệu quả và tỷ trọng công suất của bộ vi kích hoạt tăng cao hơn so với không thực hiện phun xạ.

Từ khóa: Bộ kích hoạt hình chữ V; Hiệu ứng giãn nở nhiệt; Phun xạ bề mặt; Công nghệ vi cơ khối.

1. MỞ ĐẦU

Các bộ vi kích hoạt đóng vai trò quan trọng trong việc dẫn động các thiết bị vi cơ điện tử (MEMS– Micro-electro-mechanical System). Chúng cung cấp lực và chuyển vị để dẫn động các thiết bị vi cơ [1, 2]. Một trong số các hiệu ứng kích hoạt cơ bản đó là hiệu ứng giãn nở nhiệt. Hiệu ứng này có thể cung cấp lực, chuyển vị lớn hơn, kết cấu đơn giản hơn các hiệu ứng khác. Có 3 dạng kết cấu cơ bản cho các bộ vi kích hoạt sử dụng hiệu ứng giãn nở nhiệt đó là dạng chữ U, dạng chữ Z và dạng chữ V [3, 4]. Trong đó, dạng chữ U hay còn được gọi là “hot arm – Cold arm”, lợi dụng sự giãn nở không đồng đều giữa các dầm, tạo nên chuyển động quay quanh điểm đàn hồi; trong khi đó, các bộ kích hoạt dạng chữ Z, chữ V sẽ tạo ra chuyển động tịnh tiến khi có sự giãn nở của hệ dầm. Với cùng kích thước và điện áp dẫn như nhau thì bộ vi kích hoạt dạng chữ V cho lực và chuyển vị lớn hơn nhiều so với dạng chữ U và Z [5, 6]. Do đó, bộ vi kích hoạt dạng chữ V được ứng dụng rộng rãi trong thế giới MEMS. Cụ thể như, trong các bộ vi tay kẹp [7], thiết bị kiểm tra vật liệu nhỏ [8] vi động cơ tuyến tính [9, 10], vi động cơ quay [11],...

Với mục tiêu tính toán, phân tích kỹ hơn quá trình truyền nhiệt trong bộ kích hoạt điện nhiệt, mô hình truyền nhiệt trong hệ thống dầm được nhiều tác giả đề cập tới. Cụ thể như trong [12], tác giả đưa ra phương pháp tính toán lực, chuyển vị của hệ dầm một cách đơn giản thông qua nhiệt độ trung bình của các dầm đơn và sau đó đã được phát triển, bổ sung như công bố [13]. Mô hình này cho phép tính toán nhanh chóng các đại lượng nhưng nó chỉ phù hợp khi các đặc tính của vật liệu là không đổi, biên độ thay đổi của nhiệt độ trong phạm vi nhỏ. Để khắc phục những hạn chế này, mô hình truyền nhiệt dạng sai phân hữu hạn được sử dụng trong [14] và [15] để biểu diễn quá trình truyền nhiệt trong hệ dầm chữ V, với kết quả chính xác hơn do có bổ sung các hệ số xét tới sự phụ thuộc của các thông số vật liệu vào nhiệt độ.

Những năm gần đây, với mục tiêu thiết kế và chế tạo các cấu trúc vi kích hoạt nhằm giảm điện áp dẫn động và chuyển vị lớn hơn. Trong [15] điện trở của bộ vi kích hoạt được giảm bằng cách áp dụng công nghệ sản xuất tiên tiến hoặc sử dụng vật liệu mới có điện trở suất thấp hơn.

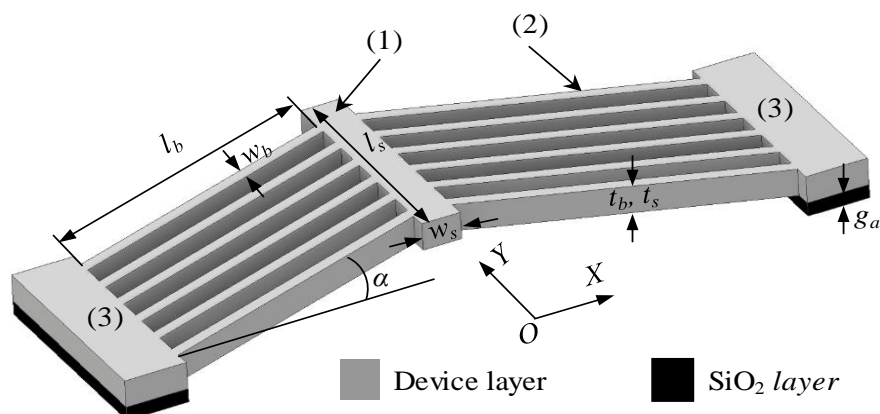
Tuy nhiên, việc sử dụng công nghệ tiên tiến hoặc vật liệu ưu việt hơn có thể dẫn đến quy trình sản xuất phức tạp hơn và chi phí cao hơn.

Bài báo này giới thiệu phương pháp giảm điện trở của bộ vi kích hoạt điện nhiệt dạng chữ V với vật liệu silicon được chế tạo bằng công nghệ SOI-MEMS truyền thống. Trong đó, bổ sung thêm một bước phun xạ bề mặt vật liệu platin vào cuối quá trình gia công vi cơ SOI-MEMS [16]. Kết quả là, chuyển vị của hệ dầm được phun xạ lớn hơn đáng kể so với khi không phun xạ. Bên cạnh đó, ảnh hưởng của thời gian phun xạ (tức là độ dày phun xạ) đến chất lượng hoạt động của bộ vi phản ứng cũng được xem xét.

2. MÔ HÌNH TRUYỀN NHIỆT VÀ TÍNH TOÁN CHUYỂN VỊ CHO BỘ VI KÍCH HOẠT ĐIỆN NHIỆT DẠNG CHỮ V

2.1. Cấu tạo và nguyên lý làm việc

Bộ kích hoạt dầm chữ V cấu tạo gồm n dầm đơn song song, được đặt nghiêng 1 góc $(\frac{\pi}{2} - \alpha)$ so với phương chuyển vị của hệ dầm hình 1. Nguồn điện cấp cho hệ dầm có dạng xung vuông hoặc nửa chu kỳ sin. Ở kỳ dẫn động (nửa chu kỳ đầu) điện áp được đặt vào các điện cực cố định (3), dòng điện chạy qua hệ dầm (2) sinh ra nhiệt làm cho hệ dầm nóng lên, giãn nở tạo chuyển vị theo phương thẳng đứng cho dầm trung tâm (1). Ở kỳ hồi vị (nửa chu kỳ tiếp theo), điện áp dẫn về 0, nhiệt được thoát ra để và không khí, hệ dầm được làm nguội, đỉnh dầm B được hồi về và chuẩn bị chu kỳ làm việc tiếp theo.



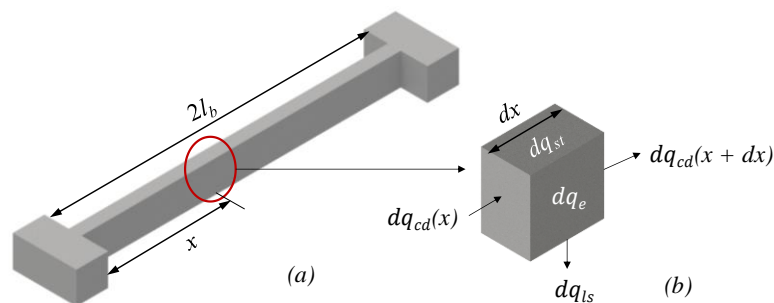
Hình 1. Cấu tạo của hệ dầm chữ V ở trạng thái chưa biến dạng.

Trong đó, $l_b = 450 \mu\text{m}$, $w_b = 4,5 \mu\text{m}$ và $t_b = 30 \mu\text{m}$ lần lượt là chiều dài, chiều rộng và chiều dày của mỗi dầm đơn; $l_s = 125 \mu\text{m}$, $w_s = 40 \mu\text{m}$ và $t_s = t_b$ là chiều dài, chiều rộng và chiều dày của dầm trung tâm; $\alpha = 2^\circ$ là góc nghiêng giữa các dầm đơn với phương ngang (OX); $g_a = 4 \mu\text{m}$ là khe hở không khí giữa cấu trúc dầm với chất nền (i.e. độ dày của lớp SiO₂).

Với kết cấu này, cần tính toán khảo sát giá trị điện áp tối thiểu để lực nhiệt thắng được lực đàn hồi của hệ dầm mới có thể tạo chuyển vị, khảo sát tần số lớn nhất mà hệ dầm có thể đáp ứng được do quán tính nhiệt [17, 18].

2.2. Mô hình truyền nhiệt

Trong quá trình hoạt động, nhiệt độ phân bố trong dầm đơn là không đồng đều (nhiệt độ cao nhất ở phía gần dầm trung tâm và giảm dần về phía điện cực). Quá trình truyền nhiệt giữa các lớp dọc theo chiều dài dầm có thể được mô tả bằng phương trình vi phân (1) [16], ở đó, mỗi dầm đơn được tách thành các phần tử vô cùng nhỏ và trong mỗi phần tử nhiệt độ phân bố đều. Xét quá trình truyền nhiệt trong dầm đơn tương đương có chiều dài $2l_b$ như hình 2.



Hình 2. Mô hình dầm thẳng tương đương.

Khi đó, tại một phần tử rất nhỏ có chiều dài dx trên dầm đơn có tọa độ là x , phương trình cân bằng nhiệt được viết như sau:

$$q_{st} = q_{cd} + q_{ls} + q_e \quad (1)$$

Trong đó: q_{st} là nhiệt lượng được tích trữ trong phân tử dầm; q_{cd} là nhiệt lượng truyền qua từng phần tử dầm; q_{ls} là nhiệt lượng truyền từ phân tử dầm qua khe hở không khí g_a ; q_e là nhiệt lượng sinh ra trong phân tử dầm khi có dòng điện chạy qua.

$$\text{Với: } q_{st} = C_p \cdot d \frac{dT}{dt} \cdot A \cdot dx; \quad q_{cd} = k_m \cdot A \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x+dx} - k_m \cdot A \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_x; \quad q_{ls} = -\frac{k_a \cdot S}{g_a} \cdot (T - T_0) \cdot w \cdot dx;$$

$$q_e = \frac{V^2}{4\rho \cdot L^2} \cdot A \cdot dx \quad (2)$$

Trong đó, C_p, d, k_m lần lượt là nhiệt dung riêng, khối lượng riêng và hệ số dẫn nhiệt của vật liệu silic; k_a, g_a là hệ số dẫn nhiệt của không khí và khe hở không khí giữa cấu trúc dẫn động với chất nền; S là hệ số hình dáng và gần đúng có thể xác định: $S = 0.6265 \left(\frac{t_b}{w_b} \right) + 1.1188$; $A = t_b \cdot w_b$ tiết diện dầm đơn; T và T_0 nhiệt độ của phân tử dầm và nhiệt độ ban đầu; t là thời gian; V là điện áp dẫn; ρ là điện trở suất của silic.

Thay (2) vào phương trình (1), ta có phương trình vi phân truyền nhiệt (3)

$$C \cdot d \cdot \frac{dT}{dt} = k_m \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{k_a \cdot S}{t_b \cdot g_a} \cdot (T - T_0) + \frac{V^2}{4\rho \cdot l_b^2} \quad (3)$$

Chúng ta nhận thấy rằng, nhiệt độ của phân tử dầm phụ thuộc vào thời gian (t) và vị trí không gian (ox). Giải phương trình (3) bằng phương pháp tách biến số ta có nghiệm (4):

$$T(x, t) = T_0 + q_e \cdot \frac{t_b \cdot g_a}{k_a \cdot S} \left(1 + C_1 \cdot e^{\tau x} + C_2 \cdot e^{-\tau x} \right) + \sum_{r=1}^{\infty} B_r \cdot e^{-[\gamma \cdot \lambda_r^2 + \beta] t} \cdot \sin(\lambda_r \cdot x) \quad (4)$$

Trong đó: B_r được xác định từ các điều kiện ban đầu $T(x, t=0) = T_0$

$$B_r = 2q_e \cdot \frac{t_b \cdot g_a}{k_a \cdot S} \cdot \left[\frac{4\tau^2 \cdot l_b^2}{r \cdot \pi \cdot (4\tau^2 \cdot l_b^2 + r^2 \cdot \pi^2)} \right] \cdot [\cos(r \cdot \pi) - 1] \quad (5)$$

C_1, C_2, λ_r được xác định từ các điều kiện biên $T(x=0, t) = T(x=2l_b, t) = T_0$

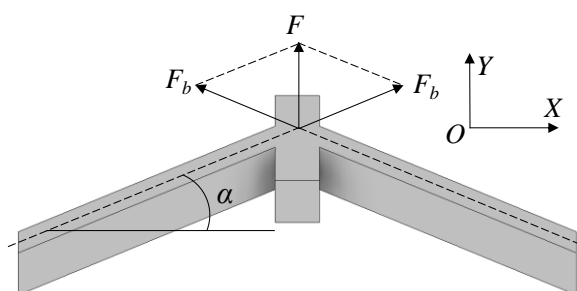
$$C_1 = q_e \cdot \frac{t_b \cdot g_a}{k_a \cdot S} \cdot \frac{(e^{-2\tau \cdot l_b} - 1)}{(e^{2\tau \cdot l_b} - e^{-2\tau \cdot l_b})}; C_2 = -q_e \cdot \frac{t_b \cdot g_a}{k_a \cdot S} \cdot \frac{(e^{2\tau \cdot l_b} - 1)}{(e^{2\tau \cdot l_b} - e^{-2\tau \cdot l_b})}; \lambda_r = \frac{r \cdot \pi}{2l_b} \quad (6)$$

r là số bậc của nghiệm nhiệt độ (T), thường ta chọn $r=1$;

$$\gamma \text{ và } \beta \text{ là các hệ số được tính theo công thức: } \gamma = \frac{k_m}{C \cdot d}; \beta = \frac{k_a \cdot S}{t_b \cdot g_a \cdot C \cdot d} \quad (7)$$

2.3. Tính toán lực nhiệt và chuyển vị

Khi có dòng điện chạy trong hệ dầm, nhiệt độ trong dầm tăng lên và chúng giãn nở dọc theo chiều dài của mỗi dầm đơn, do các dầm đơn được sắp xếp dạng chữ V, bên khi giãn nở dầm trung tâm sẽ dịch chuyển theo phương OY. Quá trình tính toán chi tiết đã được trình bày trong các tài liệu [16, 18].



Hình 3. Biểu diễn lực nhiệt tác dụng lên dầm trung tâm.

Tổng lực nhiệt tại đỉnh dầm trung tâm được xác định

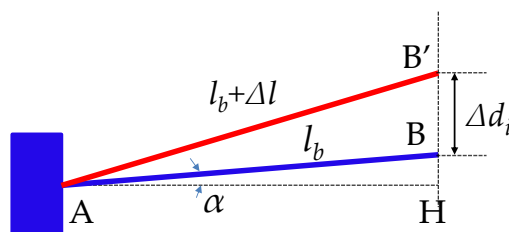
$$F = 2n \cdot F_b \cdot \sin \alpha = 2n \cdot A \cdot E \cdot \frac{\Delta l}{l_b} \cdot \sin \alpha \quad (8)$$

Trong đó: F_b là lực sinh ra dọc theo mỗi dầm đơn; Δl là tổng giãn nở dài dọc theo chiều dài dầm đơn l_b , α_l là hệ số giãn nở nhiệt của vật liệu silic; $E = 1.69 \times 10^5$ (MPa) là hệ số Young của vật liệu silic.

$$F_b = A \cdot E \cdot \frac{\Delta l}{l_b} \quad (9)$$

$$\Delta l = \sum_i \alpha_l \cdot (T_i - T_0) \cdot \Delta x \quad (10)$$

Chuyển vị của đỉnh dầm trung tâm B (gọi là Δd_i) được biểu diễn như hình 4 [17].



Hình 4. Chuyển vị của đỉnh dầm trung tâm.

Từ hình vẽ 4, có thể xác định được chuyển vị theo phương thẳng đứng của mỗi dầm đơn:

$$\Delta d_i = \sqrt{(l_b + \Delta l)^2 - (l_b \cos \alpha)^2} - l_b \sin \alpha \quad (11)$$

Do hệ n dầm song song, nên chuyển vị của hệ dầm chính là chuyển vị của 1 dầm đơn cộng với độ giãn nở của dầm xương cá (dầm xương cá được giả thiết là giãn nở đều về 2 phía).

$$\Delta d = \sqrt{(l_b + \Delta l)^2 - (l_b \cos \alpha)^2} - l_b \sin \alpha + \frac{1}{2} \Delta l_s \quad (12)$$

3. QUY TRÌNH CHẾ TẠO SOI-MEMS VÀ PHÚN XẠ BỀ MẶT

Cấu trúc bộ vi kích hoạt được chế tạo từ tấm silic kép (SOI-Silicon on Insulator) dựa trên công nghệ vi cơ khối, gồm 05 bước tiêu chuẩn như đã trình bày chi tiết tại [16]. Tấm SIO gồm 3 lớp: Lớp Silic trên cùng dày 30 μm, lớp SiO₂ ở giữa dày 4 μm và lớp nền dưới cùng dày 450 μm. Sau khi chế tạo bằng công nghệ SOI-MEMS truyền thống, nhóm nghiên cứu đã thực hiện bổ sung thêm bước thứ 6 (phún xạ bề mặt bằng vật liệu Platinum), các thông số cơ bản được chỉ ra như bảng 1.

Bảng 1. Các thông số cơ bản của quy trình phún xạ.

Tham số	Giá trị và đơn vị tính	Tham số	Giá trị và đơn vị tính
Vật liệu phún xạ	Platinum 99.99%	Dòng khí Ar	30 (sccm)
Áp suất buồng hút chân không	5×10^{-6} Torr	Áp suất phún xạ	5×10^{-3} Torr
Nhiệt độ	25 °C	Công suất nguồn	60 W

Với 03 mẫu vi kích hoạt được phún xạ ở các thời gian khác nhau (1,5 phút, 3 phút và 6 phút); lớp vật liệu Platinum phủ lên bề mặt ước lượng chiều dày tương ứng khoảng 10 nm, 20 nm và 50 nm [19]. Điện trở trung bình R_i của từng mẫu sau phún xạ tương ứng là 220 Ω, 164 Ω và 107 Ω. Điện trở suất tương đương của các mẫu ρ_{01} , ρ_{02} và ρ_{03} được xác định theo công thức:

$$\rho_{0i} = n \cdot R_i \cdot \frac{A}{2l_b} \quad (13)$$

Bảng 2. Các thông số đặc tính của vật liệu silic.

d (kg/m ³)	E (MPa)	k_a (W/m.K)	C_p (J/kg.K)	ρ_0 (Ω.m)	ρ_{01} (Ω.m)	ρ_{02} (Ω.m)	ρ_{03} (Ω.m)	λ (1/K)
2330	$1.69 \cdot 10^5$	0.0257	712	$230 \cdot 10^{-6}$	$198 \cdot 10^{-6}$	$148 \cdot 10^{-6}$	$96 \cdot 10^{-6}$	$1.25 \cdot 10^{-3}$



Hình 5. Hình ảnh bộ vi kích hoạt 6 dầm chữ V sau khi phún xạ.

Các thông số đặc tính của vật liệu silic được liệt kê tại bảng 2. Ở đó, ρ_0 , ρ_{01} , ρ_{02} và ρ_{03} lần lượt là điện trở suất, ở nhiệt độ phòng 25 °C, của dầm đơn tương ứng với các mẫu: chưa phún xạ, phún xạ 1,5 phút, 3 phút và 6 phút. Kết quả thực nghiệm cho thấy, điện trở suất của hệ dầm giảm tương ứng 1,16; 1,55 và 2,4 lần so với khi chưa phún xạ. Tuy nhiên, đối với mẫu phún xạ 6 phút xảy ra hiện tượng bị dính, phải dùng tác động cơ học để loại bỏ trước khi cấp nguồn thí nghiệm.

Điện trở suất của vật liệu phụ thuộc vào nhiệt độ và được xác định:

$$\rho = \rho_0 \cdot [1 + \lambda \cdot (T - T_0)] \quad (14)$$

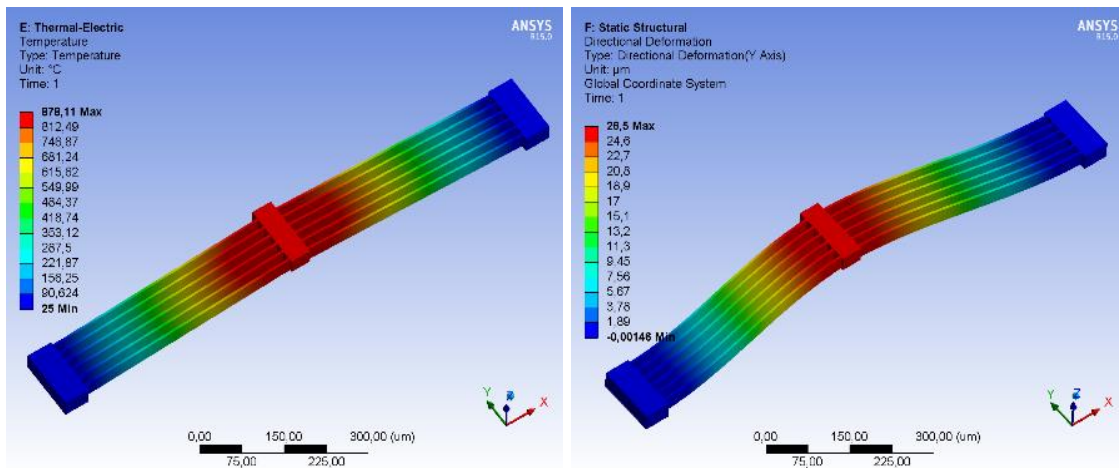
Trong đó, λ là hệ số nhiệt của điện trở suất.

Ảnh chụp từ kính hiển vi mẫu vi kích hoạt sau khi phun xạ như hình 5.

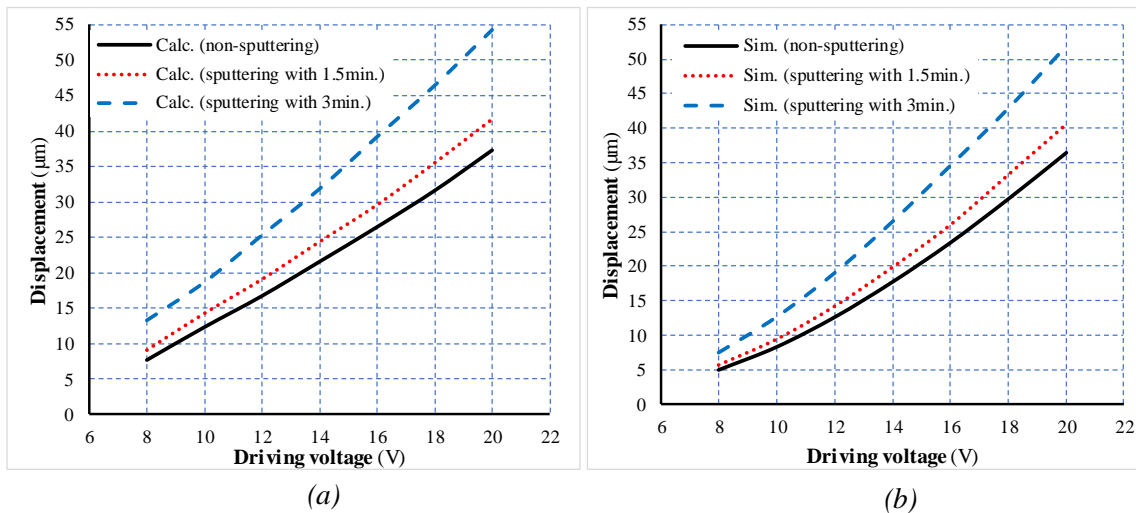
4. KẾT QUẢ TÍNH TOÁN, MÔ PHỎNG VÀ THỰC NGHIỆM

4.1. Kết quả tính toán và mô phỏng

Mô hình 3D của bộ vi kích hoạt có các thông số và đặc tính như trong bảng 1, 2 và 3 được thiết kế, mô phỏng bằng phần mềm ANSYS. Ví dụ về kết quả mô phỏng nhiệt độ, chuyển vị của hệ đảm ứng với điện áp 14 V được minh họa như hình 6, kết quả so sánh giữa tính toán và mô phỏng được thể hiện như hình 7.



Hình 6. Kết quả mô phỏng nhiệt độ và chuyển vị của mẫu phun xạ 3 phút, điện áp dẫn có biên độ 10 V.

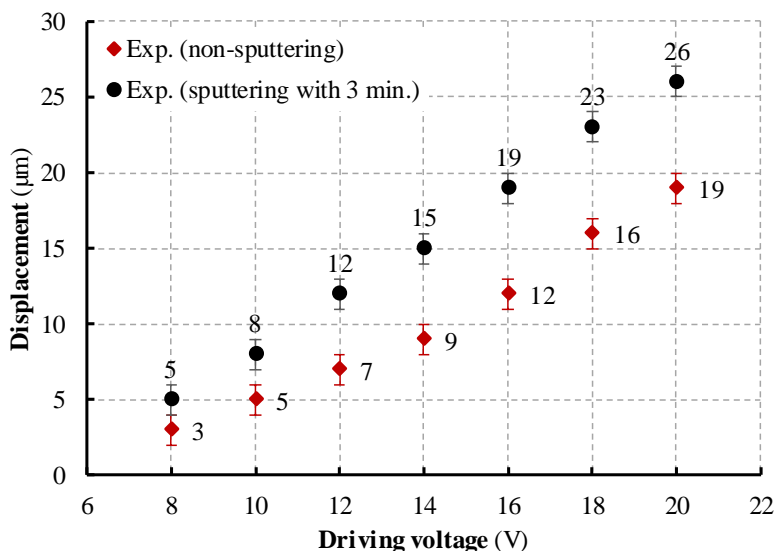


Hình 7. Đồ thị so sánh kết quả tính toán và mô phỏng giữa các mẫu phun xạ và không phun xạ (a) Kết quả chuyển vị theo tính toán; (b) Kết quả chuyển vị theo mô phỏng.

Chuyển vị lớn nhất của các mẫu tương ứng với dải điện áp từ 8 V đến 20 V được biểu diễn thông qua các đồ thị hình 8. Kết quả tính toán và mô phỏng cho thấy, chuyển vị lớn nhất giữa các mẫu phun xạ 1,5 phút và 3 phút cao hơn mẫu không phun xạ tương ứng khoảng 15% và 45%. Đối với mẫu phun xạ 3 phút, ở biên độ điện áp 20 V chuyển vị lớn nhất theo tính toán và mô

phông là 54 μm và 52 μm , trong khi đối với mẫu không phun xạ trong điều kiện tương tự chỉ đạt chuyển vị lần lượt là 37 μm và 36 μm . Những kết quả này khẳng định rằng, khi thực hiện phun xạ thì hiệu quả làm việc của các bộ vi kích hoạt tăng lên đáng kể. Thời gian phun xạ càng lâu thì lớp platin càng dày, điện trở càng giảm, tuy nhiên, nếu phun xạ quá lâu sẽ xảy ra hiện tượng bị dính giữa các cấu trúc chuyển động với chất nền. Với cấu trúc và kích thước như đã trình bày ở trên, các thí nghiệm cho thấy, thời gian phun xạ khoảng 3 phút là phù hợp.

4.2. Kết quả thực nghiệm



Hình 8. Đồ thị so sánh chuyển vị lớn nhất của mẫu chưa phun xạ và mẫu phun xạ 3 phút.

Sau khi chế tạo, các mẫu đã phun xạ và chưa phun xạ đã được kiểm nghiệm, đo đạc cẩn thận, kết quả chuyển vị thực nghiệm được so sánh như đồ thị hình 9. Nói chung, các chuyển vị thực nghiệm của mẫu được phun xạ lớn hơn so với mẫu không phun xạ tăng đáng kể trong dải điện áp từ 8 V đến 20 V (Độ lệch trung bình giữa 2 mẫu là 57,7%). Hơn nữa, kết quả đo thực nghiệm thấp hơn so với tính toán và mô phỏng, nguyên nhân là do sụt áp tại các điểm tiếp xúc cũng như tính phi tuyến của vật liệu silicon. Các kết quả thí nghiệm đã khẳng định chắc chắn hơn hiệu quả của quá trình phun xạ đối với các vi kích hoạt sử dụng vật liệu silic.

5. KẾT LUẬN

Bài báo này trình bày phương pháp tính toán truyền nhiệt trong hệ dầm chữ V, xác định lực và chuyển vị của bộ vi kích hoạt. Thử nghiệm bổ sung quy trình phun xạ sau khi các bộ vi kích hoạt được chế tạo bằng quy trình SOI-MEMS truyền thống. Ba mẫu vi kích hoạt dạng chữ V được thử nghiệm phun xạ bằng vật liệu platin với thời gian tương ứng 1,5 phút, 3 phút và 6 phút. Hiệu quả của phương pháp này được xác định thông qua kết quả tính toán, mô phỏng và thực nghiệm. Các kết quả tính toán lý thuyết cho thấy, mẫu phun xạ trong 3 phút có thể tạo ra dịch chuyển lớn hơn khoảng 45% so với mẫu không phun xạ ở dải điện áp từ 8 V đến 20 V. Kết quả thí nghiệm cho thấy hiệu quả tốt hơn với chuyển vị tăng hơn 57,7% so với mẫu không phun xạ.

Tuy nhiên, kết quả thực nghiệm cũng cho thấy thời gian phun xạ cần được tính toán phù hợp với chiều dày của lớp thiết bị cũng như khe hở khí g_a giữa lớp silicon và lớp chất nền. Với kích thước và kết cấu của bộ vi kích hoạt trình bày trong bài viết, thì thời gian phun xạ khoảng 3 phút là phù hợp, khi thực hiện phun xạ lâu hơn có thể xảy ra hiện tượng bị dính.

Trong các nghiên cứu tiếp theo, nhóm nghiên cứu sẽ tiếp tục nghiên cứu, đánh giá hiệu quả của phương pháp và xem xét áp dụng đối với các cấu trúc khác như dạng dầm chữ U, chữ Z.

Đánh giá và xây dựng quy trình chuẩn chế tạo các vi cơ cấu phù hợp với các điều kiện máy móc tại Việt Nam và giảm chi phí sản xuất.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Tập đoàn Vingroup – Công ty CP và hỗ trợ bởi Chương trình học bổng thạc sĩ, tiến sĩ trong nước của Quỹ Đổi mới sáng tạo Vingroup (VINIF), Viện Nghiên cứu Dữ liệu lớn, mã số: VINIF.2021.ThS.102”.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Fang, K.; Hu, T.; Jiang, X.; Zhao, Y. “Research on a MEMS based encrypted rotary safety and arming device”, *Sensor Actuators A Phys.*, 301, 111781 (2020).
- [2]. Zhaoxin Lao, Neng Xia, Shijie Wang, Tiantian Xu, Xinyu Wu and Li Zhang, “Tethered and Untethered 3D Microactuators Fabricated by Two-Photon Polymerization: A Review”, *Micromachines (Basel)*, 12(4): 465 (2021).
- [3]. Zhang Z., Yu Y., Liu X., Zhang X., “Dynamic modelling and analysis of V- and Z-shaped electrothermal Microactuators”, *Microsystem Technologies.*, 23(8), 3775–3789 (2017).
- [4]. Z. Zhang, Y. Yu, X. Liu and X. Zhang, “A comparison model of V- and Z-shaped electrothermal Microactuators”, 2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Beijing, 1025-1030 (2015).
- [5]. Li, X.; Zhao, Y.; Hu, T.; Xu, W.; Zhao, Y.; Bai, Y.; Ren, W, “Design of a large displacement thermal actuator with a cascaded V-beam amplification for MEMS safety-and-arming devices”, *Microsystem Technologies*, 21, 2367–2374 (2015).
- [6]. Dongpeng Zhang, Anjiang Cai, Yulong Zhao and Tengjiang Hu, “Macro Modeling of V-Shaped Electro-Thermal MEMS Actuator with Human Error Factor”, *Micromachines*, 12, 622, (2021).
- [7]. HamedMajidi Fard-VatanMohsenHamedi, “Design, analysis and fabrication of a novel hybrid electrothermal microgripper in microassembly cell”, *Microelectronic Engineering Volume 231*, 15, 111374, (2020).
- [8]. Guoning Si, Liangying Sun, Zhuo Zhang and Xuping Zhang, “Design, Fabrication, and Testing of a Novel 3D 3-Fingered Electrothermal Microgripper with Multiple Degrees of Freedom”, *Micromachines*, 12(4), 444, (2021).
- [9]. Hu T., Zhao Y., Li X., Zhao Y., Bai Y., “Integration design of MEMS electro-thermal safety-and-arming devices”. *Microsyst. Technol.*, 23(4), 953–958, (2017).
- [10]. Shen, X.; Chen, X., “Mechanical performance of a cascaded V-shaped electrothermal actuator”, *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, 10, 379, (2013).
- [11]. Park, J.S.; Chu, L.L.; Oliver, A.D., “Gianchandani, Y.B. Bent-beam electrothermal actuators-Part II: Linear and rotary microengines”, *J. Microelectromech. Syst.*, 10, 255–262, (2001).
- [12]. Zhang Z., Zhang W., Wu Q., Yu Y., Liu X., Zhang X., “Closed-form modelling and design analysis of V- and Z-shaped electrothermal Microactuators”, *J. Micromech. Microeng.*, 27(1), 015023, (2017).
- [13]. Lott C. D., McLain T. W., Harb J. N., Howell L. L., “Modeling the thermal behavior of a surface-micromachined linear-displacement thermomechanical microactuator”, *Sens. Actuators: A Phys.*, 101(1–2), 239–250, (2002).
- [14]. Shan T., Qi X., Cui L., Zhou X., “Thermal behavior modeling and characteristics analysis of electrothermal Microactuators”. *Microsystem Technologies*, 23(7), 2629–2640, (2017).
- [15]. O. Fogel, S. Winter, E. Benjamin, S. Krylov, Z. Kotler, Z. Zalevsky, “3D printing of functional metallic microstructures and its implementation in electrothermal actuators”, *Additive Manufacturing*, 21, 307-311, (2018).
- [16]. Dzung Tien Nguyen, Kien Trung Hoang, and Phuc Hong Pham, “Larger displacement of silicon electrothermal V-shaped actuator using surface sputtering process”, *Microsystem Technologies*, Volume 27(5), p. 1985-1991, (2021).
- [17]. NT Dzung, PH Phuc, NQ Dich, ND Phuoc, “Iterative Learning Control for V-Shaped Electrothermal Microactuator”, *Electronics* 8(12), 1410, p. 1-14, (2019).
- [18]. Kien Trung Hoang, Dzung Tien Nguyen, and Phuc Hong Pham “Impact of design parameters on working stability of the V-Shaped Electrothermal Microactuator”, *Microsystem Technologies.*, 26, 1479–1487, (2020).

- [19]. Nguyen Xuan Thai et al., “Effective monitoring and classification of hydrogen and ammonia gases with a bilayer Pt/SnO₂ thin film sensor”, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 45, Issue 3, pp 2418-2428, (2020).

ABSTRACT

Lower driving voltage for V-shaped Electrothermal Microactuator based on the surface sputtering process

This research proposes a method to reduce the resistance of silicon-based V-Shaped Electrothermal Microactuator (VEM) by applying a surface sputtering process. Four VEM counterparts are fabricated by the traditional SOI-MEMS technology, three of them are processed additionally by sputtering technique to deposit a thin layer of platinum on top surface with different sputtering time, and the other is non-sputtering. Measured results show that the average resistance of sputtered structures is approximately 1.16, 1.55 and 2.4 times lower than the non-sputtering sample, corresponding to the sputtering time of 1.5, 3 and 6 minutes. The displacements of the VEM are calculated and simulated to evaluate the advantages of the sputtering method. The simulation result confirmed that the maximum displacement of sputtered VEM is almost 1.45 times larger than that of non-sputtering ones in the range of voltage from 8 V to 20 V. The experimental displacements are also measured to validate the better performance of sputtered samples.

Keywords: Surface sputtering process; Resistivity; V-shaped Electrothermal Microactuator; SOI-MEMS micromachining.