

XÁC ĐỊNH HỆ SỐ HÌNH DẠNG TRONG MÔ HÌNH TRUYỀN NHIỆT CỦA VI CHẤP HÀNH ĐIỆN NHIỆT DẠNG CHỮ V BẰNG PHẦN MỀM ANSYS WORKBENCH

Hoàng Trung Kiên^{1,*}, Vũ Văn Thế¹

¹Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

Tóm tắt

Bài báo đề xuất phương pháp xác định hệ số hình dạng trong mô hình truyền nhiệt của vi chấp hành điện nhiệt chữ V bằng phần mềm ANSYS Workbench. Mô hình 2D được xây dựng để khảo sát nhiệt lượng truyền từ mặt cắt dầm đến nền qua một lớp không khí mỏng. Mô hình này có thể được dùng để xác định ảnh hưởng của chiều rộng và chiều dày dầm đến hệ số hình dạng. Kết quả của bài báo cung cấp một phương pháp hiệu quả để xác định hệ số hình dạng trong các mô hình truyền nhiệt lý thuyết cho vi chấp hành điện nhiệt chữ V và cũng có thể áp dụng cho các mô hình truyền nhiệt tương tự.

Từ khóa: Hệ số hình dạng; mô hình truyền nhiệt; vi chấp hành điện nhiệt chữ V.

1. Giới thiệu

Vi chấp hành điện nhiệt dạng chữ V là bộ phận tạo ra chuyển động và lực để dẫn động các hệ thống vi cơ điện tử MEMS. Bộ chấp hành làm việc dựa trên nguyên lý dẫn nở nhiệt của hệ dầm mảnh dạng chữ V khi được cấp điện. Như vậy, cần có mô hình toán để mô tả các quá trình chuyển đổi năng lượng điện-nhiệt. Quá trình này thường rất phức tạp do sự ảnh hưởng của nhiều yếu tố phi tuyến như tính chất dẫn nhiệt của vật liệu, môi trường, không gian làm việc, kích thước của dầm nhiệt. Đây cũng là chủ đề nhận được nhiều sự quan tâm của các nhà nghiên cứu và đã có nhiều công bố liên quan. Các phương pháp toán học thường được sử dụng để xây dựng mô hình truyền nhiệt bao gồm: giải tích trực tiếp, sai phân hữu hạn, điểm nút, phần tử hữu hạn, mạch điện tương đương.

Mô hình toán sử dụng phương pháp giải tích trực tiếp được nhiều tác giả áp dụng trong việc xác định nhiệt độ phân bố trên dầm. Trong [1], mô hình truyền nhiệt trạng thái ổn định dưới dạng phương trình vi phân bậc hai đã được xây dựng một cách chi tiết. Trong mô hình, tác giả có kể đến ảnh hưởng của truyền nhiệt qua khe hở không khí giữa lớp cấu trúc và lớp nền. Mô hình truyền nhiệt này đã được nhiều tác giả áp dụng trong công bố sau này như trong các công bố [2, 3]. Trong [4], các tác giả đã kể thêm hiện tượng mất nhiệt qua thanh đẩy ở trung tâm (shuttle). Để mô tả hiện tượng truyền nhiệt qua khe hở không khí giữa lớp cấu trúc và lớp nền các công bố trên đều đã sử dụng hệ số hình dạng của dầm [1-4]. Hệ số hình dạng của dầm là một đại lượng không thứ

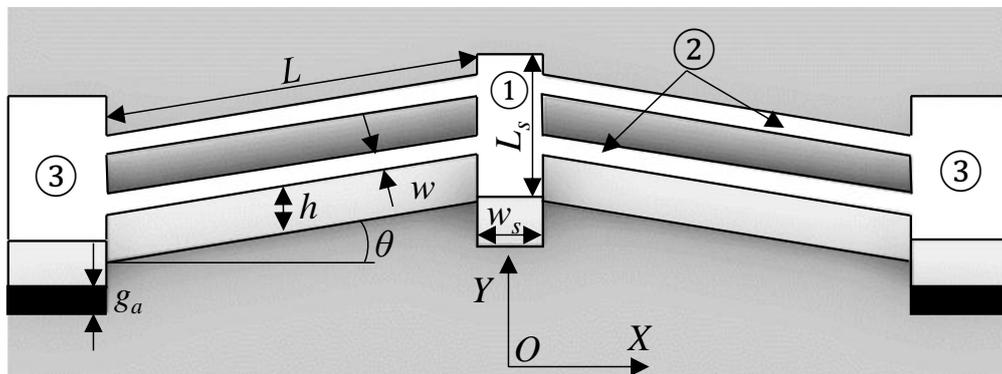
* Email: kienhoangtrung87@gmail.com

nguyên đại diện cho khả năng truyền nhiệt từ dầm đến lớp nền qua khe hở không khí. Như vậy, hệ số hình dạng là một thông số quan trọng trong các mô hình toán mô tả quá trình truyền nhiệt của vi chấp hành. Đối với hệ thống có kích thước nhỏ cỡ μm thì việc xác định hệ số này bằng thực nghiệm là rất phức tạp và khó khăn.

Để xác định được giá trị của hệ số hình dạng, phương pháp mô phỏng số đã được đề xuất trong [1]. Trong đó hệ số hình dạng đã được xây dựng dưới dạng công thức tổng quát thông qua mô phỏng số cho dải khe hở từ $0,5 \mu\text{m}$ đến $3 \mu\text{m}$. Công thức này đã được sử dụng phổ biến trong mô hình truyền nhiệt của các công bố sau này như [5, 6]. Như vậy, công thức đã đề xuất chỉ áp dụng cho khoảng khe hở lớp không khí đến $3 \mu\text{m}$. Đối với vi chấp hành điện nhiệt chữ V được chế tạo bằng công nghệ SOI-MEMS [7] thì khe hở lớp không khí phụ thuộc vào lớp đệm SiO_2 của phiên SOI (Silicon On Insulator) có thể lên đến $4 \mu\text{m}$. Do đó, bài báo tập trung nghiên cứu xây dựng công thức tính hệ số hình dạng cho cấu trúc vi chấp hành có khe hở bằng $4 \mu\text{m}$ và chiều dày lớp cấu trúc bằng $30 \mu\text{m}$. Điều này được thực hiện dựa trên các kết quả tính toán và khảo sát bằng phần mềm ANSYS Workbench.

2. Mô hình truyền nhiệt của vi chấp hành điện nhiệt chữ V

Cấu trúc của bộ vi chấp hành điện nhiệt chữ V được biểu diễn như trên Hình 1. Cấu tạo của bộ vi chấp hành gồm ba phần chính: thanh đẩy (1), hệ dầm nghiêng (2) và các điện cực cố định (3). Thanh đẩy ở trung tâm của bộ chấp hành và được treo bởi hệ dầm đối xứng có dạng chữ V. Các thanh dầm tạo với phương OX một góc nghiêng θ (để định hướng chuyển động) và đầu còn lại của dầm ngàm với hai điện cực cố định.



Lớp nền
 Lớp SiO_2
 Lớp cấu trúc

Hình 1. Cấu trúc bộ chấp hành điện nhiệt chữ V.

Các thông số kích thước của vi chấp hành trên hình vẽ được cho như trong bảng 1.

Bảng 1. Các thông số kích thước [8]

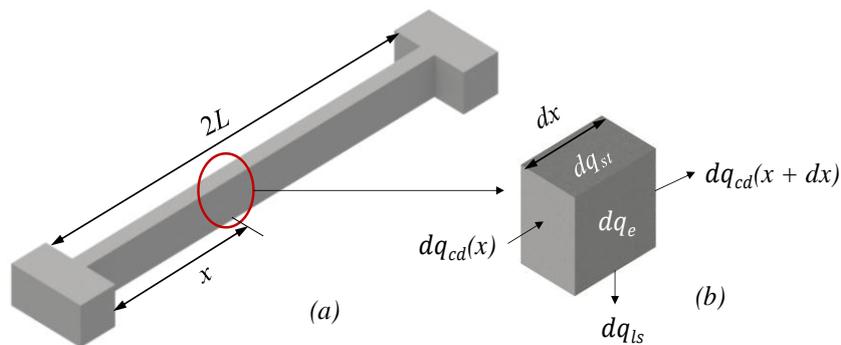
Ký hiệu	Ý nghĩa	Giá trị
L	Chiều dài dầm đơn	750 μm
w	Chiều rộng dầm	6 μm
h	Chiều dày dầm	30 μm
θ	Góc nghiêng dầm so với phương X	2°
L_s	Chiều dài thanh đẩy	300 μm
w_s	Chiều rộng thanh đẩy	50 μm
ga	Khe hở giữa lớp cấu trúc và lớp nền	4 μm

Nguyên lý làm việc: Khi đặt điện áp vào hai điện cực ③ sẽ có dòng điện chạy qua các thanh dầm mảnh và sinh nhiệt. Các dầm sẽ nóng lên và dẫn nở dài theo phương dọc trục tạo thành hợp lực đẩy thanh đẩy chuyển động theo phương OY. Khi điện áp bằng không, nhiệt độ trên các thanh dầm giảm dần về nhiệt độ môi trường làm cho dầm co lại và kéo thanh đẩy về vị trí ban đầu.

Để đơn giản hóa việc xây dựng mô hình toán học, các giả thiết cho mô hình truyền nhiệt theo phương pháp giải tích được sử dụng gồm:

- Coi các tính chất vật liệu là hằng số trong quá trình thay đổi nhiệt độ;
- Bỏ qua sự truyền nhiệt từ thanh đẩy ① đến nền qua khe hở không khí ga;
- Coi nhiệt độ trên các điện cực ③ và nền bằng nhiệt độ môi trường;
- Bỏ qua truyền nhiệt do đối lưu và bức xạ nhiệt trong môi trường không khí;
- Truyền nhiệt được coi là một chiều, dọc theo chiều dài của cặp dầm chữ V (không kể đến ảnh hưởng của góc nghiêng dầm).

Với các giả thiết như trên, mô hình dầm mảnh tương đương với chiều dài bằng tổng chiều dài của cặp dầm chữ V như trên hình 2.



Hình 2. Dầm mảnh tương đương (a) và phân tố dầm (b).

Phương trình mô tả quá trình truyền nhiệt trong một cặp dầm tương đương (Hình 2) có dạng như sau [9]:

$$C_p D_s \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{k_a S}{h g_a} (T - T_0) + \frac{U^2}{4 \rho_0 L^2} \quad (1)$$

trong đó: C_p , D_s và k_s lần lượt là nhiệt dung riêng, khối lượng riêng, hệ số truyền nhiệt của vật liệu; h - độ dày của dầm; k_a , g_a lần lượt là hệ số truyền nhiệt của không khí, khe hở lớp không khí giữa dầm và nền; S - hệ số hình dạng của dầm (xác định bằng mô phỏng); U - điện áp dẫn; ρ_0 - điện trở suất tại nhiệt độ môi trường; T và T_0 lần lượt là nhiệt độ phân bố trên dầm và nhiệt độ môi trường.

Hệ số S được suy ra từ số hạng thứ hai ở vế phải của (1):

$$q_s = \frac{k_a S}{h g_a} (T - T_0) \Rightarrow S = \frac{h g_a}{k_a (T - T_0)} q_s \quad (2)$$

trong đó: q_s là mật độ nhiệt lượng trên mặt cắt dầm. Theo (2), khi biết trước các thông số kích thước g_a , h , hệ số truyền nhiệt của không khí k_a , nhiệt độ trên mặt cắt dầm T , nhiệt độ môi trường và mật độ nhiệt lượng q_s , hệ số S hoàn toàn được xác định.

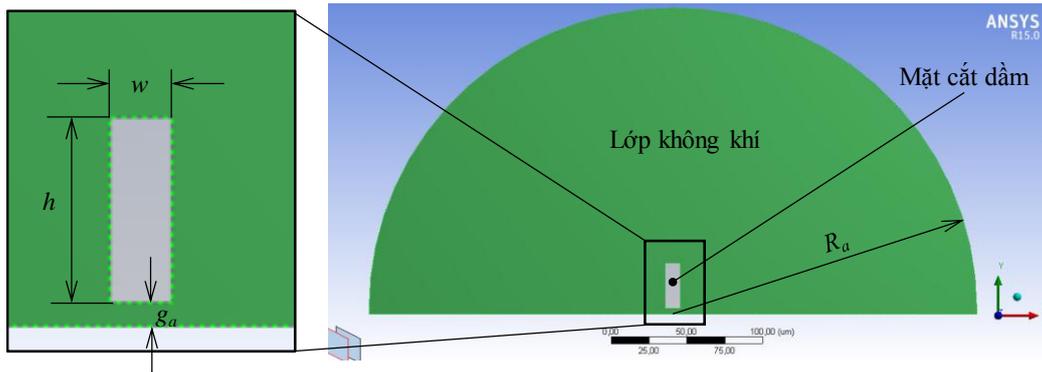
3. Xây dựng mô hình trong phần mềm ANSYS Workbench

Trong ANSYS, phần mềm Workbench có thể được dùng để xây dựng mô hình hình học dạng 1D, 2D và 3D cùng với hàng loạt các mô đun để xây dựng mô hình và mô phỏng khác nhau. Để xác định hệ số hình dạng S trong phương trình truyền nhiệt (1), công cụ *Steady-State Thermal* (mô phỏng trạng thái nhiệt ổn định) sẽ được sử dụng. Các thông số tính chất của vật liệu dầm và môi trường được cho như trong bảng 2.

Bảng 2. Các thông số dùng trong tính toán

Tên gọi	Ký hiệu	Giá trị
Hệ số truyền nhiệt của silic	k_s	148×10^6 pW/ μ m [1]
Hệ số truyền nhiệt của không khí	k_a	$0,0257 \times 10^6$ pW/ μ m [9]
Nhiệt độ môi trường	T_0	25°C
Mật độ nhiệt lượng	q_s	5×10^5 pW/ μ m ²

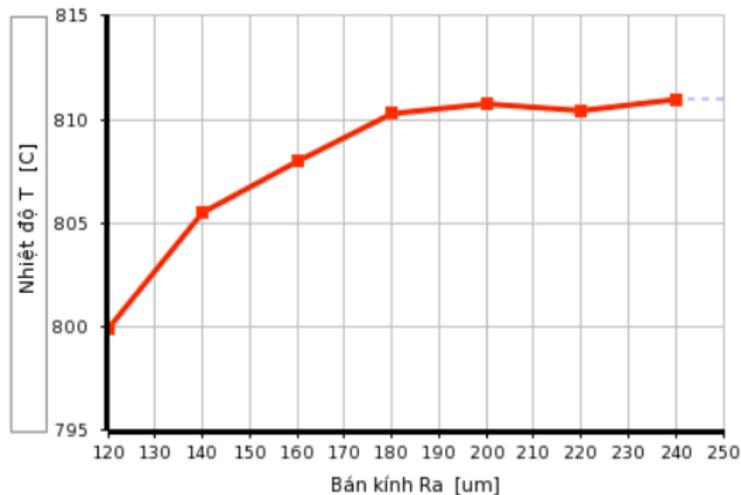
Mô hình hình học dạng 2D mô tả một mặt cắt dầm hình chữ nhật đặt trong môi trường không khí có bán kính là R_a được xây dựng như hình 3.



Hình 3. Mô hình 2D của mặt cắt dầm trong môi trường không khí.

Trong mô hình mô phỏng, bán kính của khối không khí R_a nếu quá nhỏ dẫn đến không phù hợp với yêu cầu bài toán (chỉ xét truyền nhiệt qua khe hở g_a), nếu quá lớn sẽ làm tăng số phần tử và tăng thời gian tính toán. Vì vậy, giá trị của bán kính R_a cần được khảo sát và lựa chọn cho phù hợp với yêu cầu bài toán.

Chọn chiều rộng của mặt cắt dầm $w = 10 \mu\text{m}$, các thông số kích thước và môi trường như trong bảng 1, ảnh hưởng của bán kính không khí R_a đến nhiệt độ trên mặt cắt dầm được mô phỏng và cho kết quả như hình 4.



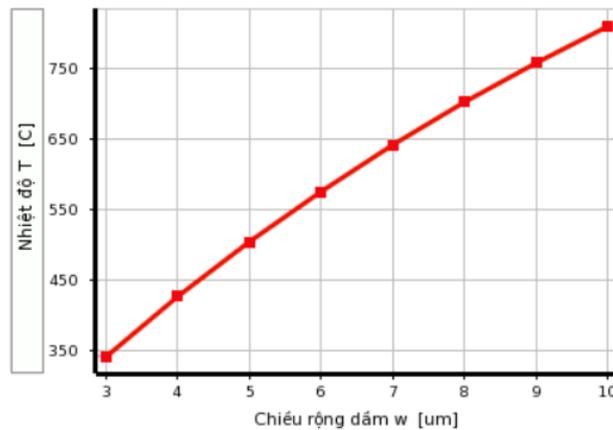
Hình 4. Ảnh hưởng của bán kính đến nhiệt độ trên mặt cắt dầm.

Theo đồ thị khảo sát, nhiệt độ trên mặt cắt dầm tăng theo bán kính lớp không khí và đạt trạng thái bão hòa khi bán kính không khí lớn hơn $180 \mu\text{m}$. Như vậy, giá trị của bán kính lớp không khí phù hợp với mô hình mô phỏng được chọn là $R_a = 200 \mu\text{m}$.

Dựa trên mô hình hình học được xây dựng, việc gán vật liệu, chia lưới và đặt điều kiện biên lần lượt được thực hiện trong khối *Steady-State Thermal*. Điều kiện biên là nhiệt độ trên toàn bộ phần mép ngoài của lớp không khí được giả thiết bằng nhiệt độ của môi trường T_0 , mật độ nhiệt lượng q_s được gán trên phần mặt cắt dầm.

4. Kết quả tính toán hệ số hình dạng dầm và thảo luận

Theo công thức (2), với các thông số đã cho như trong bảng 1, hệ số hình dạng S sẽ hoàn toàn xác định khi biết thêm nhiệt độ của mặt cắt dầm T . Như vậy, chỉ cần mô phỏng xác định nhiệt độ của mặt cắt dầm có thể tính được hệ số hình dạng S thông qua công thức (2). Kết quả mô phỏng xác định nhiệt độ của mặt cắt dầm khi chiều rộng dầm được tham số hóa trong khoảng từ 3 μm đến 10 μm được chỉ ra như đồ thị trên hình 5.



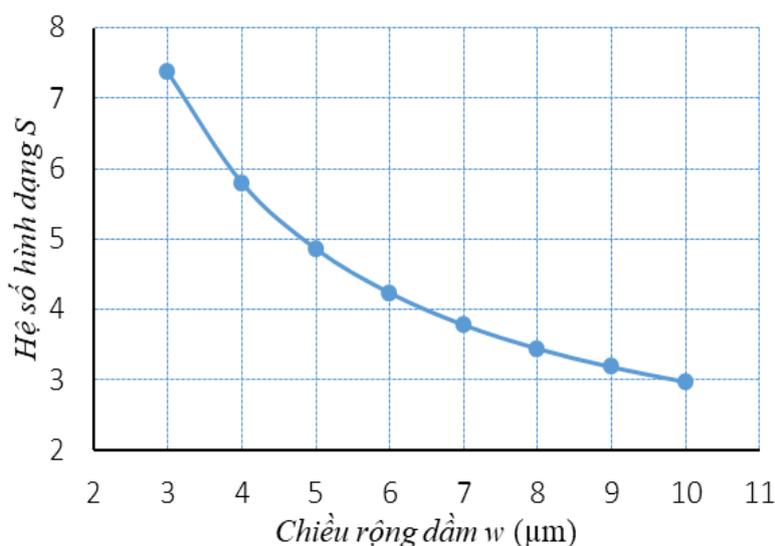
Hình 5. Ảnh hưởng của chiều rộng dầm đến nhiệt độ trên mặt cắt dầm.

Theo đồ thị mô phỏng, nhiệt độ của mặt cắt dầm tăng khá nhanh khi tăng chiều rộng dầm. Điều này cho thấy chiều rộng dầm ảnh hưởng rất lớn đến khả năng truyền nhiệt qua khe hở không khí giữa lớp cấu trúc và lớp nền. Với chiều dày lớp cấu trúc (chiều dày dầm h) và lớp đệm SiO_2 (khe hở không khí g_a) phụ thuộc vào phiên SOI dùng để chế tạo vi chấp hành, thì hệ số hình dạng chủ yếu phụ thuộc vào kích thước thiết kế chiều rộng dầm w .

Từ số liệu nhiệt độ được xác định từ mô phỏng, hệ số hình dạng S được tính toán theo công thức (2) và có giá trị như trong bảng 3. Mối quan hệ giữa hệ số hình dạng và chiều rộng dầm được biểu diễn như trên hình 6.

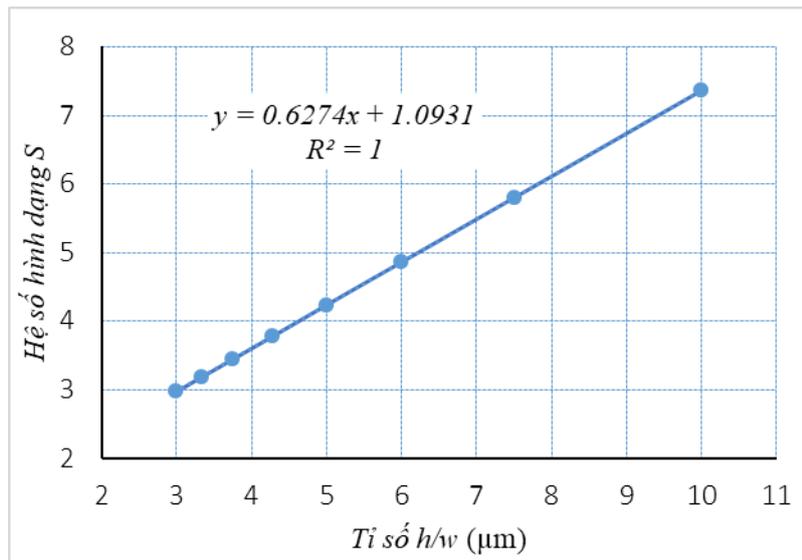
Bảng 3. Kết quả tính toán hệ số hình dạng theo nhiệt độ

w (μm)	T (°C)	S
3	342	7,36
4	431	5,80
5	515	4,86
6	579	4,24
7	645	3,78
8	709	3,44
9	760	3,18
10	810	2,97



Hình 6. Mối quan hệ giữa hệ số hình dạng và chiều rộng dầm.

Như vậy, hệ số hình dạng giảm khi tăng chiều rộng dầm điều này đồng nghĩa với khả năng truyền nhiệt từ lớp cấu trúc đến nền bị giảm xuống. Mối quan hệ giữa hệ số hình dạng với tỉ số kích thước chiều dày trên chiều rộng dầm h/w được biểu diễn như trên đồ thị hình 7.



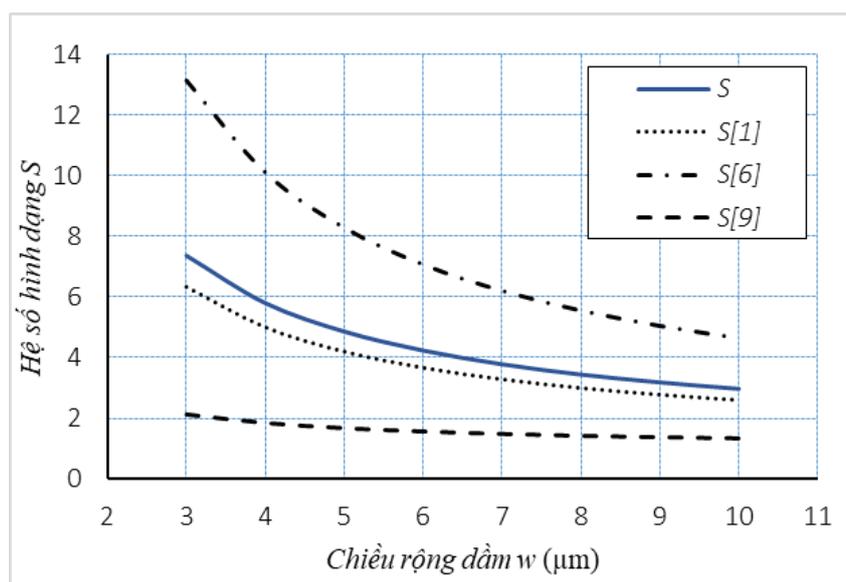
Hình 7. Mối quan hệ giữa hệ số hình dạng và tỉ số kích thước h/w .

Theo đồ thị, hệ số hình dạng phụ thuộc tuyến tính với tỉ số kích thước h/w . Bằng cách sử dụng phương pháp hồi quy tuyến tính trong EXCEL, một hàm số gần đúng (với hệ số phù hợp R như trên đồ thị hình 7) mô tả mối quan hệ giữa hệ số hình dạng S và tỉ số kích thước dầm được xác định như sau:

$$S = 0,6274 \frac{h}{w} + 1,0931 \quad (3)$$

Như vậy, hệ số hình dạng S được xác định trong trường hợp này khác với công thức tính S đã được đề xuất và sử dụng trong [1, 6, 9].

Đồ thị so sánh kết quả tính toán hệ số hình dạng theo công thức (3) với các công thức trong các công bố trước được biểu diễn trên hình 8.



Hình 8. Đồ thị so sánh hệ số hình dạng.

Theo đồ thị, giá trị hệ số hình dạng được xác định theo công thức (3) và theo các tài liệu đã công bố có sự sai khác đáng kể. Sai số tương đối trung bình so với công thức (3) (trong khoảng chiều rộng dầm được chọn để khảo sát) lần lượt là 13%, 66% và 62%. Nguyên nhân của các sai số này là do công thức tính hệ số S được xây dựng trong [1, 6, 9] cho cấu trúc có khe hở g_a thay đổi từ 0,5 μm đến 3 μm , với công thức (3) được xây dựng cho trường hợp $g_a = 4 \mu\text{m}$. Các công thức tính S đã công bố trước đó cũng có sự sai khác khi xét đến ảnh hưởng của khe hở không khí. Điều này cho thấy khe hở không khí giữa lớp cấu trúc và lớp nền có ảnh hưởng đến các hệ số trong công thức tính S , do đó các công bố sẽ lựa chọn mô hình tính S sao cho phù hợp với các thông số cấu tạo của vi chấp hành. Như vậy, công thức (3) cho giá trị hệ số hình dạng phù hợp hơn khi áp dụng cho trường hợp vi chấp hành điện nhiệt chữ V được chế tạo từ phiên SOI có chiều dày lớp cấu trúc $h = 30 \mu\text{m}$ và lớp đệm $g_a = 4 \mu\text{m}$.

5. Kết luận

Bài báo đã nghiên cứu cấu trúc và mô hình truyền nhiệt của vi chấp hành điện nhiệt chữ V. Mô hình hình học để xác định hệ số hình dạng của một mặt cắt dầm với bán kính giới hạn đã được khảo sát và lựa chọn một cách phù hợp. Theo các kết quả tính toán, hệ số hình dạng phụ thuộc vào chiều rộng dầm (khi cố định chiều dày và khe hở lớp không khí). Công thức hồi quy của hệ số hình dạng theo tỉ số kích thước chiều dày trên chiều rộng dầm đã được xác định. Công thức này có thể được áp dụng để xác định hệ số hình dạng trong mô hình truyền nhiệt của vi chấp hành điện nhiệt chữ V một cách nhanh chóng và tương đối chính xác.

Dựa trên mô hình hình học, các cài đặt và điều kiện biên của mô hình tính toán trong ANSYS Workbench đã được xây dựng có thể áp dụng để mở rộng hơn phạm vi khảo sát như ảnh hưởng chiều dày dầm, khe hở, số lượng mặt cắt dầm và khoảng cách giữa các dầm.

Tài liệu tham khảo

- [1] J. M. Maloney, D. L. DeVoe, and D. S. Schreiber, "Analysis and Design of Electrothermal Actuators Fabricated from Single Crystal Silicon," *Micro-Electro-Mechanical-Systems - ASME 2000*, vol. 2, pp. 233-240, 2000.
- [2] Y.-L. Zhao, T.-J. Hu, X.-Y. Li, Z.-D. Jiang, W. Ren, and Y.-W. Bai, "Design and Characterization of a Large Displacement Electro-thermal Actuator for a New Kind of Safety-and-Arming Device," *Energy Harvest. Syst.*, vol. 2, no. 3-4, pp. 143-148, 2015.
- [3] S. C. Chen and M. L. Culpepper, "Design of contoured microscale thermomechanical actuators," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 15, no. 5, pp. 1226-1234, 2006.
- [4] Z. Zhang, W. Zhang, Q. Wu, Y. Yu, X. Liu, and X. Zhang, "Closed-form modelling and design analysis of V- and Z-shaped electrothermal microactuators," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 27, no. 1, 2017.
- [5] T. Hu, Y. Zhao, X. Li, Y. Zhao, and Y. Bai, "Integration design of MEMS electro-thermal safety-and-arming devices," *Microsyst. Technol.*, vol. 23, no. 4, pp. 953-958, 2017.
- [6] T. Shan, X. Qi, L. Cui, and X. Zhou, "Thermal behavior modeling and characteristics analysis of electrothermal microactuators," *Microsyst. Technol.*, vol. 23, no. 7, pp. 2629-2640, 2017.
- [7] K. Mori, *Silicon-on-insulator (SOI) technology for micro-electromechanical systems (MEMS) and nano-electromechanical systems (NEMS) sensors*, Woodhead Publishing Limited, 2014.
- [8] K. T. Hoang, D. T. Nguyen, and P. H. Pham, "Impact of design parameters on working stability of the electrothermal V-shaped actuator," *Microsyst. Technol.*, vol. 26, no. 5, pp. 1479-1487, 2020.
- [9] Z. Zhang, Y. Yu, X. Liu, and X. Zhang, "Dynamic modelling and analysis of V- and Z-shaped electrothermal microactuators," *Microsyst. Technol.*, vol. 23, no. 8, pp. 3775-3789, 2017.

DETERMINE THE SHAPE FACTOR IN HEAT TRANSFER MODEL OF MICRO ELECTROTHERMAL V-SHAPED ACTUATOR USING ANSYS WORKBENCH SOFTWARE

Abstract: *This article proposes a method to determine the shape factor in heat transfer model of micro electrothermal V-shaped actuator using ANSYS Workbench software. The 2D model was built to investigate the heat transfer from a beam cross-section to the substrate through a thin layer of air. This model can be used to determine the influence of beam width and thickness on the shape factor. The results of this work will provide an effective method to determine the shape factor in theoretical heat transfer models for micro electrothermal V-shaped actuator and can also be applied to similar heat transfer models.*

Keywords: Shape factor; heat transfer model; micro electrothermal V-shaped actuator.

Nhận bài: 10/01/2022; Hoàn thiện sau phân biện: 17/03/2022; Chấp nhận đăng: 14/04/2022

