Tạp chí
NGHIÊN CỨU KHOA HỌC

ĐẠI HỌC SAO ĐỎ

SCIENTIFIC JOURNAL - SAO DO UNIVERSITY

P. ISSN 1859-4190
E. ISSN 2815-553X

Số 4 (92)
2025

P. ISSN 1859-4190
E. ISSN 2815-553X

Địa chỉ Tòa soạn:
Trường Đại học Sao Đỏ.
Số 76, Nguyễn Thị Duệ, KDC Thái Học 2, P. Chu Văn An, TP. Hải Phòng.
Điện thoại: (0220) 3587213, Fax: (0220) 3882 921, Hotline: 0912 107858/0936 847980.
Website: http://tapchikhcn.saodo.edu.vn/Email: tapchikhcn@saodo.edu.vn.

Giấy phép xuất bản số: 620/GP-BTTTT ngày 17/9/2021 của Bộ Thông tin và Truyền thông.
In 2.000 bản, khổ 21 × 29,7cm, tại Công ty TNHH in Tre Xanh, cấp ngày 17/02/2011.

TẠP CHÍ
NGHIÊN CỨU KHOA HỌC
ĐẠI HỌC SAO ĐỎ

TRONG SỐ NÀY

Số 4(92) 2025

LIÊN NGÀNH ĐIỆN - ĐIỆN TỬ - TỰ ĐỘNG HÓA

LIÊN NGÀNH CƠ KHÍ - ĐỘNG LỰC

TẠP CHÍ
NGHIÊN CỨU KHOA HỌC
ĐẠI HỌC SAO ĐỎ

TRONG SỐ NÀY

Số 4(92) 2025

LIÊN NGÀNH CƠ KHÍ - ĐỘNG LỰC

NGÀNH KINH TẾ

LIÊN NGÀNH TRIẾT HỌC - XÃ HỘI HỌC - CHÍNH TRỊ HỌC

SCIENTIFIC JOURNAL
SAO DO UNIVERSITY

CONTENTS

No 4(92) 2025

TITLE FOR ELECTRICITY - ELECTRONICS - AUTOMATION

TITLE FOR MECHANICAL AND DRIVING POWER ENGINEERING

SCIENTIFIC JOURNAL
SAO DO UNIVERSITY

CONTENTS

No 4(92) 2025

Phân tích đa vật lý về Điện - Nhiệt - Cơ của vi kết nối

Multiphysics Analysis of Electro - Thermo - Mechanical Interactions in Micro - Interconnects

Mạc Văn Giang

Tác giả liên hệ: macvgiang@gmail.com

Trường Đại học Sao Đỏ

Ngày nhận bài: 01/7/2025
Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 27/10/2025
Ngày chấp nhận đăng: 26/11/2025

Tóm tắt

Bài báo này trình bày phân tích đa vật lý chi tiết về tương tác điện - nhiệt - cơ (ETM) trong vi kết nối 3D bằng đồng và tập trung vào một kịch bản thử nghiệm khắc nghiệt (stress test) nhằm xác định các điểm yếu tiềm ẩn trong thiết kế, thay vì mô phỏng điều kiện vận hành thông thường. Sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) trên phần mềm COMSOL Multiphysics, mô hình được phân tích dưới điện áp 0,2 V, dẫn đến mật độ dòng điện cực đại mang tính gia tốc đạt $6{,}38.10^{11}$ A/m² tại vùng tiết diện hẹp. Kết quả cho thấy hiệu ứng Joule làm nhiệt độ tăng lên đến giá trị tối đa 710 K (437°C) tại khu vực trung tâm trong điều kiện tản nhiệt tự nhiên. Sự tăng nhiệt này gây ra giãn nở nhiệt, tạo ra ứng suất tổng hợp (von Mises) tính toán theo mô hình đàn hồi tuyến tính đạt $7{,}38.10^{8}$ N/m² (738 MPa) tại các góc giao. Phân tích này không chỉ xác định các điểm nóng và vùng tập trung ứng suất, nơi có nguy cơ cao xảy ra hỏng hóc do chảy dẻo, mỏi nhiệt hoặc di hành điện/nhiệt mà còn cung cấp cơ sở khoa học để tối ưu hóa thiết kế, nhấn mạnh tầm quan trọng của việc quản lý nhiệt và sử dụng các mô hình vật liệu phi tuyến để nâng cao độ tin cậy cho linh kiện vi điện tử.

Từ khóa: *Phân tích đa vật lý; Điện-Nhiệt-Cơ; hiệu ứng Joule; thử nghiệm gia tốc; ứng suất tổng hợp; phương pháp phần tử hữu hạn; vi kết nối; COMSOL Multiphysics.*

Abstract

This paper presents a detailed multiphysics analysis of electro-thermo-mechanical (ETM) interactions in 3D copper micro-interconnects, focusing on a harsh stress test scenario to identify potential design weaknesses, rather than simulating normal operating conditions. Using the finite element method (FEM) in COMSOL Multiphysics, the model was analyzed under a 0,2 V voltage, resulting in an accelerated peak current density of $6{,}38.10^{11}$ A/m^2 at the narrow cross-section. The results show that Joule heating causes the temperature to rise to a maximum of 710 K (437°C) at the central region under natural convection conditions. This temperature increase induces thermal expansion, generating a von Mises stress, calculated using a linear elastic model, of $7{,}38.10^{8}$ N/m^2 (738 MPa) at the intersection corners. The analysis not only identifies hotspots and stress concentration zones, which are at high risk of failure due to plastic deformation, thermal fatigue, or electro/thermal migration, but also provides a scientific basis for design optimization, emphasizing the critical role of thermal management and the use of nonlinear material models to enhance the reliability of microelectronic components.

Keywords: *Multiphysics analysis; Electro-Thermo-Mechanical; joule effect; accelerated testing; von mises stress; finite element method; micro-interconnects; COMSOL multiphysics.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh công nghệ bán dẫn phát triển nhanh chóng, xu hướng thu nhỏ hóa và tích hợp ba chiều (3D) đã trở thành yếu tố then chốt, giúp nâng cao hiệu suất và mật độ linh kiện. Trong đó, các vi kết nối như lỗ xuyên silicon (TSV) hoặc đệm hàn siêu nhỏ, đóng vai trò thiết yếu trong việc truyền tải tín hiệu và năng lượng giữa các lớp, đảm bảo hiệu suất và ổn định hệ thống. Tuy nhiên, khi kích thước giảm xuống mức micromet với mật độ I/O tăng cao, các tương tác đa vật lý vốn không đáng kể ở kích thước lớn trở nên quan trọng, dẫn đến thách thức nghiêm trọng về độ tin cậy. Thách thức chính nằm ở sự kết hợp phi tuyến giữa các trường điện, nhiệt và cơ (ETM): Dòng điện chạy qua vật liệu gây hiệu ứng Joule ($Q = J^2\rho$, với J là mật độ dòng điện và ρ là điện trở suất), làm tăng nhiệt độ cục bộ; nhiệt độ tăng gây giãn nở nhiệt không đồng đều, đặc biệt do sự không tương thích hệ số giãn nở nhiệt (CTE) giữa

Người phản biện: 1. TS. Vũ Hoa Kỳ
2. PGS.TS. Trần Vệ Quốc

đồng (khoảng 17.10^{-6} K^{-1}) và silicon (khoảng $3.10^{-6}K^{-1}$), dẫn đến sinh ra ứng suất. Nếu ứng suất vượt giới hạn bền (>200 MPa), nó có thể gây hỏng hóc như nứt vỡ, tách lớp hoặc di hành điện/nhiệt (EM/TM) vấn đề cấp bách trong các ứng dụng ô tô, máy bay và điện tử dân dụng,…

Mặc dù các nghiên cứu trước đã phân tích ETM trong cấu trúc TSV, [1] tập trung vào thiết kế vì khả năng sản xuất và độ tin cậy (DFM/DFR) với mô hình hóa ứng suất nhiệt-cơ tại cấp độ toàn chip, cung cấp phương pháp luận tổng quát nhưng thiếu phân tích chi tiết tại một điểm kết nối đơn lẻ dưới tải khắc nghiệt; [2] cung cấp tổng quan sâu sắc về đo lường và phân tích thực nghiệm cho TSV, nhấn mạnh ứng suất do CTE mismatch và kỹ thuật không phá hủy nhưng chưa đi sâu vào mô phỏng chi tiết về mối quan hệ nhân quả giữa các trường vật lý. Bài báo này không lặp lại các cách tiếp cận trên mà thực hiện một phân tích tình huống (case study) định lượng, tập trung vào vi kết nối đồng dưới điều kiện tải điện cao nhằm mô phỏng kịch bản thử nghiệm gia tốc (accelerated test). Mục tiêu là chủ động tạo ra mật độ dòng điện cực lớn ($6,38.10^{11}$ A/m^2), vượt xa ngưỡng di hành điện thông thường (~10^9÷ 10^{10} A/m^2), để nhanh chóng xác định các điểm yếu về nhiệt và cơ trong thiết kế, giúp khám phá cơ chế hỏng hóc tiềm tàng mà không cần mô phỏng dài hạn.

Tính mới của bài báo nằm ở việc áp dụng mô hình phần tử hữu hạn (FEM) chi tiết để phân tích tác động của tải khắc nghiệt, thiết lập mối liên hệ trực tiếp giữa thiết kế hình học với các điểm nóng nhiệt độ và vùng ứng suất tập trung cực đại, từ đó cung cấp góc nhìn định lượng về hậu quả của kịch bản này và cơ sở giá trị để tối ưu hóa thiết kế nhằm nâng cao độ tin cậy (DFR).

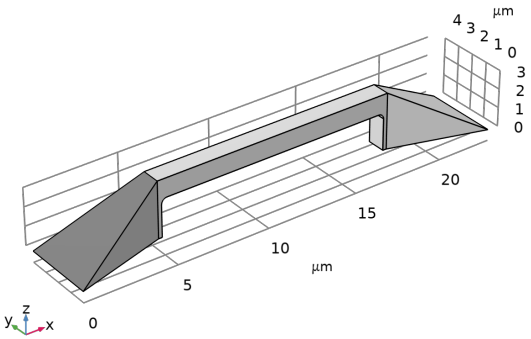
2. PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG VÀ THIẾT LẬP BÀI TOÁN

Để phân tích các tương tác đa vật lý phức tạp trong vi kết nối, nghiên cứu này sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), một công cụ số mạnh mẽ để giải các hệ phương trình vi phân đạo hàm riêng kết hợp. Toàn bộ quá trình mô phỏng được thực hiện trên nền tảng phần mềm COMSOL Multiphysics với khả năng tích hợp chặt chẽ các miền vật lý khác nhau.

2.1. Mô hình hình học và vật liệu

Mô hình hình học 3D của một vi kết nối được xây dựng, có kích thước khuôn khổ là 25×4×3 µm để phản ánh đúng kích thước thực tế của linh kiện.

Cấu trúc bao gồm hai đế kết nối (connector) ở hai đầu và một thân nối có tiết diện hẹp hơn ở giữa, một hình dạng phổ biến trong các ứng dụng thực tế và là nơi thường xảy ra các hiện tượng tập trung dòng điện và ứng suất.



Hình 1. *Mô hình của chi tiết vi kết nối*

Toàn bộ cấu trúc được chế tạo từ vật liệu đồng (Copper - Cu), đây là vật liệu được sử dụng rộng rãi cho các kết nối trong vi điện tử do có độ dẫn điện và dẫn nhiệt cao. Các đặc tính vật liệu quan trọng như độ dẫn điện, độ dẫn nhiệt và hệ số giãn nở nhiệt (CTE) được định nghĩa là các hàm phụ thuộc vào nhiệt độ để mô phỏng chính xác các tương tác phi tuyến trong quá trình phân tích được trình bày trong Bảng 1[3].

Bảng 1. *Các đặc tính cơ bản của vật liệu Cu*

TT	Đặc tính cơ bản (ký hiệu)	Đơn vị	Giá trị
1	Độ dẫn điện (σ)	S/m	$5,96.10^7$
2	Độ dẫn nhiệt (κ)	W/(m.K)	400
3	Hệ số giãn nở nhiệt (α)	K^{-1}	17.10^{-6}
4	Mô đun Young (E)	GPa	120
5	Tỷ số Poisson (v)	-	0,34

Trong khuôn khổ của nghiên cứu này, các giá trị này được giả định là hằng số để đơn giản hóa bài toán ban đầu. Đây là một giả định quan trọng và là một hạn chế của mô hình. Trong thực tế, các đặc tính vật lý của đồng thay đổi đáng kể theo nhiệt độ. Cụ thể, điện trở suất (ρ) tăng gần như tuyến tính với nhiệt độ theo biểu thức $\rho \approx \rho_0(1 + \beta\Delta T)$, với $\beta \approx 0,004$ K^{-1}, điều này sẽ làm tăng hiệu ứng Joule. Đồng thời, độ dẫn nhiệt (k) lại có xu hướng giảm ở nhiệt độ cao. Việc bỏ qua các phụ thuộc này có thể dẫn đến việc đánh giá thấp nhiệt độ cực đại. Các phân tích trong tương lai cần tích hợp các thuộc tính vật liệu phụ thuộc nhiệt độ để tăng độ chính xác của mô hình.

2.2. Thiết lập vật lý và điều kiện biên

Theo [4], mô hình ETM được thiết lập trong COMSOL Multiphysics bằng cách kết hợp ba giao diện vật lý chính: Dòng điện (Electric Currents), Truyền nhiệt trong chất rắn (Heat Transfer in Solids) và Cơ học vật rắn (Solid Mechanics). Quá trình phân tích tuân theo một chuỗi tương tác nhân quả logic, được liên kết bởi các khớp nối đa vật lý chuyên dụng.

Đầu tiên, giao diện Dòng điện (ec) giải phương trình bảo toàn dòng điện, $\nabla(\sigma\nabla V) = 0$, để xác định sự phân

bố điện thế và mật độ dòng điện trong cấu trúc. Điều kiện biên bao gồm một điện áp đặt trước V_0 = 0,2 V tại một đầu và nối đất (Ground) ở đầu còn lại, trong khi các bề mặt khác được giả định cách điện hoàn toàn.

Năng lượng điện tiêu tán sau đó được chuyển hóa thành nhiệt. Sự tương tác này được thực hiện thông qua khớp nối đa vật lý Nóng lên Điện từ (Electromagnetic Heating - e_{mh1}), trong đó nguồn nhiệt thể tích (Q = J×E) được tính từ miền điện và đưa vào giao diện Truyền nhiệt trong chất rắn (ht). Giao diện này giải phương trình truyền nhiệt $\nabla(-k.\nabla T) = Q$, để xác định trường nhiệt độ, với các điều kiện biên bao gồm nhiệt độ cố định tại đế kết nối (T_0 = 323 K), trao đổi nhiệt đối lưu với môi trường xung quanh (h_t = 5W/(m²×K)) và cách nhiệt tại các bề mặt còn lại.

Cuối cùng, trường nhiệt độ không đồng đều được tính toán ở trên được sử dụng làm tải trọng nhiệt cho giao diện Cơ học vật rắn (solid) thông qua khớp nối Giãn nở nhiệt (Thermal Expansion - t_{e1}). Biến dạng do nhiệt, được định nghĩa là: $\epsilon th = \alpha(T-T_{ref})$ với nhiệt độ tham chiếu T_{ref} = 323 K, gây ra ứng suất và biến dạng trong cấu trúc. Về mặt cơ học, một đế của vi kết nối được ràng buộc cố định hoàn toàn (Fixed Constraint), trong khi các bề mặt khác được để tự do biến dạng.

2.3. Tham số đầu vào và lưới hóa

Các tham số chính bao gồm [3]:

Điện áp áp dụng: V0 = 0,2 V.

Nhiệt độ tham chiếu: T0 = 323 K (50°C).

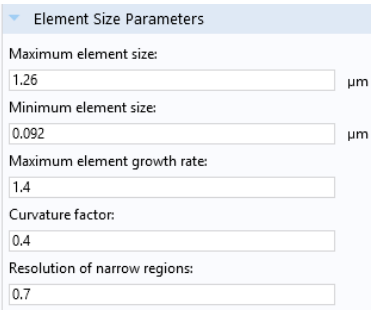
Nhiệt độ môi trường: Text = 298 K (25°C).

Hệ số trao đổi nhiệt: ht = 5 W/(m2.K).

Việc lựa chọn điện áp đầu vào V_o = 0,2 V được thực hiện với mục đích chủ động khảo sát giới hạn chịu tác dụng của cấu trúc hình học. Mặc dù điện áp này thấp, tiết diện cực hẹp của thân kết nối đã khuếch đại mật độ dòng điện lên mức cao, việc lựa chọn này cho phép mô phỏng một bài kiểm tra độ tin cậy gia tốc, qua đó nhanh chóng làm nổi bật các điểm yếu tiềm tàng về nhiệt và cơ.

Giá trị h_t = 5 W/(m².K) tương ứng với điều kiện tản nhiệt tự nhiên (không làm mát cưỡng bức). Đây là một giả thiết đưa ra (hệ thống làm mát bị hỏng) vì trong thực tế các vi mạch tích hợp 3D thường được trang bị các giải pháp tản nhiệt chủ động hiệu quả hơn. Do đó, nhiệt độ tính toán được trong mô phỏng này có thể xem là giới hạn trên. Trường nhiệt độ không đồng đều được dùng làm tải trọng cho giao diện Cơ học vật rắn. Một đế được ràng buộc cố định, các bề mặt khác tự do.

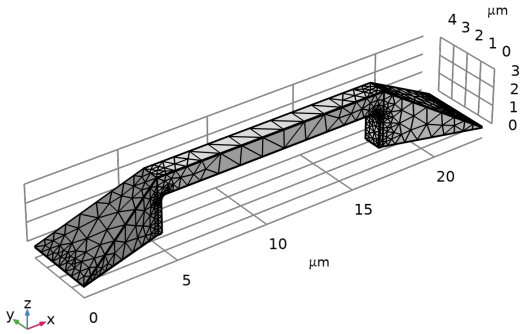
Chia lưới mô hình được thực hiện bằng phương pháp chia lưới phần tử hữu hạn.



Hình 2. *Các thông số chia lưới*

Một lưới gồm các phần tử tứ diện tự do (free tetrahedral) được tạo ra, với sự tinh chỉnh cục bộ tại các vùng có sự thay đổi hình học đột ngột như các góc giao giữa thân và đế kết nối. Phương pháp này đảm bảo độ chính xác cao cho kết quả phân tích, đặc biệt tại các khu vực dự kiến có gradient ứng suất lớn. Các thông số chi tiết điều khiển kích thước phần tử được trình bày trong Hình 2 như trên.

Kết quả chia lưới mô hình được 4.622 phần tử tứ diện trong đó: 1.626 phần tử trên mặt của mô hình, 293 phần tử trên cạnh của mô hình và 24 phần tử trên đỉnh của mô hình chi tiết vi kết nối, kích thước nhỏ nhất của cạnh phần tử tứ diện là 0,1734 μm. Lưới hóa trên toàn bộ mô hình được trình bày trong Hình 3.



Hình 3. *Kết quả chia lưới*

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ PHÂN TÍCH

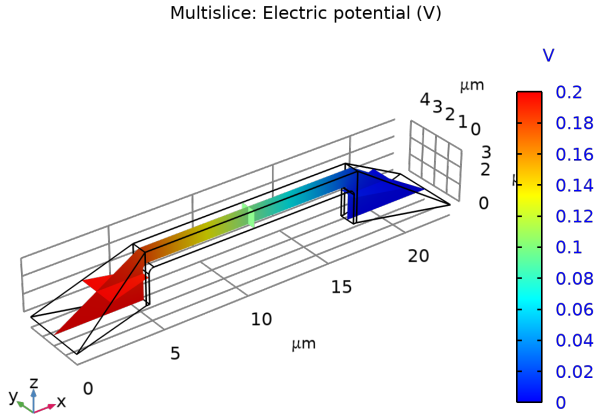
Mô phỏng được thực hiện với hai nghiên cứu tĩnh (Study 1 và Study 2) trong COMSOL Multiphysics, mỗi nghiên cứu mất khoảng 7 giây tính toán. Kết quả từ các Datasets (Solution 1 và Solution 2) được trực quan hóa qua các Plot Groups, bao gồm phân bố điện thế, nhiệt độ, ứng suất von Mises và biến dạng. Các kết quả này khẳng định tính chính xác của mô hình, với sự tương đồng giữa hai nghiên cứu, chứng tỏ mô hình ổn định và đáng tin cậy [3].

3.1. Phân bố điện thế và cường độ dòng điện

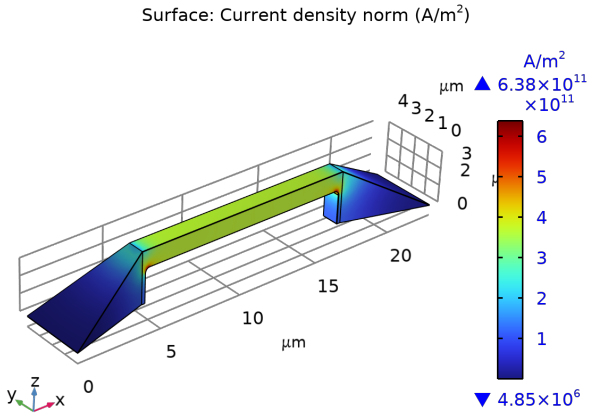
Phân bố điện thế giảm dần tuyến tính từ 0,2 V xuống 0 V. Mật độ dòng điện đạt giá trị tối đa khoảng $6,38.10^{11}$ A/m² tại trung tâm thân kết nối.

Giá trị này là rất lớn, cao hơn từ một đến hai bậc độ lớn so với ngưỡng gây ra hiện tượng di hành điện

(electromigration) thường thấy trong các tài liệu khoa học (khoảng $10^9 \div 10^{10}$ A/m² theo phương trình Black [5]. Như đã nêu, việc tạo ra mật độ dòng điện cao như vậy là chú ý của nghiên cứu, nhằm phục vụ mục đích thử nghiệm gia tốc để nhanh chóng phát hiện các điểm yếu của cấu trúc. Hình 4 biểu diễn sự phân bố điện thế trong vi kết nối, Hình 5 biểu diễn sự phân bố cường độ dòng điện trong vi kết nối.



Hình 4. *Phân bố điện thế trong vi kết nối*

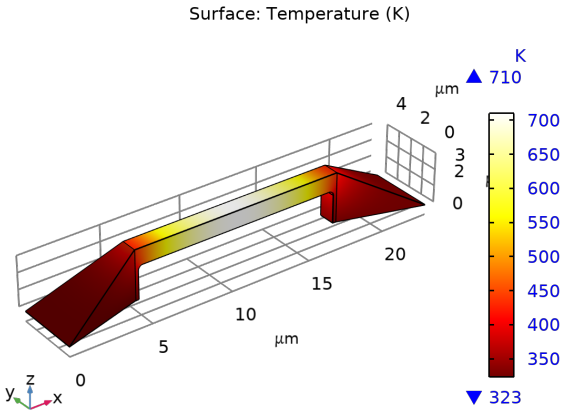


Hình 5. *Phân bố cường độ dòng điện trong vi kết nối*

3.2. Phân bố nhiệt độ

Kết quả từ giao diện Heat Transfer in Solids (ht) cho thấy trường nhiệt độ trong vi kết nối bị ảnh hưởng mạnh bởi nguồn nhiệt Joule, đạt tối đa 323÷710K tại trung tâm hẹp nhất do mật độ dòng điện cao (Q = J.E). Gradient nhiệt độ không đồng đều quanh thân kết nối, do dẫn nhiệt đồng (K = 400 W/(m·K)) bị hạn chế bởi hình học hẹp và trao đổi nhiệt đối lưu (h_t = 5 W/(m²·K)), với các điểm nóng cục bộ xác định qua Isothermal Contours (Hình 6), tăng nguy cơ giãn nở nhiệt và ứng suất. Nhiệt độ tại đế duy trì gần 298 K nhờ Heat Flux và cách nhiệt. Surface plot (Hình 7) nhấn mạnh hiệu ứng Joule khởi động tương tác nhiệt - cơ, phù hợp với phương trình $\nabla(-k.\nabla T) = Q$, góp phần vào cơ chế hỏng hóc như EM/TM đã được trình bày trong [3, 5].

Nhiệt độ 710 K (437°C) là rất cao so với nhiệt độ vận hành cho phép của hầu hết các linh kiện vi điện tử (thường dưới 150°C). Mặc dù vẫn thấp hơn nhiệt độ nóng chảy của đồng (khoảng 1358 K), mức nhiệt này chắc chắn sẽ gây ra suy giảm vật liệu nhanh chóng và dẫn đến hỏng hóc. Kết quả này phản ánh trực tiếp hệ quả của mật độ dòng điện cực cao và giả định về điều kiện tản nhiệt kém. Nó nhấn mạnh rằng nếu không có cơ chế tản nhiệt hiệu quả, cấu trúc này không thể chịu được điều kiện tải như mô phỏng.



Hình 6. *Sự phân bố nhiệt độ trong vi kết nối*

Để định lượng hóa tác động của các điều kiện khắc nghiệt này, ta có thể ước tính sơ bộ Tuổi thọ trung bình (Mean Time to Failure - MTTF) do di hành điện bằng phương trình Black [5]:

$$MTTF = A.J^{-n}.e^{\frac{E_a}{kT}} = 0{,}006 \text{ s} \quad (1)$$

Trong đó:

A: Hằng số phụ thuộc vào vật liệu;

J: Mật độ dòng điện, n thường bằng 2;

E_a: Năng lượng kích hoạt (với đồng khoảng 0,9-1,1 eV);

k: Hằng số Boltzmann;

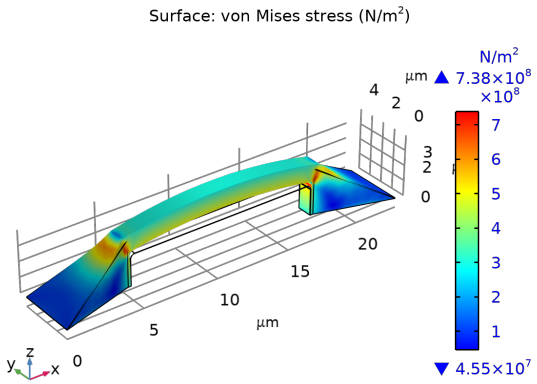
T: Nhiệt độ tuyệt đối.

Với J = 6,38.10¹¹ A/m² và T = 710 K.

Với MTTF = 0,006 giây đã khẳng định ở điều kiện nhiệt độ và mật độ dòng điện khắc nghiệt như trong mô phỏng, vi kết nối sẽ bị phá hủy gần như ngay lập tức do hiện tượng di hành điện.

3.3. Phân bố ứng suất

Kết quả từ giao diện Solid Mechanics (solid) cho thấy ứng suất von Mises đạt giá trị tối đa khoảng 7,38.108 N/m² (738 Mpa) tại các góc giao giữa thân và đế kết nối, vị trí giãn nở nhiệt không đồng đều do hiệu ứng Joule và CTE mismatch gây ra [6]. Gradient ứng suất cao xung quanh vùng hẹp, với phân bố từ thấp 4,55.107 N/m² (màu xanh) đến cao (màu đỏ), như minh họa trong Hình 7. Kết quả này phù hợp với cơ học vật rắn tuyến tính đàn hồi nhấn mạnh rủi ro nứt vỡ hoặc mỏi tại điểm tập trung, đòi hỏi tối ưu hình học để giảm ứng suất.



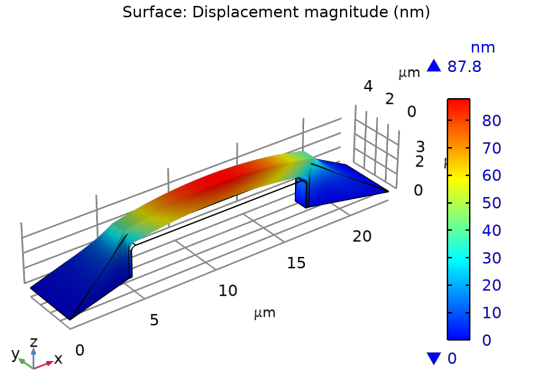
Hình 7. *Sự phân bố ứng suất trong vi kết nối*

Giá trị ứng suất tối đa 738 MPa này cao hơn đáng kể so với giới hạn chảy của đồng đã qua xử lý (thường trong khoảng 70÷400 MPa). Điều này không có nghĩa là vật liệu trên thực tế chịu một mức ứng suất đàn hồi lớn như vậy. Thay vào đó, nó phải được diễn giải một cách chính xác: Do mô hình sử dụng là đàn hồi tuyến tính, nó không thể mô tả hiện tượng chảy dẻo (plastic deformation). Giá trị 738 MPa nên được xem là một chỉ báo định tính, cho thấy vùng được chỉ định là nơi tập trung ứng suất nghiêm trọng nhất. Trên thực tế, tại vùng này, vật liệu sẽ trải qua biến dạng dẻo, tự làm cứng (work-hardening) và có nguy cơ cao bị hỏng do mỏi nhiệt chu kỳ thấp (low-cycle fatigue) hoặc nứt vỡ. Để giảm thiểu nguy cơ này, các giải pháp thiết kế như bo tròn các góc nhọn (filleting) hoặc sử dụng vật liệu đệm (underfill) có hệ số giãn nở nhiệt phù hợp cần được xem xét trong các thiết kế tương lai.

3.4. Phân bố biến dạng

Kết quả từ giao diện Solid Mechanics (solid) cho thấy phân bố biến dạng trong vi kết nối chủ yếu xuất hiện do giãn nở nhiệt không đồng đều, với giá trị tối đa khoảng 87,8 nm tại thân kết nối, nơi nhiệt độ cao nhất (710K). Biến dạng tập trung theo hướng dọc (z) do hiệu ứng giãn nở ($\varepsilon_{th} = \alpha\Delta T$), với α = 17.10-6K-1 trong đó:

$$\Delta T = T_{max} - T_{ref} = 710K - 323K = 387K \quad (2)$$



Hình 8. *Sự phân bố ứng biến dạng trong vi kết nối*

Gradient biến dạng giảm dần về phía đế, nơi bị ràng buộc cố định (Fixed Constraint), dẫn đến biến dạng tối thiểu (<0,2 μm). Kết quả này phù hợp với mô hình đàn hồi tuyến tính [6], xác nhận ảnh hưởng của nhiệt độ không đồng đều đến biến dạng, góp phần gây ra ứng suất tại các giao tiết diện.

Mặc dù giá trị biến dạng tối đa 87,8 nm có vẻ nhỏ, nó là một con số đáng kể khi so sánh với các dung sai chế tạo trong công nghệ tích hợp 3D hiện đại, vốn yêu cầu độ chính xác ở quy mô vài nanomet.

4. KẾT LUẬN

Nội dung bài báo đã phân tích Điện - Nhiệt - Cơ cho chi tiết cho vi kết nối bằng đồng dưới dạng thử nghiệm gia tốc nhằm xác định các tồn tại trong thiết kế. Kết quả mô phỏng cho thấy:

Mật độ dòng điện cực đại đạt 6,38×10¹¹ A/m² tại tiết diện hẹp, vượt xa ngưỡng di hành điện thông thường (~10^9÷10^{10} A/m²).

Hiệu ứng Joule làm nhiệt độ tăng nhanh tới 710 K tương đương 437°C trong điều kiện tản nhiệt tự nhiên và vượt qua với giới hạn làm việc của linh kiện vi điện tử.

Nhiệt độ cao gây giãn nở nhiệt không đồng đều, tạo ứng suất khối cực đại 738 MPa tại các góc và vượt quá giới hạn đàn hồi của vật liệu đồng.

Biến dạng tối đa khoảng 87,8 nm, đáng kể so với dung sai chế tạo ở quy mô vi điện tử.

Tuổi thọ trung bình ước tính bằng phương trình Black chỉ khoảng 0,006 giây, cho thấy hỏng hóc do di hành điện xảy ra gần như tức thời.

Các kết quả này khẳng định tầm quan trọng của quản lý nhiệt, tối ưu hình học để giảm tập trung ứng suất và lựa chọn vật liệu hoặc lớp đệm có hệ số giãn nở nhiệt phù hợp. Đặc biệt, cần tích hợp mô hình vật liệu phi tuyến và đặc tính phụ thuộc nhiệt độ trong các phân tích độ bền để dự báo chính xác hơn.

Mặc dù mô hình hiện tại có các giả định đơn giản hóa như: Vật liệu có tính đồng nhất tuyệt đối, mô hình đàn hồi tuyến tính, điều kiện tản nhiệt lý tưởng. Tuy nhiên, nghiên cứu đã đóng góp cơ sở khoa học cho việc tối ưu hóa thiết kế và nâng cao độ tin cậy của các hệ thống tích hợp trong điều kiện làm việc khắc nghiệt.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. D. Z. Pan, S. K. Lim, K. Athikulwongse, M. Jung, J. Mitra, J. Pak, M. Pathak and J.-S. Yang (2012), *Design for manufacturability and reliability for TSV-based 3D ICs*, Georgia Tech CAD Lab, Atlanta, GA, USA, Tech. Rep.

[2]. J. Wang, F. Duan, Z. Lv, S. Chen, X. Yang, H. Chen, and J. Liu (2023), *A short review of through-silicon via (TSV) interconnects: Metrology and analysis*, Appl. Sci., vol. 13, no. 14, p. 8301, Jul.

[3]. COMSOL, Inc (2023), *COMSOL Multiphysics Reference Manual, Version 6.2*, Burlington, MA, USA: COMSOL, Inc.

[4]. Pryor, R. W. (2011), *Multiphysics Modeling Using COMSOL5 and MATLAB*, 2nd ed, Dulles, Virginia: Mercury Learning and Information.

[5]. Black, J.R. (1969), *Electromigration: A Brief Survey and Some Recent Results*, IEEE Transactions on Electron Devices, 16(4), 338-347.

[6]. Zhang, G.Q., et al. (2006), *Mechanics of Microelectronics*, Springer.

AUTHOR INFORMATION

Mac Van Giang

Corresponding author: macvgiang@gmail.com

Sao Do University.

THỂ LỆ GỬI BÀI
TẠP CHÍ NGHIÊN CỨU KHOA HỌC, TRƯỜNG ĐẠI HỌC SAO ĐỎ

Tạp chí Nghiên cứu khoa học, Trường Đại học Sao Đỏ (P. ISSN 1859-4190, E. ISSN 2815-553X), thường xuyên công bố kết quả, công trình nghiên cứu khoa học và công nghệ của các nhà khoa học, cán bộ, giảng viên, nghiên cứu sinh, học viên cao học, sinh viên ở trong và ngoài nước.

1. Tạp chí xuất bản 01 số/quý bằng hai ngôn ngữ tiếng Việt và tiếng Anh. Tạp chí nhận đăng các bài báo khoa học thuộc các lĩnh vực: Điện - Điện tử - Tự động hóa; Cơ khí - Động lực; Kinh tế; Triết học - Xã hội học - Chính trị học; Các lĩnh vực khác gồm: Công nghệ thông tin; Hóa học - Công nghệ thực phẩm; Ngôn ngữ học; Toán học; Vật lý; Văn hóa - Nghệ thuật - Thể dục thể thao...
2. Bài nhận đăng là những công trình nghiên cứu khoa học chưa công bố trong bất kỳ ấn phẩm khoa học nào.
3. Tòa soạn chỉ nhận bài báo gửi online trên website http://tapchikhcn.saodo.edu.vn. Bài báo gửi về toà soạn dưới dạng file điện tử (*.doc *.docx và *.pdf); cuối bài báo, tác giả ghi rõ thông tin địa chỉ liên hệ, số điện thoại, email và cập nhật thông tin trên website. Bài báo phải được trình bày đúng định dạng, rõ ràng; Trường hợp bài báo phải chỉnh sửa theo thể lệ hoặc theo yêu cầu của Phản biện thì tác giả sẽ cập nhật trên website. Người phản biện sẽ do tòa soạn mời. Tòa soạn không gửi lại bài nếu không được đăng.
4. Các công trình thuộc đề tài nghiên cứu có Cơ quan quản lý cần kèm theo giấy phép cho công bố của cơ quan (Tên đề tài, mã số, tên chủ nhiệm đề tài, cấp quản lý,...).
5. Tên bài báo trình bày bằng hai ngôn ngữ (tiếng Việt và tiếng Anh), font Arial, cỡ chữ 14, in đậm, căn giữa.
6. Tên tác giả (không ghi học hàm, học vị), font Arial, cỡ chữ 10, in đậm, căn lề phải; cơ quan công tác của các tác giả, font Arial, cỡ chữ 9, in nghiêng, căn lề phải.
7. Chữ "Tóm tắt" in đậm, font Arial, cỡ chữ 10; Nội dung tóm tắt của bài báo không quá 10 dòng, trình bày bằng hai ngôn ngữ (tiếng Việt và tiếng Anh), font Arial, cỡ chữ 10, in thường.
8. Chữ "Từ khóa" in đậm, nghiêng, font Arial, cỡ chữ 10; Có từ 03÷05 từ khóa, font Arial, cỡ chữ 10, in nghiêng, ngăn cách nhau bởi dấu chấm phẩy, cuối cùng là dấu chấm.
9. Nội dung bài báo viết bằng tiếng Việt hoặc tiếng Anh; Nếu là bài báo viết bằng tiếng Việt: Tiêu đề tiếng Việt trước, tiếng Anh sau; Tóm tắt tiếng Việt trước, tiếng Anh sau; Từ khóa tiếng Việt trước, tiếng Anh sau; Nếu là bài báo viết bằng tiếng Anh: Tiêu đề tiếng Anh trước, tiếng Việt sau; Tóm tắt tiếng Anh trước, tiếng Việt sau; Từ khóa tiếng Anh trước, tiếng Việt sau.
10. Bài báo được đánh máy trên khổ giấy A4 (21 × 29,7cm) có độ dài không quá 8 trang, font Arial, cỡ chữ 10, giãn dòng At least 12pt, Before 3pt, After 3pt; căn lề trên 2.5cm, dưới 2.5cm, trái 3cm, phải 2cm; hình vẽ phải rõ ràng, đủ nét và được định dạng dưới dạng file ảnh (*.jpg); Phương trình, công thức phải soạn thảo bằng Mathtype hoặc Equation; Phần nội dung bài báo được chia thành 02 cột, khoảng cách cột là 1cm; Trong trường hợp hình vẽ, hình ảnh có kích thước lớn, bảng biểu có độ rộng lớn hoặc công thức, phương trình dài thì cho phép trình bày dưới dạng 01 cột.
11. Tài liệu tham khảo được sắp xếp theo thứ tự tài liệu được trích dẫn trong bài báo.

    - Nếu là sách/luận án: Tên tác giả (năm), Tên sách/luận án/luận văn, Nhà xuất bản/Trường/Viện, lần xuất bản/tái bản.

    - Nếu là bài báo/báo cáo khoa học: Tên tác giả (năm), Tên bài báo/báo cáo, Tạp chí/Hội nghị/Hội thảo, Tập/Kỷ yếu, số, trang.

    - Nếu là trang web: Phải trích dẫn đầy đủ tên website và đường link, ngày cập nhật.
12. Định dạng mẫu bài báo tham khảo tại địa chỉ http://tapchikhcn.saodo.edu.vn/news/detail/198/format_paper

    Bài báo sau khi xuất bản sẽ được công bố trên http://tapchikhcn.saodo.edu.vn.

THÔNG TIN LIÊN HỆ:

Ban Biên tập Tạp chí Nghiên cứu khoa học, Trường Đại học Sao Đỏ

Phòng 203, Tầng 2, Nhà B1, Trường Đại học Sao Đỏ.

Địa chỉ: Số 76, Nguyễn Thị Duệ, KDC Thái Học 2, P. Chu Văn An, TP. Hải Phòng.

Điện thoại: (0220) 3587213, Fax: (0220) 3882921, Hotline: 0912 107858/0936 847980.

Website: http://tapchikhcn.saodo.edu.vn

Email: tapchikhcn@saodo.edu.vn

BỘ CÔNG THƯƠNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SAO ĐỎ

Địa chỉ:
- **Số 1:** Số 76, đường Nguyễn Thị Duệ, KDC Thái Học 2, phường Chu Văn An, thành phố Hải Phòng.
- **Số 2:** Số 72, đường Nguyễn Thái Học, quốc lộ 37, phường Chu Văn An, thành phố Hải Phòng.
- **Điện thoại:** (0220) 3882 269 **Fax:** (0220) 3882 921 **Website:** http://saodo.edu.vn **Email:** info@saodo.edu.vn

P. ISSN 1859-4190
E. ISSN 2815-553X

Số 4 (92)
2025

Địa chỉ Tòa soạn:
Trường Đại học Sao Đỏ
Số 76, đường Nguyễn Thị Duệ, KDC Thái Học 2, phường Chu Văn An, thành phố Hải Phòng.
Điện thoại: (0220) 3587213, Fax: (0220) 3882 921, Hotline: 0912 107858/0936 847980.
Website: http://tapchikhcn.saodo.edu.vn/Email: tapchikhcn@saodo.edu.vn.

Giấy phép xuất bản số: 620/GP-BTTTT ngày 17/9/2021 của Bộ Thông tin và Truyền thông.
In 2.000 bản, khổ 21 × 29,7cm, tại Công ty TNHH in Tre Xanh, cấp ngày 17/02/2011.