

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA TẢI TRỌNG NHỎ ĐẾN HỆ SỐ MA SÁT CỦA CẶP VẬT LIỆU SILIC – SILIC TRONG THIẾT BỊ MEMS BẰNG MÔ HÌNH CHÓT TRÊN TẦM PHẪNG

RESEARCH ON THE EFFECT OF SMALL LOAD ON THE COEFFICIENT OF FRICTION OF SILIC-SILIC MATERIAL PAIRS IN MEMS BY LATCH MODELS ON FLAT PLATES

Nguyễn Văn Hoan¹, Phan Văn Mạnh², Đinh Văn Bằng³

^{1,2}Khoa Cơ khí, Học viện Kỹ thuật Quân sự

³Phòng Xe máy, Cục Kỹ thuật, Binh chủng Tăng thiết giáp

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu ảnh hưởng của tải trọng nhỏ cỡ mN tới hệ số ma sát của cặp vật liệu silic – silic, dùng trong hệ thống MEMS bằng mô hình tịnh tiến dạng chốt trên tấm phẳng. Ở chế độ tải 5 mN, cặp vật liệu SiO₂ – SiO₂ cho hệ số ma sát bằng 0,4251, cao hơn nhiều so với hệ số ma sát ở chế độ tải thông thường 5 N. Trong chế độ tải nhỏ, ảnh hưởng của các lực bề mặt đến đặc tính ma sát là đáng kể và phải được tính đến khi dự đoán ứng xử ma sát của vật liệu. Trong chế độ tải nhỏ, khi tăng độ nhám bề mặt, hệ số ma sát giảm xuống còn 0,2943. Nhám bề mặt làm giảm diện tích tiếp xúc giữa các bề mặt, từ đó làm giảm hệ số ma sát. Sự khác biệt giữa ứng xử ma sát của vật liệu silic giữa tải nhỏ và tải thông thường cũng được so sánh và đánh giá bằng các thí nghiệm ở cùng điều kiện.

Từ khóa: Ma sát trong MEMS; Tải trọng nhỏ; Hệ số ma sát; Vật liệu Silic.

ABSTRACT

This paper studies the effect of low-load on Silicon's Coefficient of Friction (COF) used in MEMS by the reciprocating pin-on-plat model. At the load of 5 mN, the COF of SiO₂ – SiO₂ is 0,4251, much higher than one at the normal load's case. At the low load, the influence of surface forces on frictional properties are significant and must be taken into account when predicting the frictional behavior of a material. In low load regime, when the surface roughness increases, silicon's coefficient of friction is reduced to 0,2943. Surface roughness reduces the contact area between the surfaces, thereby reducing the coefficient of friction. The different frictional behavior of silicon between low and normal load are also compared and evaluated by experiments under the same conditions.

Keywords: Micro-tribology; Low load; Coefficient of friction; Silicon material.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngày nay, vi cơ điện tử - Microelectromechanical System (MEMS) đang là một trong những lĩnh vực khoa học liên ngành phát triển mạnh mẽ. Các thiết bị có kích thước nhỏ giúp tăng khả năng tích hợp, giảm kích thước, khối lượng cho các hệ thống. Đồng thời, với các công nghệ tiên tiến, cho phép chế tạo hàng loạt các linh kiện, thiết bị có kích thước micro với độ chính xác cao và giá thành rẻ. Thiết bị MEMS được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như tự động hóa, khám phá không gian, sinh học, y tế...

Nhiều nghiên cứu đã chứng minh rằng, những vấn đề về ma sát của các cặp vật liệu gây ra cản trở rất lớn đến sự phát triển và mở rộng của công nghệ MEMS [1, 2, 3]. Hoạt động của thiết bị bị ảnh hưởng rất nhiều bởi các vấn đề như bám dính, ma sát, mài mòn gây nên sự hỏng hóc (hoặc không hoạt động), làm giảm tuổi thọ và độ tin cậy của thiết bị. Việc nghiên cứu những vấn đề về ma sát trong các thiết bị MEMS là vô cùng quan trọng, nó ảnh hưởng lớn tới việc tính toán thiết kế, khả năng làm việc và độ tin cậy của hệ thống. Các kiến thức chung về Tribology liệu có còn đúng và có thể áp dụng để làm giảm ma sát và mài mòn cho các thiết bị siêu nhỏ hay không? Việc giải đáp thắc mắc này đã thúc đẩy một hướng nghiên cứu mới về ma sát trong thế giới vi mô. Cần thiết phải có một hệ thống lý thuyết mới về đặc tính ma sát của cặp vật liệu trong thế giới micro (hoặc nano) để đưa ra các biện pháp nhằm loại trừ hoặc hạn chế ảnh hưởng của chúng đến khả năng làm việc của thiết bị. Nghiên cứu về các hiện tượng ma sát, mài mòn ở các thiết bị vi mô đã mở ra một lĩnh vực khoa học mới gọi là Micro/Nanotribology (ma sát vi mô) [4, 5].

Trong khi Macro-tribology đã được nghiên cứu trước đây rất lâu và cho nhiều kết

quả đáng kể thì cùng với sự ra đời của công nghệ vi cơ (MEMS), Micro/Nanotribology chỉ mới được nghiên cứu vài chục năm trở lại đây [6] và đã đạt được một số kết quả chú ý. Tuy nhiên, số lượng các tác giả và các công trình nghiên cứu còn khiêm tốn. Phần lớn các nghiên cứu trên thế giới về ma sát ở kích thước vi mô sử dụng kính hiển vi nguyên tử lực AFM (Atomic Force Microscope) hoặc kính hiển vi lực ma sát FFM (Friction Force Microscope). Dựa vào cơ chế tiếp xúc 1 đỉnh nhấp nhô (single – asperity contact), lực ma sát hoặc lực bám dính được đo đạc và tính toán thông qua các hệ số chuyển đổi [7, 8]. Tuy nhiên, cơ chế tiếp xúc này không thể hiện đúng bản chất của tiếp xúc trong linh kiện MEMS (gồm nhiều các nhấp nhô bề mặt tiếp xúc với nhau), đã làm đơn giản hóa điều kiện tiếp xúc và do đó đã không tính đến ảnh hưởng của độ nhám bề mặt tới đặc tính ma sát. Hơn nữa, áp lực tiếp xúc trong thiết bị AFM, FFM quá cao, thường cỡ GPa, trong khi theo nghiên cứu [1], áp suất tiếp xúc trong MEMS lớn nhất chỉ cỡ 400 MPa. Một số tác giả khác trên thế giới đã tạo ra các thiết bị đo ma sát dạng on – chip sử dụng chính công nghệ MEMS [9]. Các thiết bị này mô tả tốt hơn điều kiện tiếp xúc trong linh kiện vi cơ và cho độ chính xác cao, tuy nhiên, chế tạo khá phức tạp và trong điều kiện công nghệ của Việt Nam là khó thực hiện.

Tại Việt Nam, công nghệ vi cơ là lĩnh vực nghiên cứu còn mới mẻ, số lượng các công trình nghiên cứu công bố còn ít. Đặc biệt hơn, rất hiếm những nghiên cứu về ma sát trong thế giới vi mô. Đây thực sự là vấn đề cần thiết và có ý nghĩa khoa học. Bằng trang thiết bị thí nghiệm hiện có, bài báo này trình bày nghiên cứu ảnh hưởng của tải trọng nhỏ (5 mN) đến hệ số ma sát của cặp vật liệu silic – silic đơn tinh thể dùng trong hệ thống vi cơ điện tử bằng mô hình trượt dạng chót trên tấm phẳng. Mô hình này, mô tả tốt về bản chất tiếp xúc của các



bề mặt trong MEMS, có kể đến ảnh hưởng của nhám bề mặt tới hệ số ma sát.

2. THIẾT BỊ, MÔ HÌNH VÀ ĐIỀU KIỆN THÍ NGHIỆM

2.1. Thiết bị và mô hình thí nghiệm

Các thí nghiệm đo ma sát được thực hiện trên hệ thống thử nghiệm mẫu đa năng UMT (Hình 1) do hãng CETR của Mỹ chế tạo, hệ thống này được xem là hiện đại và khá tiên tiến hiện nay. Thiết bị được dùng để thí nghiệm đo ma sát, kiểm tra vết xước tế vi, chụp lại ảnh cấu trúc vật liệu, thử nghiệm về cơ tính (bao gồm kéo, nén và xoắn) cho kim loại đen, kim loại màu, nhựa, gỗ, giấy, vật liệu tổng hợp, lớp phủ mỏng, cũng như các chất bôi trơn ở thể rắn, dầu và mỡ bôi trơn. Thiết bị được kết nối và điều khiển bằng máy tính có độ chính xác, độ phân giải cao, hiển thị và phân tích kết quả bằng phần mềm tích hợp hiện đại [10].



Hình 1. Thiết bị đo UMT

Vật liệu thí nghiệm là tấm silic đơn tinh thể hướng 100 (100-single crystal silicon wafer) có đường kính 4 inch, chiều dày khoảng

500 μm . Tấm silic này có một mặt có độ nhám rất nhỏ ($\text{RMS} = 0,1 - 0,2 \text{ nm}$) gọi là mặt tinh và mặt còn lại có độ nhám khá lớn ($\text{RMS} = 0,5 \mu\text{m}$) gọi là mặt thô [11]. Nhóm tác giả sử dụng vật liệu silic (100) được sử dụng phổ biến trong chế tạo linh kiện MEMS do công nghệ chế tạo (ăn mòn) vi cơ theo hướng mạng tinh thể này là dễ nhất [12].

Mô hình thí nghiệm dạng chốt trên tấm phẳng được mô tả trên Hình 2. Mẫu trên là miếng silic (100) có kích cỡ $2 \times 2 \text{ (mm}^2\text{)}$ được cắt ra từ tấm silic bằng mũi dao kim cương và được dán chặt vào mặt dưới của chốt. Bề mặt tham gia thí nghiệm của mẫu trên có thể là mặt thô hoặc mặt tinh. Mẫu dưới là tấm silic (100) được kẹp chặt vào bàn trượt bằng vít kẹp. Bề mặt thí nghiệm của mẫu dưới là mặt tinh. Khi làm việc, truyền động dưới (gồm động cơ, giảm tốc, cơ cấu tay quay con trượt và bộ truyền đai) truyền chuyển động tịnh tiến cho bàn trượt, làm mẫu dưới trượt qua lại. Truyền động trên (bộ truyền vít đai ốc) tạo chuyển động lên xuống làm cho mẫu trên ép xuống mẫu dưới với giá trị lực tùy chọn.

Để khảo sát ảnh hưởng của ma sát trong chế độ tải nhỏ, nhóm sử dụng loại sensor đo lực FLV_Gold có dải đo lực từ 2 mN đến 100 mN, độ chính xác là $\pm 10^{-2} \text{ mN}$. Trong chế độ tải thông thường, sử dụng sensor DFM 05-0803 có dải đo lực từ 0,5 N đến 50 N, độ chính xác $\pm 10^{-2} \text{ N}$.

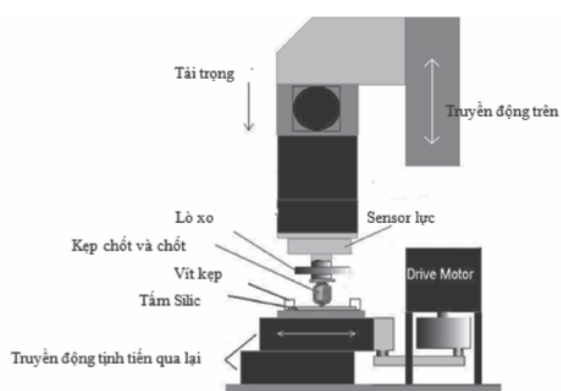
2.2. Điều kiện thí nghiệm

Các mẫu thí nghiệm gồm:

- Mẫu 1: Cặp vật liệu silic – silic (mặt tinh – mặt tinh) được rửa sạch bằng dung dịch axeton để loại bỏ các tạp chất và bụi bẩn bám vào bề mặt, sau đó rửa sạch trong nước cất và để khô tự nhiên. Do trên bề mặt vật liệu Silic

luôn tồn tại lớp oxit SiO_2 nên mẫu 1 được coi là cặp vật liệu $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$.

- Mẫu 2: Cặp vật liệu silic – silic (mặt thô – mặt tinh) được xử lý như mẫu 2, tuy nhiên, mẫu 3 này ($\text{R_SiO}_2/\text{SiO}_2$) có mặt trên (ký hiệu R_SiO_2) là mặt thô có độ nhám bề mặt cao hơn hẳn so với mặt tinh.



Hình 2. Mô hình thử nghiệm chốt trên tấm phẳng

Để phân biệt ứng xử ma sát của vật liệu silic khi tải nhỏ và tải thông thường, các mẫu được thí nghiệm với tải 5 mN (tải nhỏ) và tải 5 N (tải thông thường). Điều kiện thí nghiệm được mô tả đầy đủ trong Bảng 1. Độ ẩm môi

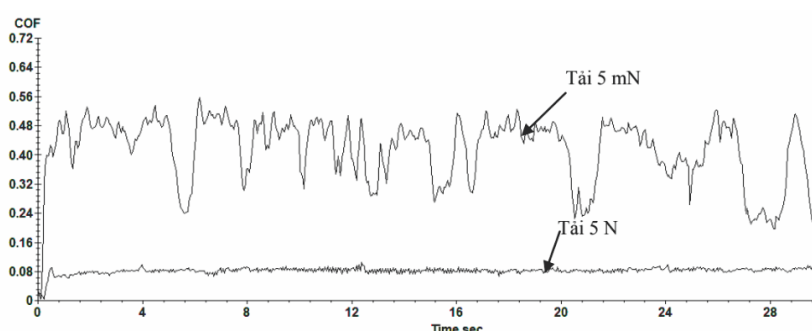
trường đo trong ngày làm thí nghiệm dao động từ 73 đến 75 %, nhiệt độ thí nghiệm từ 25 – 27°C. Độ ẩm và nhiệt độ được xem là không đổi trong một lần làm thí nghiệm.

Bảng 1. Điều kiện thí nghiệm xác định hệ số ma sát của cặp vật liệu silic – silic:

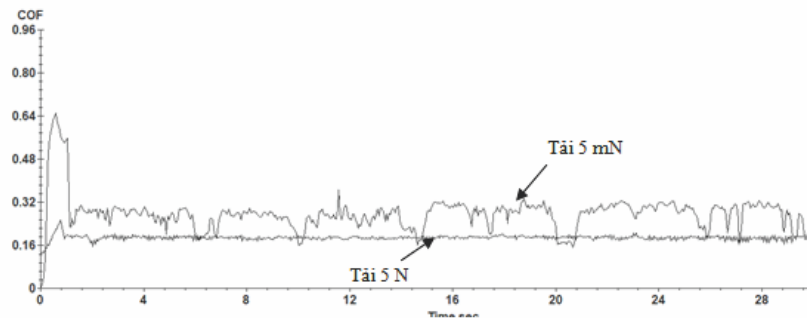
Điều kiện thí nghiệm	Giá trị hoặc mô tả
Mẫu thí nghiệm	+ Mẫu 1 ($\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$)
	+ Mẫu 2 ($\text{R_SiO}_2/\text{SiO}_2$)
Nhám bề mặt	+ SiO_2 : RMS = 0,1 – 0,2 nm + R_SiO_2 : RMS = 0,5 μm
Tải trọng	+ Thí nghiệm 1: Tải không đổi 5 mN + Thí nghiệm 2: Tải không đổi 5 N
Tốc độ vòng	1 Hz
Vận tốc trượt	0,333 mm/s
Thời gian	30 s
Độ ẩm trung bình	73 %
Nhiệt độ trung bình	26 °C

3. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM VÀ NHẬN XÉT

Đồ thị hệ số ma sát của mẫu 1 ($\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$) và mẫu 2 ($\text{R_SiO}_2/\text{SiO}_2$) trong chế độ tải nhỏ và tải thông thường được thể hiện trên Hình 3 và Hình 4. Các giá trị trung bình của hệ số ma sát được thể hiện trong Bảng 2.



Hình 3. Đồ thị hệ số ma sát của mẫu 1 ($\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$) ở chế độ tải nhỏ và tải thông thường



Hình 4. Đồ thị hệ số ma sát của mẫu 2(R_SiO_2/SiO_2) ở chế độ tải nhỏ và tải thông thường

Bảng 2. Giá trị hệ số ma sát của mẫu 1 và mẫu 2:

Tải trọng	5 mN	5 N
Mẫu 1(SiO_2/SiO_2)	0,4251	0,083
Mẫu 2 (R_SiO_2/SiO_2)	0,2943	0,1903

Dễ dàng nhận thấy rằng, hệ số ma sát ở chế độ tải nhỏ (5 mN) đều cao hơn so với hệ số ma sát ở chế độ tải thông thường (5 N) trong cả 2 trường hợp (Hình 3 và Hình 4). Đặc biệt, với mẫu 1 (mẫu có độ nhám bề mặt bé - mặt tinh) hệ số ma sát ở chế độ tải nhỏ bằng 0,4251, cao hơn nhiều so với chế độ tải thông thường (0,083) (Hình 3). Trong chế độ tải nhỏ, khi độ nhám bề mặt tăng, hệ số ma sát lại giảm xuống, từ giá trị 0,4251 còn 0,2943. Ứng xử này là hoàn toàn khác biệt khi so sánh với chế độ tải thông thường, khi độ nhám bề mặt tăng thì hệ số ma sát tăng, từ 0,083 đến 0,1903.

Điều này được giải thích bằng ảnh hưởng của các lực bám dính trong chế độ tải nhỏ. Lực bám dính trong MEMS là kết quả của các lực bề mặt như: Lực căng bề mặt (Capillary force); Lực Van der Waals (Van der Waals force); Lực tĩnh điện (Electrostatic force); Lực liên kết Hydro... Trong nhiều trường hợp, lực căng bề mặt có giá trị lớn hơn nhiều so với các lực còn lại (thậm chí lớn hơn lực tải trọng) và

là lực chi phối đến đặc tính ma sát của vật liệu [13]. Theo nghiên cứu [14], đối với tấm wafer Silic, lực căng bề mặt đóng vai trò chủ yếu do đặc tính hút ẩm của bề mặt ưa nước (lớp oxit bề mặt). Ta biết rằng, ở điều kiện thường, vật liệu silic luôn tồn tại một lớp oxit SiO_2 trên bề mặt. Lớp oxit này có đặc tính hút ẩm lớn. Khi được phơi ngoài không khí, trên bề mặt silic luôn tồn tại một lớp nước ngưng tụ. M.Binggeli và C.M. Mate cho rằng, chiều dày lớp nước khoảng 10 nm [15]. M. Scherge và các đồng nghiệp lại cho rằng có khoảng 50 lớp nước cỡ nguyên tử hoặc hơn nữa trên bề mặt silic [16]. Lớp nước tạo ra lực căng bề mặt chắc chắn sẽ ảnh hưởng đến ứng xử ma sát của vật liệu. Lực căng bề mặt của nước gây ra sự bám dính do hình thành các cầu chất lỏng giữa các mấp mô bề mặt của mẫu trên và mẫu dưới. Bề mặt có độ nhám càng nhỏ, diện tích tiếp xúc giữa 2 bề mặt càng lớn, lực căng bề mặt càng cao. Bề mặt tiếp xúc của mẫu 1 là mặt tinh – tinh, do đó ảnh hưởng của lực căng bề mặt tới ma sát trong chế độ tải nhỏ là đáng kể. Sự xuất hiện của độ ẩm trên bề mặt mẫu 1 làm phức tạp hóa đặc tính ma sát và làm đồ thị hệ số ma sát của mẫu 1 trong chế độ tải nhỏ biến động lớn hơn rất nhiều so với chế độ tải thông thường.

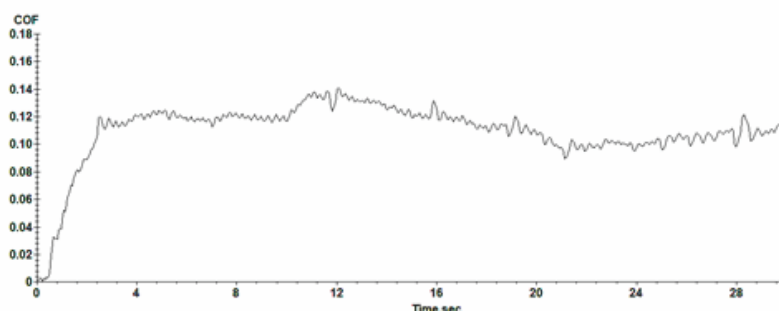
Đối với mẫu 2, độ nhám bề mặt của mặt trên (mặt thô R_SiO_2) lớn hơn rất nhiều so với mặt dưới (mặt tinh), do đó diện tích tiếp xúc

giữa hai bề mặt giảm đi rất nhiều so với mẫu 1. Ảnh hưởng của bám dính giữa 2 bề mặt được loại bỏ khá nhiều, từ đó, giá trị hệ số ma sát trong chế độ tải nhỏ 5 mN cũng giảm xuống (từ 0,4251 còn 0,2943).

Trong chế độ tải thông thường, độ lớn của lực căng bề mặt so với giá trị lực tải trọng (cỡ N) là không đáng kể, do đó, ảnh hưởng của lực căng bề mặt coi như không có. Hệ số ma sát trong chế độ tải thông thường là khá bé (0,083 cho mặt tinh và 0,1903 cho mặt thô), đồ thị hệ số ma sát cũng ít biến động và gần như không đổi.

Để khẳng định lại những điều đã nhận xét trên đây, ta tiến hành thêm thí nghiệm thứ 3.

Ở thí nghiệm này, cặp vật liệu silic – silic (mặt tinh – mặt tinh) được ngâm 2 phút trong axit HF 40% nhằm loại bỏ lớp ô xít SiO_2 cỡ nanomet trên bề mặt, sau đó lấy ra rửa sạch trong nước cất và được sấy trong lò sấy tại nhiệt độ 100°C , trong vòng 30 phút để làm khô hoàn toàn. Mẫu 3 (Si/Si) này được xem là mẫu không hút ẩm do không còn lớp SiO_2 . Độ nhám bề mặt sau khi bị ăn mòn bằng HF thay đổi không đáng kể, coi như không đổi so với trước khi bị ăn mòn. Hệ số ma sát của mẫu 3 ở chế độ tải nhỏ 5 mN được thể hiện trên Hình 5. Giá trị trung bình của hệ số ma sát mẫu 3 là 0,112. Giá trị này khá tương đồng với giá trị 0,0803 (Bảng 2) so với ở chế độ tải thông thường. Kết quả thí nghiệm lần thứ 3 này là hợp lý và hoàn toàn phù hợp với những phân tích và nhận xét ở trên.



Hình 5. Đồ thị hệ số ma sát của mẫu 3 trong chế độ tải nhỏ

4. KẾT LUẬN

Bài báo này trình bày một nghiên cứu thực nghiệm đo hệ số ma sát của cặp vật liệu silic – silic khi tải nhỏ 5 mN. Để so sánh ứng xử của vật liệu so với chế độ tải thông thường, các mẫu được thí nghiệm với chế độ tải 5 N với cùng điều kiện. Ba mẫu vật liệu dùng thí nghiệm là mẫu $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$, mẫu $\text{R-SiO}_2/\text{SiO}_2$ và mẫu Si/Si (vật liệu Silic đã loại bỏ lớp SiO_2 trên bề mặt). Kết quả thí nghiệm cho thấy, ở chế độ tải nhỏ, hệ số ma sát là lớn hơn so với chế độ tải

thông thường. Đồ thị hệ số ma sát của các mẫu ở chế độ tải nhỏ cũng biến động đáng kể. Điều này được giải thích là do lực căng bề mặt làm tăng hệ số ma sát do hiện tượng bám dính xuất hiện trong chế độ tải nhỏ. Nhám bề mặt làm giảm diện tích tiếp xúc giữa các cặp ma sát, từ đó làm giảm ảnh hưởng của lực bám dính.

Bài báo khẳng định ứng xử khác biệt của cùng vật liệu silic ở chế độ tải nhỏ (áp lực cỡ mN) và tải thông thường (áp lực cỡ N). Trong chế độ tải nhỏ, ảnh hưởng của các lực bề

mặt là đáng kể và nên được kể đến khi tính toán ma sát trong các linh kiện vi cơ điện tử. Các giá trị trung bình của hệ số ma sát mẫu Si/Si (0,112) và SiO₂/SiO₂ (0,4251) ở chế độ tải nhỏ có thể dùng trong tính toán ma sát cho các cấu trúc trong linh kiện MEMS như vi cảm biến hoặc vi động cơ. ❖

Ngày nhận bài: **05/5/2022**

Ngày phản biện: **18/5/2022**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. A.D. Romig, M.T. Dugger, P.J. McWhorter (2003). *Materials issues in microelectromechanical devices: science, engineering, manufacturability and reliability*. Acta Mater. 51, 5837–5866.
- [2]. B. Bhushan and S. Sundararajan (2001). *Micro, nano scale Tribology of MEMS*, Materials, Lubricants and Devices. Springer.
- [3]. Yifeng Lu and Pengfei Gao (2011). *Friction Measurement and lubrication in Rotatry Silicon MEMS Device*. Chinese Academy of Sciences.
- [4]. Bhushan (1999). *Handbook of Micro/ Nanotribology*. CRC Press LLC.
- [5]. Mathew Mate, C. (2008). *Tribology on the small scale - A bottom up approach to friction, lubrication and wear*. New York, USA: Oxford University Press, .
- [6]. Kaneko, R. (1993). *Microtribology today and tomorrow*. Wear, 168, 1-5.
- [7]. Bhushan, B. and A.V. Kulkarni (1996). *Effect of normal load on microscale friction measurements*. Thin solid Films, 278, 49-56.
- [8]. Rusu, F., et al. (2015). *Analysis of the surface effects on adhesion in MEMS structures*. Applied Surface Science 358, 634-640.
- [9]. Guo, Z., et al. (2008). *Research development of measuring methods on the tribology characters for movable MEMS devices: a review*. Microsystem Technologies 15, no 3 343-354.
- [10]. C.f. (2009). *Hardware Installation & Applications manual*. Tribology, USA.
- [11]. Sami Franssila (2004). *Introduction to Microfabrication-2nd Edition*. John Wiley & Sons.
- [12]. Hsu, T.-R. (2008). *Mems and Microsystems - Design, Manufacture and Nanoscale Engineering, ed. 2: United State of America*.
- [13]. Zygmunt Rymuza và Stanisław Pytko (2012). *The Effect of Scale in Tribological Testing*, Journal of Materials Research and Technology. 1(1), 13-20.
- [14]. M. Scherge, X. Li và J.A. Schaefer (1999). *The effect of water on friction of MEMS*. Tribology Letters. 6, 215-220.
- [15]. M. Binggeli and C. M. Mate (1995). *Influence of water vapor on nanotribology studied by friction force microscopy*. Journal of Vacuum Science & Technology B 13, 1312.
- [16]. M. Scherge, X. Li và J.A. Schaefer (1999). *The effect of water on friction of MEMS*. Tribology Letters. 6, 215-220.