

Nghiên cứu ảnh hưởng của tải trọng nhỏ đến hệ số ma sát của cặp vật liệu Silic - Silic dùng trong hệ thống vi cơ điện tử

Study on Impact of Low Load to Frictional Coefficient of Silicon – Silicon Couple in MEMS Devices

Phan Văn Mạnh¹, Nguyễn Trường Sinh¹, Phạm Hồng Phúc^{2,*}

¹ Học viện Kỹ thuật Quân sự - Số 234, Hoàng Quốc Việt, Bắc Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam

² Đại học Bách khoa Hà Nội - Số 1, Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Đến Tòa soạn: 07-11-2016; chấp nhận đăng: 28-02-2017

Tóm tắt

Bài báo đề xuất quy trình thí nghiệm xác định ảnh hưởng của tải trọng nhỏ tới hệ số ma sát của cặp vật liệu silic – silic bằng mô hình dạng chốt trên đĩa. Thí nghiệm thứ nhất được tiến hành khi tải thay đổi từ 2 mN đến 30 mN. Cặp vật liệu Si – Si cho hệ số ma sát gần như không đổi từ 0,15 đến 0,16 còn cặp vật liệu SiO₂ – SiO₂ cho hệ số ma sát giảm dần từ 0,35 đến 0,24. Khi tăng độ nhám bề mặt, cặp vật liệu SiO₂ – SiO₂ cho hệ số ma sát tăng dần từ 0,15 đến 0,30. 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. Ảnh hưởng của nhám bề mặt và sự khác biệt giữa ứng xử ma sát của vật liệu silic giữa tải nhỏ và tải thông thường cũng được đề cập trong thí nghiệm thứ hai.

Từ khóa: Ma sát trong MEMS, tải trọng nhỏ, hệ số ma sát, vật liệu Silic

Abstract

The paper proposes the experimental process to determine the impact of low load to frictional coefficient of silicon – silicon couple by pin on disk model. The first experiment was performed with ranging of contact load from 2 mN to 30 mN. The coefficient of friction (COF) of Si – Si couple varies from 0,15 to 0,16 and are considered to be constant and the COF of SiO₂ – SiO₂ couple decreases from 0,35 to 0,24. When increasing the surface roughness, the COF of SiO₂ – SiO₂ couple changes from 0,15 to 0,30. Consequently, the impact of surface force on frictional properties of materials have to be involved during the prediction of the frictional behavior of materials. The impact of surface roughness and different frictional behaviors of silicon between low and normal load are also mentioned in the second experiment.

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

1. Giới thiệu

Tribology là lĩnh vực khoa học nghiên cứu về ma sát, mòn và bôi trơn trong các máy móc, thiết bị cơ khí có kích thước macro. Ma sát, mòn không chỉ là nguyên nhân chủ yếu ảnh hưởng xấu đến hoạt động mà còn làm giảm hiệu suất, tuổi thọ của các máy móc thông thường.

Sự phát triển nhanh chóng của ngành công nghiệp vi cơ điện tử có thể tạo ra các linh kiện siêu nhỏ có kích thước từ nanomet đến một vài milimet. Nhưng hiện tượng ma sát vẫn là nguyên nhân chính ảnh hưởng xấu đến hoạt động, làm giảm tuổi thọ và độ tin cậy của thiết bị vi cơ [1, 2, 3]. 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. 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

* Địa chỉ liên hệ: Tel.: (+84) 987751970

Email: phuc.phamhong@hust.edu.vn

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 lĩnh vực 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, chưa có một nghiên cứu nào về ma sát trong thế giới vi mô. Đây thực sự là vấn đề cần thiết và có ý nghĩa khoa học. Bài báo của nhóm tác giả khảo sát ảnh hưởng của tải trọng nhỏ (từ 2 mN đến 30 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 đĩa. 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, gốm, 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].



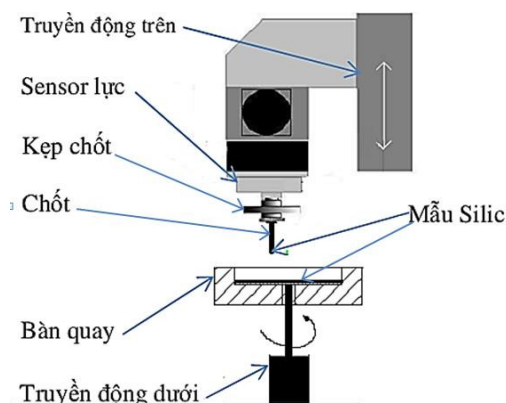
Hình 1. Thiết bị đo UMT

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 chót trên đĩa được mô tả trên Hình 2. Mẫu trên là miếng silic (100) có kích cỡ $2 \times 2 (\text{mm}^2)$ được cắt ra từ tấm silic bằng mũi dao kim cương và được dán chặt vào mặt dưới của chót. 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 quay bằng vít kẹp. Bề mặt thí nghiệm của mẫu dưới là mặt tinh. Khi làm việc, truyền động dưới (gồm động cơ, giảm tốc và bộ truyền đai) truyền chuyển động quay cho bàn quay, làm mẫu dưới quay theo. 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 $\pm 10^{-3} \text{ mN}$. Trong chế độ tải thông thường, sử dụng sensor DFH 20-0839 có dải đo lực từ 2 N đến 200 N, độ chính xác $\pm 10^{-3} \text{ N}$. Bàn quay có dải tốc độ quay từ 0,1 v/ph tới 2000 v/ph [10].



Hình 2. Mô hình thí nghiệm

2.2. Điều kiện thí nghiệm

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 [13]. M. Scherge và các đồng nghiệp lại cho rằng có khoảng 50 lớp nước cơ nguyên tử hoặc hơn nữa trên bề mặt silic [14]. Lớp nước tạo ra lực căng bề mặt chắc chắn sẽ ảnh hưởng đến ứng xử ma sát của vật liệu. Chúng tôi sử dụng 3 mẫu thí nghiệm được xử lý theo quy trình như sau:

- Mẫu 1: Cặp vật liệu silic – silic (mặt tinh – mặt tinh) được ngâm 2 phút trong axit HF 40% nhằm loại bỏ lớp ô xít SiO₂ 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 1 (Si/Si) này được xem là mẫu không hút ẩm do không còn lớp SiO₂. Độ nhám bề mặt sau khi bị ăn mòn bằng HF thay đổi không đáng kể, do đó coi như không đổi so với trước khi bị ăn mòn.

- Mẫu 2: 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 đó vẫn tồn tại lớp oxit SiO₂ mỏng trên bề mặt. Mẫu 2 (SiO₂/SiO₂) được xem là mẫu có đặc tính hút ẩm.

- Mẫu 3: Cặp vật liệu silic – silic (mặt thô – mặt tinh) được xử lý như mẫu 2, tuy nhiên mẫu 3 này (R_SiO₂/SiO₂) có mặt trên (ký hiệu R_SiO₂) là mặt thô có độ nhám bề mặt cao hơn hẳn so với mặt tinh, như vậy sẽ giảm diện tích tiếp xúc của hai bề mặt khi trượt, từ đó loại bỏ bớt ảnh hưởng của lực căng bề mặt do lớp nước gây ra tới ma sát.

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 (Si/Si) + Mẫu 2 (SiO ₂ /SiO ₂) + Mẫu 3 (R_SiO ₂ /SiO ₂)
Nhám bề mặt	+ SiO ₂ : RMS = 0,1 – 0,2 nm + R_SiO ₂ : RMS = 0,5 μm + Si: RMS = 0,1 – 0,2 nm
Tải trọng	+ Thí nghiệm 1: Tải tăng tuyến tính từ 2 mN đến 30 mN + Thí nghiệm 2: Tải tăng tuyến tính từ 2 N đến 10 N
Tốc độ vòng	0,1 v/ph
Vận tốc trượt	2 mm/s
Thời gian	60 giây
Độ ẩm trung bình	71,5 %
Nhiệt độ trung bình	26°C

Thí nghiệm 1: Tải trọng được đặt tăng dần từ 2 mN đến 30 mN, cả ba mẫu đều được làm thí nghiệm nhiều lần nhằm xác định giá trị trung bình.

Thí nghiệm 2: Để phân biệt ứng xử ma sát của vật liệu silic khi tải nhỏ và tải thông thường, thí nghiệm với trường hợp tải thay đổi từ 2 N đến 10 N được áp dụng cho loại mẫu 2 và 3.

Điều kiện thí nghiệm được mô tả đầy đủ trong Bảng 1. Trong tất cả các thí nghiệm, vận tốc trượt giữa hai bề mặt ma sát được giữ không đổi bằng 2

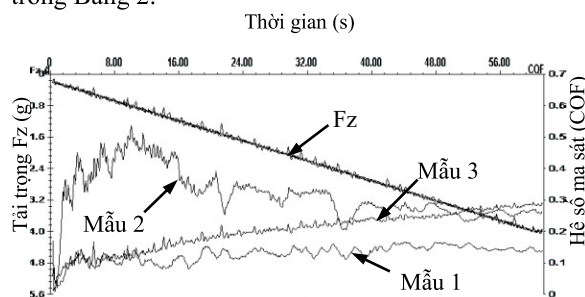
mm/s, thời gian cho mỗi lần thí nghiệm là 60 giây. Độ ẩm môi trường đo trong ngày làm thí nghiệm dao động từ 68 đến 75 %, nhiệt độ thí nghiệm từ 25 – 27°C. Độ ẩm và nhiệt độ được xem là không đổi trong một lần làm thí nghiệm (khoảng 60 giây).

3. Kết quả thí nghiệm và nhận xét

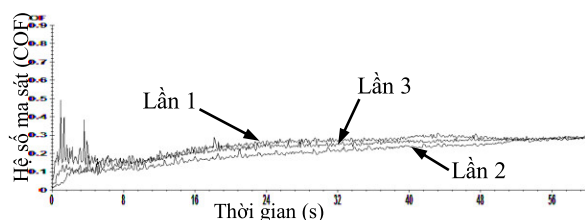
3.1. Kết quả thí nghiệm

Thí nghiệm 1: Khảo sát sự thay đổi của hệ số ma sát trong trường hợp tải nhỏ. Đồ thị thể hiện sự phụ thuộc của hệ số ma sát của cả 3 mẫu đối với sự thay đổi của tải trọng được thể hiện trên Hình 3.

Thực tế, giá trị của hệ số ma sát tại các lần thí nghiệm khác nhau (trong cùng điều kiện) thì có sự sai khác. Hình 4 mô tả sự khác nhau của đồ thị hệ số ma sát của mẫu 3 qua 3 lần thí nghiệm là một ví dụ. Sự khác biệt này là do trong chế độ tải nhỏ, đặc tính bề mặt (độ nhám, độ phẳng, độ sạch, khuyết tật bề mặt...) có ảnh hưởng đáng kể tới ma sát. Các bề mặt thí nghiệm yêu cầu phải giống nhau trượt đối, tuy nhiên trong thực tế không bao giờ đạt được như vậy. Sự sai khác nhỏ của bề mặt cũng gây ra sự biến động khác nhau của hệ số ma sát. Do đó, để đánh giá một cách chính xác hơn sự thay đổi của hệ số ma sát khi tải trọng tăng dần. Nhóm tác giả thí nghiệm trong trường hợp tải trọng tăng dần theo bước: 2, 10, 20 và 30 mN. Kết quả thí nghiệm tại mỗi bước tải trọng là kết quả tính trung bình của 5 lần thí nghiệm. Các giá trị trung bình tại mỗi bước tải trọng được thể hiện trong Bảng 2.



Hình 3. Hệ số ma sát của 3 mẫu khi tăng tải liên tục tuyến tính từ 2 mN đến 30 mN



Hình 4. Đồ thị hệ số ma sát của mẫu 3 qua 3 lần thí nghiệm khi tải tăng tuyến tính từ 2 mN đến 30 mN

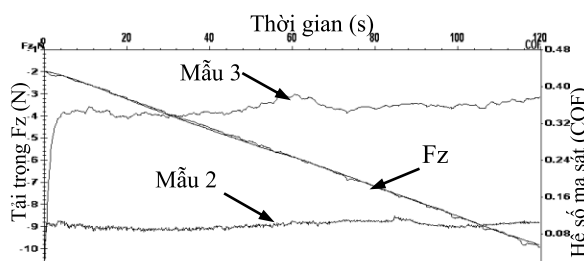
Bảng 2. Giá trị trung bình của hệ số ma sát tại các bước tải trọng (nhỏ) cho 3 mẫu thí nghiệm

Tải trọng (mN)		2	10	20	30
Hệ số ma sát	Mẫu 1	0,16	0,15	0,154	0,161
	Mẫu 2	0,35	0,317	0,302	0,239
	Mẫu 3	0,15	0,20	0,25	0,3

Bảng 3. Hệ số ma sát của mẫu 2 và 3 trong chế độ tải thông thường

Cặp vật liệu	Mẫu 2	Mẫu 3
Hệ số ma sát trung bình	0,13	0,38

Thí nghiệm 2: Khảo sát sự thay đổi của hệ số ma sát trong trường hợp tải thông thường. Mối quan hệ giữa hệ số ma sát và tải được chỉ ra trên Hình 5. Giá trị trung bình của hệ số ma sát được thể hiện trên Bảng 3.



Hình 5. Hệ số ma sát của mẫu 2 khi tải tăng tuyến tính từ 2 N đến 10 N

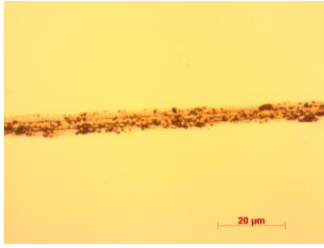
3.2. Nhận xét

Ta thấy khi tải trọng tăng từ 2 mN đến 30 mN, hệ số ma sát của mẫu 1 gần như không đổi với giá trị biến động trong khoảng nhỏ từ 0,15 đến 0,16 (xem Hình 3 và Bảng 2). Đối với mẫu 2, khi tăng tải trọng, hệ số ma sát giảm dần. Trong các chế độ tải trọng, hệ số ma sát của mẫu 2 cao hơn hẳn so với mẫu 1. Điều này được giải thích bằng ảnh hưởng của lực căng bề mặt gây ra do hơi nước trong chế độ tải trọng nhỏ. Như đã đề cập ở trên, bề mặt silic luôn tồn tại lớp oxit SiO₂ có đặc tính hút ẩm rất lớn. Trên bề mặt của vật liệu mẫu 2 luôn tồn tại lớp nước cỡ vài lớp nguyên tử do SiO₂ hút ẩm từ môi trường. 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 2 là mặt tinh – tinh, do đó ảnh hưởng của lực căng bề mặt tới ma sát là đáng kể, cho nên mẫu 2 có hệ số ma sát cao hơn nhiều so với mẫu 1 (được xem như khô hoàn toàn do loại bỏ lớp SiO₂ và sấy khô trên 100°C). Khi tải trọng tăng, hệ số ma sát giảm, điều này được giải thích bằng sự giảm ảnh hưởng của lực bám dính khi tăng tải. Sự xuất hiện của độ ẩm trên bề mặt mẫu 2 làm phức tạp hóa đặc tính ma

sát và làm đồ thị hệ số ma sát của mẫu 2 biến động lớn hơn so với mẫu 1 và mẫu 3.

Đối với mẫu 3, độ nhám bề mặt của mặt trên (mặt thô) 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 2. Ảnh hưởng của bám dính giữa 2 bề mặt hầu như bị loại bỏ. Hệ số ma sát của mẫu 3 tại các tải trọng 2 mN, 10 mN và 20 mN nhỏ hơn rất nhiều so với mẫu 2 (Bảng 2). Khi tải trọng tăng, hệ số ma sát của mẫu 3 tăng dần, nguyên nhân là do sự xâm nhập của các nhấp nhô và chiều sâu xâm nhập của các nhấp nhô bề mặt và sự cào xước của đỉnh mấp mô bề mặt này lên bề mặt kia. Do tải trọng nhỏ, sự cào xước này chỉ diễn ra trên lớp SiO₂ chứ chưa làm bóc tách lớp oxit khỏi bề mặt vật liệu silic. Khác với mẫu 3, mẫu 1 cho hệ số ma sát gần như không đổi với giá trị nhỏ (trung bình bằng 0,155), nguyên nhân là do bề mặt mẫu 1 có độ nhám nhỏ hơn rất nhiều so với mẫu 3, quá trình xâm nhập vào nhau và cào xước của các nhấp nhô bề mặt là chưa đáng kể.

Trong chế độ tải thông thường (thí nghiệm 2), ảnh hưởng của lực căng bề mặt coi như không có. Hệ số ma sát của mẫu 2 lúc này gần như không đổi (Hình 5), giá trị trung bình của hệ số ma sát bằng 0,13 (Bảng 3) và nhỏ hơn rất nhiều so với hệ số ma sát của mẫu 2 khi tải nhỏ (từ 0,35 đến 0,24 – Bảng 2). Điều này khẳng định lại một lần nữa, lực căng bề mặt do độ ẩm ảnh hưởng đáng kể đến ma sát trong chế độ tải nhỏ. Giá trị này (0,13) thậm chí còn bé hơn một chút so với hệ số ma sát của mẫu 1 (Si/Si) khi tải nhỏ (0,155), điều này là do sự khác biệt về bản chất của vật liệu SiO₂ so với Si, thực tế modun đàn hồi của vật liệu SiO₂ nhỏ hơn so với Si, quá trình cắt qua lớp SiO₂ của các nhấp nhô bề mặt dễ dàng hơn so với Si, do đó vật liệu SiO₂ cho hệ số ma sát nhỏ hơn. Khi tải thông thường, hệ số ma sát trung bình của mẫu 3 gần như không đổi và bằng 0,38 (Hình 5 – Bảng 3). Giá trị này cao hơn rất nhiều so với hệ số ma sát của mẫu 3 khi tải nhỏ (từ 0,16 đến 0,3 – Bảng 2) và mẫu 2 khi tải thông thường (0,13 – Bảng 3). Nguyên nhân là do mẫu 3 có độ nhám bề mặt lớn hơn nhiều so với mẫu 2 nên quá trình cào xước của các nhấp nhô bề mặt và bóc tách lớp vật liệu diễn ra một cách khốc liệt khi tải tăng lên. Sự tăng cao hệ số ma sát do cào xước và bóc tách vật liệu lớn hơn nhiều lần so với sự giảm hệ số ma sát khi không còn ảnh hưởng của lực căng bề mặt. Các nhấp nhô bề mặt tiếp xúc liên tục bị biến dạng, nén ép và san phẳng khi tăng tải. Lớp SiO₂ trên bề mặt vật liệu sẽ dần bị bóc tách hoàn toàn, vết cào xước được hình thành và có thể quan sát bằng mắt thường sau khi làm thí nghiệm (Hình 6 thể hiện vết xước bề mặt của mẫu 3 sau khi làm thí nghiệm với tỷ lệ phóng đại 100:1). Sau khi bóc tách lớp SiO₂ ra khỏi bề mặt, quá trình ma sát diễn ra ổn định hơn, do đó hệ số ma sát của mẫu 3 khi tải thông thường hầu như không đổi.



Hình 6. Bề mặt mẫu 3 sau thí nghiệm ở chế độ tải thông thường

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 thay đổi từ 2 mN đến 30 mN. Ba mẫu vật liệu dùng thí nghiệm là mẫu Si/Si, mẫu SiO₂/SiO₂ và mẫu R_SiO₂/SiO₂. Kết quả thí nghiệm cho thấy hệ số ma sát của mẫu Si/Si là ổn định khi tải thay đổi và có giá trị dao động từ 0,15 đến 0,16. Hệ số ma sát của mẫu R_SiO₂/SiO₂ tăng dần theo tải từ 0,15 đến 0,30. Hệ số ma sát của mẫu SiO₂/SiO₂ biến động khá lớn, giảm từ 0,35 đến 0,24 khi tải tăng dần. 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. Tuy nhiên nhám bề mặt lớn sẽ làm tăng hệ số ma sát do cơ chế khóa vào nhau và cào xước của các đỉnh nhấp nhô hơn cả ảnh hưởng do lực bám dính.

Bài báo khẳng định ứng xử khác biệt của cùng vật liệu silic ở chế độ tải nhỏ với áp lực cỡ mN và tải thông thường với áp lực cỡ N. Trong chế độ tải thông thường, hệ số ma sát hầu như không phụ thuộc vào tải trọng và tuân theo định luật ma sát thông thường. 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 (0,155) và SiO₂/SiO₂ (0,3) ở chế độ tải nhỏ kể trên là tin cậy được và có thể dùng trong tính toán ma sát cho các cấu trúc trong linh kiện MEMS như vi cảm biến hoặc vi động cơ.

Tài liệu tham khảo

[1]. A.D. Romig, M.T. Dugger, P.J. McWhorter, Materials issues in microelec-tromechnical devices:

science, engineering, manufacturability and reliability. *Acta Mater.* 51, (2003) 5837–5866.

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