코팅된 실리콘웨이퍼의 Microtribological 특성

Micro-tribological Properties of Coated Silicon Wafer

차금환 · 김대은*

연세대학교 대학원 *연세대학교 기계공학과

Abstract

In recent years, the tribological behavior of coated ceramic material has been the topic of much interest. Particularly, the understanding of the tribological performance of thin film under light load is important for potential applications in MEMS. In this work under light load and low speed, the tribological behavior of coated silicon was investigated.

The results show that both adhesive and abrasive wear occur depending on the sliding condition. Also the effect of humidity on friction was influenced by the apparent ares of contact between the two surfaces. Finally, undulations on the silicon wafer were found to be effective in trapping wear particles.

Key Words : Micro-tribology(미세트라이볼로지), Adhesion(응착), Abrasion(연삭), Undulated Surface(요철표면),

I 서 론

세라믹 재료들은 내마모성, 저밀도, 고경도, 내온성 및 높은 압축강도 등의 우수한 기계적 특성으로 인해 각종 베어링이나 절삭공구 등에 사용되고 있으며, 화학적인 방법을 통해 정밀한 미세패턴 가공이 가능하므로 MEMS(Micro-Electro-Mechanical-System) 및 반도체 산업에서 사용이 증가되고 있다 [1-2].

이전의 연구에 의하면 세라믹 재료의 마찰 및 마멸특성은 접촉조건 및 온도, 습도 등의 환경에 크게 영향받는 것으로 보고되었다 [3-4]. 특히, silicon은 미소기기의 기본소재로서 microtribological 특성에 대한 이해가 요구되고 있다.

그러나 지난 수 십년간의 지속적인 연구에도 불구하고 마이크로 모터나 펌프와 같은 초정밀부품에서 발생하는 마찰현상에 대한 연구는 미약한 것이 현실이다. 또한 각종 세라믹재료의 마찰특성에 관한 연구도 모재 및 후막코팅시 고하중 및 고속 등의 심각한 마찰 및 마멸이 발생되는 경우에 대한 것이 대부분이다 [5-6]. 그러나 최근 이러한 세라믹재료들을 표면에 코팅하여 MEMS부품을 제작하는데 있어서 희생층이나 구조재로 사용하는 경우가 증가하고 있는데, 이 경우 각 부품들은 저하중하에서 고속 및 저속으로 작동하게 되며 이 경우의 마찰특성은 거시적인 관점에서의 마찰특성과는 다른 양상을 보인다. 그러므로 이 분야에 대한 연구가 현재 활발하게 진행되고 있으나 아직까지 이러한 특수한 작동조건에서의 각종 코팅재료의 마찰특성에 대한 이해가 부족한 실정이다. 본 연구에서는 MEMS 부품의 제작에 많이 사용되고 있는 Si_3N_4 polysilicon, SiO_2와 같은

재료를 실리콘웨이퍼에 코팅한 시편에 대하여 작동조건 및 환경조건의 변화에 따른 기본적인 마찰 및 마멸특성을 이해하고자 하는데 목적이 있다.

Ⅱ. 실험방법

2.1 실험장치

본 실험에서는 미소하중에서 마찰특성을 파악하기 위해 microtribology tester를 제작하였다.

본 실험장치에서 핀과 코팅시편간의 접촉은 양방향으로 진행되며 핀의 1회 왕복운동거리는 6mm이다. 또한 접촉부에 가해지는 수직하중과 이때 발생하는 마찰력은 반도체 스트레인 게이지를 이용하여 측정하였으며 앰프를 통해 증폭되고 A/D board를 이용하여 컴퓨터로 저장된다. Fig. 1에 이와 같은 실험장치를 나타내고 있다.

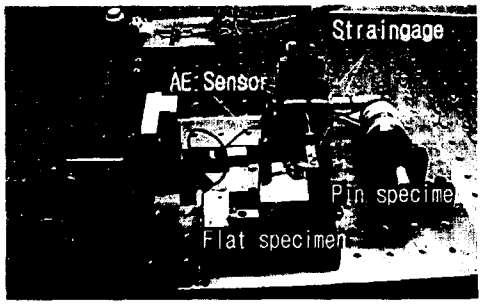


Fig. 1 Experimental setup

2.2 실험시편 및 조건

본 실험에 사용한 핀은 3종류로서 하드디스크의 슬라이더, 1/16inch인 STB2 bearing용 ball 및 5㎛의 끝단 반경을 가진 다이아몬드 팁을 이용하였다. 또한 디스크시편은 (100)실리콘웨이퍼 위에 Si_3N_4와 polysilicon을 각각 250nm와 1㎛ 두께로 CVD방법으로 증착시킨 것과 실리콘웨이퍼를 산화시켜 80nm정도의 SiO_2 막을 형성시킨 시편 및 (100) bare silicon 등의 4가지를 사용하였다.

Polysilicon 디스크의 경우 표면거칠기는 10nm Ra정도로 비교적 큰 값을 가졌지만 그 이외에는 3-5nm Ra였다. 또한 시험전에 디스크 및 핀 시편을 아세톤으로 초음파 세척하였다. 디스크 시편의 미끄럼 속도는 1mm/sec 였으며 하중은 1, 3.5, 5gf 로 변화시켰다. 실험에서 설정한 미끄럼 거리는 각 조건에 따른 마찰계수의 변화를 관찰하기 위해 0.6m, 그리고 마멸특성을 파악하기 위해 2m로 각각 다르게 수행하였다.

실험은 Class 100의 청정환경에서 진행하였으며, 습도의 영향을 파악하기 위해 상온(25±2℃)상태에서 습도를 35, 50, 80%의 3단계로 변화시키면서 실험을 진행하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

각 실험조건에 따른 마찰계수의 변화를 관찰하기 위해 미끄럼 거리를 0.6m로 설정하였다. 이는 다이아몬드를 핀으로 사용했을 경우 가시적인 마멸트랙이 관찰되지 않는 거리이다. 이렇게 얻은 마찰계수를 Fig. 2-5에 보인다.

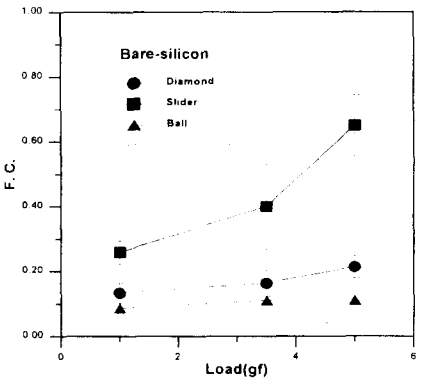


Fig. 2 Friction coefficient of bare silicon w.r.t normal load

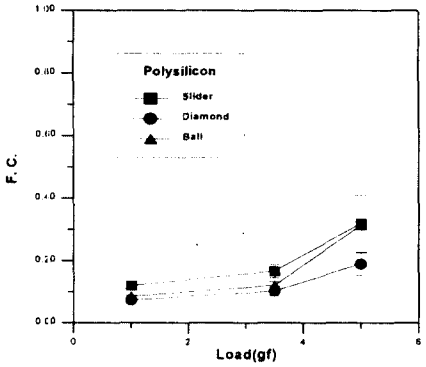


Fig. 3 Friction coefficient of polysilicon w.r.t normal load

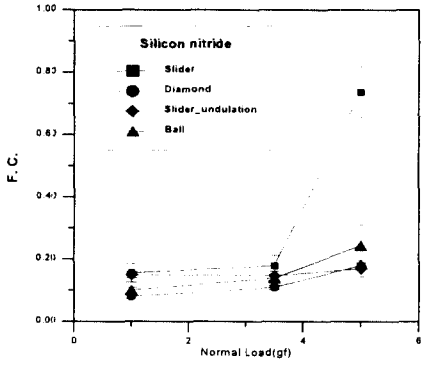


Fig. 4 Friction coefficient of Si_3N_4 w.r.t normal load

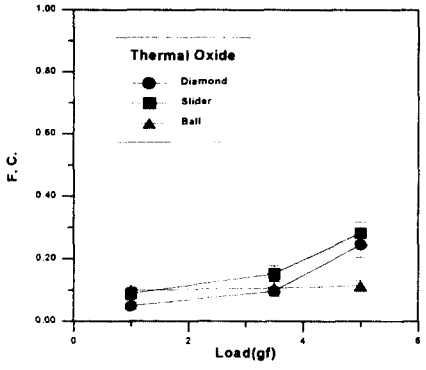


Fig. 5 Friction coefficient of SiO_2 w.r.t normal load

우선 하중에 따른 마찰계수의 전체적인 경향을 살펴보면 하중에 따라 전반적으로 증가하는 경향을 보인다. 핀 재료를 볼과 다이아몬드를 사용했을 때와 슬라이더를 사용했을 경우를 비교하면 전자의 경우 마찰계수가 비교적 안정되고 하중에 따른 영향도 그리 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 슬라이더를 핀으로 사용했을 경우 접촉면적이 증가하여 상대적으로 응착의 영향이 커져 마찰계수의 편차도 크고 급격한 증가를 보인다.

각 코팅재료에 따른 마찰계수의 변화를 보면 bare silicon과 Si_3N_4로 코팅된 디스크시편에 슬라이더를 핀으로 사용했을 경우 하중이 증가함에 따라 마찰계수가 크게 증가하는 것으로 나타났다. 특히 bare silicon은 슬라이더를 핀으로 사용했을 경우 하중이 증가함에 따라 접촉면의 stiction이 크게 증가하여 접촉이 매우 불안정하였고 5gf의 경우 마찰계수가 1에 근접하는 것을 알 수 있다. 그러나 50㎛간격의 산과 골이 있는 Si_3N_4 요철표면의 경우, Fig. 4에서 보인 것처럼 슬라이더를 핀으로 사용해도 마찰계수의 증가가 뚜렷하지 않았다. 이로써 미소하중에서 작동하는 micro- system에서도 macro-system과 같이 요철표면이 마찰을 감소시키는 역할을 하는 것을 알 수 있었다.

Polysilicon과 SiO_2코팅시편의 경우에도 슬라이더를 핀으로 사용한 경우가 마찰계수가 가장 큰 값을 갖는 것으로 보아 미소하중에서는 접촉면이 넓을 경우 접촉면에서의 응착력이 마찰계수에 가장 지배적인 인자임을 알 수 있다. 이러한 접촉면적의 영향은 습도가 높은 경우에 더 크게 나타날 것으로 예상되므로 각 핀 시편에 습도를 달리했을 경우의 마찰계수를 측정하였으며 그 결과를 Fig. 6-8에 나타내었다.

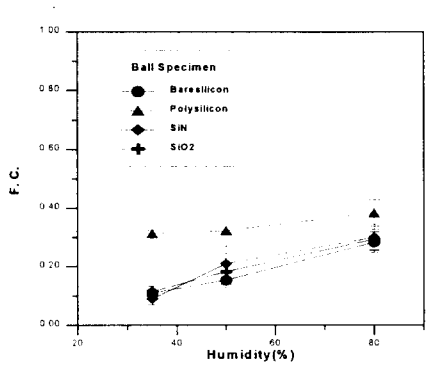


Fig. 6 Effect of humidity with ball pin

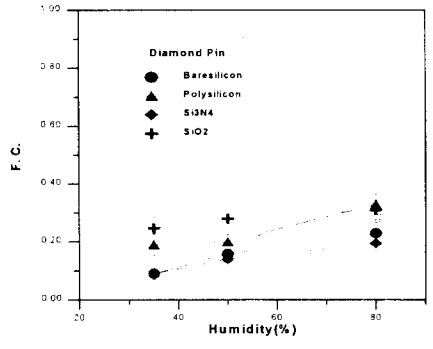


Fig. 7 Effect of humidity with diamond pin

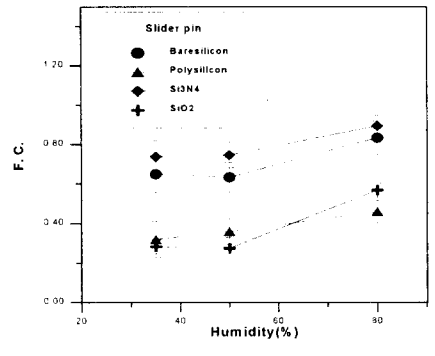
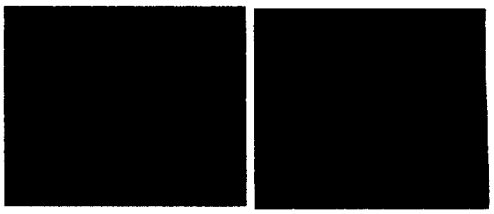


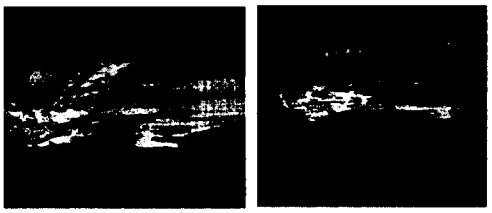
Fig. 8 Effect of humidity with slider pin

Fig. 6-8은 수직하중이 5gf 일 경우 핀과 디스크간의 각 조합에서 습도의 영향을 파악한 것이다. 전체적으로 보면 습도에 따라 전체 디스크시편의 마찰계수가 증가하는 것으로 보인다. Fig.6-7은 핀시편으로 볼과 다이아몬드를 사용한 경우로서 습도증가에 따른 영향은 그리 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 8과 같이 접촉면이 큰 슬라이더를 핀으로 사용한 경우에는 앞의 두 경우와 비교했을 때 초기 마찰계수도 크고 그 변동도 심한 것으로 나타났다. 일반적으로 표면이 평탄하고 작용하중이 작은 경우에는 습도가 표면장력을 증가시켜 마찰력을 증가시키는 meniscus effect를 발생시키는 것으로 알려져 있다. 슬라이더를 핀으로 사용했을 경우도 이러한 효과 때문에 마찰계수가 큰 것으로 판단된다.

다음은 각 코팅시편의 마멸특성을 알아보기 위해 볼을 핀으로 이용하여 거시적인 마멸의 관찰이 가능하도록 미끄럼거리를 2m로 했을 경우, 마멸트랙의 형상을 Fig.9 에 나타내었고 마멸입자와 트랙면에 대하여 AES(Auger Electron Spectroscopy) 측정을 통해 마멸기구를 분석하였다.



(a) bare silicon (b) polysilicon



(c) SiO_2 (d) Si_3N_4

Fig.9 Optical micrograph of disk (5gf)

Fig. 9에서 보면 bare silicon의 경우 취성파괴(brittle fracture)에 의해 생성된 미세한 마모입자와 트랙 양옆의 소성변형이 관찰되었다.

SiO_2, polysilicon 및 Si_3N_4의 마멸트랙에서는 표면에 응착된 물질이 다수 관찰되었는데 이는 Fig. 10과 같이표면에 생성된 산화마을 제거한 후의 AES분석 결과 1, 3과 같이 마멸트랙과 마멸입자의 주 성분은 볼과 접촉표면에서 발생한 Fe 및 Si 산화물인 것으로 밝혀졌다.

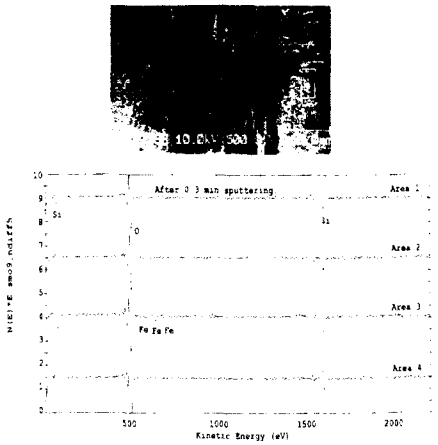


Fig. 10 AES analysis of SiO_2 wear track (constant 5gf load, 35% humidity)

Ⅳ. 결론

Si_3N_4, polysilicon 및 SiO_2를 CVD 방법으로 증착시킨 실리콘웨이퍼 위에 베어링 볼과 반경 5㎛ 다이아몬드 및 슬라이더를 핀으로 이용하여 미소하중하에서 마찰실험한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 습도는 두 접촉면의 표면거칠기가 매우 작을 경우 meniscus 효과에 의해 마찰계수를 증가시키지만, 접촉면적이 작을 경우 그 영향이 크지 않은 것으로 나타났다.

2. Silicon nitride 코팅시편 및 bare-silicon의 경우 슬라이더를 핀으로 사용했을 때, 마찰계수가 큰 값을 갖고 변동이 심하였지만 요철표면에 대해서는 비교적 작은 마찰계수를 나타내었다. 이것으로 보아 요철표면은 저하중하에서도 마찰계수를 감소시키데 효과적이라고 판단된다. 또한 bare silicon의 마찰특성을 개선하기 위해 저마찰 특성을 갖는 코팅이 필요하다.

3. 미소하중이 작용하는 시스템에 대한 마멸기구는 접촉면적이 큰 경우 응착마멸이 지배적이라고 판단된다.

후기

본 연구는 한국과학기술연구원(과제번호 : 97HN)과 한국과학재단 지정 정보저장기기 연구센터(과제번호 : 97K3-0907-02-02-1)의 지원을 받아 이루어 졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

[1] M. Mehregany and S. T. Senturia, "Measurement of Wear in Polysilicon Micromotors", IEEE Transactions on Electron Devices, V. 39, No. 5, pp.1136-1143, 1992.

[2] B. Bhushan and S. Venkatesan, "Friction and wear studies of Silicon in sliding contact with thin-film magnetic rigid disks", J. of Mater. Res., Vol. 8, No. 7, pp. 1611-1628, 1993.

[3] J. F. Lin, M. H. Liu and J. D. Wu, "Analysis of the friction and wear mechanism of structural ceramic coatings, Part2, Wear, V. 198, pp. 7-14, 1996.

[4] K.Demizu, H. Ishigaki and R. Wadabayashi, "Dry Friction of Silicon Carbide and Silicon Nitride Against Metals", J. of tribology, V.111, pp. 401- 405

[5] Wnag Fu-xing and Lin-Heng Haung, "Study on Tribology of Silicon Nitride Ceramic Tappet", J. of tribology, V. 115, pp. 295-298, 1993.

[6] M. Watremez, J. P. Bricout, B. Marguet, "Friction, Temperature and Wear analysis for Ceramic Coated Brake Disks", J. of tribology, V. 118, pp. 457- 465, 1996.