

シリコン単結晶のトライボロジーと微構造変化

[研究代表者] 高木 誠 (工学部機械学科)
 [共同研究者] 岩田博之 (工学部電気学科)
 [共同研究者] 坂 公恭 (総合技術研究所)

研究成果の概要

シリコン(Si)単結晶はマイクロシステム(MEMS)応用において構造材料として使用されるようになってきたが、その機械的性質についての基礎データは十分ではない。またシリコン単結晶は高純度で極めて完全性の高い結晶構造を有するため、物質間の摩擦・摩耗現象に関する基礎的なモデルとして学術的にも意味がある。本研究では、シリコン単結晶の摩擦・摩耗(トライボロジー)について調べた。具体的には、シリコン単結晶ウエハ表面にシリコン単結晶または窒化ケイ素(Si_3N_4)を相手材として摩擦を行い、それに伴う微構造変化を透過型電子顕微鏡(TEM)で調べた。その結果、シリコン単結晶同士の同種材料間の摩擦では活性になり、原子拡散により溶着・酸化が起こって剥離し摩耗粉が生じ転位などの欠陥も発生する。一方、シリコン単結晶-窒化ケイ素(Si_3N_4)間の摩擦では大きな構造変化は生じなかった。したがって、シリコン単結晶についても同種材料間と異種材料間の摩擦現象は大きく異なるということができる。

研究分野：材料工学、材料科学

キーワード：シリコン単結晶、摩擦・摩耗、透過型電子顕微鏡

1. 研究開始当初の背景

医療や情報など様々な分野において、狭小空間で動作可能なマイクロシステム(MEMS)の開発が期待される。一般的にMEMSを構成する微小な機械要素部品の材料としては、微細加工技術が確立しているシリコン(Si)単結晶が使用される。しかし、Si単結晶はこれまで電子材料として使用されてきたため、機械的性質については十分に調べられているとはいえない。なかでもトライボロジー(摩擦・摩耗)とそれに関わる材料微構造の変化についてはほとんど未解明である。

また、Si単結晶は完全性の高い結晶構造が得られる稀有な材料でもあるため、そのトライボロジーで生じる現象の解明は、広範な摩擦・摩耗現象の1つの基本的なモデルを提示することにもなり得、学術性もある。

2. 研究の目的

本研究では、Si単結晶ウエハに、相手材と

して同種材料であるSi単結晶または窒化ケイ素(Si_3N_4)を用いて摩擦を行い、それに伴う形状変化及び微構造変化をそれぞれ走査型電子顕微鏡(SEM)および透過型電子顕微鏡(TEM)等で詳細に調べた。それにより、Si単結晶間およびSi- Si_3N_4 間のトライボロジーについて、現象面から応用する上での基礎的な知見を得ることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 摩擦・摩耗試験

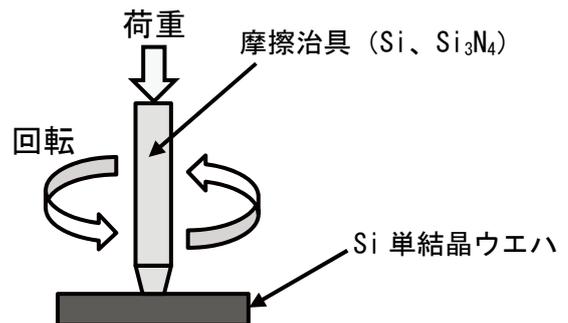


図 1. 摩擦・摩耗試験の模式図

図 1 に示すような摩擦・摩耗試験により、Si(100)単結晶ウエハを試料として、相手材である摩擦治具に Si 単結晶または窒化ケイ素(Si_3N_4)を用いて、荷重 5N、回転速度 10rpm、摩擦時間 50 時間で、同種材料間及び異種材料間の摩擦・摩耗試験を行った。

摩擦・摩耗試験後に Si 単結晶ウエハ表面の形状を走査型電子顕微鏡(SEM)で観察した。また、相手材の Si 単結晶または Si_3N_4 からなる摩擦治具の摩擦面付近の形状も同様に SEM で観察した。

(2) 摩擦に伴う微構造変化の TEM 観察

摩擦に伴う Si 単結晶ウエハ表面の微構造変化を調べるために、透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて、摩擦部の断面観察を行った。尚、この TEM 観察用試料の作製には集束イオンビーム(FIB)を使用した。

4. 研究成果

(1) Si 単結晶間のトライボロジー

Si 単結晶ウエハを、同種材料である Si 単結晶からなる摩擦治具を用いて、荷重 5N、回転速度 10rpm、摩擦時間 50 時間で摩擦・摩耗試験を行った。図 2 に示す、試験後の Si 単結晶ウエハ表面の摩擦部及び Si 単結晶摩擦治具表面の SEM 像より、摩擦面には凹凸部が存在していた。

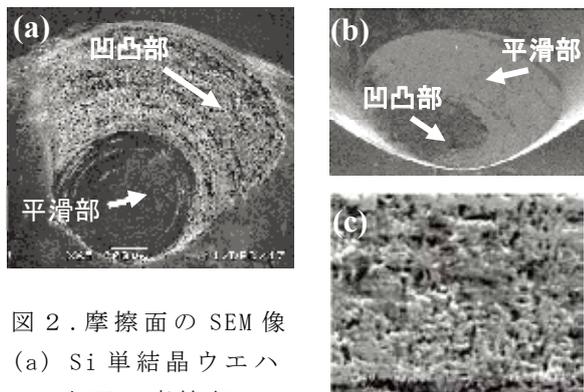


図 2. 摩擦面の SEM 像

(a) Si 単結晶ウエハ表面の摩擦部

(b) Si 単結晶摩擦治具表面

(c) 凹凸部の拡大像

図 3 に示す、Si 単結晶ウエハの摩擦部断面の TEM 像から、平滑部にはわずかに双晶や歪みが見られるが、大きな構造変化は生じ

ていない。一方、凹凸部には酸化を伴って剥離した摩耗粉が表面に凝着し、その下の Si 単結晶部分には転位やクラックが発生していた。

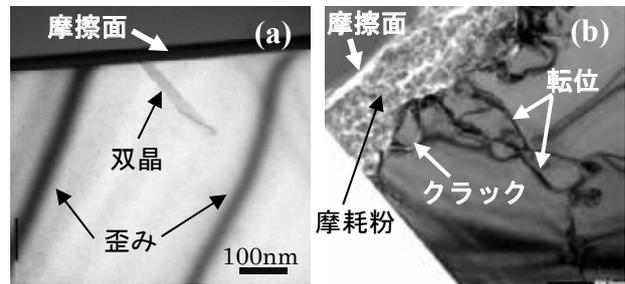


図 3. Si 単結晶ウエハの摩擦部断面の TEM 像

(a) 平滑部 (b) 凹凸部

(2) Si 単結晶 - Si_3N_4 間のトライボロジー

Si 単結晶ウエハを、 Si_3N_4 からなる摩擦治具を用いて、(1)と同様の条件で摩擦・摩耗試験を行った。図 4 の SEM 像に示すように、Si 単結晶ウエハ表面の摩擦部及び Si 単結晶摩擦治具表面はともにほぼ平滑で、(1)の Si 単結晶間で見られたような凹凸部はほとんど存在しなかった。

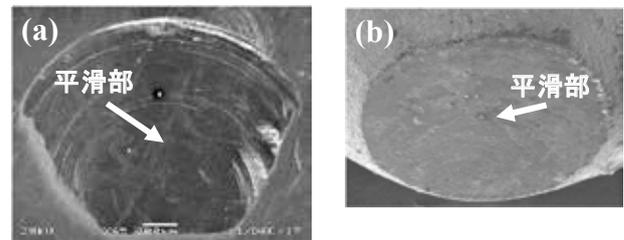


図 4. 摩擦面の SEM 像

(a) Si 単結晶ウエハ表面の摩擦部

(b) Si_3N_4 摩擦治具表面

図 5 に示す、Si 単結晶ウエハの摩擦部断面の TEM 像から、平滑部からなる摩擦面には大きな構造変化は見られないことがわかる。

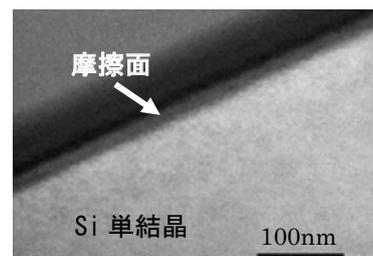


図 5. Si 単結晶ウエハの摩擦部断面の TEM 像

(3) Si 単結晶の摩擦・摩耗現象の考察

前述した(1)及び(2)の実験結果を比較すると、Si 単結晶間の同種材料同士の摩擦では、酸化を伴いながら塑性流動が生じて剥離することで摩耗粉が生じて表面に凝着し、表面に凹凸ができる。一方、異種材料 Si_3N_4 との摩擦(モース硬度は Si と近い)では顕著な構造変化は生じない。このことから Si においても、同種材料間の摩擦では、材料間の原子拡散が起こりやすく活性になるため、半熔融状態での溶着や酸化が生じやすくなり、異種材料との摩擦とは明らかに異なる現象を示すことが判明した。