

令和 3 年 8 月 20 日現在

機関番号：35409

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06054

研究課題名（和文）ナノワイヤ利用微細凹凸による極低摩擦係数薄膜の開発

研究課題名（英文）Development of low friction coefficient film by fine projection

研究代表者

加藤 昌彦（KATO, MASAHIKO）

福山大学・工学部・教授

研究者番号：70274115

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：無潤滑で低摩擦係数を実現するため、コーティング表面の微細凹凸形成を行った。形成のため、界面にナノワイヤを形成した。その結果、ナノワイヤ形成条件が適切であれば薄膜のはく離強度は向上することがわかった。摩擦係数は、微細凹凸の高さにより変化し、微細凹凸の高さが $0.5\mu\text{m}$ 程度で最も効果が高くなることがわかった。また、ナノワイヤの密度も重要な因子であり、放電条件により高密度化が可能であることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

新たに開発したナノワイヤは、硬度が高くしかも低コストに形成可能な技術である。しかも脱離に対しても強い。これを応用し、表面微細凹凸を形成した。微細凹凸による接触面積低減効果により、無潤滑でも低摩擦係数化が可能であることがわかった、開発が完成すれば、従来のボールベアリングを置換することが可能である。

研究成果の概要（英文）：To achieve low friction coefficient without lubrication, fine projections were formed on the coatings. Nano-wires were grown at the interface to form fine projections. The result showed that the delamination strength of the coatings was increased by the projections. Friction coefficient was influenced by the height of the fine projections, and the minimum friction coefficient was observed when the average height of the projection was around 0.5 micrometer. Density of the nano-wires was one of important factors, and increase in density was achieved by optimizing discharging condition.

研究分野：表面設計工学

キーワード：コーティング ナノワイヤ 摩擦係数

1. 研究開始当初の背景

半導体素子用シリコンウェハサイズは、生産性向上のため年々拡大し、直径 300mm の実用化にまで至っている。現在は 450mm の実用化のための開発が巨額を投じて行われるとともに、プロセスの 3D 化が進行し、複雑化の一途を辿っている。その一方、配線幅（プロセスルール）は特性向上のため年々微細化して現在では 32nm が実用化され、14nm の実用化が目指されている。

ウェハの大型化および配線幅の微細化に伴い問題となっているのは、搬送装置の位置決め精度である。例えば、ウェハの回転角に要求される精度は、ウェハサイズの増加および配線幅の微細化が同時に進行すると、著しく厳しくなる。

従来の搬送装置では、図 1 に例を示すように、すべり抵抗が低いボールベアリング方式が一般的である。この場合搬送装置の精度はボールベアリングの真円度に律されるので、精度向上には限界がある。ごく近い将来には半導体搬送装置に要求される精度を満たさなくなると予測され、新しい搬送装置が望まれている。

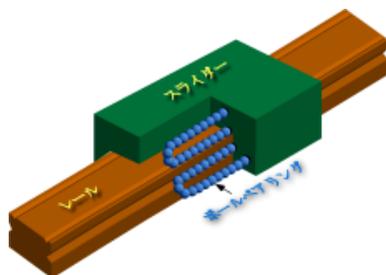


図 1 ボールベアリングを使用した搬送装置

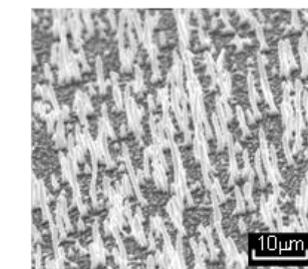
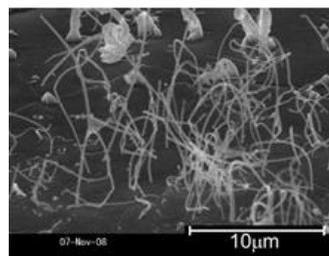


図 2 ナノワイヤの例

これまでの研究で、金属をある条件でスパッタエッチングすることにより、図 2 に示すような直径 1 μm 以下のナノワイヤ状突起物の形成に成功した。このナノワイヤは極めて高硬度であり、密着力が高い利点がある。ナノワイヤを基材表面に形成して薄膜をコーティングすれば、ワイヤの投錨効果により高い密着力が期待できる。

図 3 に示すようにナノワイヤの微細凹凸を利用して SiC 薄膜表面に微細凹凸を形成すれば摩擦係数低減可能であるとの着想により評価を行った。これの摩擦係数を測定すると、相手材はゆる動特性が悪いステンレスにも関わらず摩擦係数が低減することがわかり、ばらつきを有するナノ凹凸は顕著に摩擦係数を低減することを明らかにした。

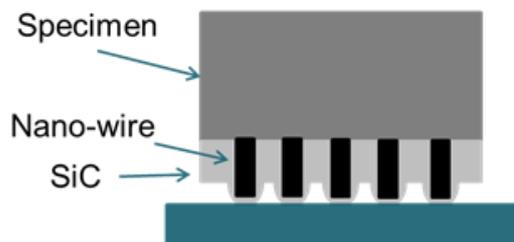


図 3 ナノワイヤによる微細凹凸

2. 研究の目的

図 3 に示す超低摩擦係数搬送装置の開発につながるナノ凹凸薄膜の探索を目的とする。そのためには、薄膜のはく離強度がある一定のレベルにないと実用性が保てないので、まずはナノワイヤ形成ののち SiC を成膜した試験片にマイクロ円環圧縮試験を行い、はく離強度評価を行った。次に、ピン・オン・ディスク方式摩擦試験機を用い、摩擦特性評価を行った。次に、特性のさらなる改善のためにナノワイヤの高密度化に取り組んだ。

3. 研究の方法

3. 1 試験片

本研究ではオーステナイト系ステンレス鋼 (JIS:SUS304)を直径 20 [mm], 厚さ 0.5 [mm], 幅 10 [mm]に加工したもの, あるいは厚さ 2.0 [mm], 幅および長さ 10.0[mm] に加工したものを基材とした。

3. 2 固溶加熱処理および研磨

図 4 に示す雰囲気制御型加熱装置(フルテック株式会社製:FT-100FM)を用いて加熱処理を行った。基板材料を装置に設置し、試験片が酸化することを防止するために Ar ガスを流量 1.0l/min で流入させながら、1323K まで加熱した後、5.4ks 保持し、水冷した。

固溶加熱処理を行った後、基材表面をエメリーペーパーで研磨を行い、バフ研磨装置で粒度 0.1 μ m まで研磨し、鏡面に仕上げた。またその後、研磨等で生じた不要な砥粒をアセトン中で超音波洗浄を行い、取り除いた。



図 4 加熱炉

3. 3 プラズマ放電によるナノワイヤの形成

図 5 に示す高周波マグネトロンスパッタ装置(最大波出力 800W)を用いてプラズマ放電を施し、ナノワイヤを形成した。十分に排気を行ったチャンバー内(約 $2.0 \sim 4.0 \times 10^{-2}$ Pa)に Ar ガス(純度 99.999%)を約 5.7sccm で導入し、排気速度を制御してチャンバー内圧力を $P=5.0$ Pa に保持する。その後、出力 $P=300 \sim 500$ W の各条件で、チャンバー内にガスを導入し、時間 t プラズマ放電を行った。

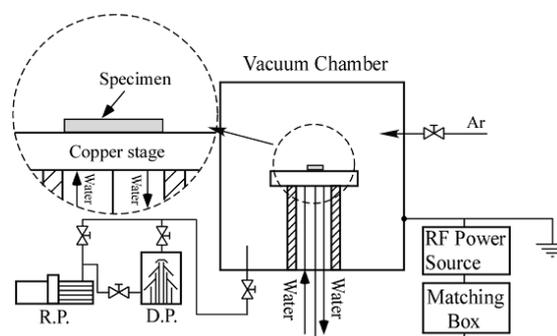


図 5 プラズマ放電装置

3. 4 ヘリコンスパッタ装置による SiC 薄膜の成膜

ナノワイヤを形成した試験片に図 6 に示す製:MSP-2000-HC-3S2)を用いて SiC 薄膜のコーティングを行った。チャンバー内の真空度を約 5.0×10^{-4} Pa になるまで排気した後、Ar ガス(純度 99.999%)を 18sccm で導入しながら、カソードおよびコイルに所定の高周波を加えて SiC ターゲットを 32.4ks スパッタさせ、薄膜の厚さが 1 μ m になるように成膜した。また、均一な膜の形成を行うため、基板を 5rpm で回転させた。

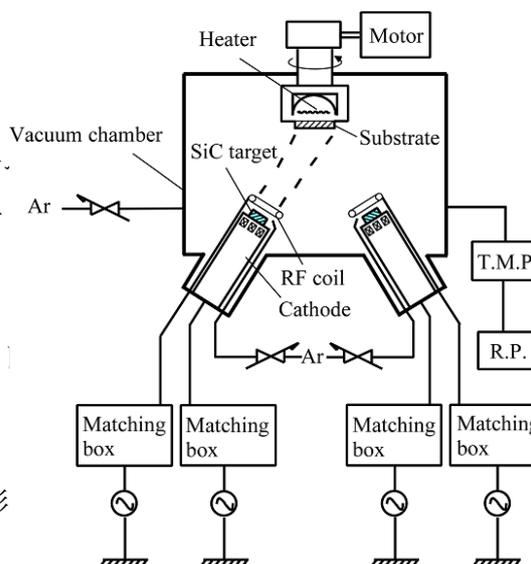


図 6 ヘリコンスパッタ装置

3. 4 マイクロ膜円環圧縮試験機によるはく離強度評価

図7に示すマイクロ円環圧縮試験機を用いて、薄膜のはく離強度評価を行った。

得られる荷重-変位曲線の例を図8に示す。これより、式(1)を用いて、基材の弾塑性係数を求めた。

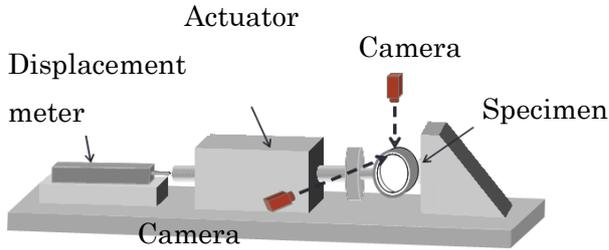


図7 マイクロ円環圧縮試験

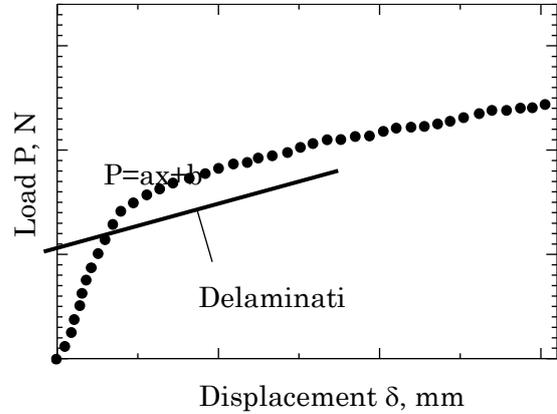


図8 荷重-変位曲線.

$$P = \frac{E_{p2}I}{2\left(\frac{\pi}{8} - \frac{1}{\pi}\right)\rho_0^3} \delta + \frac{2b\left(\frac{B_2}{2}\right)^2 \sigma_{ys2}}{\left(\frac{\pi}{8} - \frac{1}{\pi}\right)\rho_0} \left(\operatorname{sincos}^{-1}\left(\frac{2}{\pi}\right) - \frac{2\cos^{-1}\left(\frac{2}{\pi}\right)}{\pi} \right) \quad (1)$$

3. 5 摩擦係数評価

摩擦係数評価には、図9に示す自作のピン・オン・ディスク方式摩擦試験機を使用した。摩擦試験片には、高速工具鋼鋼材(JIS:SKH55)を使用した。

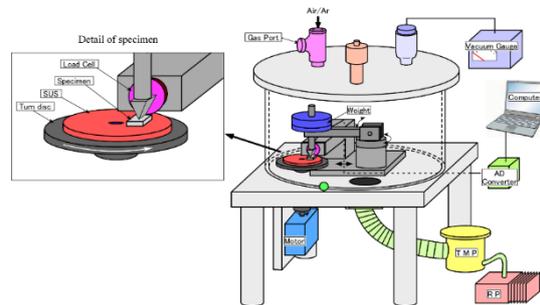


図9 摩擦試験機

4. 研究結果

4. 1 マイクロ膜円環圧縮試験機によるはく離強度評価

マイクロ円環圧縮試験の様子を代表例を図10に示す。荷重が増加して182Nになると薄膜表面には荷重負荷方向と垂直にき裂が生じ(白矢印)、荷重の増加とともにその本数が増加する。荷重が195Nで薄膜の一部がはく離する(黒矢印)。

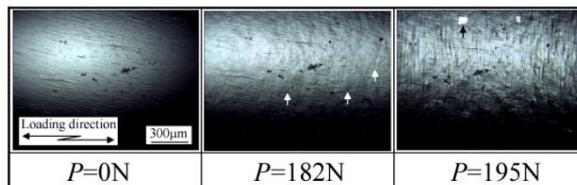


図10 マイクロ円環圧縮試験片.

試験で得られたはく離荷重より界面破壊靱性値 G_c を膜厚で整理して Fig.4-2 に示す。な

お、縦軸は膜厚が $1.0\ \mu\text{m}$ のときの界面破壊靱性値 G_{C1} で除して無次元化している。

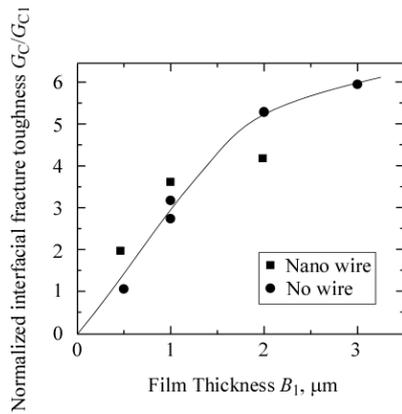


図 11 界面破壊じん性値

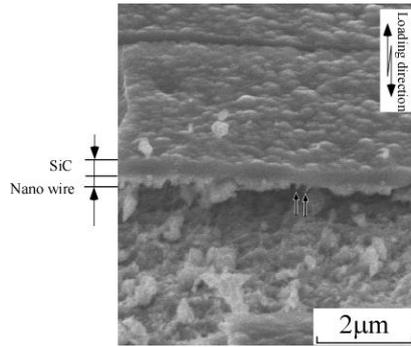


図 12 はく離の様子

破壊靱性値は膜厚の増加とともに増加する。それぞれの膜厚で比較すると、膜厚が $2\ \mu\text{m}$ を除きナノワイヤを形成した試験片の界面破壊靱性値は、ナノワイヤを形成していない試験片のそれよりも高くなり、ナノワイヤのアンカ効果が確認される。

ナノワイヤを形成した薄膜はく離の様子を図 12 に示す。ナノワイヤが基材から脱落するようにはく離しており、ナノワイヤは薄膜側に多く残留しているすなわち、薄膜のはく離強度向上のためにはナノワイヤの密度の向上が重要であることがわかった。

4. 2 摩擦係数評価

ナノワイヤ形成有無の摩擦係数の例を図 13 に示す。縦軸は、ナノワイヤを形成しない試験片の初期摩擦係数で無次元化した摩擦係数である。ナノワイヤ形成により摩擦係数が低下することがわかるとともに、その効果は 20000 サイクルまで維持される。

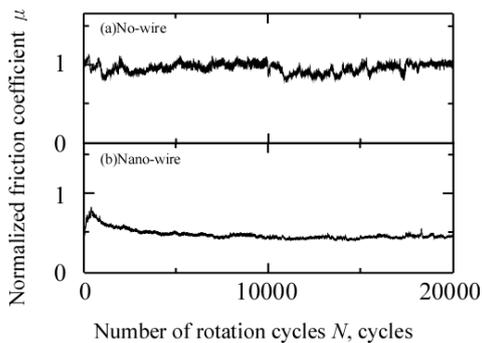


図 13 摩擦係数の例

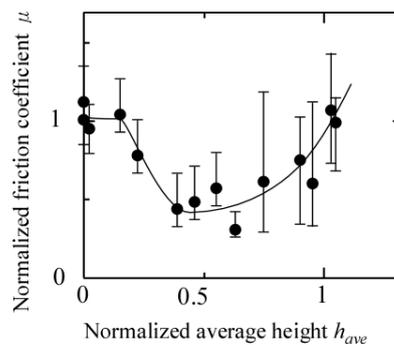


図 14 高さ と 摩擦係数

膜厚で無次元化した突起の高さと無次元化摩擦係数の関係を図 14 に示す。無次元化摩擦係数には最適値があることがわかり、それより高くても低くても無次元化摩擦係数が増加することがわかる。

5. まとめ

超低摩擦係数搬送装置の開発につながるナノ凹凸薄膜について、高い効果を示す凹凸の条件がほぼ明らかになった。また、さらに特性を改善させるためには密度が重要であり、高密度化の指針が得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 加藤 昌彦, 小林 健吾
2. 発表標題 ナノワイヤにより凹凸を形成したSiC薄膜の摩擦係数評価
3. 学会等名 日本機械学会 2020 年度年次大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------