Carbon nitride coating for friction control by absorbed nitrogen gas

正 足立幸志 (東北大) ○学 森田泰史 (東北大)
正 加藤康司 (東北大)

Koshi Adachi, Hiroshi Morita and Koji Kato

Tohoku University, Aramaki-Aza-Aoba 01, Aoba-ku, Sendai, Miyagi

Key words: Carbon nitride coating, Nitrogen gas, Friction coefficient, Hardness, Surface roughness

1. 緒言

マイクロマシン技術の分野において摩擦制御は必要不可欠な技術課題の一つである。分子間力や表面張力など摩擦力の関与する表面は、機械の寸法の減少にともない体積力より表面に關与する摩擦力の影響が相対的に増大するためである^[1]。摩擦係数 0.01 以下の低摩擦を実現するために、通常液体の潤滑剤が使用されるがマイクロマシンに代表される高精度な機械の滑らかな表面同士の接触部では、メニスカス力の発生のため液体の潤滑剤は逆に摩擦の増加を引き起こす。

これに対し、著者らは近年窒素雰囲気中における窒化炭素(CNx)と窒化ケイ素(Si₃N₄)のすべり摩擦において摩擦係数 0.01 以下の低摩擦が発現することを発見し、さらに、この組み合わせにおいて窒素ガスを接触界面に吹き付けるだけでも同様の低摩擦が得られる可能性を示している。

そこで、本研究では、大気中で窒素ガスを吹き付けるだけで簡単に低摩擦が得られるトライボシステムの実用展開を目的に、CNx膜の成膜条件、成膜方法、基板材料とその表面あらさの観点から低摩擦を安定して得るための必要条件を明らかにする。

2. 実験方法

CNx膜は炭素のスパッタリングまたは蒸着と同時に窒素イオンをミキシングする2種類の IBAD(Ion Beam Assisted Deposition)法により成膜した。これらの成膜をシリコンウエハ(Si(100))(表面粗さ Ra0.2nm, 硬度 Hv:800)と窒化ケイ素(Si₃N₄)(Ra: 20nm, Hv:2478)の2種類の基板に施すことにより4種類の CNx 膜を成膜した。

窒素ガスの供給は、吹き付けによる窒素供給法とともにチャンバー内の窒素圧力を制御した窒素供給法も用いた。摩擦時の荷重、すべり速度は、窒素吹き付け法の場合 200~1000mN, 0.28m/s, 雰囲気制御法の場合 100mN, 0.67x10⁻³ m/sとした。窒素雰囲気圧力は、3.0x10, 1.0x10⁻², 1.0x10⁻³ Paの3種類に変化させた。

3. 実験結果

3.1 摩擦特性に及ぼす CNx 膜の成膜条件の影響

Fig.1 に摩擦特性に及ぼす CNx 膜の成膜条件のひとつである炭素の蒸着速度の影響を示す。成膜条件の違いにより形成された CNx 膜の摩擦係数が大きく変化することがわかる。そこで、実験により最も低い摩擦係数を与え得る CNx 膜の成膜条件を以下のように選定した。

Table1 Characteristics on four types of CNx coating

	Substrate	Coating method	Hv	Surface roughness of CNx coating	
				Ra (nm)	R _{max} (nm)
I	Si	Sputtering	2100	3	30
II		Evaporation	2801	27	392
III	Si ₃ N ₄	Sputtering	2921	16	210
IV		Evaporation	2594	41	813

スパッタ型 IBAD: 炭素のスパッタ条件: アルゴンイオンビームの加速電圧 1.0kV, 加速電流 100mA, 窒素イオンビームのミキシング条件: 加速電圧 0.5kV, イオン電流密度 30μA/cm², 膜厚: 100nm.

蒸着型 IBAD: 炭素の蒸着条件: 蒸着速度 20 Å/s, 窒素イオンビームのミキシング条件: 加速電圧 1.5kV, イオン電流密度 90μA/cm², 膜厚: 400nm.

最適条件で成膜した4種類の CNx 膜の硬度と表面粗さを Table 1 に示す。基板の粗さ及び成膜手法により表面粗さの異なる CNx 膜が形成されていることがわかる。

3.2 摩擦特性に及ぼす雰囲気窒素圧力の影響

Fig.2 にガス圧力 30Pa の窒素雰囲気下における4種類の CNx 膜と窒化ケイ素の摩擦特性を示す。CNx 膜の種類により摩擦特性が大きく異なることがわかる。各 CNx 膜における摩擦係数に及ぼす窒素ガス圧力の影響を Fig.3 に示す。被膜の種類により低摩擦を実現するための最適窒素ガス圧力が存在することがわかる。

3.3 摩擦特性に及ぼす CNx 膜の表面粗さの影響

Fig.4 に表面粗さの異なる2種類の窒化ケイ素基板(R_{max}=82nm, R_{max}=210nm)に同じスパッタ型 IBAD 法で成膜した CNx 膜を用いた時の摩擦係数に及ぼす窒素雰囲気圧力の影響を示す。低摩擦を実現するための最適窒素圧力が CNx 膜の表面粗さにより異なることがわかる。

Fig.1 The effect of coating speed by IBAD (Evaporation) on friction coefficient

Fig.2 The effect of pressure of N₂ gas (30Pa) on friction coefficient

Fig.3 The effect of pressure of N_2 gas on friction coefficient

Fig.5 The effect of load on friction coefficient

3.4 摩擦特性に及ぼす荷重の影響

Fig. 5 に吹き付け窒素ガス中における4種類のCNx膜と窒化ケイ素の摩擦係数に及ぼす荷重の影響を示す。低荷重では十分な低摩擦が実現せず、低摩擦発現のためには、被膜が剥離しない範囲で高い荷重が必要であることがわかる。高荷重下の摩擦により低摩擦を発現させる SP^2 構造(グラファイト構造)への変化が促進されることに起因していると考えられる^[2]。この荷重条件を満たす場合、窒化ケイ素基板上に蒸着型IBAD法で成膜したCNx膜は、窒素ガスを吹き付けるだけで簡単に0.03以下の低摩擦を与えることがわかる。

4. 考察

3章の実験結果をもとにCNx膜と窒化ケイ素の摩擦において低摩擦を安定して得るための必要条件について考察する。Fig.3,4より、低摩擦発現のための最適窒素ガス圧力はCNx膜の表面粗さと相関があることが明らかである。Fig.6に低摩擦($\mu < 0.03$)が得られるCNx膜の表面粗さと窒素ガス圧力の条件(図中では白丸)を示す。相対的に粗い表面($R_{max} > 200nm$)ほど低い窒素ガス圧力で低摩擦が実現できることがわかる。これは、表面粗さが粗いほど局所的な接触圧力が高く、Fig. 5の結果同様 SP^2 構造(グラファイト)が増加するため低い窒素ガス圧力下でも、低摩擦が得られるものと考えられる。即ち、 SP^2 構造への変化の割合を支配するCNx膜の成膜条件、成膜方法、基板材質、基板の表面粗さ及び接触荷重によって決定される局所面圧と窒素ガス圧力によりCNx膜と窒化ケイ素の摩擦において低摩擦を安定して得るための定量的な必要条件が与えられる(Fig. 7)。この図をもとにした局所圧力の最適設計により大気中で窒素ガスを吹き付けるだけで簡単に低摩擦が得られるトライボシステムが可能になるといえる。

Fig.4 The effect of surface roughness of CNx coating on friction coefficient

Fig.6 The effect of pressure of N_2 gas on surface of CNx coating ($\mu < 0.03$) Fig.7 The effect of pressure of N_2 gas on local contact pressure ($\mu < 0.03$)

5. 結言

窒化ケイ素球とCNx膜の摩擦において、接触部における局所面圧と窒素ガス圧力の制御により、0.03以下の安定した低摩擦を実現できることを実験より明らかにした。また大気中で窒素ガスを吹き付けるだけで簡単に0.03以下の低摩擦を与えることのできるCNx膜を実現した。

参考文献

- [1] 三宅正二郎, 表面改質技術とトライボロジー特性, 機械の研究, 50, 5 (1998) 536-545.
- [2] J. Shiao and R. W. Hoffman., Studies of diamond-like and nitrogen-containing diamond-like carbon using laser Raman spectroscopy, Thin Solid Film, 283 (1996) 145-150.