

審査の結果の要旨

氏名 朴 元淳

機械要素の耐久性の改善のためにダイヤモンドライクカーボン膜（DLC 膜、炭素系硬質膜）がコーティング材として用いられている。一方、機械要素のほとんどは三次元形状を有しており、DLC 膜の応用を考える際、三次元コーティング手法の確立は重要である。近年開発されたプラズマ利用イオン注入成膜法（PBII&D 法）は被コーティング材をプラズマ中に浸漬させてから被コーティング材に負の高電圧を印可することで被コーティング材の周囲に均一なイオンシースを形成させ三次元コーティングを行う手法であるが、その三次元コーティング手法はまだ確立されていない。さらに機械要素がイオンシースに埋もれてしまうマイクロ・ナノスケールに微細化した場合の DLC 成膜および膜評価に関する研究はほとんどなされていない。そこで本研究は、マイクロスケールの三次元部材にバイポーラ PBII&D 法を用いて DLC コーティングを行うとともに成膜されて膜の構造・機械的特性評価およびプラズマシミュレーションによりコーティングのメカニズムを明らかにすることを目的にして研究を行った。

本論文は 6 章より構成されている。

「第 1 章 序論」では、本研究を実施するに至った背景と、三次元 DLC コーティングの物理的限界、三次元 DLC コーティングおよびプラズマ計算の現状、研究の目的を述べている。

「第 2 章 DLC コーティングおよびプラズマ計測」では、本研究で DLC コーティングを行うために用いたバイポーラ PBII&D について述べている。また、プラズマシミュレーションに用いるためのバルクプラズマの計測結果（プラズマ密度、電子温度など）について述べている。

「第 3 章 PIC-MCC 法によるプラズマシミュレーション」では、プラズマシミュレーションに用いた PIC-MCC 手法の説明とマイクロトレンチ周囲のプラズマをシミュレーションするために新たに考案した 2 段階シミュレーション手法について述べている。

「第 4 章 マクロトレンチへの DLC コーティング及びプラズマ挙動解析」では、イオンシース長より大きいスケールのマクロトレンチ形状物上に DLC コーティングを行った後、膜の均一性評価およびプラズマシミュレーションを行った結果を述べている。

トレンチの各面（上面、側面、底面）における膜厚・硬さ分布の測定、マイクロラマン分光分析を用いた膜の構造解析を行った結果、類似な膜特性を示すことがわかった。プラズマシミュレーションからトレンチ形状に沿ったイオンシースが形成され、各面に同じエネルギーを有するイオンが垂直に入射されることが示され、実験の結果の妥当性が確認できた。

「第 5 章 マイクロトレンチへの DLC コーティング及びプラズマ挙動解析」では、マイクロトレンチ形状物への DLC コーティングおよびトレンチ周囲におけるプラズマシミュレーションの結果について述べている。バイポーラ PBII 法により、マイクロトレンチ（ピッチ 4 μm ）の上面、底面、側面ともに DLC 膜を作成することができたが、トレンチの各面における DLC 膜の厚さ分布および膜構造に不均一性が生じることがわかった。具体的にはマイクロトレンチの上面と底面に比べて側面での DLC 膜厚が相対的に薄く、負の高電圧が大きいほどイオンが側面からの電界に追従できなくなるためにこの傾向が強くなることがわかった。また、マイクロトレンチの側面では、上面と底面に比べて異なる DLC 膜構造を示すことがマイクロラマン分光分析の結果から新たに分かった。即ち、負の高電圧が小さい場合、側面に入射されるイオンエネルギーが上面と側面に入射されるイオンエネルギーに比べてかなり小さくなるため、膜はよりポリマーライクな構造に遷移する。一方、負の高電圧が大きい場合、側面での DLC 膜は PBII&D 法による DLC 成膜メカニズムではなく、トレンチの底面からのスパッタリング効果による膜の堆積が支配的になり、その結果、側面の DLC 膜はグラファイトライクな構造に遷移する。以上の結果を、DLC 成膜実験、マイクロラマン分光分析による膜構造の解析、プラズマシミュレーションにより明らかにした。

「第 6 章 結論」では、本論文の総括を述べている。

以上要するに、本研究によりバイポーラ PBII&D 法によりマイクロスケールの三次元形状物に DLC 膜が作成できること、マイクロラマン分光分析を用いて膜構造の評価ができたこと、マイクロ空間におけるプラズマシミュレーションを可能にしてマイクロトレンチへの DLC 膜の形成メカニズムを明らかにしたことは高く評価でき、マイクロ機械要素、微小金型など様々な分野への応用が期待される。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。