

## 審査の結果の要旨

氏名 平田 祐樹

機械要素の摩擦・耐久性等の改善のために高硬度非晶質炭素膜（amorphous carbon 膜；a-C:H 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いるが、非晶質炭素膜の三次元コーティングに関する技術は確立されていないのが現状である。特に機械要素がイオンシースに埋もれてしまうマイクロ・ナノスケールの三次元部材への非晶質炭素膜のコーティングおよび評価に関する研究はほとんどなされていない。三次元形状の機械要素はスケールが異なるトレンチ構造の組み合わせといえることから、本研究は、マクロからマイクロ・ナノスケールの異なるスケールのトレンチ部材にバイポーラ PBII&D 法を用いて非晶質炭素膜のコーティングを行い、トレンチのスケールによるコーティングの差異を膜の構造の観点から調べるとともにラジカルの挙動を含んだプラズマ計算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。さらに、アスペクト比 20 の高アスペクト比マイクロチャンネル内面への非晶質炭素膜のコーティングを目指して研究を行った。

本論文は 9 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、非晶質炭素膜の三次元コーティングにおける物理的限界、三次元コーティングおよびプラズマ計算の現状、研究の目的について述べている。

「第 2 章 実験装置」では、三次元部材として使用するトレンチおよびマイクロチャンネルの作製、非晶質炭素膜の作成手法、非晶質炭素膜の膜質・膜構造の評価手法について述べている。

「第 3 章 プラズマ粒子挙動解析手法」では、イオンとラジカル挙動の解析に用いたプラズマ計算手法である PIC-MCC 法および DSMC 法、PIC-MCC 法と DSMC 法のカップリング計算について述べている。

「第 4 章 マクロトレンチへの非晶質炭素膜の成膜」、 「第 5 章 マイクロ

「トレンチへの非晶質炭素膜の成膜」および「第 6 章 ナノトレンチへの非晶質炭素膜の成膜」では、それぞれ、マクロ（ピッチ 20  $\mu\text{m}$ ）、マイクロ（ピッチ 4  $\mu\text{m}$ ）、ナノ（ピッチ 300 nm）スケールのトレンチに作成した a-C:H 膜の膜厚・膜構造について成膜実験、ラマン分光分析による膜構造の評価およびプラズマ挙動の解析により調べた。特に、トレンチ側面における a-C:H 膜の膜厚および硬度の低下は、トレンチ周囲においてその形状に沿ったイオンシースが形成されず、側面へのイオンの入射フラックスとエネルギーの低下およびイオンに比べてラジカル入射比率の増加が原因であることを明らかにした。さらに、負の高電圧が大きくなるほど、トレンチの側面の a-C:H 膜はよりグラファイトライクな構造に遷移すること、その遷移の度合いはトレンチのスケールに依存することを述べている。

「第 7 章 膜質へのトレンチ形状物のスケール依存性」では、異なるスケールのトレンチ部材、特にトレンチ側面において非晶質炭素膜の膜構造の違いを示し、スケールの差異による膜構造への影響をイオンスパッタリング効果、イオンとラジカルの入射比の観点で詳しく述べている。

「第 8 章 マイクロチャンネルへの非晶質炭素膜の成膜」では、トレンチ形状物への a-C:H コーティングの研究から得られた知見をベースに、アスペクト比 20 のマイクロチャンネル（溝幅：100  $\mu\text{m}$ 、深さ：2.0 mm）上への非晶質炭素膜の作成、膜質の評価、プラズマ計算の結果について述べている。片端開口サンプルの場合、印加する負のパルス電圧値を大きくすることでよりマイクロチャンネルのより深部までイオンが到達することで膜厚の均一性は向上したが、アスペクト比 20 までにコーティングは出来なかった。一方、両端開口サンプルの場合、両端からイオンが入射されチャンネル内部でミキシングされることでコーティングの膜厚および膜構造の均一性が向上し、さらにアスペクト比 20 までのコーティングに成功したことを述べている。

「第 9 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 法によりマクロ、マイクロ、ナノスケールの三次元形状物に a-C:H 膜が作成できること、膜構造の評価ができたこと、マイクロ・ナノ空間におけるイオンおよびラジカル挙動解析を可能にして a-C:H 膜の形成メカニズムとトレンチスケールの依存性を明らかにしたこと、トレンチ形状物への a-C:H コーティングの研究から得られた知見をベースにアスペクト比 20 の高アスペクト比マイクロチャンネル内面への a-C:H 成膜に成功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。