

審査の結果の要旨

氏名 プラヤット・ロバート・ビノド

本論文は、水素窒素含有非晶質炭素薄膜 (a-C:H:N 薄膜) の太陽電池反射防止膜への応用を念頭に置き、その製造と光学的特性に関する研究を行ったものであり、全6章で構成されている。

第1章は序論であり、本論文の目的と構成について述べている。将来、宇宙空間での大規模な太陽光発電が月や地球やその他の惑星に電力を送り、化石エネルギーに対する依存性を減少させることが期待される。太陽電池の光学的特性に影響を与える多くの因子が太陽電池の効率を制限しているが、その1つが太陽電池表面における光の反射である。そのため、反射防止膜が重要となり、これが太陽電池の振舞いを決定することになる。いくつかの材料がこれまでに研究され、反射防止用として有望であると考えられてきたが、低密着性・低硬度・低化学安定性などの制約があった。これらの状況の下で、本研究では、高密着性・高機械強度・光化学的安定性を有する a-C:H:N 薄膜の反射防止膜への適用可能性について検討した結果を報告するとともに、今後の研究開発課題をとりまとめている。

第2章では本研究の理論的背景について述べるとともに、これまでの研究成果をレビューしている。非晶質炭素薄膜の生成とその構造モデルや電子構造について詳述するとともに、太陽電池用反射防止膜に要求される諸性質、特にその光学的特性に関する理論とこれまでの研究状況について述べている。

第3章では非晶質炭素薄膜の製造に関して、その原理・装置などについて述べている。本研究では、種々の化学組成を持つ a-C:H:N 薄膜を RF マグネトロンスパッタリング法により n-Si 基板上やシリカ基板上に作製した。その際にターゲットにグラファイト (99.999%) を用い、プラズマガスとしてアルゴン・水素・窒素の混合ガスを用い、これらの成分割合を制御することにより、薄膜中の組成を制御することに成功している。

第4章は本論文の中心部分であり、作製した薄膜の組成・構造・光学特性について、XPS、FT-IR、AFM、エリプソメトリーによる測定などの結果について述べるとともに、詳細な検討を行っている。室温における a-C:H:N 薄膜の作製、基板温度を上昇させたときの影響、成膜後の熱処理の影響等について系統的に

検討を行うとともに、光学測定を行いながら成膜を行うことができる装置を製作し、リアルタイムに光学特性を測定しながら、最適条件になるように成膜を行った結果を報告している。

薄膜中の N/C 比がプラズマガス中の窒素ガス割合の増加にともなって増加するに従って、 sp^2CN 結合が優勢になることが見いだされた。基板温度の増加は同様の結果を与えた。同時に、屈折率 n や消光係数 k が増加したが、この結果は薄膜中の sp^2CN 結合に由来すると考えられる。AFM により、プラズマ中の窒素含有量が増加するに従って、薄膜の表面がよりラフになることが見いだされた。これは、窒素含有量の増加が結晶粒の粗粒化をもたらすことによる。ただし表面荒さは基板温度には依存せず、薄膜表面は比較的平坦で反射防止膜の要件を満たすのに十分であった。

本薄膜試料に対する熱処理の影響を調べるため、熱処理実験を実施した。その結果、熱処理にともない、 sp^2CN 結合として薄膜中に存在している窒素原子が大量に除去される事がわかった。光学的特性に関しては、 sp^2CN 結合の除去は良い影響を及ぼすが、 sp^3CH 結合の除去は悪い影響を及ぼし、両者のトレードオフで全体としての影響が決定される。これらのうち、前者の影響がより大きく、全体への影響として光学的特性の改善に有利に働くことがわかった。また、紫外可視吸収測定により、熱処理によって薄膜試料の透明性が増加し、光学特性を改善できることがわかった。市販の反射防止コーティングの透過スペクトルと比べて、N/C 比が 0-0.3 の薄膜が宇宙太陽光発電用反射防止膜として極めて優れた特性を有していることが明らかになった。

成膜時の薄膜の特性を改善する目的で、成膜下その場光学特性測定装置を製作した。リアルタイムでのモニタリングは、薄膜の光学特性の制御や希望する光学特性を持つ薄膜の作製に極めて有効である。本手法を用いて、反射防止膜に用いることができる極めて優れた光学特性を有する薄膜を作製した。本手法は、多層反射防止膜の作製にも有効であり、その場合には、N/C 比が 0-0.3 の薄膜を連続的に組成傾斜させた状態で成膜することができるとされている。

第 5 章では、本研究で得られた結果をもとに総合的な観点からの議論を行うとともに、今後の研究課題を整理している。第 6 章は結論である。

以上を要するに、本研究は、水素窒素含有非晶質炭素薄膜 ($a-C:H:N$ 薄膜) の太陽電池反射防止膜への応用を念頭に置き、その製造・構造・光学的特性に関して総合的に検討を行ったものであり、本研究で得られた成果は、 $a-C:N:H$ 薄膜

の反射防止膜などへの応用を検討する際に有益な知見を与えるものであるのみならず、プラズマ材料工学およびシステム量子工学に寄与するところが大きい。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。