誘導結合高周波プラズマ支援マグネトロンスパッタ放電におけるイオンエネルギー分布*

松浦 正道**・山本 直志**・森田 正**・倉内 利春**

(受付1997年12月1日, 掲載決定1998年2月7日)

Ion Energy Distribution during Magnetron Sputtering Enhanced with an Inductively Coupled rf Plasma

Masamichi MATSUURA, Tadashi YAMAMOTO,
Tadashi MORITA and Toshiharu KURAUCHI

(Tsukuba Institute for Super Materials, ULVAC JAPAN Ltd., 29 Wadai, Tsukuba, Ibaraki, 300-42)

(Received December 1, 1997, Accepted February 7, 1998)

The energy distribution of ions during magnetron sputtering enhanced with an inductively coupled rf plasma at $10^{-1} \sim 10^{-2}$ Pa was measured using a quadrupole mass spectrometer combined with an ion energy filter. The cathode in this sputtering system has an rf coil attached to the planar magnetron sputtering target. Other discharge properties of this plasma, including V-I characteristics and floating substrate potential, were also evaluated. The ion current of both the sputtered metal and the Ar gas increased significantly with increasing rf coil input power at a constant DC input power to the target. Simultaneously, the energies of both ion species increased moderately. It was possible to increase the ratio of the ion current of the sputtered metal to that of the Ar gas by adjusting the rf coil input power in relation to the DC power. It was concluded that this sputtering method was very effective in ionizing sputtered particles in comparison with conventional magnetron sputtering.

1. はじめに

我々が現在開発を進めている誘導結合 rf プラズマ支援マグネトロンスパッタ装置は、従来より 1 桁低い 10^{-2} Pa 台での放電が可能な超高真空対応の多元同時スパッタ装置で、そのカソードには Fig. 1 に示すようにプレーナマグネトロンスパッタ装置の上に誘導結合 rf プラズマ放電用のコイルを備えつけたものを用いている。我々はこれまでこの装置を用いて磁性膜、光学多層膜、化合物膜と種々の薄膜を作成してきた¹⁻⁴⁾。その結果、得られた膜の特性としては基本的には低圧スパッタ膜の特徴を備えていること、および従来のマグネトロンスパッタと

Fig. 1 Schematic diagram of the magnetron sputtering source with an inductively coupled rf plasma.

較ベスパッタ粒子のイオン化率が高いことを示すいくつかの特徴を有していることが分かってきた。従って、高イオン化スパッタの放電特性を理解することは、膜のモフォロジーや結晶配向性など膜の諸特性を制御する上で不可欠と思われた。そこで本研究では、スパッタ粒子の

* 平成9年11月5日 第38回真空に関する連合講演会で講演 (6Ap-5)

** 日本真空技術(株)筑波超材料研究所 (〒300-42 茨城県つくば市和台29)

Fig. 2 Set-up for evaluating the energy distribution of ions during magnetron sputtering.

Fig. 3 V-I characteristics of the discharge of magnetron sputtering with an inductively coupled rf plasma. (Fe target, $P_{Ar}=2.7 \times 10^{-1}$ Pa)

イオンエネルギー分布を中心に種々の放電特性を測定した。

2. 実験方法

イオンエネルギー分布の測定は、Fig. 2に示すシリンドリカルミラー型イオンエネルギーフィルター (IEF) 付の四重極質量分析計 (ULVAC : MSQ-400) を用いて行った。測定可能なイオンエネルギー範囲は ~ 15 eV程度である。このIEF/QMSシステムの取り付け位置は、 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ Paと低圧でターゲットと基板間の距離を離して成膜するロングスロースパッタを考慮して、ターゲット上方約130 mmにした。ターゲットには、FeあるいはAlを用いた。本研究ではメタルターゲットにはDC電力を、カソードコイルにはrf電力を投入した。な

Fig. 4 Ion energy distribution of (a) aluminum ions ($^{27}Al^+$) and (b) argon ions ($^{40}Ar^+$) for various rf coil powers. (Al target, $P_{Ar}=1.3 \times 10^{-1}$ Pa)

おコイル終端の結線方法として(a)誘導結合 rf プラズマを発生させるためコイルの終端をアースに直接落としたもの、あるいは(b)そのプラズマ電位を下げるによりカソード周辺構成材料からのスパッタによる膜中不純物混入を抑制するため取り付けした LCR 回路を経由してアースに落としたもののいずれかとした。またイオンエネルギー分布測定以外に、Ni メッシュ製フローティング基板の電位測定およびイオン電流の測定、水晶共振膜厚モニターによる膜析出速度の測定、カソード V-I 測定およびプラズマ放電の空間的広がりを示すための写真撮影を適宜実施した。この内フローティング基板の電位測定は、プラズマ空間電位を推定する目的で行った。

3. 結果および考察

(1) rf コイル投入電力を変化させた場合の放電特性

本放電 V-I 特性の一例として Fe ターゲットを用いたときの測定結果を Fig. 3 に示す。コイル入力を増大するにつれプラズマが空間に広がり放電空間のインピーダンスが低下するため、印加電圧一定の場合急激に電流が流れることになる。

Al ターゲットを用いたときの Al^+ , Ar^+ イオンエネルギー分布を Fig. 4 に示す。各測定曲線の下部の面積が総イオン量に対応する。rf コイルを使用することにより、Al, Ar のイオン化が著しく進みイオン電流が急激に増大していることがわかる。またそれと共にイオン電流曲線のピーク位置が高エネルギー側にシフトしているのが読み取れる。Fig. 5 にそのときのフローティング基板電位の変化を示す。このフローティング基板電位の増加は、rf コイル電力の増加により誘導結合プラズマが励起されるためであるが、この変化と Fig. 4 のピーク位

Fig. 5 Change of floating substrate potential with rf coil power.
(Al target)

Fig. 6 Dependency of Fe film deposition rate and ion current flow to the negatively biased mesh on rf coil power.
(Fe target, $P_{Ar}=8 \times 10^{-2}$ Pa)

置のシフトは良い対応をしていることがわかる。

Fig. 6 に Fe ターゲットを用い rf コイル電力を変化させた場合の成膜速度と Ni 製メッシュ基板に流入する電流の変化を示す。この基板には -50 V 印加し、 $+I$ イオンのみが到達できるようにしてある。 10^{-2} Pa 台の低い圧力では、rf コイルの電力を増大しても成膜速度は僅かにしか増加しないが、基板に流入する Al^+ 、 Ar^+ イオン電流は著しく増加する。これらの変化の理由は以下のように考えられる。成膜速度即ちターゲットからスパッタされる量は、ターゲットに投入される DC 電力に支配されるため、DC 電力を一定にする限り rf コイルの電力

Fig. 7 Ion energy distribution of (a) aluminum ions ($^{27}I_{Al^+}$) and (b) argon ions ($^{40}I_{Ar^+}$) for various target DC powers.
(with LCR circuit, Al target, and $P_{Ar}=1.3 \times 10^{-1}$ Pa)

を増大しても成膜速度はほとんど変わらない。他方、スパッタされた中性粒子は rf コイルによる誘導結合プラズマゾーンを通過する際イオン化される（ポストイオン化）ため、rf 電力の増加に伴い急激にイオン化が進むことになるのであろう。この著しいイオン電流の増加は Fig. 4 の変化に対応している。

(2) ターゲット DC 電力を変化させた場合の放電特性

Fig. 7 は、rf コイル電力を一定とし、ターゲット投入 DC 電力を変化させた場合の Al^+ 、 Ar^+ イオンエネルギー分布の一例を示す。DC 電力を増加するにつれ、カソード電極電位の低下やスパッタされた中性粒子によるプラズマ電子温度の低下により、イオンエネルギー分布のピーク位置は低エネルギー側にシフトしてくる。**Fig. 8** にこの場合のフローティング基板の電位の変化を示すが、両者はよい対応をしている。また Fig. 7 において、基板に流入する Al^+ と Ar^+ イオン量の変化の仕方には大きな差があること、即ち Al^+ イオンは DC 電力の増加とともに増大しているのに対し、 Ar^+ イオン量は減少しているのがわかる。この両者の挙動の差は、本実験条件下でのイオン化が主にペニングイオン化機構⁵⁻⁷⁾であることに起因していると考えられる。即ち、Al と Ar のイオン化エネルギーに差があり（第一イオン化エネルギー：Al 5.98 eV, Ar 15.75 eV）、ポストイオン化が行われる誘導結合プラズマゾーンでは DC 電力の増加と共に相対的にプラズマ電子温度が低下すると Ar はイオン化されにくくなる。しかし準安定励起状態（励起エネルギー 11.56 eV）に励起されている Ar^* は多数存在しているため、DC 電力の増加に伴い増加した中性 Al スパッ

Fig. 8 Change of floating substrate potential with target DC power.
(with LCR circuit and Al target)

タ粒子はこの準安定 Ar^* との衝突によりイオン化され (ペニングイオン化), Al のイオン生成が進むことになる. このように投入する DC 電力と rf 電力をうまく調整することにより Ar イオンに対し相対的にメタルイオンの量を増大することが可能である. 我々はこの投入電力の最適化が本スパッタ法の最適な成膜条件を見つけるため最も重要な因子の一つと考えており, 事実これまで行ってきた種々の成膜においても適度な rf 電力の投入の条件下で最良の特性を持つ膜が得られている¹⁻⁴⁾.

4. ま と め

イオンエネルギーフィルター付四重極質量分析計によ

り, 誘導結合 rf プラズマ支援マグネトロンスパッタにおけるスパッタ粒子およびスパッタガスのイオンエネルギー分布の測定を行い, 本スパッタ法が従来のプレーナマグネトロンスパッタに較べ著しくイオン化率の高いスパッタ法であることを確かめた. これはターゲットよりスパッタされた中性粒子が rf コイル誘導結合放電によるプラズマゾーンを通過する際イオン化されるためと考えられる. なおこの際, 基板に流入する Ar ガスのイオン量を抑制させたままスパッタ粒子のイオン量を増大するには, 適度な rf 電力を投入しペニングイオン化機構を利用してイオン化エネルギーの小さなメタルスパッタ粒子のみをイオン化させるのが有効であることがわかった.

【文 献】

- 1) 森田 正, 山本直志, 倉内利春, 三沢俊司, 箱守宗人, 松浦正道: 真空, **38** (1995) 255.
- 2) 山本直志, 森田 正, 倉内利春, 松浦正道: 日本応用磁気学会誌, **21** (1997) 569.
- 3) T. Morita, T. Yamamoto, T. Kurauchi and M. Matsuura: Proc. 4th Int. Symp. Sputtering & Plasma Processes (ISSP'97), Kanazawa, 1997, p. 405, SP2-7.
- 4) 松浦正道, 山本直志, 森田 正, 倉内利春: 第94回表面技術協会講演要旨集, (1996) 226, 28A-依頼講演①.
- 5) 武田 進: 気体放電の基礎 (東京電機大学出版局, 1990), p. 78.
- 6) J. W. Coburn and E. Kay: Appl. Phys. Lett., **18** (1971) 435.
- 7) J. Hoopwood and F. Qian: J. Appl. Phys., **78** (1995) 758.