コイルターゲット型高周波スパッタ装置の試作*

山下 睦雄**・加々見丈二**

(受理1995年9月14日, 掲載決定1995年11月4日)

Trial Production of Coil-Target-Type High-Frequency Sputter Apparatus

Mutsuo YAMASHITA and Jhoji KAGAMI

(Faculty of Engineering, Osaka Electro-Communication University, 18-8 Hatsu-cho, Neyagawa, Osaka)

(Received September 14, 1995, Accepted November 4, 1995)

A coil-target-type high-frequency sputter apparatus for ion-based thin-film formation techniques, such as ion plating and ion beam deposition, was constructed. A plasma-exciting high-frequency coil made of sputter source material (Cu) was located in the metallic sputter chamber and high-frequency power of 13.56 MHz and DC voltage between 200 V and 1 kV were applied to this coil simultaneously. When a parallel magnetic field of 150 G was superimposed on the plasma region, this coil was positively sputtered by high-rate inverse magnetron sputtering. At a high pressure around 9 Pa, a large majority of the extracted ion beam was comprised of Cu^+ ions and Ar^+ ions accounted for less than 2%. When a suitable perpendicular magnetic field between 10 G and 40 G was superimposed, both the sputter rate and the ionization ratio of the sputtered source material increased markedly, especially in the gas pressure below 6.5×10^{-1} Pa.

1. ま え が き

スパッタ法は高融点材料を含む各種金属, 半導体材料からクリーンな状態で長時間安定して高密度金属蒸着を得るのに有効な方法と言える。このスパッタ法によって得られる金属蒸気の密度はスパッタ空間のプラズマ密度(ターゲット電流密度)に比例して増加する。このためにマグネトロン型¹⁻²⁾, 対向ターゲット型³⁻⁴⁾等の各種高速スパッタ法では, 磁気回路に種々の工夫を凝らしてプラズマ密度を高めている。また, 熱陰極放電やマイクロ波放電によってターゲットの近傍にプラズマを供給しているものもある。しかしながらこれらの方法で得られる金属蒸気のほとんどが中性状態にあるために, 各種のイオン化プレATINGやイオンビームデポジション法(IBD)といったイオン工学的手法を積極的に取り入れ

た新しい薄膜形成法⁵⁻⁹⁾への応用には適さない。このスパッタ粒子のイオン化については, 例えば F. Shimizu and A. Itoh, J. W. Coburn and E. Kay 等によって詳しく議論されている¹⁰⁻¹³⁾。

筆者は以前にプラズマ励起用高周波コイルを通常のDC二極スパッタ装置やブレーナ型DCマグネトロンスパッタ装置のターゲットと基板台の間に設置して強力な誘導結合型高周波放電を起こし, これによって高速スパッタを実現すると同時にスパッタ粒子を高い割合でイオン化するようにした新しいタイプ的高速スパッタ蒸着装置¹⁴⁻¹⁶⁾及び金属イオン源¹⁷⁾を試作し, これらの構造, 原理及び基本特性について報告した。またプラズマ諸特性に及ぼす平行磁界¹⁸⁾および垂直磁界¹⁹⁾の効果についても調べてきた。

最近では装置の動作圧力の低減化, スパッタ粒子の積極的なイオン化およびこれの応用に関する関心が急速に高まっており, ブレーナ型DCマグネトロンスパッタにrfコイルを組み込んだスパッタ方式に関する優れた研究成果が多くの研究機関から報告されている²⁰⁻²⁵⁾。し

* 平成6年3月28日 第41回応用物理学関係連合講演会で講演 (28a-ZP-4)

* 平成6年10月27日 第35回真空に関する連合講演会で講演 (27Bp-3)

** 大阪電気通信大学工学部 (〒572 大阪府寝屋川市初町18-8)

かしながら、これらのスパッタ方式ではスパッタ粒子のイオン化割合が放電圧力の低下とともに急激に低下し、1 Pa 以下の低圧力領域ではこれのイオン化はあまり期待できない。またこれらはいずれもプレーナ型ターゲットを使用しているために線状あるいは棒状下地への成膜には適さない。さらにマグネトロン方式を利用する場合にはターゲットのエロージョン領域が不均一となるため材料効率の点からも多少問題が残る。本研究ではこれらの問題点を改善するために、プラズマ励起用の高周波コイルをスパッタ材料自体で作成し、これに高周波電力と直流電力を同時に供給することによって、コイル材料を積極的にスパッタさせることを試みた。この方式では、前報¹⁸⁾で述べたと同様に、スパッタ空間にコイルの軸に平行な直流磁界（平行磁界、 $B_{//}$ ~150 G）を重畳したときには一種の逆マグネトロン方式となるために、3 Pa 以上の高圧力領域ではプラズマ濃度が極度に高まり、且つ高真空中に引き出されたイオンはほとんどがスパッタ金属イオンで占められるようになった。またこの高周波コイルの軸に垂直な直流磁界（垂直磁界、 $B_{\perp}$ 10~20 G）を重畳したときにはプラズマ空間で一種の共鳴現象¹⁹⁾が生じ、スパッタ速度とスパッタ粒子のイオン化割合がさらに大幅に向上した。しかもこの $B_{\perp}$ の効果は 6.5×10^{-1} Pa 以下の低圧力領域で顕著となった。本報告では本スパッタ方式のプラズマ諸特性とその応用に関する検討結果について述べる。

2. 実験装置

本研究で使用した実験装置の構成を Fig. 1 に示す。通常の高周波放電装置ではガラス製放電管の外側にプラズマ励起用高周波コイルを設置している。このため金属蒸気を含むガスに対しては長時間安定した運転が難しい²⁶⁻²⁷⁾。そこで本装置ではこのコイルを金属製スパッタチャンパー（直径15 cm 高さ10 cm）の中に設置するようにした。また本実験装置の高周波コイル（内径7 cm, 巻数5.5）はそれ自体がスパッタ用ターゲットを兼ねるため厚さ3 mm, 幅8 mm（または1 cm）の帯状金属材料（本実験ではCu）で作成し、その外周に沿って水冷用の銅パイプを取り付けた。このコイルには高周波電力（周波数13.56 MHz）を特別に設計したインピーダンス整合回路を介して供給するとともに、その一端から高周波チョークコイル（RFC）を通してスパッタ用の直流コイルバイアス電圧 V_B （~-600 V）を印加するようにした。さらにコイルの上部には棒状の電極（直径1.5 cm, 長さ1~3 cm）を設置した。この電極はこれに正電圧（ $V_C=0$ V~200 V）を印加した時にはプラズマ電位制御電極として、また負の電圧（ $V_T=-200$ V~

Fig. 1 Schematic diagram of the coil-target-type high-frequency (HF) sputter apparatus.

-800 V) を印加した時にはターゲット電流 I_T が流れ、前述のコイルとともにスパッタターゲットとして働く。（この電極は必要に応じて通常の円盤状スパッタターゲットと交換することが出来る）放電特性を改善するために、高圧力領域（1~10 Pa）ではコイルの軸に対して平行な磁界（平行磁界、 $B_{//}$ 150 G 程度）を、また低圧力領域（0.1~1 Pa）ではコイルの軸に対して垂直方向の磁界（垂直磁界 $B_{\perp}$ 15~50 G, 放電圧力や高周波電力などによって最適値は変化する）を加えるようにした。コイルの下には必要に応じてプラズマスクリーングリッドを設置した。平板基板上にスパッタ蒸着を行なうときの基板台は直径10 cm の円柱状をしており、水冷が出来るようになっている。またこの基板台はこれに入射してくる荷電粒子（電子およびイオン）の量を調べるために直流電流計を介してアースした。プラズマ中のイオン種の質量スペクトルを調べる時には、イオンビーム引き出し電極と軌道半径4 cm のセクターマグネットを有する簡単な質量分析計を用意し、これらと上記のプラズマスクリーングリッドおよび基板台一式とを交換するようにした。

3. 実験結果

3.1 外部磁界のないときの放電特性

Fig. 2-a はアルゴン圧力6.7 Pa, 高周波電力200 W に各々保った時のコイルに重畳する負の直流コイルバイアス電圧 V_B とこのとき外部回路に流れる直流コイルバイアス電流 I_B （高周波コイルに流入する電子の数とイオンの数の差に相当する電流）の関係を示す。また、Fig. 2-b は放電中に観測した高周波コイルの一端とスパッタチャンパー壁との間の電圧波形を示す。同図で(a), (b) および(c)はそれぞれ Fig. 2-a の A, B および C の各点に対応する電圧波形である。

Fig. 2-a Coil bias current I_B as a function of the applied coil bias voltage V_B , without external magnetic field.

Fig. 2-b Change of the potential waveform of one end of the HF coil with respect to the sputtering chamber wall with bias voltage V_B . (Discharge Ar gas pressure: 6.7 Pa, HF power: 200 W)

本実験装置のインピーダンス整合回路は特別に設計したもので、高周波コイルは直流的にはアース電位にあるスパッタチャンパー壁から絶縁されている。このため、コイルには放電開始と同時に多量の電子とイオンが流入するが、両者間の質量差に起因して外部直流電源をOFF状態にした時でも負の自己バイアス電圧が加わる。定常状態ではこの値は $-75\text{ V} \sim -85\text{ V}$ (A点)となる。また、このときプラズマ負荷のインピーダンスが大きく低下するので、電圧波形は(a)に示すように大きく歪む。 V_B の増加に伴う I_B の急激な増加と -200 V (B点)付近の勾配の変化には次のことが原因となっている。すなわち、 V_B が低いところでは高周波電圧の1サイクルのうちでコイルの電位がプラズマ電位 ($+15\text{ V} \sim +30\text{ V}$) より高くなる期間が生じる。このためにコイルには

Fig. 3 Coil bias current I_B and target current I_T as a function of the applied HF power, without external magnetic field.

多量の電子が流入し、これによってイオンの流入による電流 (正方向) の大部分が打ち消されるが、 V_B が増加 (負方向に増加) するにつれ上記の期間が短くなるために、電子の流入量が急減すると同時にイオンの流入量が増すので結果として I_B が急増する。 V_B が -400 V (C点) 以上になるとコイルの電位はFig. 2-b(c)のように高周波電圧のほとんど全期間でプラズマ電位より低くなる。このためにコイルへの電子の流入はほとんどなくなると同時に、これによってプラズマ密度が緩やかに増す。結果として I_B は緩やかな増加を示す。また、 V_B 、 V_T ともに -400 V 一定としたときの、高周波電力と I_B および I_T の関係をFig. 3に示す。実験の範囲内 (放電圧力 $8.8 \times 10^{-1}\text{ Pa} \sim 4.4\text{ Pa}$ 、高周波電力 $100 \sim 400\text{ W}$) では両者とも、よい直線関係を示すことがわかる。以上の特性は前報¹⁴⁾で述べたスパッタ方式 (コイルには高濃度プラズマを発生させるための高周波電力のみを加え、別に設けた円盤状のスパッタターゲットに直流電力を加えるようにしてある) の V_T - I_T 特性とよく似ている。しかしながら、スパッタ速度に直接関係するコイルおよびターゲットの直流電流量は10倍近くまで増大しており、プラズマが非常に効率よく発生していることがわかる。また、この場合もプラズマの発生は主としてコイルから放射される高周波エネルギーによって行われており、直流電力は専らスパッタ作用に供せられ、プラズマの発生にはあまり寄与していないと言える。したがって本方式もまたスパッタ速度の制御性に優れていると言える。な

Fig. 4-a Coil bias current I_B as a function of the applied coil bias voltage V_B . (Ar gas pressure: 5.6 Pa, HF power: 150 W and 0, parallel magnetic field $B_{//}$: 150 G)

Fig. 4-b Change of the potential waveform of one end of the HF coil with bias voltage V_B .

お、高周波電力を加えない時にはこの程度の V_B (−400 V) では放電が起こらなかった。

3.2 外部平行磁界を重畳した時の放電特性および引き出しイオンビームの質量スペクトル

前述したスパッタ方式はそれ自体で高速スパッタが可能であるが、これのスパッタ空間に軸方向の磁界(平行磁界 $B_{//}$, コイルの中央部で150 G)を加えると、コイルの内側で逆マグネトロン型の高速スパッタが起り、この空間にはさらに高密度のスパッタ金属粒子が発生する。しかも、このようにして発生した金属粒子はベニング効果等によって非常に効率よくイオン化し、コイルの中心軸に沿って集中する。Fig. 4-aは放電圧力を5.6 Pa

Fig. 5 Typical mass spectrum of the ion beam extracted from the sputtering chamber. (Sputter source material: Cu, parallel magnetic field $B_{//}$: 150 G)

一定にしたときのコイルの直流バイアス電圧 V_B とこれに流れる直流電流 I_B との関係を示したものである。高周波電力を0とし、コイルに直流電力のみを加えたときには逆マグネトロン型の一種である円筒マグネトロンスパッタ方式²⁸⁾に類似したものとなり、 I_B は−400 V 付近の比較的高い V_B から流れ始めるが、これに高周波電力150 Wを重畳すると V_B の非常に低いところ(−50 V)から急激に立ち上がり、−150 V 付近で緩やかな増加に転じている。このことから高周波電力重畳の効果が非常に大きいことがわかる。このときの各バイアス電圧に対する高周波電圧波形をFig. 4-bに示す。図中のa', b', c'は各々Fig. 4-aのA', B', C'の各点に対応する。 $B_{//}$ のないときの結果(Fig. 2-a, 2-b及びFig. 3)に比べると、 I_B の立ち上がり電圧及び高周波電圧の大きさ(ピーク〜ピーク)は共に半分程度に低下している。また飽和領域における I_B はプラズマ励起用高周波電力と直線的な関係にあった。

Fig. 5に放電圧力5.5 Pa, 高周波電力180 W, 直流バイアス電圧 V_B −370 V, バイアス電流 I_B 1.62 Aとしたときの質量スペクトルを示す。横軸の加速電圧の値にプラズマ電位(〜+20 V)を加えるとイオンが質量分析

Fig. 6 Coil bias current I_B and each ion intensity as a function of the coil bias voltage V_B . (Sputter source material: Cu, parallel magnetic field $B_{//}$: 150 G)

器を通過しているときのエネルギーとなる。この時のイオンビームは大部分がコイル材料から生じた Cu^+ イオンで占められており、放電サポートガス (Ar) からのイオン Ar^+ は全体の数%以下と非常に少なくなっている。また多価イオンを含むこれら以外のイオン種はほとんど検出されなかった。イオン発生部に棒状のチタンターゲット (1.5 cm ϕ) を設置し、これに -500 V の直流電圧を加えて高速スパッタすることによってコイルの表面にあらかじめ多量のチタン金属粒子を堆積させたのち、再びこのコイルに -380 V の V_B を加えてコイルをスパッタした。このときにはコイルに付着したチタンからの一価イオン Ti^+ が Cu^+ と入れ代わって大きなピークを持つようになった。

Fig. 6 は放電圧力 4.9 Pa, 高周波電力 150 W の放電条件におけるコイルバイアス電圧 V_B と I_B , Cu^+ および Ar^+ の関係を各々示す。 V_B の増加に対して Cu^+ は I_B と同じような増加を示している。他方 Ar^+ は V_B が -100 V 以下では少し複雑な変化を示しているがこれ以上では V_B の増加につれて急激に減少している。これは V_B の増加につれてイオン衝撃による二次電子すなわち γ 電子の逆マグネトロン運動が活発になるためであると考えられる。

Fig. 7 は高周波電力 150 W, バイアス電圧 V_B -300 V 一定に保ったときの質量スペクトルにおいて、 Cu^+ の

Fig. 7 Ar gas pressure dependence of the mass-analyzed Cu^+ and Ar^+ ion intensities. (HF power: 150 W, $B_{//}$: 150 G, V_B : -300 V)

ピーク値と Ar^+ のピーク値が放電圧力の変化に対してそれぞれどのように変化するかを示したものである。 Cu^+ は放電圧力の上昇とともに増加し、6.7 Pa 付近に最大値をもっている。一方 Ar^+ は測定範囲内では、放電圧力の上昇とともに急激に減少し、上記の Cu^+ の最大点付近の圧力では全引出イオンビームの 2% 以下と微小なものとなっている。このような特異な現象は前報¹⁷⁾で述べたスパッタ方式でも生じていたがこれほど極端ではなかった。すなわち、 Cu^+ が数倍程度に増大し、 Cu^+ と Ar^+ が逆転する放電圧力が 5 Pa 付近から 1.3 Pa 付近に改善されている。以上の結果から IBD やイオン注入用金属イオン源に応用する場合、イオンビームの引き出しおよび輸送の効率を高めるための差圧排気システムや、ビーム中の Cu^+ と Ar^+ の比率などを考慮すると、コイルには直流電力と高周波電力を同時に加えて、5 Pa 付近の放電圧力で働かせるのが適当と言える。

3.3 垂直磁界を重畳した時の放電特性

前述したように、本スパッタ方式に $B_{//}$ を重畳することは 1~10 Pa 台の高圧力領域では非常に有効であるが、これ以下の圧力領域では、 $B_{//}$ の効果は圧力の減少とともに急激に低下する。ここでは低圧力領域における放電特性を改善するために、コイルに垂直磁界 $B_{\perp}$ (コイルの軸に対して垂直方向の磁界) を加えた結果について述べる。

Fig. 8 は放電ガス圧力およびコイルバイアス電圧 V_B

Fig. 8 Coil bias current I_B as a function of the perpendicular magnetic field $B_{\perp}$ for various HF powers.

Fig. 9 Coil bias current I_B and the optimum perpendicular magnetic field $B_{\perp \text{MAX}}$ as a function of the coil bias voltage V_B .

をそれぞれ 5.3×10^{-2} Pa, $V_B = -400$ V 一定に保ち、高周波電力をパラメータとしたときの $B_{\perp}$ と I_B の関係を示す。プラズマ密度に対応する I_B は $B_{\perp}$ に大きく依存しており、それぞれ最適な垂直磁界 ($B_{\perp \text{MAX}}$) を持っていることがわかる。またこの $B_{\perp \text{MAX}}$ の値は高周波電力の増加とともにほぼ直線的に増加する。この $B_{\perp \text{MAX}}$ の値はコイルバイアス電圧 V_B にも大きく依存しており、その様子を Fig. 9 に示す。

Fig. 10は低圧力領域における高周波電力と I_B の関係を示す。図中の曲線Aは放電ガス圧力 6.3×10^{-1} Pa, $B_{\perp} = 0$ の時のものであるが、これに48 Gの $B_{\perp}$ が加わるとこの特性は曲線Bのように大幅に改善される。また曲線Cは圧力を更に1桁引き下げ、 6.3×10^{-2} Paとし、これに $B_{\perp \text{MAX}}$ を加えたときの特性である。いずれの曲線も高周波電力と直線関係にある。また、 6.3×10^{-2} Paといった低圧力領域においても高周波電力が400 Wの時には I_B は1.8 A (電流密度は20 mA/cm²) に達しており、高速スパッタが大いに期待できる。

Fig. 11は $B_{\perp} = 0$ および $B_{\perp} = B_{\perp \text{MAX}}$ に対する I_B の放電ガス圧力依存性をそれぞれ示す。 $B_{\perp} = 0$ のときにも1~10 Paの高圧力領域では非常に大きな I_B を得ることが出来る。しかしながらこの値は放電ガス圧力の低下とともに大きく減少している。他方、 $B_{\perp}$ を常に最適磁界強度 $B_{\perp \text{MAX}}$ になるように調節した時には I_B は大幅に増加しており、しかもこの効果は圧力の低下につれて大きく現れている。これらの結果は、放電ガス圧力、高周波電力およびコイルバイアス電圧 V_B に見合った最適値の $B_{\perp}$ すなわち $B_{\perp \text{MAX}}$ を放電空間に重畳すると、低圧力

Fig. 10 Coil bias current I_B as a function of the applied HF power for various discharge conditions.

領域でスパッタ速度とそのイオン化の割合が大幅に増すことを示している。(このことは $B_{\parallel}$ を重畳したときと同様に、高真空中に引き出したイオンビームの質量スペクトルの解析によって確認されている) また、同図の中に■印でプロットした曲線は $B_{\perp}$ を 6×10^{-2} Pa にお

Fig. 11 Discharge Ar gas pressure dependence of the coil bias current.

る $B_{\perp \text{MAX}}$ (コイルの中心部で18 G) に保ったときの特性である。このときの I_B の放電圧力依存性は非常に小さく、特に $5 \times 10^{-2} \text{ Pa} \sim 7 \times 10^{-1} \text{ Pa}$ ではほとんどフラットになっている。

4. 応用分野の検討

4.1 高速イオン化プレーティングへの応用

本実験装置では $B_{\parallel}$ を重畳すると、前述のようにスパッタ粒子のイオン化割合が非常に高くなる。(特に放電ガス圧力の高いところではペニング効果が強まり¹⁰⁻¹³⁾、種々の実験結果から6.7 Pa 以上ではこの割合は50%以上となることが確認されている) プラズマスクリーングリッドの近傍まできたイオン化スパッタ粒子はここに生じるイオンシースの中でプラズマ電位によって加速された後に基板に向かうことになる。このプラズマ電位は上部の棒状電極に印加する直流電圧 V_C によって +20 ~ +200 V の範囲で容易に制御できるので、これを利用することによって基板をアース電位に保ったままでこれに入射するイオン化スパッタ粒子のエネルギーをある程度制御することが可能となる。(通常のバイアススパッタ装置では、基板の電位を変えることによってイオン化粒子の基板への入射エネルギーを調節している。また、対象となるイオン化粒子は放電サポートガスから生じる Ar^+ イオンが中心となっている) 以上のことから本スパッタ方式は今までに例を見なかったスパッタ法による高速イオン化プレーティングの実現の可能性を秘めているといえる。また、Fig. 7 に示した通り、6 Pa 以上の高圧力領域では引き出しイオンビームのほとんどが目的金属イオンで占められていることから、高性能のイオンビームデポジション (IBD) やイオン注入用の大電流金属イオン源への応用が有望となる。さらに使用目的によ

ては質量分離部を省くことが可能となり、小型で効率のよい IBD やイオン注入装置の実現が期待できる。

4.2 低圧力高速スパッタ成膜への応用

Fig. 11 からわかる通り、本スパッタ方式に $B_{\perp}$ を重畳すると $5 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 付近の低圧力においても安定した高速スパッタを制御性よく行う事が出来る。しかも、この程度の低圧力領域になるとスパッタ粒子の平均自由行程は数 cm 以上に見積もられ、それらの大部分は飛行中に雰囲気ガス (主として Ar ガス) と衝突することなく基板に到達できる。したがって、本方式ではプラズマスクリーングリッドを用いて基板をプラズマから隔離することによって、通常のイオンビームスパッタ法に近い状態で非常に高速且効率よく高品質薄膜を形成することが出来る。例えば Cu 材料を用いて放電圧力 $6.3 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 、高周波電力300 W、バイアス電圧 $V_B = -500 \text{ V}$ それぞれ一定に保ち、コイルの下端から 5 cm 離れた所にガラス基板を置いたときには 6000 Å/min と非常に速い成膜速度を得ることができた。しかもこれらの成膜速度は Fig. 9, Fig. 10 から考えられる通り、高周波電力、コイルバイアス電圧 V_B のいずれに対してもほぼ直線的に増加する。さらに、コイルの上部にある棒状電極を円盤ターゲットに取り替え、これにも同じようにスパッタ用直流バイアス電圧 V_T を加えるならば、成膜速度はさらに大幅に向上する。また、スパッタ粒子がコイルの中心軸に沿って集中することから、これに沿って細線を流すことにより細線状下地への連続高速成膜も可能となる。(現在これの試作器が完成し、データを収集しているが、上記のガラス基板のときと同じスパッタ条件のもとで $3 \mu\text{m/min}$ の成膜速度が得られている。)

5. ま と め

以前に開発したスパッタ蒸着装置の高周波コイルをベルト状の目的スパッタ材料 (Cu) で作成し、これに高周波電力と直流電力を同時に供給するとともに高周波コイルの軸に水平な磁界 ($B_{\parallel}$) または垂直な磁界 ($B_{\perp}$) を重畳し、以下のような結果を得た。

1) 外部磁界が 0 のときにでも長時間にわたる安定した高速スパッタが可能となり、しかもスパッタ金属粒子のイオン化割合が通常のスパッタ方式のものに比べて 1 桁以上高くなることが分かった。

2) コイルに加える直流バイアス電圧 V_B が -200 V 以上になるとコイルに流入するイオンによる電流はほとんど飽和状態になるが、このときの I_B の値はプラズマを励起するために供給した高周波電力に対して直線的に増加した。したがって、本スパッタ方式は成膜速度の制御性においても優れているといえる。

3) スパッタ空間に平行磁界 ($B_{//}$) を加えるとコイルの内側で γ 電子 (イオン衝撃による二次電子) が逆マグネトロン運動を起こし, さらに高濃度のプラズマが発生した。これによって高速スパッタが始まると同時にスパッタ粒子がベニング効果によって選択的に強くイオン化し, コイルの中心軸に沿って集中するようになった。このため, 高真空中にビーム状に引き出されたイオンの大多数が目的金属イオンで占められた。またコイルの上部に挿入した棒状電極によってプラズマ電位を制御することが出来た。これによってスパッタ成膜装置として利用する場合, スパッタ粒子が基板に入射するときのエネルギーを制御することができた。これらの結果から本スパッタ方式はIBDやイオン注入用大電流金属イオンビームの生成だけでなく, 新しい成膜法としてのスパッタ法によるイオン化プレーティングへの応用が考えられる。

4) コイルの軸に対して垂直方向の最適磁界 $B_{\perp \text{MAX}}$ (15~40 G) を加えることにより 1 Pa 以下の低圧力におけるプラズマ特性が大幅に改善された。これによって, 放電圧 6.3×10^{-2} Pa, 高周波電力 300 W, $V_B = 500$ V の時 I_B は 1.3 A となり, コイルの中央部で $3 \mu\text{m}/\text{min}$ の成膜速度が得られた。

〔文 献〕

- 1) N. Hosokawa, T. Tsukada and T. Misumi: J. Vac. Sci. & Technol. **14** (1977) 143.
- 2) J. A. Thornton: J. Vac. Sci. & Technol. **15** (1978) 171.
- 3) S. Kadokura, T. Tomie and M. Naoo: IEEE Trans. on Mag. Mag-17 (1981) 3175.
- 4) 星 陽一, 直江正彦, 山中敏一: 電子通信学会論文誌 **J65-C** (1982) 490.
- 5) D. M. Mattox: J. Vac. Sci. & Technol. **10** (1973) 47.
- 6) Y. Murayama: J. Vac. Sci. & Technol. **12** (1975) 876.
- 7) K. Miyake, K. Ohashi, H. Takahashi and T. Minemura: Surface Coating and Technol. **65** (1994) 208.
- 8) T. Takagi: J. Vac. Sci. & Technol. **A2** (1984) 382.
- 9) J. Ishikawa, Y. Takeiri and T. Takagi: Rev. Sci. Instrum. **57** (8) (1986) 1512.
- 10) 篠木藤敏, 伊藤昭夫: 応用物理 **44** (1975) 629.
- 11) F. Shinoki and A. Itoh: Proc. 6th Int. Vaccm. Congr. 1974, Jpn. J. Appl. Phys. **13**, Suppl. 2. pt. 1 (1974) 509.
- 12) J. W. Coburn and E. Kay: Appl. Phys. Lett. **18** (1971) 435.
- 13) J. W. Coburn, E. Taglauer and E. Kay: J. Appl. Phys. **45** (1974) 1779.
- 14) M. Yamashita: J. Vac. Sci. & Technol. **A7(2)** (1989) 151.
- 15) 橋村昌弘, 山下睦雄: 第36回応物学会講演予稿集 第一分冊1989年春期 4p-W-9 p39.
- 16) 山下睦雄: 第2回粒子線の先端的应用技術に関するワークショップ BEAMS 1991論文集 (1991アイオニクス) p45.
- 17) M. Yamashita: Jpn. J. Appl. Phys. **26** 5 (1987) 721.
- 18) M. Yamashita: Nucl. Instrum. and Methods **B37/38** (1989) 194.
- 19) M. Yamashita: J. Vac. Sci. & Technol. **A7(4)** (1989) 2752.
- 20) S. M. Rossnagel: Proc. of the 3rd ISSP (Tokyo, 1995) 253.
- 21) S. M. Rossnagel and J. Hopwood: J. Vac. Sci. & Technol. **B12(1)** (1994) 449.
- 22) S. M. Rossnagel and J. Hopwood: Appl. Phys. Lett. **63** (24) 13 (1993) 3285.
- 23) 森田 正, 山本直志, 箱守宗人, 倉内利春, 三沢俊司, 松浦正道: 真空 **38** 3 (1995) 255.
- 24) 小池正記, 千脇光國, 鈴木 功, 小林直人: 第55回応物学会講演予稿集1994年秋期 21a-ZN-5 p555
- 25) 川端敬志, 渡辺啓一郎, 岡 健一, 迫 文雄, 山本智紀, 田中 武: 真空 **38** 3 (1995) 315.
- 26) Y. Saito, Y. Mitsuoka and S. Suganomata: Rev. Sci. Instrum. **55** (1984) 1760.
- 27) 月出 修, 山下睦雄: 真空 **18** (1975) 350.
- 28) 金子忠夫, 桜井美恵子, 入野野修: 真空 **37** 8 (1994) 639.