カウフマン型低エネルギーイオン源

田原 英明*・松原 克夫*・野川 修一*

(受付1990年7月5日, 掲載決定1990年9月12)

Kaufman-Type Low-energy Ion Source

Hideaki TAHARA, Yoshio MATSUBARA
and Shuichi NOGAWA

(Nissin Electric Co. Ltd., Ukyo-ku Kyoto)

(Received July 5, 1990, Accepted September 12, 1990)

The Kaufman type ion source with a broad beam has been redesigned for high-current and low-energy ion beam sputtering. The three-grid ion extraction system was employed for low-energy operations. The computer simulations of ion beam trajectories were carried out to obtain the suitable geometrical conditions for the aperture diameters, the grid thickness and the grid separations. A significant improvement in low-energy ion beam extraction efficiency was successful achieved.

1. はじめに

カウフマン型イオン源¹⁾, もともと宇宙空間推進用ロケットのイオンエンジンとして開発されたが, 構造が比較的簡単で, 多孔式イオンビーム引出し電極により大電流のイオンビームが容易に得られることから, イオンビームスパッタ (IBS), イオンアシスト蒸着 (IVD) による薄膜形成や, イオンビームミリングによるパターンエッチング, イオンビームスパッタによるクリーニング等の表面処理など, 種々の用途に広く利用されている. なかでも, イオン源の大電流化が直接薄膜形成速度に結びつく IBS 法による薄膜形成の研究には, カウフマン型イオン源は大きく貢献した.

しかしながら, 従来のカウフマン型イオン源では, 通常2枚電極によるイオン引出し系が採用されており, 引出されるイオン電流は, 空間電荷効果のため引出し電圧の3/2乗にはほぼ比例する. このため, イオンエネルギーが1000 eV 以上では充分なイオン電流が得られるものの, 数百 eV 程度の低エネルギー域において, イオン電流の低下が大きい. またイオンエネルギーの減少に伴いスパッタ率も低下するため, 薄膜形成速度が大幅に低下す

る欠点があった.

一方, 最近の IBS 法による薄膜研究において, 低エネルギー域でのスパッタ成膜の有効性が見出されている. IBS 膜は比較的大きな圧縮の内部応力を持つが, 西村らは²⁾, 600 eV の低エネルギースパッタによる NiFe 膜で内部応力の低減を明らかにしている. また, 井上ら³⁾の窒素イオンビームを用いた反応性 IBS 法による SiN 膜の研究では, 低エネルギースパッタ域でストイキオメトリに近い SiN 膜が得られ, イオンエネルギーの上昇とともに Si リッチの膜になると報告している.

イオンビームのエネルギーは, スパッタ粒子の運動エネルギーとなって, 膜構造に大きな影響を与えられるので, 広いエネルギー範囲で充分なイオン電流の引出し性能を有するイオン源が IBS 装置にとって望ましい.

そこで我々は, カウフマン型イオン源のプラズマ中のイオン密度をより高め, さらに3枚電極によるイオン引出し系を採用することにより, 低エネルギー大電流でかつ500~1500 eV の広いエネルギー範囲でほぼ一定のイオン電流を得ることを目的としたイオン源の開発を行った. 以下にその詳細を報告する.

2. カウフマン型イオン源の原理と構造

Fig. 1 にカウフマン型イオン源の代表的な構造を示

* 日新電機株式会社 (京都市右京区梅津高畝町47番地)

Fig. 1 Schematic diagram of Kaufman type ion source.

す。イオンビームとして引出されるイオンは、イオン源内に中性ガスを導入し、アノードとカソード間の直流放電によって生成される。通常のスパッタリングでは中性ガスとして Ar 等の希ガスが用いられている。大電流のイオンビームを得るには、まずイオン源内で高密度プラズマを生成する必要がある。このタイプのイオン源では、カソードフィラメントから放電電圧に相当するエネルギーを持って放出された一次電子を軸方向に形成された磁場 B によりプラズマ内に拘束し、電子がアノードに達するまでの飛行距離を長くすることで、衝突電離効率を高めている。また、磁場に直交する screen 電極は、Fig. 1 のように高抵抗を接続しフローティング電位、もしくはカソード電位として、一次電子が直接流入しないように静電的閉じ込めを行っている。通常フィラメント材料には容易に多量の電子放出が可能な線径 0.25 mm 程度のタングステン線が用いられている。運転時の放電電圧は中性ガスの電離効率の良い 40~100 V 程度であり、0.1 Pa (約 1 mTorr) 前後の低ガス圧中でもイオン密度が 10^{11} cm^{-3} 以上の高密度プラズマを生成することができる。

イオンビーム引出し系には、直径 2 mm 前後の孔が多数設けられた多孔式電極が用いられ、大面積の面ビーム引出しが可能である。Fig. 2 に通常の 2 枚電極でのイオンビーム引出し孔部分の断面を示す。一般に、イオン引出し電極間 (screen 及び accelerator 電極間) では、イオン自身の空間電荷により、引出し得る最大のイオン電流量が制限される。これは、簡単のため平板電極を考えると、良く知られた次式の Child-Langmuir の式で与えられる⁴⁾。

Fig. 2 Two-grid ion extraction system.

$$I_{si} = \frac{1}{9} \epsilon_0 \left(\frac{2Z_e}{m_i} \right)^{1/2} \cdot V_T^{3/2} \cdot \pi \cdot \left(\frac{2a}{d} \right)^2 \quad (1)$$

I_{si} : 空間電荷制限電流 [A]

ϵ_0 : 真空の誘電率 [$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$]

Z_e : イオンの電荷量 [C]

m_i : イオンの質量 [kg]

$V_T = V_1 + V_2$: 引出し電圧 [V]

$2a$: 孔径 [m]

d : 電極間距離 [m]

上式から明らかなように、大電流化には、アスペクト比 $2a/d$ を大きくするか、または引出し電圧 V_T を高くすることが必要である。しかしながら、あまりに $2a/d$ を大きくしすぎると、イオンビーム自身の電荷により中心軸上の電位が高くなり、イオンビームの径方向への広がりが大きくなる。このためイオンビームの引出し電極への流入やイオン源を出た後にビームの発散が生じ、照射面上での電流密度が低くなってしまふ。アスペクト比 $2a/d$ には経験的に上限が定められ、通常 $2a/d \leq 2$ 程度である。また、引出し得るイオン電流は引出し電圧 V_T の $3/2$ 乗に比例するが、2 枚電極では、 V_T はイオンエネルギーにはほぼ等しく、低エネルギーで大電流のイオン引出しを行うには、自ずから限界がある。

3. 開発の概要

今回試作したイオンビーム口径 25 mmφ のカウフマン

Fig. 3 Cross section of improved ion source.

型イオン源の断面図を Fig. 3 に示す。磁場の形成にはアルニコ系の永久磁石を用いて、小型・軽量化を図った。また、より高密度プラズマを安定に生成するため、カソードフィラメントは線径0.8 mm のタングステン線とし、熱電子放出性能を強化した。さらに、低エネルギー域での大電流化を図るため、3 枚電極によるイオンビーム引出し系を採用した。また、高密度プラズマ、大電流化に伴う熱負荷の増加を考慮し、プラズマ容器を直接水冷構造とした。電極材料としては高融点材料で比較的加工性の良いモリブデンを用いた。

Fig. 2 に示す 2 枚電極系に接地電位の decelerator 電極を加えた 3 枚電極系では、イオンエネルギー V_1 と引出し電圧 V_T の比 V_1/V_T が小さくても、イオンビームの発散は少い。すなわち、3 枚電極系では、screen 電極の電位 V_1 で定まるイオンエネルギーを低くして、accelerator 電極に負の電位 $-V_2$ を大きく印加し式(1)の引出し電圧 V_T を大きくすることで、引出し得るイオン電流の最大値 I_{si} を低エネルギー域でも増加させることができる。Kaufman⁵⁾らによって、このような利点を持つ 3 枚電極によるイオンビーム引出し系の最適化の研究がなされている。しかしながら、彼らの検討では、高密度プラズマからのイオンビーム引出しの検討が不十分であった。そこで、我々は、500~1500 eV の広いエネルギー範囲にわたり、より高密度のプラズマから大電流引出しが可能で、収束性の良好なイオンビーム引出し系につき、イオ

ンビーム軌道のシュミレーションを用いて検討を行い、その改良を行った。

4. イオンビーム引出し系

イオンビームの引出し性能を決定する上で大きな要因の一つにプラズマからのイオン放出面形状がある。

Fig. 4 に代表的なイオン放出面形状を示す。良好なイオン引出し条件を保つには、Fig. 4(a) のように、イオン放出面が平面状であることが望ましい。しかし、イオン密度を高めると、イオン放出面は凸形状に膨らみ、Fig. 4(b) に示すように変化する。このようになると、イオンビームの広がりが大きくなり、引出し電極への流入が増加して、大電流のイオン引出しが困難となる。したがって、プラズマパラメータに応じた引出し系の設計が重要である。そこで、Fig. 4(c) に示すような引出し系の各パラメータ (N_i : イオン密度, $a_1 \sim a_3$: 孔半径, $t_1 \sim t_3$: 電極厚み, d_{1-2} , d_{2-3} : 電極間隔, V_1 , V_2 : 電極電位) を変化させてビーム軌道計算を行い、最適な電極形状の検討を行った。Table 1 は計算に用いた種々の電極形状寸法を示す。

今回行ったビーム軌道計算の基礎式を式(2)に示す。

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 \phi &= -\rho/\epsilon_0, \quad E = -\nabla \phi \\ m_i \frac{dv}{dt} &= Z_e E \\ \nabla \cdot \mathbf{j} &= \nabla \cdot (\rho \cdot \mathbf{v}) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ϕ : ポテンシャル [V] m_i : イオン質量 [kg]

Table 1 Summary of grid configurations

	(A)	(B)	(C)
$2a_1$ [mm]	2.06	1.0	1.2
$2a_2$ [mm]	1.32	0.64	0.8
$2a_3$ [mm]	1.70	0.8	1.0
t_1 [mm]	0.38	0.3	0.3
t_2 [mm]	0.76	1.0	0.8
t_3 [mm]	0.76	1.0	0.8
d_{1-2} [mm]	1.0	0.7	0.7
d_{2-3} [mm]	0.5	0.5	0.5

Fig. 4 Typical conditions of plasma boundary position.

E : 電界 [V/m] v : イオン速度 [m/s]
 ρ : 電荷密度 [C/m³] J : イオン電流密度 [A/m²]
 Z_e : イオンの電荷量 [C]

また、イオン放出面は、次式(3)⁶⁾で表されるプラズマのイオン飽和電流と、式(1)に示した空間電荷制限電流とが等しくなるように反復計算を行い求めた。

$$I_{pi} = N_i \cdot Z_e \cdot \left(\frac{\kappa T_e}{m_i} \right)^{1/2} \cdot \pi a^2 \cdot \exp(-1/2) \quad (3)$$

I_{pi} : イオン飽和電流 [A] T_e : 電子温度 [K]
 N_i : イオン密度 [1/m³] m_i : イオン質量 [kg]
 Z_e : イオン電荷量 [C]

κ : ボルツマン定数 [$\kappa = 1.38 \times 10^{-19}$ J/K]

Table 1(A)は Kaufman らによって示された3枚電極構成における最適値の例⁵⁾である。その計算結果を

Fig. 5 Extracted ion current density as a function of ion saturation current density.

Fig. 5(A)に示す。この場合、プラズマのイオン飽和電流密度 J_{pi} を大きくすると、 $J_{pi} = 40$ mA/cm²以上において引出し得るイオン電流密度 J_{bi} はむしろ低下する。これは、イオン密度の上昇に伴いイオン放出面が凸形状となり、イオンビームが広がり引出し電極へ流入することによって、有効に引出されるイオン量が減少するためである。これに対し、今回検討した Table 1 の電極形状 (B) 及び (C) については、Fig. 5(B) (C) に示すように、イオン飽和電流密度 50 mA/cm² 以上の高密度プラズマ生成時においても、イオン放出面は Fig. 4(a) のような平面形状を保ち、良好なイオンビーム引出しが可能であった。また、この特性は、引出し電圧 V_T を一定にし、イオンエネルギー V_1 を 500~1500 eV まで変化させた場合にもほぼ同様の結果が得られた。

このように、イオン放出面の形状を凸から凹にする一般的な方法として、①引出し電圧 $V_T (= V_1 + V_2)$ を高くする、②電極間隔 d_{1-2} を小さくする、③孔径 $2a_1$ を小さくする、等があげられる。定性的に見ると、プラズマの膨らみを抑えるものは電極間に形成された電界であるが、イオンビーム自身の電荷量の増大によって印加電界の乱れが大きくなるに伴い、プラズマが電極孔内に入り込むようになる。従ってイオン引出し領域に滞留するイオンビーム自身の電荷量を低減することで、イオン放出面形状を改善することができる。引出し電圧 $V_T (= V_1 + V_2)$ を高くするか、あるいは電極間隔 d_{1-2} を小さくした場合は、電極間の軸方向電界が大きくなるのでイオン速度が速くなりイオン引出し領域の空間電荷密度が小さくなる。これに伴ってイオン放出面がプラズマ側に後退し、凹形状に近づく。また、孔径 $2a_1$ を小さくした場合は、単孔当たりのイオン電流量が小さくなるので、同様の効果がある。

引出し電圧 V_T を高くする方法は、電極間の絶縁破壊

Fig. 6 Ion beam trajectories simulated.

Fig. 7 Ion current as a function of discharge current at discharge voltage of 50 V.

Fig. 8 Ion current as a function of ion energy.

電圧により限界値が定まるが、電極間隔 d_{1-2} を小さくする方法については、電極間の平均電界 V_T/d_{1-2} を E_2 で表したとき、式(1)に示すように空間電荷制限電流は、 $E_2^2/V_T^{1/2} (= V_T^{3/2}/d_{1-2}^2)$ にほぼ比例し、また電極間の絶縁破壊の平均電界も電極間隔が小さいほど大きくなる⁷⁾ので、非常に有効である。但し、電極間隔をあまり小さくすると製作上の精度が無視できなくなる。ここでは Table 1 に示すように $d_{1-2}=0.7$ mm とし、また、孔径 $2a_1$ については 1.2 mm と 1.0 mm として検討を行った。なお、Table 1 の(C)の電極形状でのイオンビーム軌道のシミュレーション結果の一例を Fig. 6 に示す。

5. 試作イオン源の特性

イオンビーム引出し電極として、Table 1(C)に示す形状を用い、この引出し孔を 25 mm 径内に 253 個設け、動作ガスとして Ar ガスを用いてイオン源の動作試験を行った。

Fig. 7 は、放電電圧 50 V 時の放電電流に対するイオン電流特性を示す。放電電流は、イオン源内のイオン密度に比例する量とみなすことができ、Fig. 7 よりイオン密度の増加に対しイオン電流は比例的に増加する特性を示すことが判る。図に示すように、放電電流 2.0 A のとき最大 120 mA の大電流イオンビームを引出すことができた。このとき、イオンエネルギー V_i は 1000 eV、引出し電圧 V_T は 2400 V とした。この値は単孔当たりのイオン

Fig. 9 Beam profile at ion current of 50 mA, ion energy of 500 eV and distance of 100 mm from source.

電流密度で約 42 mA/cm² に相当し、シミュレーション結果と同様に、高密度プラズマの領域においても、効率良くイオンビームを引出すことができています。

Fig. 8 はイオンエネルギーに対する電流特性を示す。図中の 500~1500 eV の範囲は、放電電流を 1.5 A と一定にして運転した場合の特性である。広いエネルギー範囲にわたってはほぼ一定のイオン電流が得られた。また、図中の 500 eV 以下の領域は、引出し電極に流入するイオン電流が最低になるように放電電流を調整しながら運転した場合を示す。100~500 eV の非常に低いエネルギー範囲に

においても40 mA以上のイオン電流を得ることが出来た。

Fig. 9, イオンエネルギー500 eVで50 mAのイオンビームを引き出した際の照射面上におけるイオン電流密度プロファイルを示す。照射面はイオン源の引出し電極から約100 mm前方の位置とした。収束性の良好なイオン電流密度プロファイルが得られている。

6. ま と め

イオンビームスパッタ薄膜形成に適したスパッタリング用低エネルギーイオン源を開発するため、カウフマン型イオン源に次のような改良を加えた。

(1) タングステンフィラメント線径を太くして熱電子放出性能を高めた。

(2) 高密度プラズマ生成による熱負荷に対処するためにプラズマ容器部の直接水冷を行った。

(3) 低エネルギー領域でのイオン電流を確保するため3枚電極のイオン引出し系を採用した。

(4) イオンビーム軌道計算を行い、イオンビーム引出し性能の良い電極孔径、電極間隙、電極厚さを求めた。

上記(1), (2)項は高密度プラズマの安定な生成に, (3),

(4)項は効率の良いイオンビームの引出しに寄与することを試作イオン源の動作特性から明らかにした。

本イオン源は、イオンビーム口径25 mmφの小形ながらイオンエネルギー500~1500 eVで100 mA以上のイオン電流が得られており、今後のイオンビームスパッタ薄膜形成プロセスの研究に重要な役割を果たすものと考えられる。

〔文 献〕

- 1) H. R. Kaufman, J. J. Cuomo and J. M. E. Harper: J. Vac. Sci. Technol., Vol. 21, No. 3 (1982), 725-756
- 2) 西村 力, 柳沢佳一, 戸島知之, 広野 滋: 信学技報 CPM85-48 (1985), 17-22
- 3) 井上大輔, 高野真一, 野川修一, 大菅英昭, 上條栄二: 真空, Vol. 32, No. 1 (1989), 14-19
- 4) I. Langmuir, K. B. Blodgett: Phys. Rev., 24 (1924), 49
- 5) G. Aston, H. R. Kaufman: AIAA JOURNAL, Vol. 17, No. 1 (1978), 64-70
- 6) 石川順三: 「イオン源工学」アイオニクス叢書 (1981)
- 7) H. R. Kaufman: Advances in Electronics and Electron Physics, Vol. 36 (1974), 309