

励起粒子ビーム源の開発と薄膜作製への応用

Development of Excited Particle Beam Source for Thin Film Preparation

岡本昭夫* 野坂俊紀*
Akio Okamoto Toshikazu Nosaka

吉竹正明** 小川倉一***
Masaaki Yoshitake Souichi Ogawa

(2002年7月17日 受理)

キーワード：励起粒子ビーム，低エネルギーアシスト成膜，室温成膜，イオンビームスパッタ，ITO薄膜，窒化アルミニウム薄膜

1. はじめに

真空を利用した薄膜作製技術，例えば真空蒸着法やスパッタリング法等の物理的薄膜作製法 (Physical Vapor Deposition: 以下 PVD 法) において化合物や機能薄膜を作製する場合，適切な温度に基板を加熱する必要があり，その温度は作製する化合物の種類や要求される機能に依存して決められる。しかし，基板温度を高温にすることは，一方で利用できる基板に耐熱温度の点で制約が加わることになる。最近の技術の動向として，エレクトロニクス等の薄膜利用分野でも，小型軽量化がうたわれ，プラスチック材料等，耐熱温度の低い材料への高機能薄膜作製が期待されている。そのためには，熱エネルギーの代替として励起粒子 (イオン，電子，ラジカル等) やプラズマの利用が重要な技術として期待されている。さらに，基板もしくは堆積していく薄膜と励起粒子との相互作用を利用することは，基板のクリーニング，薄膜の結晶配向性制御，化合物薄膜の組成制御，基板表面での反応制御等の効果が期待できる。しかし，照射する励起粒子の運動エネルギーが大きすぎると，逆に，結晶性の劣化や構造敏感な材料へのダメージ等の問題が生じるため¹⁾，その照射エネルギーには種々の目的に応じて適正值

が存在すると考えられる。

励起粒子の中でもイオンや電子のような荷電粒子は電界や磁界により，その運動エネルギーや照射量を制御して利用できるが，ラジカル等電荷を持たない粒子の制御は困難である。電子は，薄膜作製に対しては，エネルギーを与えるだけであるが，イオン，ラジカル等の場合は元素 (物質) の持つ性質も付与できることが利点である²⁾。この内のイオンを発生させる装置としてイオン源があるが，一般に，効率良くイオンビームを取り出すためにはイオンの引き出し・加速電圧を大きくする必要があり，低エネルギー照射を実現するためには工夫が必要である。また，イオン源に導入するガス状材料のイオン化率は，数%～十数%と低いいため，イオンのみを分離して利用しようとする制御性は良くなるが，導入ガスの利用効率が悪くなる³⁾。

そこで，薄膜作製時に照射するアシスト用励起粒子ビーム源としては，低エネルギーで大電流密度が得られ，導入ガスの利用効率の観点からプラズマ中に含まれる中性粒子やラジカルを薄膜形成に有効に利用できることが必要であると考え，これらの特性を満足するような励起粒子ビーム源の開発を行った。本報告では，筆者らが開発した比較的簡単な構造の低エネルギー励起粒子ビーム源について，その特徴と照射特性を紹介し，イオンビームスパッタ成膜と組み合わせることで作製した高品質な化合物薄膜における低エネルギー励起粒子ビーム照射効果について報告する。

* 材料技術部 薄膜材料グループ

** 材料技術部

*** 大阪府中小企業支援センター

2. 低エネルギー励起粒子ビーム源

(1) 特徴

今回開発を行った励起粒子ビーム源は、高機能薄膜作製や低損傷エッチング等に対して有効な低エネルギービーム照射を目的として、ガス導入部にマルチキャピラリーを用いることを特長としている。単一のキャピラリーによるガスフローは、内径に対する長さの比（いわゆるアスペクト比）が数百以上あれば、指向性を持ち、ビーム強度が増加することが知られており^{4,5)}、それを束ねたマルチキャピラリーをイオン源のガス導入系として利用することを考えた。当初、熱電子を用いた低電圧放電によりプラズマを発生させる熱電子励起型低エネルギーイオン源の開発を行った。その後、活性ガスに対する安定動作と動作ガス圧の低減とを目的として高周波放電を用いたイオン源の開発へと移行した。この方式のイオン源は、100%酸素ガスを導入しても充分動作可能であり、そのビーム中には酸素の原子イオン、分子イオン、ラジカル等の種々の励起種が多く含まれていることが判明した。従って、本イオン源は種々の励起粒子を有効に活用できる“励起粒子ビーム源”として取り扱うことができる⁶⁾。

(2) 構成と動作

図1に高周波（以下 RF）型励起粒子ビーム源の構成概略図を示す。本装置は、主としてマルチキャピラリー、励起用 RF コイル、放電室、ガス導入系、水冷系から成り、非常にコンパクトな構造で、一般の真空成膜装置にも ICF152 フランジにより取り付けることができる。また、RF コイル用冷却水と RF 電力の供給ができれば動作可能である。放電ガスはマルチキャピラリーを通して石英製の円筒形放電室に導入される。その放電室外部に設置されたコイルに RF 電力を供給することによりプラズマを発生させる。水冷された RF コイルは直接プラズマに晒されない配置となっているため、100%酸素のような活性ガスでも長期間安定

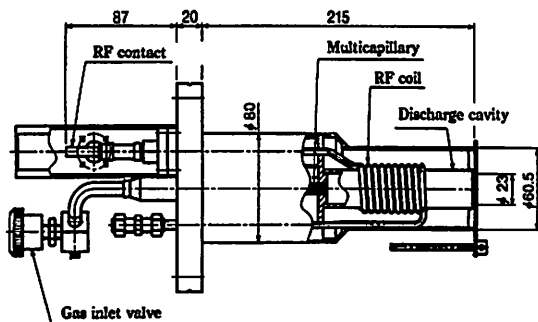


図1 高周波型励起粒子ビーム源の概略図

な動作が可能である。ビーム引き出し口径は 25mmφ でアシスト時の照射距離は～500mm である。また、投入電力は 50W～300W 程度とし、マルチキャピラリーによる分子線形成効果により、各種ガスに対して、 4×10^{-3} Pa と非常に低いガス分圧から動作できる。

(3) 照射特性

(A) 照射イオン数密度

照射されるイオンの数を検討するため、基板ホルダーに流れ込むイオン電流を測定し、単位面積、単位時間あたりのイオン数（照射イオン数密度）に換算した。基板バイアスは、電子の流入を防ぎ、イオンを引き込む方向、つまり、負のバイアスを印加している。測定に用いた照射距離は実際に成膜で使用する距離を考慮して 400mm とした。投入 RF 電力は、50～200W と変化させた。図2に酸素ガスを用いて、基板バイアスを -70V に固定して投入 RF 電力を変化させたときの照射イオン数密度の変化を示す。ガス分圧によって、図の照射イオン数密度が急に立ち上がる時の投入電力値の違いが明確に分かる。

本励起粒子ビーム源の RF 電力供給方式はコイル状のアンテナ電極による誘導結合型であり、供給電力が小さい場合でも放電室内ではプラズマが発生する。この状態が照射イオン数密度の小さいモードであり、供給電力を増加させると、放電室内のプラズマの密度が上昇するとともに、コイル両端に発生する電圧も増加しプラズマ電位も上がる。ついには、マルチキャピラリーで形成された分子流により、励起粒子ビーム源の外までプラズマが広がるようになる。これが、照射イオン数密度の大きいモードであり、図の照射イオン数密度が急激に立ち上がった後の状態である。従って、ガス分圧が高くなるほどこの状態に移行する電力も

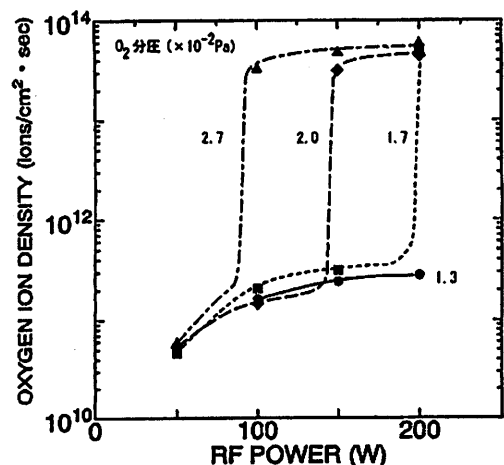


図2 照射イオン数密度の高周波電力依存性

小さくなっていることも理解できる。また、この立ち上がり前後で2桁程度の照射イオン数密度の増加が見られる。これらのことより、ガス分圧が高く、投入RF電力が大きい条件の場合には照射距離が400mmと比較的長いにも関わらず、 5×10^{13} ions/cm²s (イオン電流にして数 mA) 程度の大きな照射イオン数密度が得られており、薄膜作製時のアシスト用励起粒子ビーム源として充分利用可能であることが分かる。

(B) 照射イオンエネルギー

イオンビームのエネルギーは、図3に示す静電反射型4枚グリッド測定法⁷⁾を用いて測定した。イオンコレクター電極の前に4枚のメッシュ電極(グリッド)が配置され、それぞれに正・負の電圧が印加される。イオン源側からみて1枚目と3枚目のグリッドは測定器のケースと接続されており、本実験の場合はイオンを引き込むため-50Vの電圧を印加している。2枚目のグリッドには、イオンコレクターからの2次電子の放出を防ぐために-100Vの電圧が印加されている。4枚目のグリッドにはエネルギー分析を行うための電圧が印加され、ここに印加した電圧による電位の障壁を越えるだけのエネルギーを持つイオンが検出される。この電圧を走査することによりエネルギー分布が測定できる。

図4には、投入RF電力は200Wとして、酸素ガスを 8.0×10^{-2} Pa (6.0×10^{-4} Torr)の圧力になるように導入した場合のイオンエネルギー(E_i)の分布を示す。図中のパラメータ V_t は分析器に印加したバイアス電圧である。 V_t はこの場合イオン照射時の加速電圧に相当する。ピーク位置は V_t に対して40~65eV高いエネルギーを示すが、170eV以下の低エネルギー照射が実現できていることが分かる。また、半値幅も35~45eVであり、比較的広がり小さいエネルギー分布となっていることが分かる。

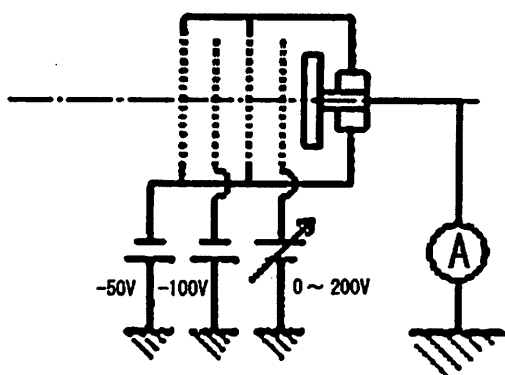


図3 静電反射型4枚グリッドエネルギー分析器

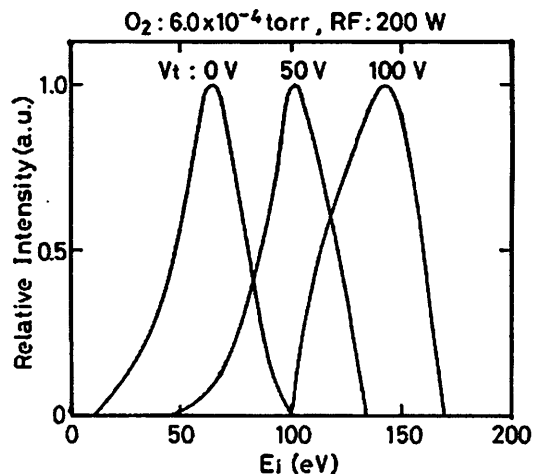


図4 ターゲット電圧を変化させた場合の酸素イオンエネルギー分布

(C) 発光分光分析

発光分光分析は、励起粒子ビーム源直後の発光を、ビューイングポートを通して光ファイバーから取り込み、200nm~900nmの波長範囲で行った。

図5に酸素ガスを導入した場合の代表的な発光分光分析の結果を示す。いずれの圧力の場合も原子及び分子の励起状態(*で示す)からの発光ラインが強く観察されていることが分かる。照射イオン数密度の結果ともあわせて考えると、ビーム中には、イオンのみならず、励起状態の中性粒子も多く含まれていることが分かる。その酸素励起ビームの発光スペクトルの中で 0^* (777.6nm) と 0_2^+ (563.2nm) の2本のスペクトルに注目し、投入RF電力による発光強度の変化を調べた結果を図6に示す。RF電力を変化させても 0_2^+ (563.2nm) の発光強度は変化しないのに対して、 0^* (777.6nm) の発光強度はRF電力の増加とともに大きくなることが分かる。この結果から、投入するRF電力によりビーム中に含まれる 0^* と 0_2^+ の照射比率を制御することができることが分かる。

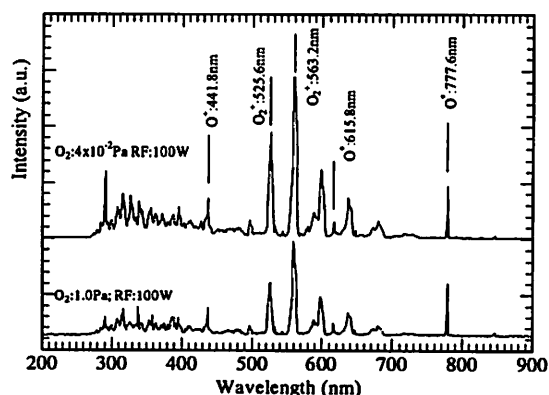


図5 酸素ビームの発光分光分析結果

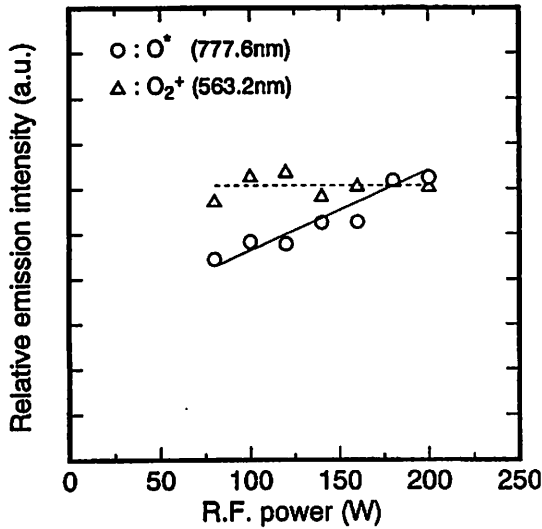


図6 酸素の励起種とイオンの発光強度の高周波電力依存性

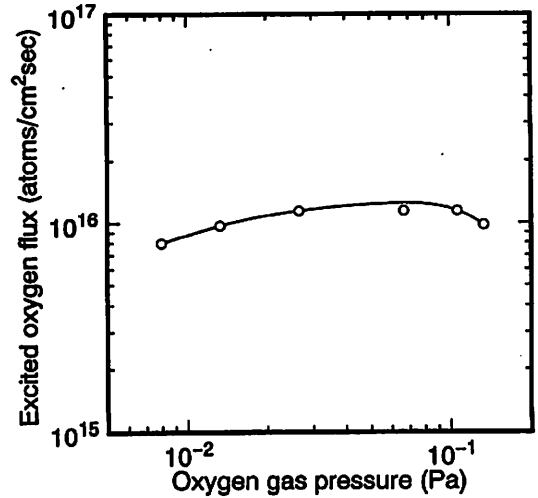


図8 酸素励起種のガス分圧依存性

(D) 酸素励起種フラックス量^{8,9)}

酸素励起ビームについて、酸素励起種のフラックス量の測定を行った。投入RF電力は200Wとした。酸素励起種のフラックス量は、Ag膜が酸素分子では酸化されずに、酸素励起種によってのみ酸化されることを利用して、Ag膜を蒸着した水晶振動子を取り付けた膜厚モニターを用いる方法¹⁰⁾により測定した。図7に測定概略図を示す。

図8に、照射距離100mmにおける酸素フラックス量の導入酸素ガス分圧依存性を示す。酸素ガス分圧が 8.0×10^{-3} Paと比較的低い場合でも 8.0×10^{15} atoms/cm²sのフラックス量が得られ、 10^{-2} Pa台では安定して 10^{16} atoms/cm²s台のフラックス量が得られていることが分かる。この結果から、比較的高真空領域での応用が可能であることが分かる。

図9には酸素ガス分圧 2.7×10^{-2} Paのときの酸素フラックス量と照射距離の関係を示す。距離に対して指数関数的に減少することから、励起ビームの発散角

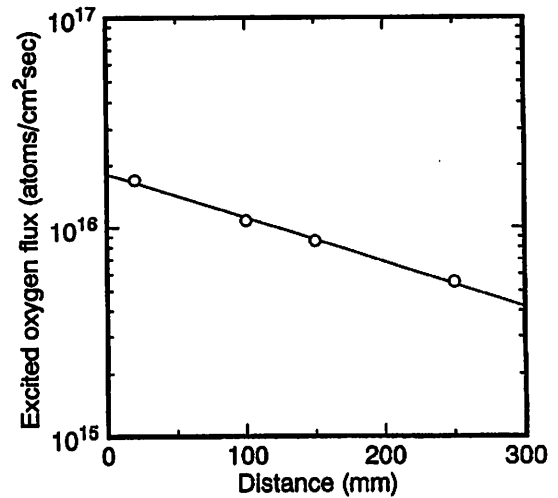


図9 酸素励起種の照射距離依存性

を見積もると1度以下であり、励起種は拡散過程の広がりではなくビームを形成し、比較的高密度で距離に対する減衰の小さい照射が可能な励起粒子ビーム源であることが分かる。この現象は、マルチキャピラリーガス導入による分子線形成効果とプラズマ状態で輸送されるためクーロン反発が起こらないこと等のために、ビームの発散が抑えられていると考えられる。

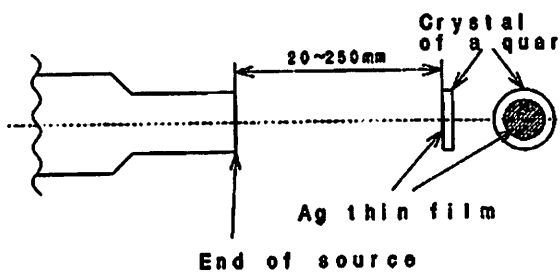


図7 酸素励起種のフラックス量測定概略図

3. 励起粒子ビームアシスト法による化合物薄膜の作製と照射効果

PVDによる薄膜作製時における励起粒子ビーム照射効果を調べるために、イオンビームスパッタ (Ion

Beam Sputter : 以下 IBS) 法と励起粒子ビームアシストを組み合わせた成膜装置を試作した。この装置を用いて、金属ターゲットを出発材料とした IBS 法による成膜時に、酸素や窒素等の反応ガスの励起ビームを基板上に照射することにより、室温基板上への化合物薄膜の作製を試みた。

化合物薄膜の作製において、金属ターゲットを用いることの利点は、

- 1) ターゲットの成形が容易である、
- 2) 熱伝導が良くターゲットの冷却が容易である、
- 3) 高純度のターゲットが得られる、
- 4) 導体ターゲットであるのでイオンビームの中性化等の機構が必要ない、
- 5) 作製する化合物薄膜の組成を広範囲にコントロールできる、

等があり、励起粒子ビームの照射効果を調べることに適している。

酸素ビーム照射実験として、液晶ディスプレイやタッチパネル等に用いられている透明導電膜として良く知られている錫ドープ酸化インジウム (Indium Tin Oxide : 以下 ITO) 薄膜の作製を試み、また、窒素ビーム照射実験として、ワイドギャップ半導体として知られ熱的・化学的に安定でパッシベーション膜としても用いられる AlN 薄膜の作製を試みた。

以下に試作した励起粒子ビームアシスト IBS 装置の概要について述べた後、それぞれの薄膜作製に関して励起粒子ビームの照射効果について述べる。

(1) 励起粒子ビーム源を備えたイオンビームスパッタ装置

(A) 装置の概要

励起粒子ビーム源の指向性を充分発揮できるように成膜時の真空度が比較的高い IBS 法との組み合わせを考え、励起粒子ビーム源をアシスト源として基板方向に照射できるように設置した IBS 装置を試作した。スパッタイオン源、励起粒子ビーム源ともガスソースタイプであるため、排気速度の大きいターボ分子ポンプ (1.5m³/s) 2 台を主排気系に用いている。到達真空度は 4×10^{-5} Pa 以下である。真空度及びガス圧測定のため広帯域電離真空計を用いている。

(B) 装置の構成と基本動作

図 10 に本実験で用いた IBS 装置の構成概略図を示す。本装置はスパッタ用イオン源、アシスト用励起粒子ビーム源、ターゲットホルダー、基板ホルダー及び排気系等から構成されている。

スパッタ用イオン源は熱電子励起型ガスソースイ

オン源を基本とした比較的大面積の照射ができるもので 2 枚グリッドのいわゆるカウフマンタイプである。イオンビームの引き出し口径は 80mmφ で、加速電圧は ~1kV、スパッタガスは通常 Ar ガスを用い、ガス導入量は 10SCCM 程度で動作ガス圧は 10^{-2} Pa 台の前半である。引き出し電圧 300V、加速電圧 1kV のとき、ターゲットに流れ込むビーム電流は 20~30mA である。

アシスト用の励起粒子ビーム源は、成膜基板へ向けて反応ガス (酸素、窒素等) の励起粒子ビームを照射できるように配置されている。動作時のガス導入量は 10SCCM 程度で動作ガス圧は 10^{-2} Pa 台の前半である。投入高周波電力は 50~200W で用いる。

ターゲットは 150mmφ (MAX) で、2 種類の材料まで装着でき真空外からの切り替えが出来るため、積層薄膜の作製も可能である。通常、ターゲットは 100mmφ の金属や合金を用いる。基板ホルダーは 120×120mm の大きさの基板が 4 枚までセットでき、必要に応じて基板バイアスも印可できる機構となっている。

(2) 酸素ビーム照射による ITO 薄膜作製^{1), 12)}

(A) 目的及び成膜方法

透明導電膜としてよく知られている ITO 薄膜は、その可視領域の透明性と低抵抗性から、液晶表示素子、プラズマディスプレイ等の電極としてよく用いられている。現状では種々の透明導電膜材料の中で最も優れた特性を持つことが知られている。プロセスの低温化、基板材料の選択性の良さ、低コスト化等の観点から基板温度を上げずに良好な特性の ITO 薄膜を作製することが現在重要な課題となっている。ここでは、基板加熱を行わない室温基板上へ良好な特性を持つ ITO 薄膜を作製することを目的とし、温度の代替エネルギーとしての酸素励起ビーム照射の効果を確認するために成膜実験を行った。

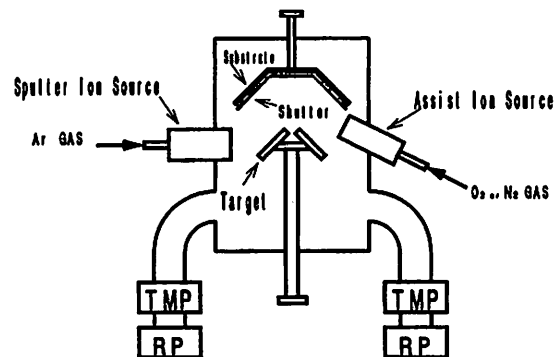


図 10 励起粒子ビームアシストイオンビームスパッタ装置の構成概略図

表1 ITO 薄膜の作製条件

スパッタイオン源		励起粒子ビーム源		基板	
Ar ガス圧	9.3×10^{-3} Pa	O ₂ ガス圧	4.0×10^{-3} Pa	バイアス電圧	-100~+100V
加速電圧	600V, 1kV	Ar ガス圧	1.3×10^{-2} Pa	電流	+3.0~50mA
ターゲット電流	15, 35mA	RF 電力	100W	温度	室温

成膜方法は、ターゲットに 100mmφ の In-Sn(10%) 合金を用いて、スパッタイオン源で Ar イオンビームを発生させスパッタする。成膜中、基板方向に酸素励起ビームを照射することにより基板上で In 及び Sn と酸素とを反応させ ITO 薄膜を作製した。基板には #7059 ガラス及び石英を用いた。成膜時の基板温度は数十℃であった。表1に主な作製条件を示す。

(B) 成膜結果と検討

透明導電膜の評価としては、膜の比抵抗と可視光領域の透過率が重要となる。種々の条件で作製した ITO 薄膜について、図11には基板温度と比抵抗の関係、図12には可視領域での透過率と反射率の変化をそれぞれ示す。

基板加熱をしない室温の状態、アシスト酸素の励起を行わなかった場合(図中記号A)は、透明にはならず、金属光沢の薄膜となった。その薄膜の比抵抗は $9.7 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}$ と大きくなっており、十分な酸化反応は起こらず、一部膜中に酸素が取り込まれているだけであると考えられる。次に、励起は行わないままで、基板温度を 190℃まで上げた場合(図中記号B)は酸化反応が起こり、スパッタイオン源の加速電圧が600V

の条件では、透過率 80%、比抵抗 $4.0 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$ の良好な ITO 薄膜が得られた。しかし、加速電圧を 1kV と大きくすると、スパッタされた合金の基板への到達速度が大きくなり、反応する酸素量が不足して半透明の膜となった。基板温度の代替として酸素励起ビームアシストを行って成膜した場合には、基板電位の違いにより異なる結果となった。まず、基板を接地電位にした場合(図中記号C)は比抵抗 $8.2 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}$ で、半透明な反射率の高い ITO 薄膜となるが、接地せずに浮遊電位とした場合(図中記号D)から+60Vのバイアス電圧を印加した場合(図中記号E)へと基板電位を変化させた時、すなわち励起粒子ビーム中に含まれる正イオンが ITO 薄膜を照射するエネルギーを小さくするにつれて 4.0×10^{-3} から $7.0 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$ へと比抵抗が小さくなり電気的特性が向上した。透過率としてはDの場合が 90%(at550nm)と良好であった。Eの場合には膜厚の効果による干渉がみられており、図からは 70%(at550nm)と読みとれるが、反射率が数%以下であることも合わせて考えると実質的な透過率はより高いと考えられる。

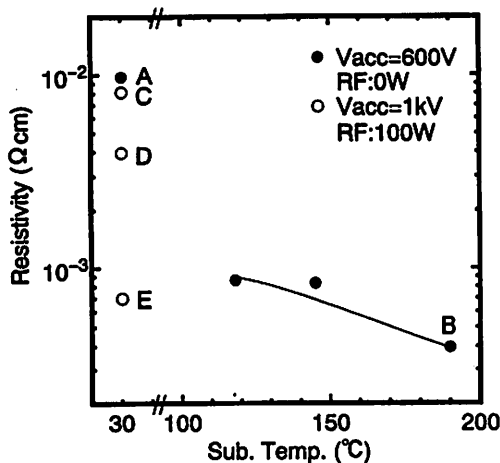


図11 ITO 薄膜の比抵抗の基板温度依存性

A: 室温基板, アシスト無し, B: 基板加熱あり, アシスト無し, C: 室温基板, アシストあり(接地電位), D: 室温基板, アシストあり(浮遊電位), E: 室温基板, アシストあり(バイアス電圧+60V印加)

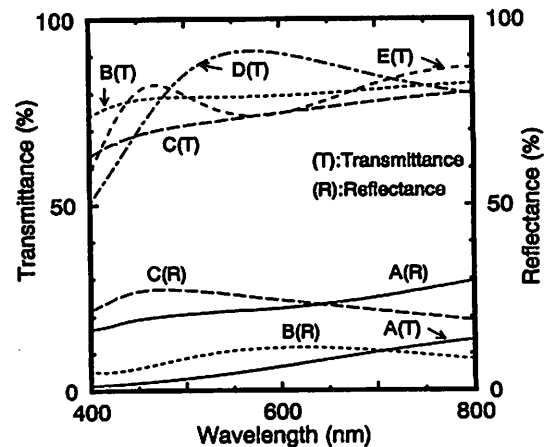


図12 ITO 薄膜の分光透過率及び反射率

A: 室温基板, アシスト無し, B: 基板加熱あり, アシスト無し, C: 室温基板, アシストあり(接地電位), D: 室温基板, アシストあり(浮遊電位), E: 室温基板, アシストあり(バイアス電圧+60V印加)

表2 AlN 薄膜の作製条件

スパッタイオン源		励起粒子ビーム源		基板	
Ar ガス圧	1.3×10^{-2} Pa	N ₂ ガス圧	3.3×10^{-2} Pa	バイアス電圧	-----
加速電圧	800V	Ar ガス圧	-----	電流	-----
ターゲット電流	22mA	RF 電力	200W	温度	室温

これらのことより、室温基板上へ良好な特性のITO薄膜を作製するためには、酸素励起ビームアシスト法が非常に効果的であることが分かった。

(3) 窒素ビーム照射によるAlN 薄膜作製^{1,2)}

(A) 目的及び成膜方法

窒素励起ビームの照射効果を確認するため、窒化物薄膜の室温成膜を試みた。窒化物薄膜としては、熱的・化学的に安定で半導体等のパッシベーション膜に用いられ、結晶性薄膜は表面弾性波素子等の圧電材料等に用いられ、することが知られているAlN薄膜に注目した。

成膜方法は、ターゲットに150mmφのAl金属ターゲット(99.999%)を用いたIBS法に、基板方向に照射するアシスト窒素励起ビームを組み合わせ、室温ガラス基板上でAlと窒素を反応させAlN薄膜を作製した。成膜時の基板温度はITO薄膜作製時と同様数十℃であった。表2に主な作製条件を示す。

(B) 成膜結果と検出

図13に作製したAlN薄膜についてのX線回折パターンを示す。2θ=22度付近のブロードなピークは基板からのものである。加速電圧800Vの場合で、窒素ガスを導入しない場合(図中記号N₂:---)と窒素ガスを導入して放電を起こさない場合(図中記号

RF:---)と窒素励起ビームとしてアシスト照射を行った場合(図中記号RF:200W)による違いを示している。

窒素ガスを導入せずに成膜した場合は金属光沢のAl薄膜が得られ、Al(111)面からの回折ラインのみがみられている。窒素ガスを 3.3×10^{-2} Pa導入した場合で、RF電力を投入しなければ非晶質のAl薄膜になり、さらにRF電力200Wで窒素励起粒子ビームを照射した場合にはAlN(002)面からの回折ラインのみが確認でき、AlN薄膜が作製できていることが分かる。

図14には分光透過率・反射率を示す。窒素ガスを導入しない場合(図中記号N₂:---)及び窒素ガスを導入するがRF放電を起こさない場合(図中記号RF:---)には、窒化反応が起こらず、透過光が認められない金属光沢のAl薄膜となっていることが分かる。また、200WのRF電力を投入して窒素励起ビームアシストを行って作製したAlN薄膜(図中記号RF:200W)は膜厚の効果による干渉を示す透過率の高いものが得られ、十分に窒化反応が進んでいると考えられる。エリプソメトリにより測定した屈折率はバルクAlNの物性値に近い2.11であった。

これらのことより、励起粒子ビームアシストを用いたIBS法により室温基板上に較的配向性の良いAlN薄膜が得られていることが分かり、窒素励起ビームの照射によりAlを十分に窒化できることが確認された。

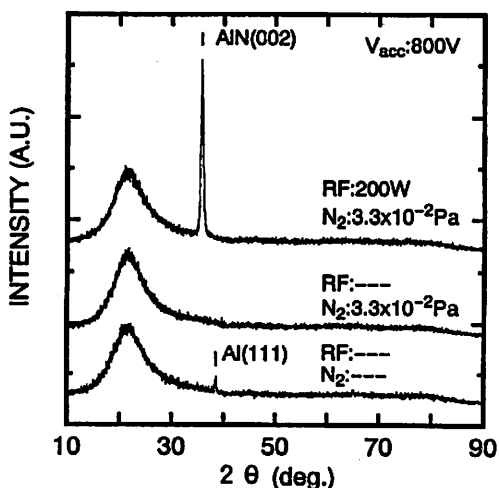


図13 スパッタ電圧800Vで作製したAlN薄膜のX線回折パターン

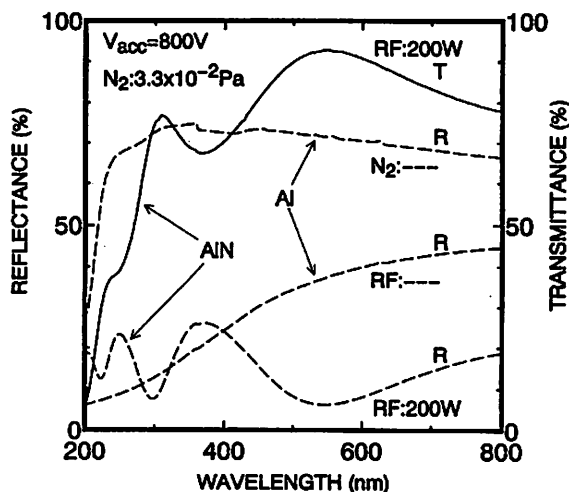


図14 AlN薄膜の分光透過率及び反射率

4. まとめ

PVDによる薄膜作製時のアシスト用として低エネルギー励起粒子ビーム源の開発を行った。酸素のような活性ガスでの安定動作を目指し、高周波放電を用いる方式のビーム源を開発した。そのビーム特性を調べた結果、イオンのみならず多くの励起粒子が含まれることが確認できた。特に、酸素励起ビームの照射特性を詳細に検討した結果、ガス導入系に用いているマルチキャピラリーの効果により、高いフラックス量を保ったまま、比較的長い距離の照射が実現できていることが分かった。

励起粒子ビーム源の照射効果を調べるために、励起粒子ビームアシストイオンビームスパッタ法により、基板加熱をしない室温ガラス基板上への化合物薄膜作製を試みた。

透明導電膜であるITO薄膜に関しては、In-Sn合金ターゲットをArイオンビームでスパッタし、基板へ酸素励起ビームを照射することにより室温成膜を行った。その結果、透過率が良好で、比抵抗 $7.0 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$ 程度のITO薄膜が室温基板上に比較的容易に得られることが分かった。さらに、ビーム中に含まれるイオンの衝撃を抑えるために、基板バイアス等の適切な条件を設定することによって、より良好な特性のITO薄膜を作製できる可能性を見いだした。

AlN薄膜に関しては、Al金属ターゲットをArイオンビームでスパッタし、基板へ酸素励起ビームを照射することにより、室温成膜を行った。その結果、透過率90%程度で屈折率2.11、AlN(002)面に優先配向したAlN薄膜が得られた。

これらのことにより、本励起粒子ビーム源の化合物薄膜形成への応用として、金属ターゲットを出発材料としたイオンビームスパッタ法と組み合わせることにより、良好な特性を持つ酸化物・窒化物薄膜を室温基板上に作製できることが分かり、作製する化合物薄

膜の特性を損なうことなく十分に反応に寄与する酸素励起ビーム、窒素励起ビームの照射効果が明らかになった。

本研究の基幹となる低エネルギー励起粒子ビーム源は(株)クライオバックとの共同開発によるものである。関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) T. Takagi, J. Vac. Sci. Technol., A2, 382 (1984)
- 2) T. Takagi; Thin Solid Films, 92, 1 (1982)
- 3) 石川順三; イオン源工学(アイオニクス株), 81 (1986)
- 4) C. B. Lucas, Vacuum, 23, 395 (1973)
- 5) 美馬宏司, 山内尚彦, 森脇聡博, 小川倉一; 真空 34, 899 (1991)
- 6) 小川倉一, 岡本昭夫, 福居滋夫, 上野 勉; 真空 33, 268 (1990)
- 7) 宇佐美興一, 鈴木利光, 松井誠一, 後藤俊成, 山中惣之助, 真空 29, 538 (1986)
- 8) 岡本昭夫, 小川倉一, 上野 勉, 福居滋夫; 真空 37, 348 (1994)
- 9) A. Okamoto, S. Ogawa, T. Ueno and S. Fukui, Thin Solid Films 281-283, 172 (1996)
- 10) V. Matijasevic, E. L. Garwin and R. H. Hammond, Rev. Sci. Instrum., 61, 1747 (1990)
- 11) A. Okamoto, M. Yoshitake, T. Nosaka and S. Ogawa; Proc. of the 3rd Symp. on Beam Engineering of Advanced Material Syntheses, pp. 35-38 (Tokyo, Japan, 1992)
- 12) A. Okamoto, M. Yoshitake, T. Nosaka, Y. Suzuki and S. Ogawa; Proc. of the 6th Symp. on Beam Engineering of Advanced Material Syntheses, pp. 91-94 (Tokyo, Japan, 1995)