

# イオンビームミリング, スパッタリングおよびドーピング装置と適用例

## Applications and Systems for Ion Beam Milling, Sputtering and Dopping

種々の材料に対する高精度の微細加工技術や、新しい成膜技術としてのイオンビーム装置が注目されている。金、白金、銅などの金属や磁性体、酸化物など特殊材の微細パターン加工装置として独自開発のイオン源を搭載したイオンビームミリング装置はすでに開発済みである。最近開発したロードロック付き枚葉式イオンビームミリング装置は、長時間安定なイオン源とクリーン搬送機構を持ち、今後いっそうの微細化が要求されるプロセス用として期待される。ほかに、超電導薄膜などに適合した多元同時イオンビームスパッタ装置、液晶プロセスでの大面積・高速イオンドーピング装置なども完成した。

橋本 勲\* *Isao Hashimoto*  
難波圭翹\* *Yoshitaka Nanba*  
大野康則\*\* *Yasunori Ôno*  
下條哲男\*\*\* *Tetsuo Gejô*

### 1 はじめに

大口径のイオンビームを用いたプロセス技術の適用分野としては、第一に高精度な微細加工があげられる。薄膜磁気ヘッドの各種パターン加工、化合物半導体などの金、銅、白金、の配線、さらには新しいデバイスでの各種材料に対するパターン加工などである。第二に高温超電導や磁性膜などの成膜がある。プラズマフリーで高精度な膜厚制御ができるイオンビームスパッタが注目され、各方面で研究が行われている。第三には、拡大基調にある液晶分野でのTFT(Thin-Film Transistor: 薄膜トランジスタ)形成のための非質量分離形のイオンドーピング装置による成膜技術がある。

本稿では、日立製作所が開発し、多くの特徴を持つイオン源とそれを搭載したイオンビームミリング装置、スパッタ装置、およびドーピング装置とその適用例について述べる。

### 2 微細プロセス用イオン源技術

イオンビームミリングによる微細加工、イオンビームスパッタによる機能性薄膜の成膜、イオンドーピングによる不純物注入などの応用には、均質な大電流の大面積イオンビームが必要であり、バケット形イオン源と閉磁路形のマイクロ波イオン源をそろえている。

#### 2.1 バケット形イオン源

微細プロセス用バケット形イオン源は、次の特徴を持っている。

- (1) 低エネルギーでも大電流のイオンビームを発生できる。
- (2) イオンビームの均一性が良い。
- (3) イオンビームの広がり(発散)が少ない。
- (4) 反応性の化合物ガスで動作できる。
- (5) イオンビームに含まれるイオンの種類が均一である。
- (6) 大面積化が容易である。

バケット形イオン源では、フィラメントで発生した熱電子は、多極磁界によって閉じ込められ、ガス原子・分子に衝突して、効率よく均一なプラズマを生成する。

シミュレーションによって得られた熱電子の軌跡を図1(a)に示す。同図(b)は、放電室に生成されたプラズマを撮影したものである<sup>1)</sup>。中央の明るい部分が高密度のプラズマであり、熱電子が閉じ込められている領域とほぼ一致している。内壁付近を除き、放電室内にほぼ均一なプラズマが生成されるため、発散の小さいイオンビームが得られる。

ミリングやドーピングでは、化合物ガスを使用するため、大面積イオンビーム中にさまざまなイオン種が混在することになる。微細プロセス用バケット形イオン源に、CHF<sub>3</sub>ガス導

\* 日立製作所 国分工場 \*\* 日立製作所 日立研究所 \*\*\* 日立製作所 産業機器事業部 工学博士

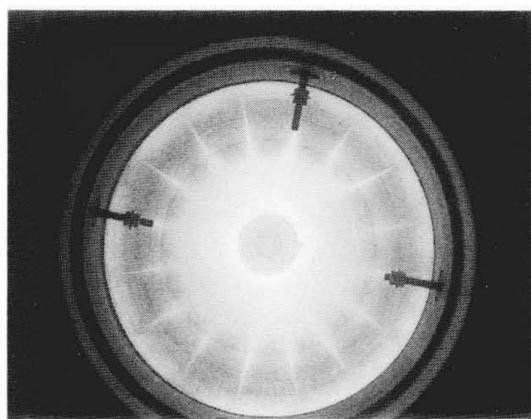
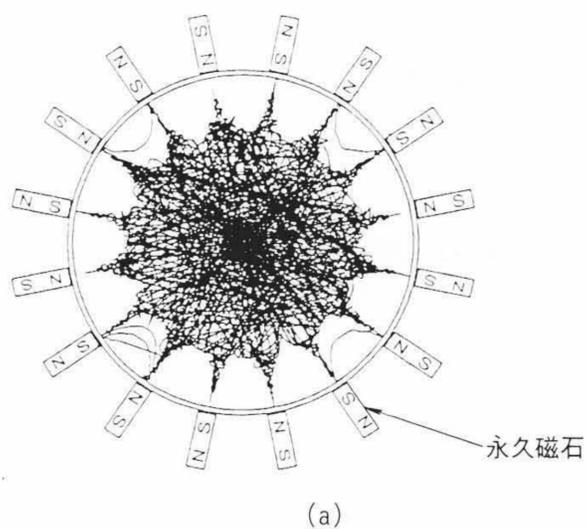
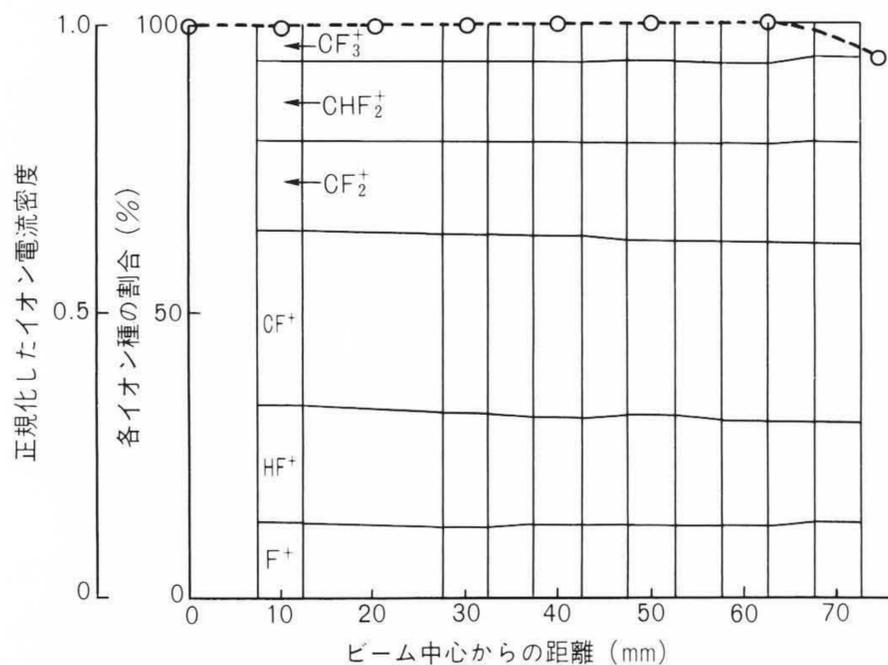


図1 バケツ形イオン源で形成されるプラズマ (a)はシミュレーションによる電子の軌跡を、(b)はアルゴンのプラズマ(明るい部分)を示す。



注：各イオン種の割合を実線で、正規化したイオン電流密度を点線で示す。

図2 バケツ形イオン源でのイオンビームの均一性 イオンビーム強度およびイオン種の分布も均一である。

入時の、ビームに含まれるイオン種の場所による違いを図2に示す<sup>2)</sup>。イオンビーム引出し径110 mmに対し、イオンビーム中心から70 mmの間では、各イオン種の割合はほとんど一定である。この結果は、同一イオン源で、均一なミリングや

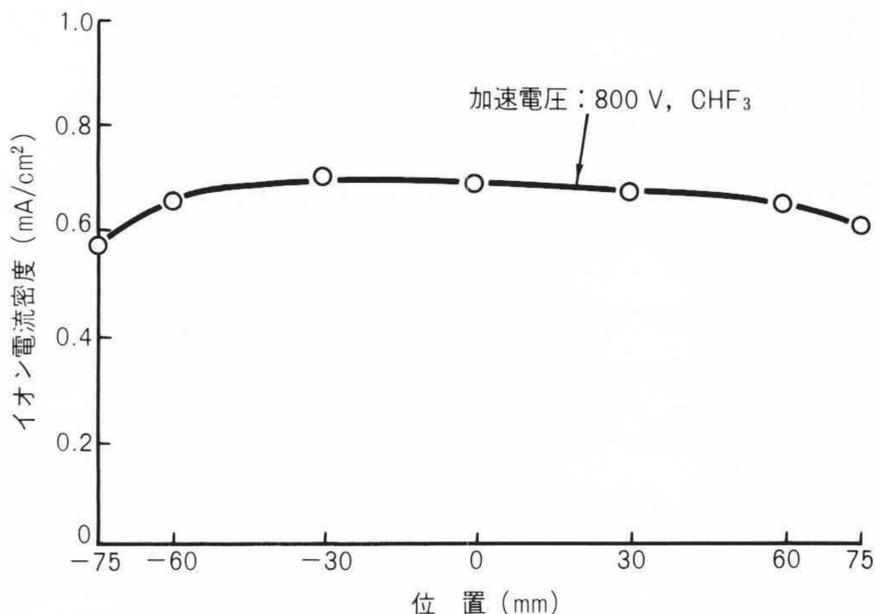


図3 閉磁束形マイクロ波イオン源でのイオンビーム強度分布 動作ガス圧 $2.6 \times 10^{-2}$  Paで、ファラデーカップを用いて測定した。

ドーピングができることを示している。

## 2.2 閉磁束形マイクロ波イオン源

反応性の強いイオンビームを使用したり、あるいは長時間連続的に動作するイオンビーム装置では、フィラメントの消耗が問題となる。フィラメントを持たないイオン源としては、電子サイクロトロン共鳴(Electron Cyclotron Resonance)を利用し、低ガス圧力下でも安定に動作できる有磁場マイクロ波イオン源があり、半導体用のイオン打込み装置などに応用されている<sup>3)</sup>。

ミリングでは、低エネルギー、大面積のイオンビームが必要とされる。電子サイクロトロン共鳴を利用してこれを得る場合、イオン引出し電極にかかる磁場によって、生成されるイオンビームが不均一になったり、発散が大きくなることがある。今回開発した大面積マイクロ波イオン源では、マイクロ波放電に使用した磁束の大半を、イオン引出し電極に到達する手前で戻し、磁束が閉じるようにしている。この閉磁束形マイクロ波イオン源の採用により、イオン引出し電極にかかる磁場を低く抑えられるため、均一で、発散の小さい大面積イオンビームが得られる<sup>4)~6)</sup>。

大面積マイクロ波イオン源から引き出したイオンビーム分布の例を図3に示す。イオンビームのばらつきは、5インチ基板上で $\pm 5\%$ 以下であり、良好な均一性を示している。

## 3 イオンビームミリング装置とその適用例

### 3.1 適用分野と装置構成

イオンビームミリングは広範囲の材料の加工が可能という特徴があり、特に従来のプラズマエッチングなどで加工が困難な白金や金あるいは銅のエッチング、さらには半導体以外の新しいデバイス材料などのエッチング法として下記の分野に採用されている。

表1 装置構成と適用分野(加工材料) 適用分野によって最適装置構成を選択する。

No.	システム	イオン源の形式	使用ガス	加工材料
1	バッチ式 適用プロセス ●長時間の量 産プロセス ●パターン幅 の広いもの	フィラメント方式 (バケツ形)	Ar	Pt Au Cuほかメタル 各種磁性膜 各種セラミック
			Cl <sub>2</sub>	GaAs InP
2			CF <sub>4</sub> ほか	LiNbO <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
3	枚葉式 適用プロセス ●短時間の量 産プロセス	フィラメント方式 (バケツ形)	Ar	Pt Au Cu
4	●高微細加工 ●活性ガスに よる高精度 加工	フィラメントレス 方式(μ波)	CF <sub>4</sub> ほか	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
			Cl <sub>2</sub>	GaAs InP

- (1) 薄膜磁気ヘッドのコイル, 磁性体保護膜のパターン加工
- (2) 化合物半導体や高速デバイスの金, 白金, 銅などの導体の加工
- (3) 新材料(例えばLiNbO<sub>3</sub>など)のパターン加工やグレーティング加工
- (4) 各種センサ(加速度, 圧力ほか)のパターン加工

上記のプロセスはパターン幅がサブミクロンから数百ミクロンまであり, 加工時間も数分前後のものから数時間に及ぶものがある。さらに選択比やエッチング速度を取るため, 活性ガスを用いるリアクティブイオンビームミリングと要求内容も数多くあるが, プロセス要求に合致した各種システムを用意している。適用分野(加工材料)と主な装置構成の関係を表1に示す。

### 3.2 バッチ式装置

バッチ式イオンビームミリング装置は2章で述べたイオン源を搭載し, 小形の研究開発機から大形の量産機<sup>7)</sup>までのシリーズを完成し, 各種の要望にこたえることができる。それら標準機種を表2に示す。

バッチ式イオンビームミリング装置を図4に示す。主な特徴は次のとおりである。

- (1) 研究機から量産機までビームの質を合わせているため, 研究プロセスの結果を即量産プロセスへ適用できる。
- (2) 大口徑で低発散, 均一ビームのイオン源によって高精度加工が可能である。バッチ間のミリング分布例を表3に示す。
- (3) イオン源の引出し電極穴徑の経年変化がきわめて少ない。そのため, 電極寿命が長くランニングコストが安くなり, 電

表2 バッチ式イオンビームエッチング装置の標準形式 研究開発機から量産機までシリーズ化している。

項目	仕様				
	形式	IML-120	IML-250	IML-350	IML-580
イオン源	電圧 (V)	~1,000			
	電流密度 ( $\frac{mA}{cm^2}$ )	~1.0			
	口径 (mm)	φ120	φ250	φ350	φ580
基板ホルダ	同時処理枚数	φ3インチ, 1枚	φ3インチ, 4枚	φ3インチ, 9枚	φ3インチ, 24枚
	動作	自転, 傾斜, 自転, 公転, 傾斜			
	冷却	水冷			



図4 イオンビームミリング装置(形式IML-350) 均一, 低発散ビームでワンタッチ開放のバケツ形イオン源を使用し, 加工性, 保守性の良い装置となっている。

極の穴徑変化によるプロセス変動, および電極からの異物の発生も防ぐことができる。

- (4) アルゴンビームはもとより活性ガスでも安定したビームが引き出せる(ビーム電流の安定性の例: 5時間で±1.5%以下)。そのため, 加工膜厚が一定であれば終点検知をしなくてもプロセスが時間で管理できる。
- (5) 基板ホルダは公転, 自・公転および静止まで対応可能である。また, 基板の取り付けは真空チャック方式などをはじめとした種々の方式を準備しており, 基板の各種特性に応じた生産プロセスに対応できるようになっている。
- (6) 運転は全自動となっており, 決められたプロセスを選択すればスタートボタンを押すだけで全自動処理が可能である。
- (7) 保守点検が行いやすく, 短時間で対応できるよう主要部分(イオン源, 基板ホルダ)は構造の単純化を図っており, 特

表3 エッチング分布とバッチ間のばらつき IML-580による測定結果を示す。加工物Cu, エッチング分布, バッチ間の分布も均一なことがわかる。

		測 定 結 果										再 現 性 (%)				
バッチ	基板	測 定 値 (nm/min)										レ ー ト (nm/min)	均一性 (%)	(b) Max.—(a)	(b) Min.—(a)	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			(a)	(a)	
No.1	A	44.25	44.5	44.75	44.75	44.25	44.5	44.75	44.25	44.75	44.5	(b)	446.5	1.4	0.56	-0.34
	B	44.75	45.0	44.75	45.0	44.25	44.5	44.5	44.5	44.75	44.0	445.5		2.0		
No.2	A	45.0	44.25	44.0	44.2	44.25	44.75	44.25	44.5	44.5	44.75	(b)		2.0		
	B	44.25	44.75	44.25	44.25	44.75	44.75	44.5	44.75	44.5	44.5	445.0		1.4		
No.3	A	45.0	44.75	44.75	44.75	44.75	44.5	45.0	44.75	44.5	44.75	(b)		1.1		
	B	44.75	45.0	45.25	44.75	45.0	45.0	45.0	45.0	44.75	45.0	449.0		1.0		

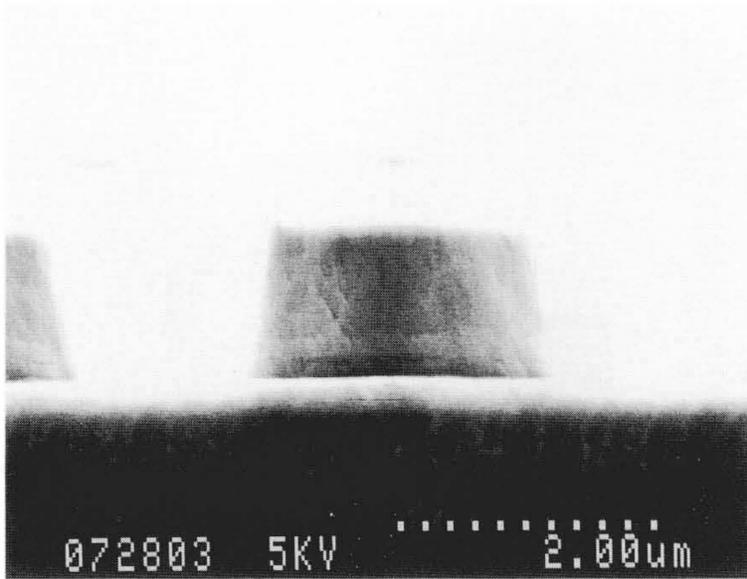


図5 金配線断面(600 V, 0.78 mA/cm<sup>2</sup> ビーム入射角15°) 加工面の傾斜角が急峻(しゅん)なのがわかる。



図6 枚葉式イオンビームミリング装置 ロードロック付きのカセット ツー カセット方式のシステムとなっている。

にイオン源はカバーをワンタッチで開放することによってフィラメント交換が1分以内で可能としている。本装置を用いた加工例として金の加工断面を図5に示す。

### 3.3 枚葉式ミリング装置とその適用例

パターンの微細化に伴う異物付着低減と活性ガスによるプロセスのより安定化を目標に、ロードロック付き枚葉式ミリング装置(カセット ツー カセット方式)を開発した。その装置を図6に示す。特徴は以下のとおりである。

- (1) プロセスの安定と異物の発生を防ぐため、基板交換時であっても、処理室および基板ホルダが大気に触れない構造とした。
- (2) カセットと基板ホルダの間の基板搬送はクリーンロボットによって行い、異物発生の低減と簡素化による信頼性の向上を図った。
- (3) アルゴンイオンビームではバケット形イオン源を搭載、活性ガスを用いる場合は前述のフィラメントレスイオン源を用い、長時間(120時間程度)連続使用可能とした。CF<sub>4</sub>ガスを使用してLiNbO<sub>3</sub>のグレーチング加工を行った例を図7に示す(基板ホルダ回転停止して加工)。

- (4) ホルダは実績のあるバッチ式をベースに、自動搬送システムに最適で冷却効果の優れた方式を開発した(試験例: 600 V, 0.78 mA/cm<sup>2</sup>のビーム照射で4 mm厚さのガラス基板表面温度が60 °C)。
- (5) 制御はパーソナルコンピュータを用いた全自動操作であり、必要なデータはフロッピーディスクに記録される。
- (6) オプションとして、分光による終点検知装置の取り付けが可能となっている。

## 4 イオンビームスパッタ装置とその適用例

### 4.1 特徴と適用分野

イオンビームスパッタはイオン源からビームを引き出し、ターゲットに衝突させ、ターゲット材をスパッタさせて、こ

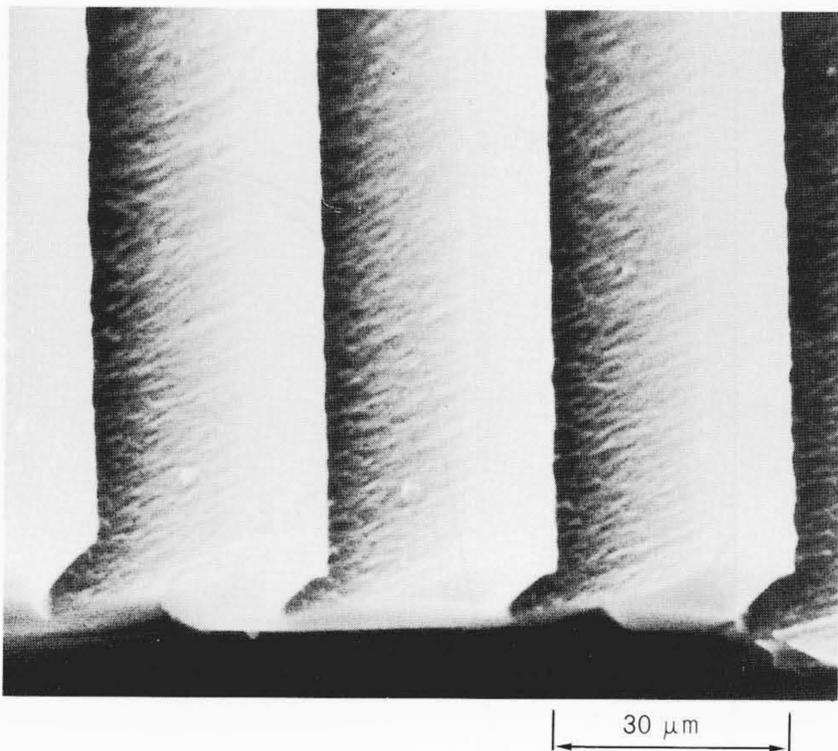


図7 グレーチング加工例(材料 $\text{LiNbO}_3$ , 使用ガス $\text{CF}_4$ ) 試料を回転させず、傾斜させての加工例で、断面がのこぎり形に切れており、ビームの直進性、均一性に優れているのがわかる。

の粒子を基板に堆(たい)積させる方式である。特徴は次のとおりである。

- (1) 高真空中( $10^{-3} \sim 10^{-2}$  Pa)でのスパッタ成膜が可能である。
- (2) 高エネルギー(約10 eV)のスパッタ粒子の堆積が可能であり、密着性が高い。
- (3) 成長膜がプラズマにさらされないため、イオンなどによる損傷がない。また、成膜表面が滑らかである。
- (4) スパッタレートがイオンビーム電流に比例するため、きわめて制御性が良い。
- (5) 薄膜の成長が低温でできる。
- (6) 成膜前の基板または成膜時に、アシスト用のイオン照射やレーザー照射が可能である。

これらの特徴を生かし、高機能磁性膜、高温超電導膜などのほかに低温成膜と密着性を生かして高分子材やセラミック材への適用が始まっている。また、平滑や密着性の面から各種金型分野への適用を図る研究も行われている。

#### 4.2 装置構成と仕様

装置は上記の特徴を生かせる構成となっており、1元のターゲットから4元のターゲットを持つ装置まで製品化されている。いずれも応力、結晶制御などに用いるアシストイオン源が付けられる構成となっている。4元同時イオンビームスパッタ装置を図8に示す<sup>8)</sup>。

#### 4.3 装置の特徴と適用例

- (1) イオン源は前述のバケツ形を用いているため、大容量化が可能である<sup>9)</sup>。
- (2) バケツ形イオン源の低発散ビームとビーム収束技術により、ターゲット以外へビーム照射することがなく、高純度

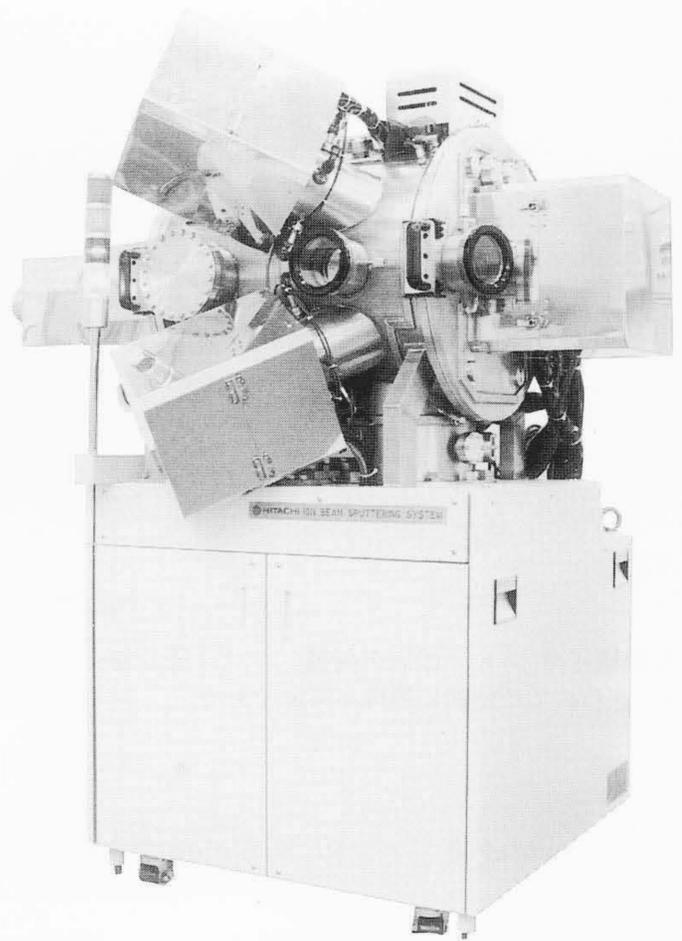


図8 4元同時イオンビームスパッタ装置 高電流密度、低発散ビームのバケツ形イオン源を使用しているため、装置は非常にコンパクトな構成となっている。

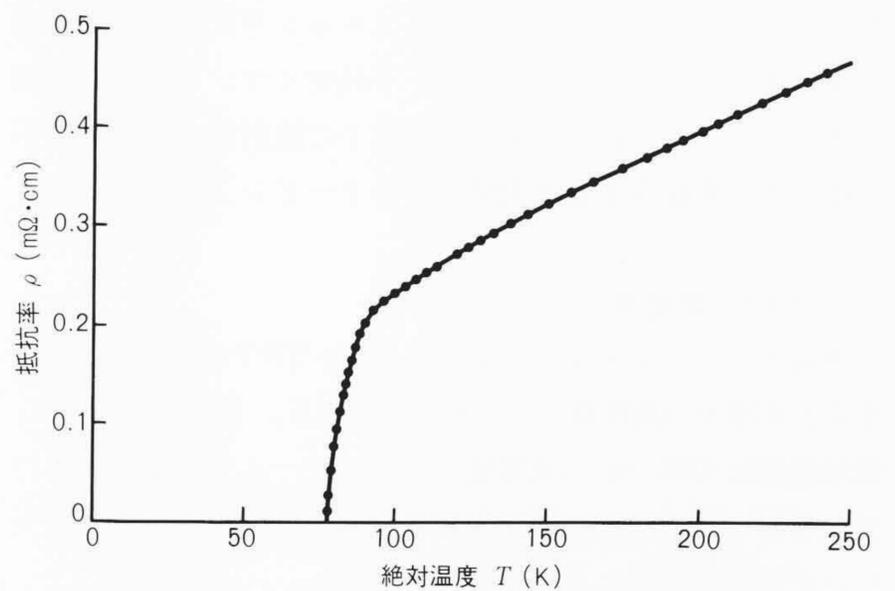


図9 高温超電導膜の温度-抵抗特性 成膜後、1気圧酸素中でアニールすることによって、臨界温度74 Kの高温超電導薄膜が得られた。

な成膜が可能となる。

- (3) イオン源からの漏れ磁場が少ないため、磁性膜などの成膜に有利である。
- (4) 4元素は独立制御が可能であり、高精度な組成比で成膜が可能で、しかも時間によって組成変化を連続的に変えることもできる。
- (5) 構造は保守性を考え前後面を全面扉とし、複数のターゲットは基板を回転させなくても膜厚分布が均一になるような配置を採用している。

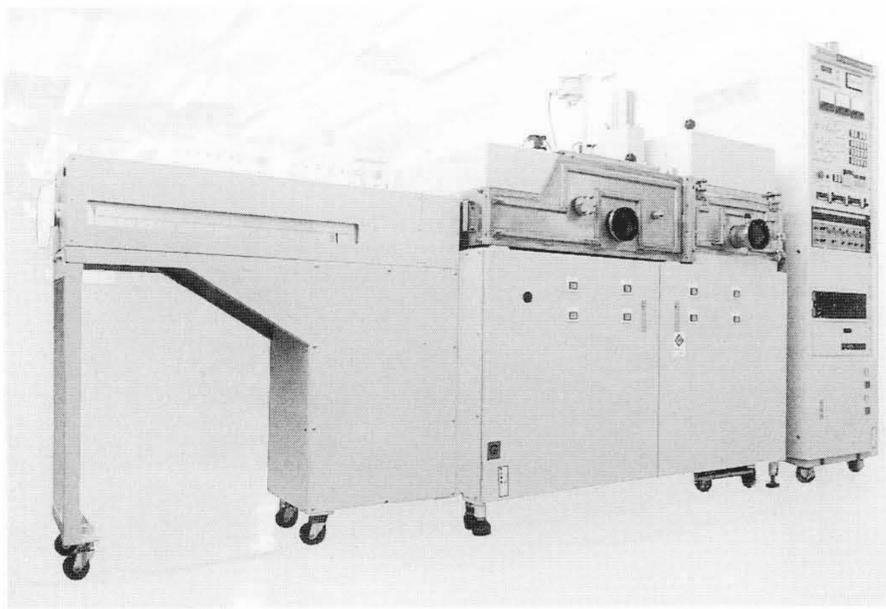


図10 大面積イオンドーピング装置 大口径、均一ビームのイオン源を持ち、きわめて短時間に処理が可能である。

本装置を用いて成膜したYBC系高温超電導膜の特性例を図9に示す<sup>8)</sup>。

### 5 イオンドーピング技術とその適用例

高集積回路などの半導体素子の形成には、質量分離した高純度の不純物イオンを加速して、素子に注入するイオン打込み技術が用いられる。従来のイオン注入装置で大面積TFTを形成するには、小径ビームによるスキャン方式のため、処理に長時間を必要とする。そこで、不純物イオンを含む大面積イオンビームを、質量分離せずに素子に照射し、短時間で不純物イオンを注入する大面積イオンドーピング技術が注目されるようになった。

#### 5.1 TFTへの応用

液晶ディスプレイ用の多結晶シリコンTFTでは、今後ますます大面積かつ高性能のものが要求される。日立製作所では、低加速電圧で均一かつ大電流のイオンビームを発生できるバケット形イオン源を用いた非質量分離形の大面積イオンドーピング技術を開発した<sup>2), 10)</sup>。

大面積イオンドーピング装置を図10に示す。

この大面積イオンドーピングを用いて形成したTFTでの、ゲート電圧とドレーン電流の関係を図11に示す。破線は、従来のイオン打込み装置によってビームをスキャンして形成したTFTの特性を示す。大面積イオンドーピングで形成したTFTでは、従来法によるものとはほぼ同程度の特性が得られている。

### 6 おわりに

以上、薄膜デバイスの製造プロセスに適したイオン源とこれを搭載した各種イオンビーム装置の特徴、およびその適用例について述べた。

イオンビームミリング装置は現在量産に用いられており、今回開発した枚葉式装置がいつもの微細化プロセスと安定

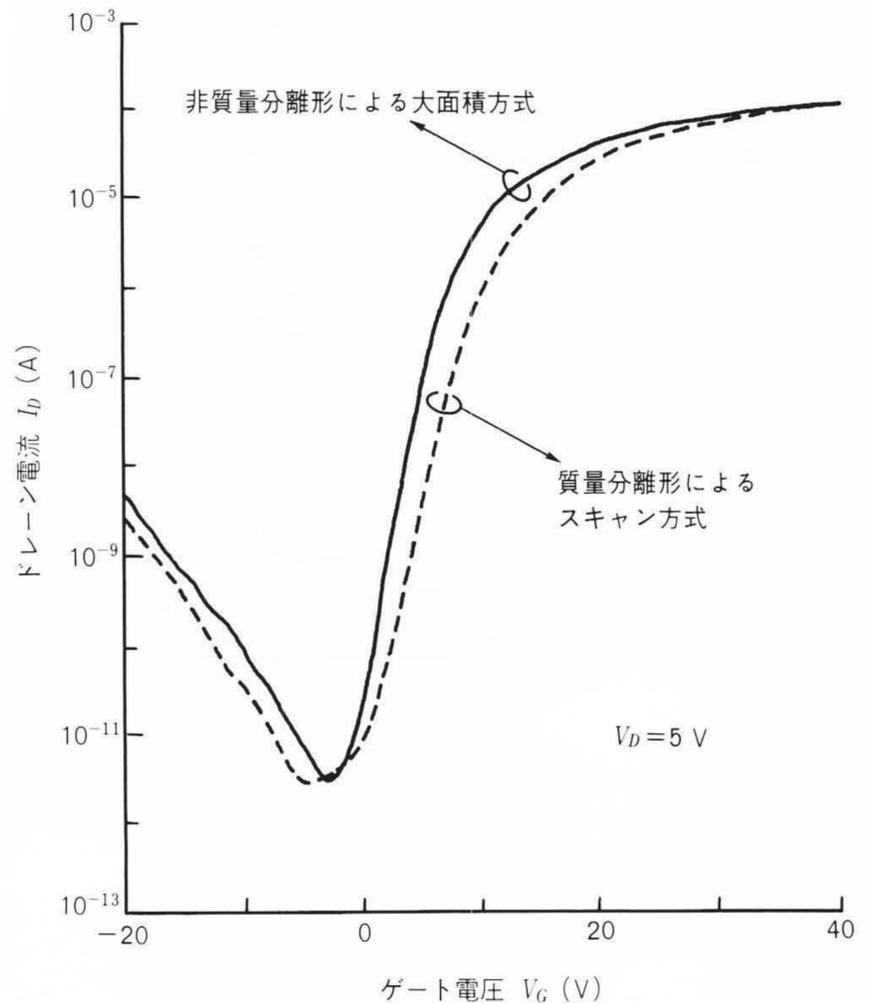


図11 大面積イオンドーピングを用いた薄膜トランジスタの形成 薄膜トランジスタの特性を示す。

した量産に対応していくものと思われる。また、イオンビームスパッタやイオンビームドーピング装置は、各種の新デバイス製造プロセスの研究、開発に新しい領域を開くものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) Y. Oono, et al. : J. Vac. Sci. Technol., A7, 2784(1989)
- 2) Y. Oono, et al. : Proc. Spec. Seminar. on ISIAT '90, Tokyo, p.179(1990)
- 3) N. Sakudo, et al. : Rev. Sci. Inst., 48, 762(1977)
- 4) Y. Hakamata, et al. : J. Vac. Sci. Technol., A8, 1831(1990)
- 5) Y. Oono, et al. : US Patent, No.4, 713, 585(1987)
- 6) H. Nihei, et al. : Jpn. J. Appl. Phys. Lett., 25, L822(1990)
- 7) 有松, 外 : 大口径イオンビームミリング装置の開発, 日立評論, 68, 6, 485~488(昭61-6)
- 8) 石川, 外 : 多元同時イオンビームスパッタ装置の開発一次世代の成膜装置一, 日立評論, 72, 7, 667~672(平1-7)
- 9) I. Hashimoto, et al. : Ion Implantation Technology, June, p.7~10(1988)
- 10) G. Kawachi, et al. : J. Electrochem. Soc., 137, 3522(1990)