

# 一般論文

## Sub-keV級低エネルギーイオン源の開発

Development of the Ion Source for Low Energy Ion Beam under 1 keV

稲実 宏\* 大丸 智 弘\*  
H. Inami T. Daimaru  
長町 学\* 三上 隆 司\*  
S. Nagamachi T. Mikami

### 概要

イオン源技術応用として、イオンミリング装置を開発中である。本稿では、面ビームイオン源開発の経緯、開発中であるSub-keVイオン源のイオンビーム特性、そのイオンビームを用いた加工特性について報告する。

### Synopsis

We have developed the ion milling equipment applying an area beam ion source. In this paper we report the ion beam characteristics of the developed ion source for low energy ion beam and the milling characteristics.

### 1. まえがき

当社では1980年代初期の、原子力研究所核融合プロジェクト (JT60) 向けイオン源<sup>①</sup>をはじめとして、多くの応用装置向けに面ビームイオン源の開発を行ってきた。主なものはIVD (Ion Vapor Deposition) 成膜装置<sup>②</sup>、IBS (Ion Beam Sputter) 成膜装置<sup>③</sup>、Ion Doping装置<sup>④</sup>に用いたイオン源である。これらのイオン源開発により面ビームイオン源技術の蓄積が進んだ。この面ビームイオン源は多孔電極からイオンビームを引出すタイプのイオン源で、イオンエネルギーは0.5keV~100keV、サイズ500mmφ程度まで対応できる。イオンミリング装置向けイオン源の検討も行われたが、当時は半導体用微細加工装置としては反応性イオンエッチング(RIE:Reactive Ion Etching) が主流となり継続的开发にはならなかった。

近年は、磁気ヘッド、HDDメディア、ナノインプリント用モールド、MEMS、スピントロニクス関連などSi半導体以外の分野でも微細加工が必要とされ、イオンミリングは複数ある加工方法の一つとして実用化されている。イオンミリングの特徴は、希ガスイオン (例: Ar<sup>+</sup>) による加工で化学反応性を伴わないためRIEでは加工の困難な材料も加工対象と出来ることである。一方、これらの微細加工プロセスへのイオンミリングの適用にはイ

オンダメージを小さくし、加工均一性を改善する視点から次の様な課題がある。

- ・イオンエネルギー：500eV以下
- ・ビーム発散角：1度程度
- ・均一性：±5%以下

これらの課題解決を目標に、面ビームイオン源およびミリング試験装置の開発を行った。以下では開発したSub-keV級イオン源のビーム特性と磁性材料を対象とした場合の加工特性について報告する。

### 2. Sub-keVイオン源のイオンビーム特性

開発したイオンミリング試験装置の模式図を図1に示す。

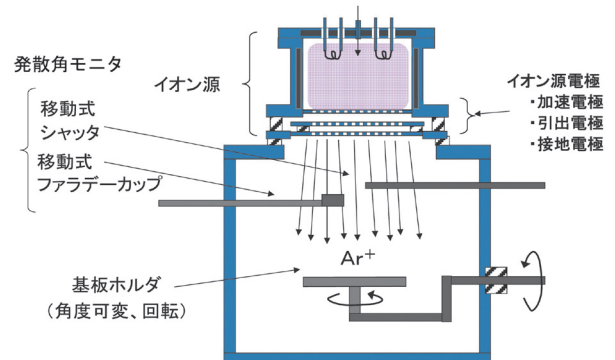


図1 イオンミリング試験装置模式図

\* 研究開発本部

イオン源はアーク放電方式の多極磁場型イオン源<sup>5)</sup>であり均一性の良いプラズマの生成に適している。ビームの引出電極は加速電極、引出電極と接地電極の構成として低発散角ビームの引出を可能としている。このイオン源と基板ホルダの間に移動式のビームシャッタとファラデーカップから成る発散角モニタを搭載した。

### 2.1 イオンビーム引出特性

イオン源の引出特性の例を図2に示す。ビーム条件は、

- ・イオンエネルギー：260eV
- ・加速電流：55mA,110mA,220mA
- ・電極多孔部径：150mmφ

である。各加速電流に対して引出電圧の調整により引出電流は最小になる。これは引出電圧の変化によってビームの発散角が変化してビームの一部が引出電極に入射するためであり、引出電流の最小値付近でビームの発散も最小になると考えられる。加速電圧が異なる場合は引出電流が最小となる引出電圧は異なるが、引出電圧の変化によって引出電流が変化する傾向は同じである。

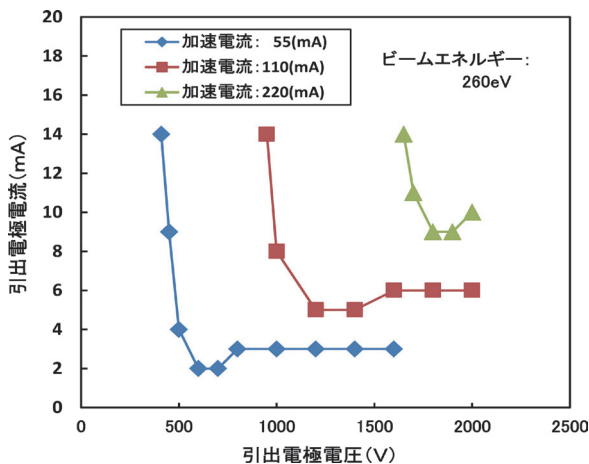


図2 引出電極電流と引出電極電圧の関係

### 2.2 ビーム発散角

ビーム発散角の測定は、スリットを設けたビームシャッタとスリット通過後のビーム分布を測定する可動ファラデーカップにより行う。ビームシャッタは電極から150mm下流に取り付けている。ビーム条件は、

- ・イオンエネルギー：160eV,260eV,360eV,460eV
- ・加速電流：30mA,60mA,100mA

とした。引出電圧は引出電流が最小になる電圧に設定した。測定時の処理室ガス圧力は $2 \times 10^{-2}$ Paである。ビーム中心部（加速電極多孔部150mmφの中心）のビーム発散角と加速電圧の関係を図3に示す。ここでビーム発散角は分布が最大の1/eとなる角度とする。

イオンエネルギー360eVと460eVでは発散角は1度から1.2度の範囲にあるが、イオンエネルギー260eVでは1.5度から2.3度に、更にイオンエネルギー160eVでは2.5

度から4.9度の範囲に増加している。イオンエネルギー160eVでは加速電流が大きいほど発散角は大きい。イオンエネルギーと加速電流に対するビーム発散角増加の原因は引出電極部と引出後の空間電荷による発散の2種類が考えられる。ここで加速電流100mAの場合にシャッタスリット部で電流密度は $0.4\text{mA}/\text{cm}^2$ であった。

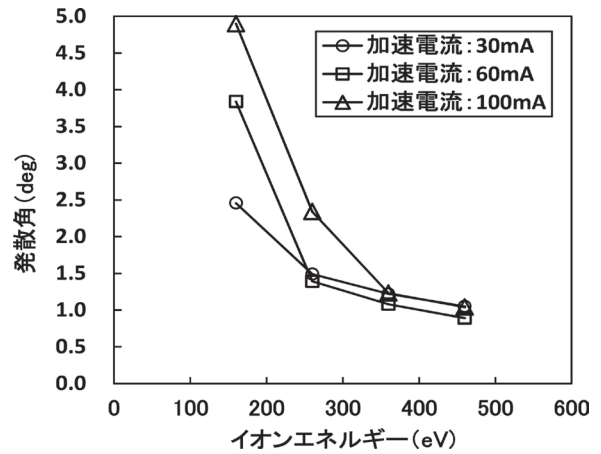


図3 ビーム発散角（中心）の比較

### 2.3 ミリングレート分布

#### 2.3.1 ビーム電流とミリングレート分布の関係

Co膜（基板Siウェーハ）に対するビーム電流とミリングレート分布の関係をイオンエネルギー260eV、加速電流56mA、108mAと220mAについて調べた（図4a）。イオンビームの発散コントロールは引出電圧の調整により行っている。基板はイオン源接地電極から350mmの距離にある基板ホルダに取り付けて基板回転を行っている。図4aの各加速電流に対してφ90mm範囲のミリングレートの均一性は±5%以下であり、中心のミリングレートはほぼ加速電流に比例して増加している（図4b）。このように加速電流が増加するとミリングレートは直線的に増加し制御性は高い。

#### 2.3.2 イオンエネルギーとミリングレート分布の関係

Co膜（基板Siウェーハ）に対するイオンエネルギー

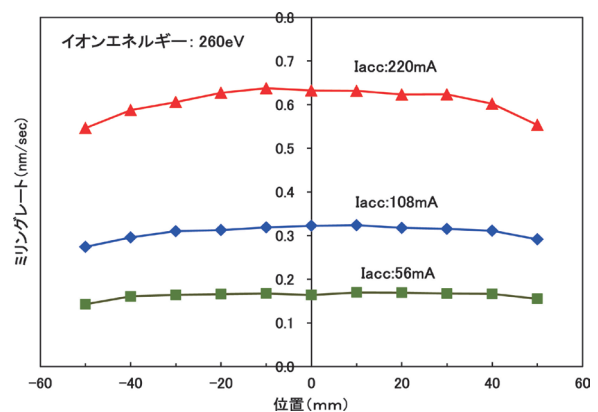


図4a 加速電流に対するミリングレート分布の比較

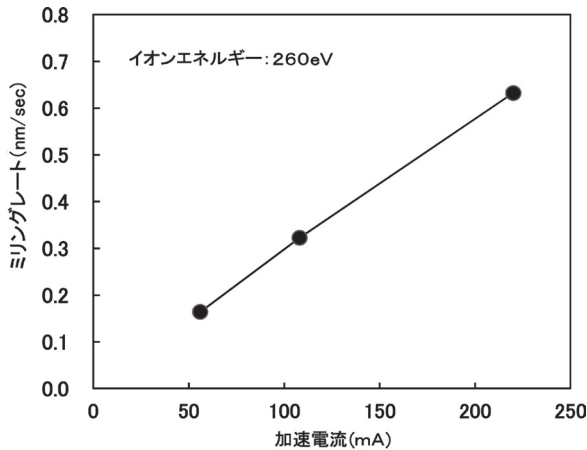


図 4 b ミリングレートと加速電流の関係

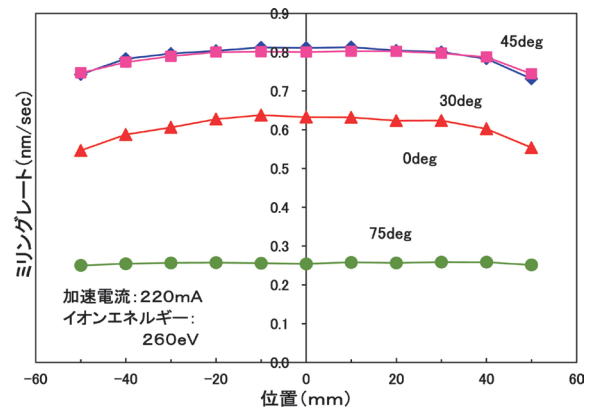


図 6 a 入射角度に対するミリングレート分布の比較

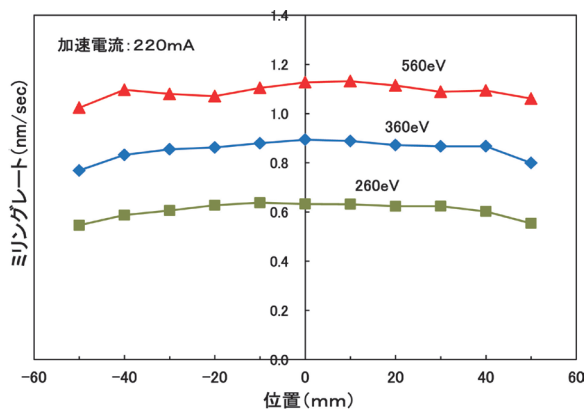


図 5 イオンエネルギーに対するミリングレート分布の比較

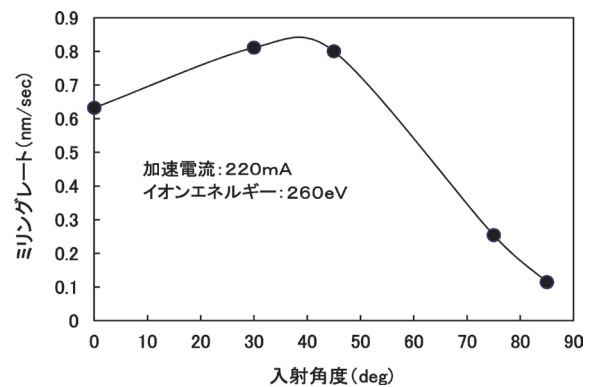


図 6 b イオンビーム入射角度とミリングレートの関係

とミリングレート分布の関係を加速電流220mA、イオンエネルギー260eV、360eVと560eVについて調べた(図5)。図5の各イオンエネルギーに対してφ90mm範囲のミリングレートの均一性は±5%以内であり、イオンエネルギー560eVでは中心部のミリングレートは1.1nm/secが得られている。

### 2.3.3 基板傾斜角とミリングレート分布の関係

開発したミリング試験装置はイオンビームに対する基板の角度を可変とする構造としており、基板傾斜角を0度(基板面がビームに直角の場合)、30度、45度と75度と変えてCo膜のミリングレート分布を調べた(図6)。

ビーム条件は加速電流220mA、イオンエネルギー260eVである。基板傾斜角30度と45度ではミリングレートが0度の場合の1.3倍に増加するとともに均一性が向上している。一方、基板傾斜角75度ではミリングレートは1/2以下に低下しているが均一性は±2%と向上している。

## 3. イオンビームを用いた加工特性

微細加工用のサンプルには100nmライン&スペースレジストパターンを表面に形成したCo膜(厚さ100nm)/石英(1.1mm)のサンプルを使用した。レジストは

電子ビーム用のレジストZEP520A(日本ゼオン(株)製)である。レジストライン高さは約200nmである。

### 3.1 ミリング加工形状と基板傾斜角の関係

イオンビームをレジストパターンサンプルに照射するとイオンビームによりスパッタされたCoの一部はレジスト壁の側面に付着する。イオンビームのサンプル面に対する入射角度を変えるとレジスト壁側面に対するビーム入射角が変化し、付着Coの低減に有効となる可能性が考えられる。このため基板傾斜角0度、15度と30度の3通りに対するミリング加工形状を調べた。サンプルは基板ホルダ中心から30mmの位置にレジストラインが回転方向を向く様に取付け、基板回転を行う。イオンビーム条件は、発散角が1度程度となる次の条件とした。

(ミリング加工条件)

- ・イオンエネルギー: 460eV
- ・加速電流: 60mA (0.34mA/cm<sup>2</sup>)
- ・処理時間: 180sec
- ・基板回転: 12rpm
- ・基板傾斜角: 0度, 15度, 30度

一例として基板傾斜角30度に対してミリング加工したサンプルの断面TEM観察結果例を図7に示す。

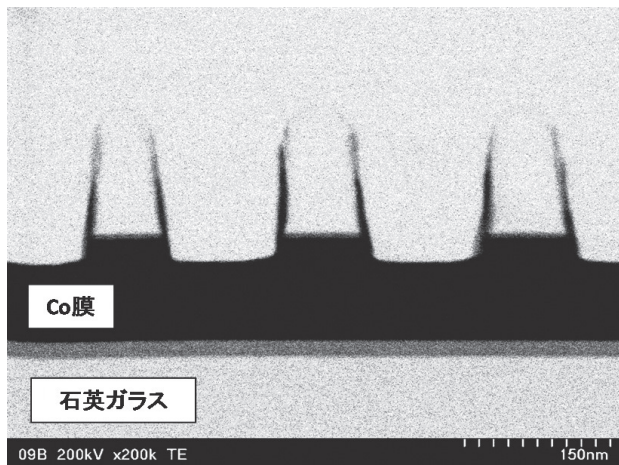


図7 ミリング形状のTEM像 (基板傾斜角度30度)

Co膜に出来た溝の深さ、レジストライン側面付着Co膜厚とCo膜溝側面テーパ角が確認でき、基板傾斜角が0度、15度、30度と増加するに伴ってCo膜のミリング深さは小さくなり、レジスト壁の側面付着Co膜厚も小さくなる傾向にある。

基板傾斜角に対するミリング形状TEM写真からこれらの値を数値化した結果を図8に示す。図8のように基板傾斜角が15度と30度に対してテーパ角はほぼ90度となり飽和していることが分かる。ミリング深さも基板傾斜角の増加に伴い飽和する傾向にあり近似曲線は45度程度で30nmとなって飽和する。

一方、側面付着厚さは近似曲線によれば基板傾斜角43度程度で0になる。ミリング深さが飽和する傾向はレジストライン壁によりイオンビームが遮られるためと考えられる。

#### 4. むすび

微細加工向けに開発したSub-keV級エネルギーイオン源はこの分野で新たに要求される基本性能の一部を満たすことが確認出来た。さらに100nmライン&スペースレ

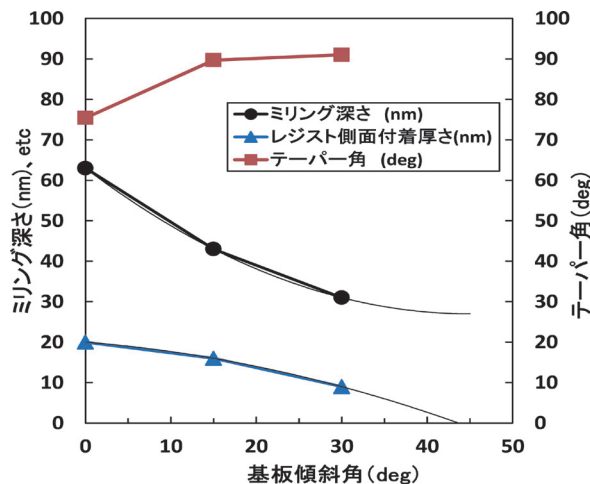


図8 基板傾斜角とミリング形状の関係

(注) レジストパターン:100nmライン&スペース、レジスト高さ:150~200nm

ジストパターンサンプルのミリング加工からミリング形状に基板傾斜の影響の大きいことが確認出来た。今後も必要とされる性能の実現を図り、量産用イオンミリング装置の検討を進める。

本開発を行うに当たってご協力頂いた日新イオン機器(株)の関係者各位に感謝します。

#### 参考文献

- (1) 松田慎三郎 他:「日本原子力研究所納NBI用イオン源の開発」日新電機技報 Vol.27, No.4 (1982) p.51
- (2) 酒井茂樹 他:「IVD法による結晶配向の制御について」:日新電機技報 Vol.33, No.2 (1988) p.12
- (3) 野川修一 他:「IBS法による光磁気薄膜」日新電機技報 Vol.33, No.2 (1988) p.23
- (4) 立道潤一 他:「イオンドーピング装置」日新電機技報 Vol.39, No.3 (1994) p.52
- (5) 石川順三:イオン源工学(アイオニクス社,1986)

#### 執筆者紹介



稲実 宏 Hiroshi Inami  
研究開発本部  
ビーム・プラズマ技術開発研究所  
システム開発グループ 主任



大丸 智弘 Tomohiro Daimaru  
研究開発本部  
ビーム・プラズマ技術開発研究所  
システム開発グループ



長町 学 Satoru Nagamachi  
研究開発本部  
ビーム・プラズマ技術開発研究所  
システム開発グループ



三上 隆司 Takashi Mikami  
研究開発本部  
ビーム・プラズマ技術開発研究所 主幹  
兼 システム開発グループ長