

# ナノレベルの「見る」、「削る」、「付ける」技術で最先端半導体デバイス製造に貢献する

—イオンビームによるフォトマスク欠陥修正技術—

八坂 行人  
Yasaka Anto

荒巻 文朗  
Aramaki Fumio

小堺 智一  
Kozakai Tomokazu

松田 修  
Matsuda Osamu

半導体デバイス製造に用いられるリソグラフィ用フォトマスクの欠陥修正には集束イオンビーム技術が用いられる。最先端のデバイスでは、欠陥修正の最小加工寸法や精度にナノメートルレベルが要求される。この微細化要求に対応するために、従来30年以上にわ

たって実績がある液体金属イオン源に代えて、微細化ブレークスルー技術として新方式の電界電離型ガスイオン源を開発した。これを欠陥修正装置に搭載し、最小加工寸法や修正精度、修正後のフォトマスクの光学特性など、最先端の性能要求を満たすことを確認した。

## 1. はじめに

半導体デバイスの高集積化を支えるリソグラフィ技術では、縮小投影露光により、フォトマスク上の回路パターンをウェーハ上に繰り返し転写する。このため、回路パターンの原版ともいえるフォトマスクは、無欠陥であることが半導体デバイス製造において非常に重要である。最先端デバイスではパターン寸法は20 nm以下まで微細化し、問題となるフォトマスク上の欠陥サイズもナノメートルレベルとなり、欠陥修正技術も微細化への対応が求められている。

このフォトマスク欠陥修正技術として、集束イオンビーム(FIB: Focused Ion Beam)を用いた装置が開発された。1985年の初号機以来30年にわたって、常に進化を続ける最先端半導体デバイスでフォトマスク欠陥修正に用いられ、半導体製造の歩留まり向上に貢献している。以下、集束イオンビームによるフォトマスク欠陥の計測・修正技術とその最新の動向について解説する。

## 2. 集束イオンビームによる欠陥の計測・修正技術

集束イオンビーム技術は、1980年代初めに液体金属イオン源の開発によって実用化され、広く用いられるようになった。集束イオンビーム技術の大きな特徴は、1 μm以下の微細なビームスポット径を得られることである。試料上をイオンビームで走査することにより、「走査電子顕微鏡」の電子をイオンに置き換えた「走査イオン顕微鏡」と

して用いることができる。同時にイオンビームによるスパッタリング効果や表面反応を利用することで、局所的にエッチングや成膜の微細加工を行うことができる。すなわち、1つのビームで、「見る」、「削る」、「付ける」という3つの機能を有する。これらの機能を活用して、フォトマスク欠陥の計測・修正を具現化している。

### 2.1 集束イオンビームによるフォトマスク欠陥修正装置

集束イオンビーム欠陥修正装置の構成を図1に示す。主

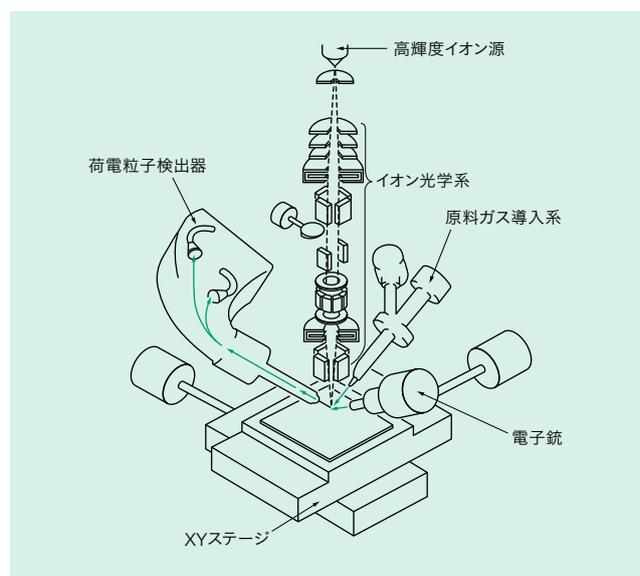


図1 | 集束イオンビームによる欠陥修正装置の構成  
真空内に配置される構成要素の関係を表す模式図を示す。

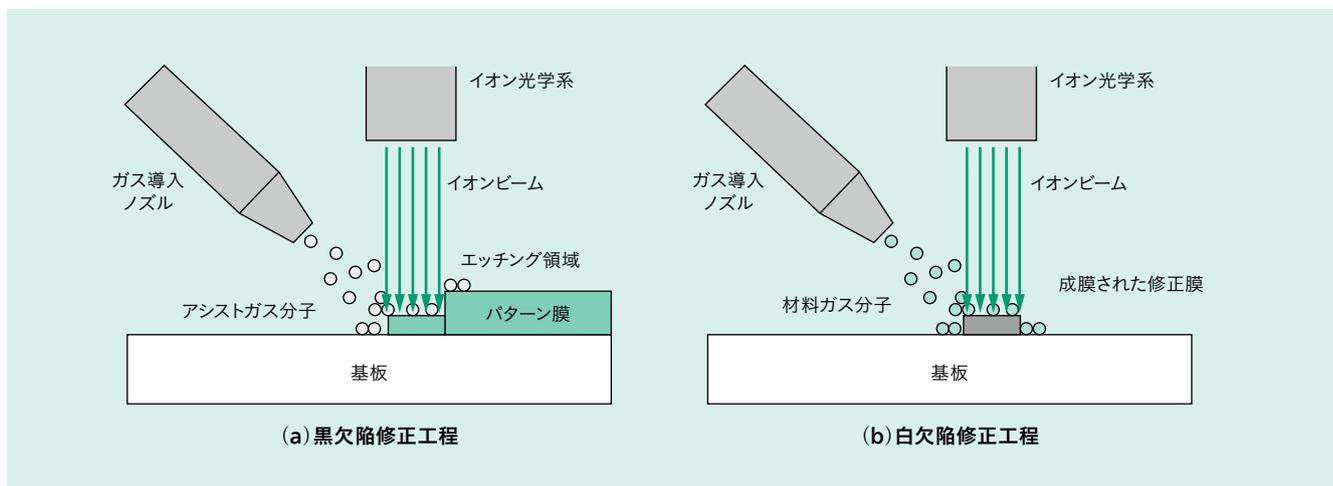


図2 | 集束イオンビームによる欠陥修正工程の模式図

(a) 黒欠陥修正のための局所エッチング工程の模式図を示す。(b) 白欠陥修正のための局所成膜工程の模式図を示す。

な要素は、高輝度イオン源、イオンビームを微細スポットに集束し走査するためのイオン光学系、イオン像取得に用いる荷電粒子検出器、フォトマスク表面の帯電を中和するための電子銃、局所エッチングや成膜のための原料ガス導入系、フォトマスクを搭載し移動させるXYステージ、真空排気系、マスク搬送系などである。

フォトマスク欠陥を計測・修正する概略の手順は次のとおりである。

- (1) 欠陥検査機からの欠陥座標データを基に、欠陥場所へ移動する。
- (2) 欠陥を含む領域の走査イオン像を取得する。
- (3) 欠陥の種類に応じて、走査イオン像上で、修正領域や方法を定める。
- (4) ガスを導入しながら、集束イオンビームを局所的に照射し、欠陥を修正する。

この欠陥修正の工程を図2に示す。フォトマスク欠陥は、(a) パターン膜が残留した余剰欠陥、(b) パターン膜が欠落した欠損欠陥に大別できる。(a) は光が遮られるため黒欠陥 (Opaque Defect)、(b) は光が透過するため白欠陥 (Clear Defect) とそれぞれ呼ばれる。欠陥種類 (黒欠陥・白欠陥) に応じて、黒欠陥は余剰部分のエッチング除去、白欠陥は欠落部分への材料の成膜付加により、修正を行う。

## 2.2 最先端フォトマスクの欠陥修正技術に求められる性能

半導体デバイスの高集積化とともに、フォトマスクの欠陥修正では、主に次の3点が常に要求される。

- (1) 線幅微細化への対応
- (2) 修正精度の向上
- (3) 修正部のフォトマスクとしての光学特性品質が正常部と変わらないこと

最先端デバイス用フォトマスクでは、20 nm以下の微細

線幅パターンに対応し、10 nm以下の最小修正寸法が求められる。露光装置の短波長化や焦点深度の短小化から、求められる修正精度も非常に高く、2~3 nm以下の再現性が必要である。さらに、欠陥を修正した領域の光透過率や露光焦点ずれによる転写寸法変動が、修正していない正常部と同等であることが求められる。

こうした要求に応えるために、集束イオンビーム技術も大きく進化してきている。次章以降では、最新の装置に用いられている技術とその性能を紹介する。

## 3. 最新装置の概要と性能評価結果

### 3.1 装置概要

最新の集束イオンビーム欠陥修正装置 (GR3000) では、従来30年以上の実績がある液体金属イオン源に代えて、新開発の電界電離型ガスイオン源 (GFIS: Gas Field Ion Source) を採用した<sup>1), 2)</sup>。GFISは、原子レベルまで先鋭化したエミッタチップに高電圧を印加することで、先端に強い電界を形成し、その電界でガス分子を電離する (図3参

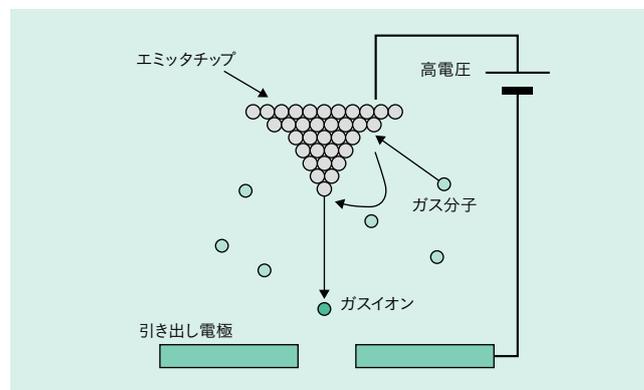


図3 | GFISの構造模式図

GFIS (Gas Field Ion Source) は、原子レベルに先鋭化したエミッタチップと対向する引き出し電極の間に高電圧を印加し、チップ先端の高電界でガス分子をイオン化する。

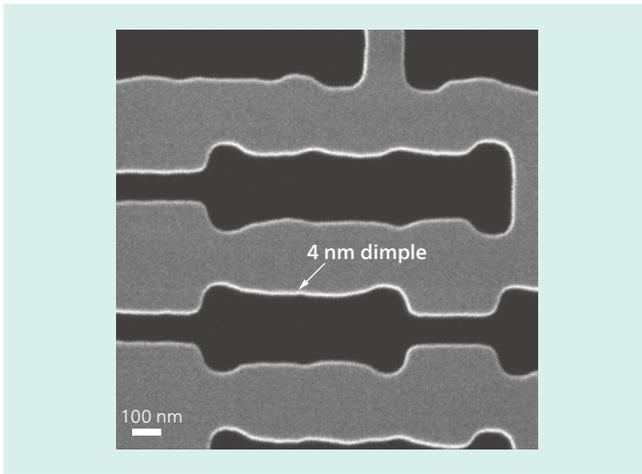


図4 | GFISを搭載した集束イオンビーム装置で取得したフォトマスクの走査イオン顕微鏡像

25 keV  $N_2^+$  ビームをフォトマスク上で走査し、二次電子を検出することによって取得した像を示す。フォトマスク上の4 nmの欠陥が視認できる。

照)。チップ先端の強電界部のみでイオン化が起るため、イオン発生領域が数ナノメートルサイズと極めて小さく、放出されるイオンのエネルギー分布も非常に狭い。そのため、微細スポット径のイオンビーム形成に優れた特性を有する。

このGFISを搭載することで、イオンビームのスポット径が従来の $\frac{1}{2}$ 以下となり、走査イオン顕微鏡像の分解能が向上し、微細欠陥の視認性が向上した。走査イオン顕微鏡像の例を図4に示す。サイズ4 nmの欠陥が視認できている<sup>2)</sup>。また、修正加工の最小寸法も10 nm以下を実現できた<sup>2)</sup>(図5参照)。さらに、イオン種が従来の金属イオンから、窒素や水素といったガス分子イオンとなったため、フォトマスクの基板である石英ガラスにイオンを照射した際に問題となるイオン注入による光透過率の低下も桁違いに改善された<sup>2), 3)</sup>。

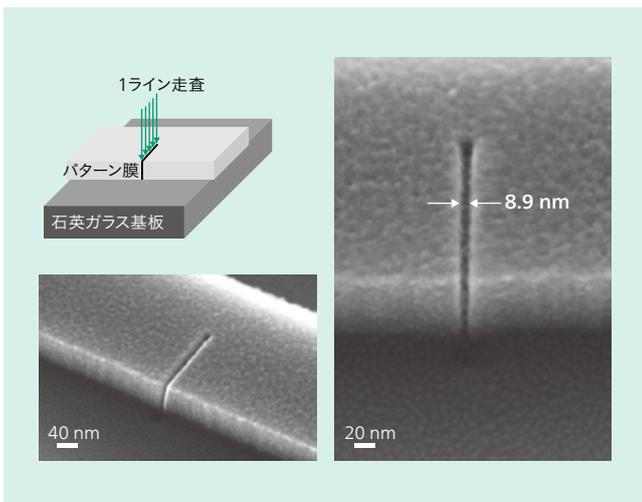


図5 | GR3000による最小加工寸法

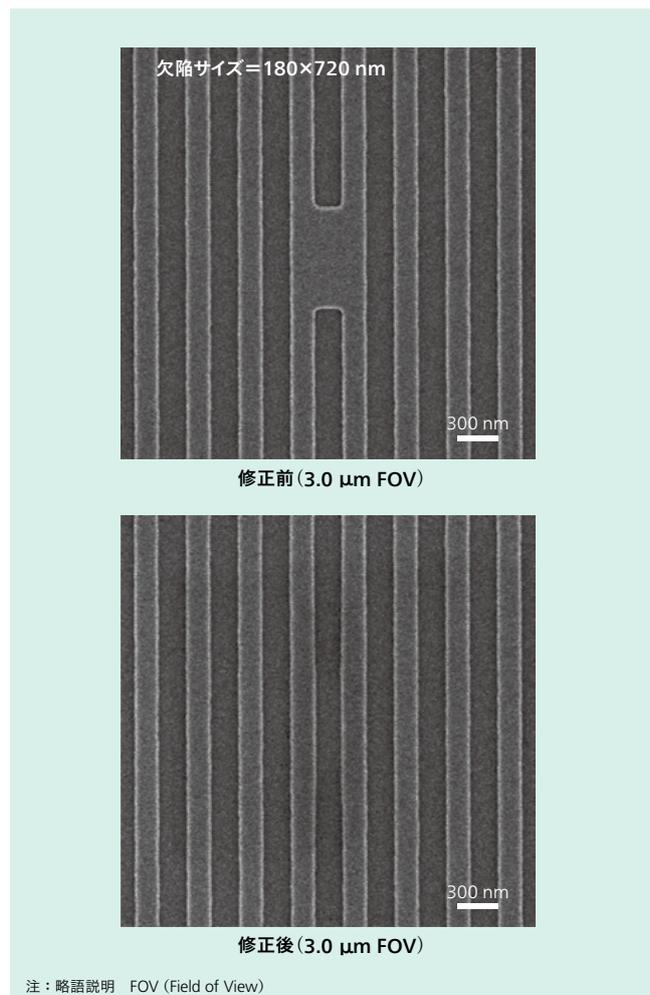
フォトマスクのパターン膜をイオンビームでライン加工したものを走査電子顕微鏡で観察した。

### 3.2 欠陥修正性能評価結果

GR3000による黒欠陥修正の例を図6に示す。フォトマスク上のラインスペースパターンのブリッジ状欠陥の余剰部をエッチング除去して修正した前後の走査電子顕微鏡像である。パターン膜の材質はMoSiON化合物の位相シフトマスク<sup>※)</sup>である。修正には、25 keVの窒素イオンビーム( $N_2^+$ )を用いた。修正領域にガラス基板のダメージはなく、パターンエッジの形状もきれいに修正できていることが確認できる。同じ材質のホール(微細孔)パターンの修正前後の走査電子顕微鏡像を図7に示す。これも高品質な修正が実現できている。これらの修正部について、フォトマスクの露光波長での光学特性評価結果も良好であることが確認されている<sup>2), 3)</sup>。

また、次世代リソグラフィとして注目されているEUV(Extreme Ultraviolet)リソグラフィに用いられるマスクの欠陥修正性能についても評価を行った。修正には15 keV

※) 位相シフトマスク：光の位相や透過率を制御することで、光の干渉現象を利用して露光時の特性を改善し、解像度を向上させたフォトマスク。



注：略語説明 FOV (Field of View)

図6 | GR3000によるフォトマスクの黒欠陥修正例(ラインアンドスペースパターン)

修正前後のフォトマスク走査電子顕微鏡像を示す。線幅180 nmのMoSiONパターン膜である。

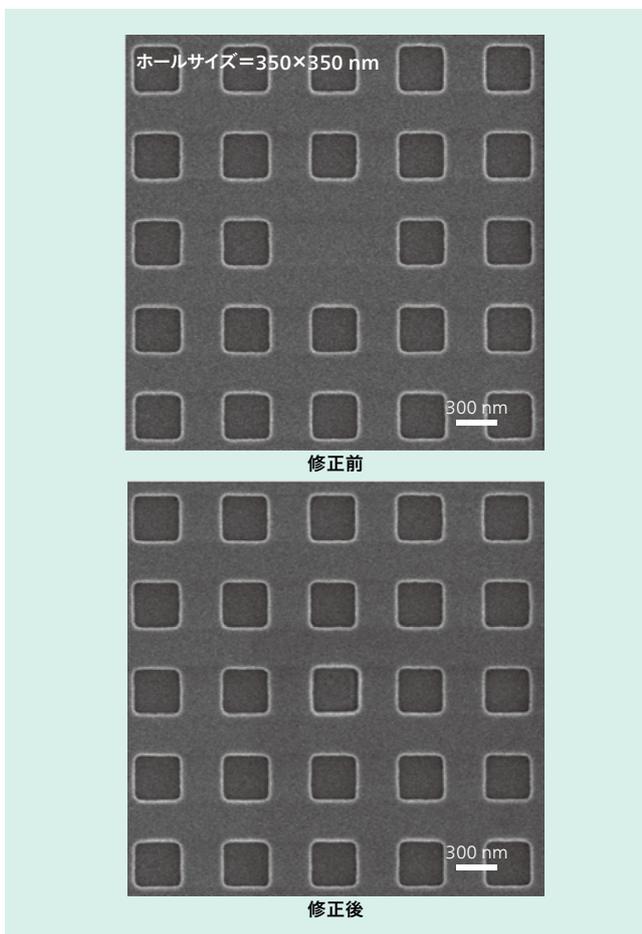


図7 | GR3000によるフォトマスクの黒欠陥修正例（ホールパターン）  
修正前後のフォトマスク走査電子顕微鏡像を示す。ホール幅350 nmのMoSiONパターン膜である。

の水素イオンビーム ( $H_2^+$ ) を使用し、その実用性を実証した<sup>1)</sup>。

#### 4. おわりに

ナノメートルレベルでの「見る」、「削る」、「付ける」が1台の装置で実現できる集束イオンビーム技術は、半導体集積回路の高集積化を支えるリソグラフィ用フォトマスクの欠陥修正に応用されてきた。最先端の20 nm以下の微細パターンに対応するために、新開発のGFISを搭載したマスク欠陥修正装置を開発した。この装置を用いて最先端デバイス用フォトマスクやEUVマスクの欠陥修正を行い、実用が可能であることを確認した。

#### 謝辞

本稿で述べたGFISマスク欠陥修正装置の開発においては、株式会社半導体先端テクノロジーズ、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）にご支援いただいた。また、実験評価には大日本印刷株式会社の吉川真吾氏に多大なご協力をいただいた。深く感謝の意を表する次第である。

#### 参考文献

- 1) F. Aramaki, et al.: Development of new FIB technology for EUVL mask repair, Proceedings of SPIE 7969, 79691C (2011)
- 2) F. Aramaki, et al.: Photomask repair technology by using gas field ion source, Proceedings of SPIE 8441, 84410D (2012)
- 3) F. Aramaki, et al.: Performance of GFIS mask repair system for various mask materials, Proceedings of SPIE 9235, 92350F (2014)

#### 執筆者紹介



**八坂 行人**  
株式会社日立ハイテクノロジーズ  
科学・医用システム事業統括本部 科学システム製品本部  
電子顕微鏡第一設計部 所属  
現在、電子顕微鏡、集束イオンビーム技術の設計開発に従事  
博士（工学）  
応用物理学会会員



**荒巻 文朗**  
株式会社日立ハイテクサイエンス 設計本部 BT設計部 所属  
現在、集束イオンビームマスク修正装置の設計開発に従事



**小堺 智一**  
株式会社日立ハイテクサイエンス 設計本部 BT設計部 所属  
現在、集束イオンビームマスク修正装置の設計開発に従事



**松田 修**  
株式会社日立ハイテクサイエンス 設計本部 BT設計部 所属  
現在、集束イオンビームマスク修正装置の設計開発に従事