



材料改質量産装置「KYOKA (鏡花)」

Material Modification Equipment for Mass Production, “KYOKA”

松本 武*
Takeshi Matsumoto

宇根 英康
Hideyasu Une

甲斐 裕章
Hiroaki Kai

高嶋 大樹
Daiki Takashima

和田 涼太
Ryota Wada

黒井 隆
Takashi Kuroi

日新イオン機器(株)は、半導体デバイス製造用の材料改質量産装置「KYOKA (鏡花)」を世界で初めて開発した。我々が有する大電流大面積イオン源技術とともに、新たに低エネルギー領域でのイオンビーム輸送効率を高めるビーム輸送系、金属元素イオンビームを安定的に出すことができるイオン源の開発に成功し、本装置を実現させた。本装置を使用することにより、半導体微細加工技術が進化し、デバイス性能が向上することが期待される。本稿では、材料改質が求められている背景を説明するとともに、本装置の構成とその特長、および本装置を使った材料改質実験結果の一例を述べる。

Nisshin Ion Equipment Co., Ltd. has pioneered the development of “KYOKA,” the world’s first mass-production material modification equipment for semiconductor device manufacturing. By combining our high-current large-area ion source technology with advancements in low-energy ion beam transport efficiency and the development of stable metal ion sources, we have successfully developed this innovative equipment. This equipment is expected to advance semiconductor microfabrication technology and enhance device performance. This paper provides an overview of the demand for material modification, the structure and features of the equipment, and presents experimental results utilizing the equipment.

キーワード：材料改質、量産、イオンビーム、半導体

1. 緒言

2023年12月、日新イオン機器(株) (以下、日新イオン) は、材料改質プロセスの量産化を可能にする世界初の装置「KYOKA (鏡花)」を開発したことを発表した。材料改質は最先端半導体デバイスの製造に役立つプロセスであり、その量産化がかねてから切望されていた。我々は、2017年以降、このような市場の要求を満たすべく、独自の大電流イオンビーム技術を基に、シミュレーションによるビームの軌道解析および機械・電気・ソフトウェアの改良を重ねてきた。半導体デバイス製造工程で使用されるイオン注入装置は日新イオンの主力製品のひとつであり、このイオン注入技術をベースとした新たな製品を開発し、注入装置以外の市場にも活動範囲を広げることが企図されていた。「鏡花」はその思いを実現した装置である。

本装置の名称「鏡花」は四字熟語の鏡花水月からとったものであり、この言葉の持つイメージから着想したものである。本装置の命名には、材料表面を改質することで美しく価値あるものを生み出したいという我々の思いが込められている。また、その読みである「きょうか」には材料を強化するという意味もある。そして「きょう」には日新電機(株)グループ発祥の地である京都の「京」をかけており、「京(けい)」が10の16乗(1の後に0が16個続く)という非常に大きな数字を表す単位であることから、材料改質に必要な大量のイオンを生成することができる装置という意味も込められている。

2. 半導体と材料改質

現代社会は半導体によって支えられている。半導体の進化は新しい未来を創る原動力のひとつと言っても過言ではない。半導体がなければスマートフォンはおろか携帯電話さえ実現せず、現在のような高度情報化社会は形作られていなかったはずである。新型コロナウイルスのパンデミックを契機として2021年ごろに発生した半導体不足とそれが引き起こした世界各地での混乱は、人々に半導体の重要性を再認識させるのに十分な出来事であった。このときの教訓から、有事に備え、半導体の生産拠点を自国内に確保しようとする動きが各国でみられる。例えば米国のThe Creating Helpful Incentives to Produce Semiconductors and Science Act (通称CHIPS法)では、米国内の半導体製造誘致に390億米ドルもの巨額の補助金が投じられることになっている⁽¹⁾。

半導体市場は誕生後順調に成長しており、今後も、6G通信、AI (Artificial Intelligence) 技術、IoT (Internet of Things)、データセンター等の需要がけん引し、2030年には1兆米ドルの超巨大市場になることが予測されている。半導体がその重要性を失うことは今後もないものと考えられる。

半導体の進化の歴史はその微細化の歴史と重なっている。台湾のある半導体デバイスメーカーが製造している最先端デバイスのプロセスノード(半導体微細化の世代を示す指標。近年、この指標はチップ上の何らかの実寸法を示すものではなく、)は3nmまで微細化が進んでい

る。シリコンの格子定数は0.54nmであることを考慮すると、いかに半導体の微細化が進んでいるかは明らかである。また、従来は平面であった半導体トランジスタの構造も、最先端のものでは特性を確保するために三次元構造が採用されるようになってきている。このような構造の微細化・複雑化に伴い、既存の半導体加工プロセスだけでは加工精度に限界が見られるようになってきており、加工技術面でのブレイクスルーが待ち望まれていた。その候補のひとつがイオンビームによる材料の改質である。シリコンや酸化シリコンなどの半導体デバイスを構成する材料にカーボンやシリコンなどのイオンビームを大量に照射することで、元の材料の特性を好ましい方向に改質し、これまで不可能であった加工を実現したり、後に続く加工プロセスを容易にしたりすることができる。例えば、エッチングと呼ばれる微細加工プロセスにおける材料除去速度を増加または減少させることで加工精度を高めたり、改質された材料表面には膜が堆積しにくい性質を利用して局所選択的に所望の材料を成膜したりすることが可能となる。

このように、材料改質は、半導体デバイス製造工程で使用できる新たな武器のひとつとして加工技術の進化に貢献し、さらには、デバイスの微細化とそれに伴う小型化・低消費電力化などのデバイスの高性能化にも恩恵をもたらすことが期待されている。その反面、材料改質処理として大量のイオンを照射するためには長い時間を要することが長年の課題であった。これに対する解決法としてイオンビームの大電流化が考えられるが、材料改質に使われる低エネルギーイオンは大電流ビーム化しにくいという技術的な壁があった。こうした背景から、材料改質の成果は多数公表^{(2)~(11)}されているものの、それらはあくまでも実験結果であり、量産と実用化に適した低エネルギー大電流イオンビーム装置の実現が待ち望まれていた。

3. 材料改質量産装置 [KYOKA]

前章で記載の状況の中、低エネルギー大電流イオンビームを実現し、材料改質プロセスの量産・実用化を可能にした世界初の装置が [KYOKA] である。[KYOKA] は300mm ウェーハ用の装置であり、その最大の特長は、単位面積当たりのイオン照射量が 1×10^{16} 個/cm²という大量のイオンを要する材料改質処理であっても、1時間当たり30枚以上のウェーハを処理できることである。

この実現には、超大電流イオンビームを生成できる大型イオン源の開発に成功したこと、また、後述するように、装置の各構成要素の最適化により材料改質に使用される低エネルギー領域でのイオンビーム輸送効率を最大化できたことが貢献している。この装置の設計には、日新イオンが10年以上にわたり市場を独占しているスマートフォンディスプレイ製造用イオン注入装置で培った独自の超大電流イオンビーム技術およびビーム輸送技術が使われており、競合他社が簡単には模倣できない装置となっている。[KYOKA]

の外観写真を写真1に、イオンを生成してからウェーハに照射するまでの機構の概略図を図1に示す。大型イオン源で生成された超大電流イオンビーム（高さ>300mm）は、質量分離マグネット内部に到達するとそこに形成された磁場によって曲げられ、必要なイオン種のみが選択的にマグネット出口に設けられたスリットを通過する。通過後のビームは、均一化機構により密度分布が均一に調整され、静電フィルターで所定のエネルギーから外れてしまった不要なイオンが除去されたのちにウェーハに到達する。ウェーハ全面への均一なイオン照射は、ウェーハをビーム中で水平方向に繰り返し往復運動させることによって実現する。イオンは正の電荷をもっているため、イオンビームを照射し続けるとウェーハは正に帯電し、ウェーハ上に形成されている半導体デバイスを静電破壊させることがある。これを防止するために PFG (Plasma Flood Gun) と呼ばれるウェーハへの電子供給機構が設けられ、正の電荷を負の電荷をもつ電子で打ち消している。材料改質にはさまざまな種類のイオンが使われることを考慮し、本装置で引き出せるイオンには、イオン注入装置で一般的に使われているボロンやリンに加え、カーボン、シリコン、および金属元素も含まれる。



写真1 材料改質量産装置KYOKAの外観

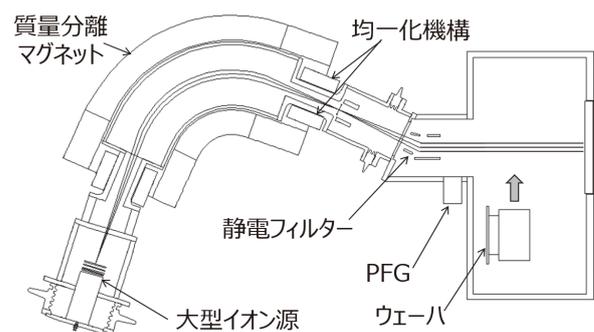


図1 KYOKAビーム輸送系の上面からみた概略図

4. 「KYOKA」を使った材料改質結果

本章では本装置を使って材料改質した結果^{(12)、(13)}を示す。図2は、シリコンウェーハ上に形成した厚み30nmの酸化シリコン膜にシリコンイオンあるいはリンイオンを 1×10^{16} 、あるいは 3×10^{16} 個/cm²照射することで、フッ化水素酸に対する膜のエッチングレートがどのように変化したかを、イオンを照射しなかった場合の結果とともに示している。もともと7.5nm/minであったエッチングレートは、シリコンイオン照射により2割以下に減少し、逆にリンイオン照射により2倍以上に増加するという結果が得られた。

この変化の理由を理解するために、X線光電子分光法(X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)を用いて改質前後の酸化シリコン膜の化学結合状態を調べた結果を図3に示す。イオンの照射量はシリコン、リンともに 1×10^{16} 個/cm²とした。リンイオンで酸化シリコンを改質し

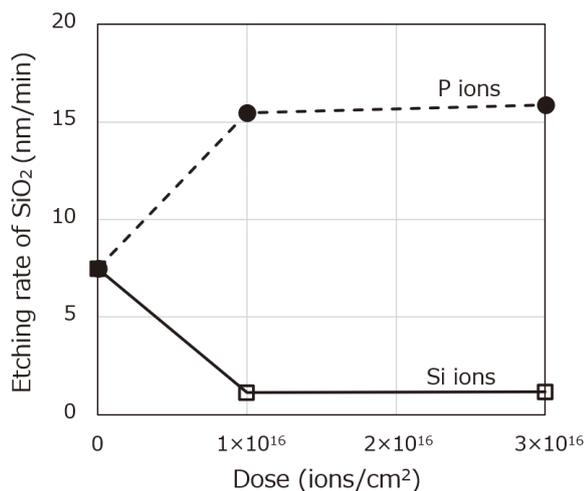


図2 材料改質された酸化シリコン膜のエッチングレート

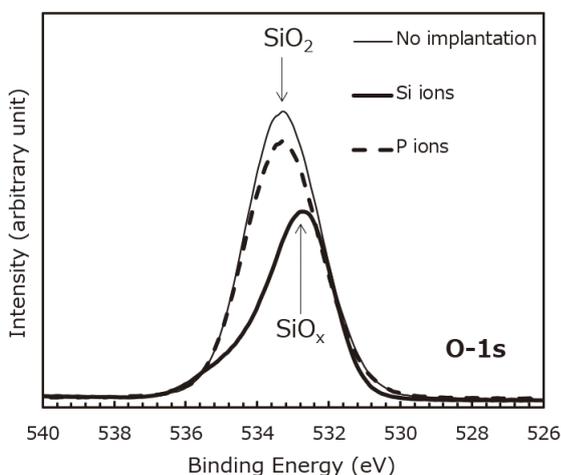


図3 材料改質前後での酸化シリコン膜のXPSスペクトル

た場合、SiO₂由来のピークが減少し、SiO₂の結合がイオン照射により破壊されたことが示唆された。これに対し、シリコンイオンで酸化シリコンを改質した場合、SiO₂とは異なる位置にピークが観察され、シリコンイオン照射によりシリコン原子が過剰となり、SiO_xが存在することが示された。このような結合状態の違いによりフッ化水素酸に対するエッチング耐性が変化し、結果的にエッチングレートが変化したものと考えられる。

次に、シリコンのトレンチ上に成膜した酸化シリコン膜を部分選択的にエッチングした例を示す。深さ200nmのシリコントレンチが周期的に並び構造上に30nmの酸化シリコンを成膜したサンプルを準備し、それを 1×10^{16} 個/cm²のシリコンイオンで改質した。注意点は、イオンは非常に指向性が高いため、トレンチ底面とトレンチ外部上面にはイオンが大量に照射される一方、トレンチ側壁にはイオンがほとんど照射されないということである。材料改質後のサンプルをフッ化水素酸でエッチング処理すると、改質によってエッチングレートが低下した底面と上面の酸化シリコンだけがエッチングされずに残り、側壁のみが選択的に除去された構造を得ることができた(写真2)。

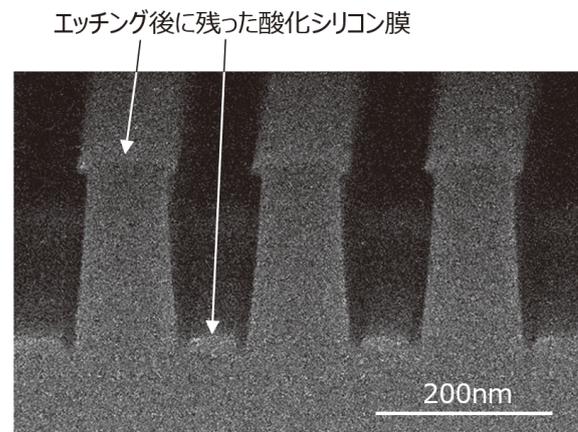


写真2 材料改質後、エッチングされたシリコントレンチ上の酸化シリコン膜の電子顕微鏡写真

5. 結 言

2023年12月の「KYOKA」開発の発表、また、それに続く東京で開催された「SEMICON JAPAN2023」への出展以降、本装置について多くの問い合わせを受けている。2024年4月には日新イオン滋賀事業所にデモ機を設置し、材料改質プロセスが顧客の目指す半導体デバイスの実現に貢献できることの実証を開始している。

日新イオンは、「KYOKA」を皮切りとして、イオン注入装置以外の新たな市場への進出を加速し、同時に、世界が求めるイノベティブな製造装置をいち早く市場に届け、

顧客の発展と持続可能な社会の実現に今後も貢献していく所存である。

6. 謝 辞

この成果は、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）の委託業務（JPNP21009）の結果得られたものである。

- ・KYOKAは日新イオン機器㈱の登録商標です。
- ・SEMICONは国際半導体製造装置材料協会（SEMI）の登録商標です。

参 考 文 献

- (1) アメリカ国立標準技術研究所（NIST）：CHIPS FOR AMERICA
<https://www.nist.gov/chips>（参照：2024/2/20）
- (2) E. Bellandi, V. Soncini, "SiO₂ etch rate modification by ion implantation," *Thin Solid Films*, 524, 75 (2012)
- (3) X. Sun, Q. Lu, H. Takeuchi, S. Balasubramanian, T. J. K. Liu, "Selective enhancement of SiO₂ etch rate by Ar-ion implantation for improved etch depth control," *Electrochemical and Solid-State Letters*, 10, D89 (2007)
- (4) H. X. Qian, W. Zhou, J. Miao, L. E. N. Lim, X. R. Zeng, "Fabrication of Si microstructures using focused ion beam implantation and reactive ion etching," *J. Micromech. Microeng.*, 18, 035003 (2008)
- (5) W. H. Kim et al., "A Process for topographically selective deposition on 3D nanostructures by ion implantation," *ACS Nano*, 10, 4451 (2016)
- (6) S. J. Lin, S. L. Lee, J. Hwang, T. S. Lin, "Selective deposition of diamond films on ion-implanted Si(100) by microwave plasma chemical vapor deposition," *J. Electrochem. Soc.*, 139, 3255 (1992)
- (7) O. Eryu, K. Abe, N. Takemoto, "Nanostructure formation of SiC using ion implantation and CMP," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, 242, 237-239 (2006)
- (8) S. M. Jang, C. H. Yu, "Method for forming polish stop layer for CMP process", United States patent, No. 5674784 (1997)
- (9) C. Kenyon, M. R. Fahy, G. T. Zietz et al., "Method of stabilizing resist material through ion implantation," United States patent, No. 6864144 (2005)
- (10) B. D. Chalifoux, Y. Yao, K. B. Woller, R. K. Heilmann, M. L. Schattenburg, "Compensating film stress in thin silicon substrates using ion implantation," *Optics Express*, 27, 11195 (2019)
- (11) L. W. Teo, E. Quek, "Modulation of stress in stress film through ion implantation and its application in stress memorization technique," United States patent, No. 8119541 (2012)
- (12) R. Wada, H. Kai, J. Sasaki, T. Kuroi, T. Ikejiri, "Surface modification of SiO₂ film using high-dose ion implantation technique as a suitable manufacturing process," *Jpn. J. of Applied Physics*, 59, SGGA03 (2020)
- (13) R. Wada, H. Kai, N. Kawakami, J. Sasaki, T. Kuroi, "The investigation of material modification for SiO₂, Si₃N₄ film and photo-resist using high-dose Ion implantation technique," *Proc. of 2020 4th IEEE Electron Devices Technology and Manufacturing*, Penang, Malaysia, p.174 (2020)

執 筆 者

松本 武*：日新イオン機器㈱ 副部長
博士（工学）



宇根 英康：日新イオン機器㈱ 主任



甲斐 裕章：日新イオン機器㈱ 主任



高嶋 大樹：日新イオン機器㈱



和田 涼太：日新イオン機器㈱ 主任



黒井 隆：日新イオン機器㈱ グループ長
博士（工学）



* 主執筆

出典元

松本武 他、「材料改質装置『KYOKA（鏡花）』の開発」、日新電機技報 Vol.69 No.1、pp.31-35（2024年7月）