大電流酸素イオン注入用マイクロ波イオン源の特性*

関 孝義^{*1}・登木口克己^{*1}

(受理1999年4月6日, 掲載決定1999年6月5日)

Characteristics of a High Current Microwave Ion Source for Oxygen Ion Implanter*

Takayoshi SEKI^{*1} and Katsumi TOKIGUCHI^{*1}(Power & Industrial Systems R & D Laboratory, Hitachi Ltd., Ohmika-cho,
Hitachi-shi, Ibaraki-ken 319-1221, Japan)

(Received, April 6, 1999, Accepted June 5, 1999)

Separation by Implanted Oxygen (SIMOX) wafer is recognized as one of the promising Silicon on Insulator (SOI) substrates to be used for next generation semiconductor device fabrication. Since high dose O^+ implantation of about 4×10^{17} ions/cm² is conventionally carried out in SIMOX wafer fabrication process, the use of very high-current ion beams is indispensable for volume production. This report describes characteristics of a new high-current microwave ion source which contains a specially-designed transform waveguide and a cylindrical plasma chamber. Oxygen ion beams of 240 mA could be extracted with multi-aperture electrode system. The data indicates that this source has a good potential to increase SOI substrate throughput.

1. はじめに

現在, パーソナルコンピュータ・携帯電話などの携帯端末機器の普及により, 高速・低消費電力の動作が可能なデバイスを作製できる SOI (Silicon on Insulator) ウェハの需要が高まっている. SOI は絶縁膜上に単結晶シリコンを形成するもので, その作製方法は数多く考案されている¹⁾. そのひとつにイオン注入を用いた SIMOX (Separation by Implanted Oxygen) 基板作製法がある. SIMOX 法は酸素イオン (O^+) を通常 180~200 keV のエネルギーでシリコンウェハにイオン注入し, その後アニールすることにより, 注入エネルギーに応じた深さに SiO_2 の埋め込み酸化膜を形成するものである. 我々はこれまでに従来の半導体用不純物注入に用いられるリッジ型マイクロ波イオン源およびこれを用いたイオン注入装置を開発してきており²⁻⁵⁾ この技術の応用として SI-

MOX イオン注入に利用可能な大電流のマイクロ波イオン源の開発を行った. SIMOX イオン注入では酸素ガスをイオン源放電ガスとして用いるため, 熱フィラメントを用いないマイクロ波イオン源は寿命も長く, SIMOX イオン注入用にもっとも適したイオン源の一つといえる. SIMOX 基板作製では, たとえば O^+ イオンを 180~200 keV のエネルギーで, ドーズ量 $4 \times 10^{17} \sim 1.4 \times 10^{18}$ cm⁻² 程度で注入する^{6,7)}. したがって P^+ , As^+ , B^+ の注入に用いられる 10 mA クラスの汎用イオン注入装置を使うと, 6~8 インチウェハを 1 パッチ (25 枚) 注入するには 40~50 時間を要する. SIMOX 用イオン注入装置で高速のイオン注入処理を実現し, 十分高いスループットを得るには, 100 mA レベルの大電流で注入する必要がある. 100 mA の電流であれば注入時間は約 4~5 時間となり, 実用上, 十分な値の処理能力が得られる. このような大電流下でも SIMOX イオン注入における注入時間は従来に比べ 10 倍以上長い.

基板上で 100 mA のビーム電流を得るためには, 質量分離器等の注入装置に関わるビームラインの通常の透過

* 1996年9月10日, 電気学会プラズマ研究会に於いて発表

^{*1} 日立製作所電力・電機・開発研究所 (〒319-1221 茨城県日立市大みか町 7-2-1)

率 (60%) を考慮すると、イオン源酸素プラズマ中の O^+ の成分比で80%が得られたとしても、イオン源では150 mA 以上の引出し電流が必要となる。この値は、矩形型放電室からスリット状のイオンビームを引出していた汎用注入装置のリッジ型マイクロ波イオン源で得られる電流値⁹⁾の2倍以上である。したがって150 mA を超える大電流ビームを長時間安定に得るには、大口径で均一なプラズマからイオンビームを引き出すとともにマイクロ波吸収効率を高め、高密度プラズマを長時間安定に生成維持できる放電室の開発が重要である。このほか、このイオン源は注入装置に組み込み可能な小型であることも必要である。このような観点から我々は大面積化による大電流化が容易な円筒構造の放電室にマイクロ波を効率よく伝播できる変換導波管を備えたマイクロ波イオン源を開発し、その単体基本性能を調べた。またこれをイオン注入装置に搭載して引出し性能を評価した。

本報告では、イオン源構造と共に得られたイオン源基本特性および SIMOX イオン注入装置搭載時のビーム特性について述べる。

2. 大電流マイクロ波イオン源

2.1 イオン源放電室

SIMOX 用マイクロ波イオン源としては、円筒型放電室に標準矩形導波管を直接結合してマイクロ波を導入するものが報告されている⁹⁾。この場合、真空封じ用のマイクロ波窓材である誘電体の厚さや種類を変えることによりマイクロ波のインピーダンス整合を取ったり、あるいはスタブチューナによる調整を加えてマイクロ波の吸収効率を高める方法が取られている。我々は誘電体やスタブチューナによるインピーダンス整合に代わって変換導波管の使用によるマイクロ波吸収効率の向上を行った。今回開発したマイクロ波イオン源の構造を Fig. 1 に示す。2.45 GHz のマイクロ波は標準矩形導波管から変換導波管を介して円筒型の放電室に導入される。放電室の内径はプラズマの安定化を図るため単一モードのみで動作するようにした。本イオン源では、その単一モードとして円筒導波管の最低基本モードである TE_{11} を選んだ。この場合、円筒導波管の内半径 a は次式で与えられる¹⁰⁾。

$$fc = C_0 \cdot \rho / 2\pi a \quad (1)$$

ここで fc はマイクロ波周波数 (Hz)、 ρ は伝送モードに対するモード固有値¹⁰⁾、 C_0 は光速 (2.998×10^8 m/s) である。式(1)より TE_{11} の場合、モード固有値 ρ は1.84であるから導波管内半径 a_{11} は3.6 cm となる。円筒導波管の場合、 TE_{11} の次のモード (高次モード) は TE_{01} モードであり、モード固有値は2.40であるから、これに対応

Fig. 1 Schematic structure of high current microwave ion source. The outer diameter of coil is about 30 cm.

する導波管内半径 a_{01} は4.7 cm となる。したがって導波管内半径は a_{11} から a_{01} の間の値、すなわち3.6~4.7 cm であれば TE_{11} モードだけが発生することになる。単一モードの伝播範囲内で極力大口径化を図り、均一プラズマの生成を容易にするため、管内半径は4 cm (直径8 cm) とした。

放電室の外部には空心コイルが2個設けられ、磁場分布とその強度が調整可能である。磁場強度は放電室領域で ECR ポイント (0.0875 T) よりも高い強度となっている。フィスラーモードの伝播によるマイクロ波吸収となるため吸収効率が高くでき、 $10^{11} \sim 10^{12}$ cm⁻³ の桁の高密度プラズマが生成可能となる。また動作ガスを高めることにより一価イオンが有効に生成される強度である²⁾¹¹⁾。イオンビームの引出しには直径0.5 cm の穴を複数個配置したマルチアパーチャタイプの電極を用いている。引出し電極は加速、減速、接地電極の3枚構成とした。

2.2 変換導波管

フィスラーモードを用いる場合、プラズマをひとつの良好なマイクロ波電力の吸収体とみなせる。この場合、マイクロ波をいかに効率よく放電室まで伝送するかが高密度で安定なプラズマの生成に重要となる。前述のように放電室は大口径で均一なプラズマを生成する目的から円筒型の放電室を採用した。一般にマイクロ波発振器からのマイクロ波の伝送には矩形導波管が用いられている。このため直接矩形導波管を円形放電室へ接続すると、その接合部においてマイクロ波の反射が起こり、十分なマイクロ波の伝播が行われず、高密度プラズマが生成できない。マイクロ波の反射を抑える方法としてチューナを用いる方法や変換導波管を用いる方法がある。ここではチューニング等の操作が不要な変換導波管 (ステップ変換器) を採用した。その変換導波管の構成を Fig. 2 に示す。矩形導波管を円形導波管に変換するもの

Fig. 2 Schematic structure of transform waveguide.

としては通常テーパ導波管が知られている。しかしテーパ導波管で矩形から円形にその電界分布を滑らかに接続して反射の少ない変換を行うには管内波長以上の長さ(約20 cm)が必要であり、構造が大きくなってしまい欠点がある。これに対しステップ変換器であれば設計によっては1/4波長の長さで済むため、本イオン源では新設計のステップ変換器を採用した。一般にステップ変換は2つの異なる寸法の導波管の間に別の形状の導波管を接続して反射の少ない接続を実現する方法である。ステップ部を設けることにより Fig. 2 に示すように矩形導波管の両端の電気力線が変換導波管部では湾曲するため、続く円形導波管の分布に近い形に滑らかに変換される。このため反射の少ない変換が可能となる。

3. 実験装置

イオン源特性を評価するために用いた実験装置を Fig. 3 に示す。本装置はマイクロ波イオン源、質量分離器および電流計測用ファラデーカップで構成される。変換導波管のマイクロ波伝播性能を評価するため、イオン源とマグネトロン間にマイクロ波の入射波電力を測定するパワーモニタ(東芝製: TMU-607A)を設置した。この立体回路中にはパワーモニタ以外の機器、例えばスタブチューナやE-Hチューナ等の整合器は設けていない。パワーモニタによる測定ではビーム引出しの有無に関わらず、マイクロ波の入射波電力に大きな差は見られなかったため、以降の吸収特性測定ではビームは引き出さず、主としてプラズマ点火のみの条件下で実験を行った。またプラズマ内でのイオン種成分を測定して一価イオンの生成効率を評価するため、質量分離器とファラデーカップを使って引出したイオンビームの質量分離

Fig. 3 Experimental apparatus.

Fig. 4 Dependence of microwave absorption efficiency on microwave power.

スペクトルを測定した。Fig. 3 で質量分離器は、偏向半径0.5 m、偏向角75度、磁極間隔0.055 mの磁場型質量分離器(入射角可変式)で、質量分解能は75である。ファラデーカップは口径80 mmの円筒型カップで、前面に2次電子抑制用の負電位電極を配置した。プラズマ生成に用いる酸素ガスには、純度99.99%の酸素ガスを使用した。またイオンビーム引出し測定では、代表的な引出し電圧である40~50 kVのとき、引出しイオンビームパワーは最大10 kWにも及ぶ。質量分離器、ファラデーカップはイオン種成分を測定するためのプローブとして用いており、十分な冷却が施されていないため、10 kWを超える受熱能力がない。このため本実験ではイオン源直後に十分水冷された平板のビームダンプを設け、ビーム受けとした。本ビームダンプは電氣的に絶縁された構造になっており、流入するイオン電流測定も同時に行える構造になっている。本実験ではイオン源電源電流を測定し、引出し電流値とした。

Fig. 5 Mass spectrum of extracted oxygen ion beam.

4. 実験結果と検討

変換導波管付きのマイクロ波イオン源の SIMOX イオン注入装置用イオン源としての性能を評価するため、マイクロ波吸収特性、引出しビームのイオン成分、引出し電流密度および多孔型引出し電極による引出し電流特性を測定した。

4.1 マイクロ波電力吸収特性

Fig. 4 にマイクロ波電力を変えたときのマイクロ波吸収電力の変化を示す。図示のようにマイクロ波電力の広い範囲で安定運転に必要な80%程度の高い吸収率が得られた。この他ガス流量を変えた実験からは通常の動作流量範囲の0.5~1.3 sccm の領域で、同様に80%の高効率でマイクロ波が吸収されている。実験では放電室内半径を変えたときの吸収率測定も行った。放電室内半径が4.5 cm のものでも同様に良い吸収特性が得られており、単一モード励振条件で高効率にマイクロ波が放電室に伝播されていることがわかった。一方、Fig. 1 のイオン源で変換導波管をつけず、直接矩形導波管を円形放電室に取り付けたときのマイクロ波電力吸収率は代表的な値で40%であった。

今回開発した変換導波管の採用により、スタブチューナ等の整合器なしで高効率に矩形導波管から円形導波管へマイクロ波電力を伝播できることがわかった。

4.2 プラズマ中のイオン成分比

プラズマ中で生成されるイオンのうち、イオン注入に必要なイオン種が多く生成されなければ注入電流の増加につながらない。このためプラズマ中に生成されるイオンの成分を引出しイオンビームの質量分析により測定した。本実験では、SIMOX イオン注入時に用いられる後

Fig. 6 Dependence of ion species component on microwave power.

述の多孔型引出し電極の代わりに、分解能をあげるため直径0.5 cm の単孔引出し電極を使ってイオン引出しを行っている。さらにファラデーカップやビームラインの熱を考慮し、利用される引出し条件の中では最も低い引出し電圧の40 kV でビームを引出している。引出し電圧以外のガス流量、磁場強度等の条件は実用時と同一条件とした。代表的な酸素プラズマの質量スペクトルを Fig. 5 に示す。図から O⁺ イオンの他に O₂⁺ イオン、微量（全体の約1.5%）の O₂⁺ イオンも観測されている。またマイクロ波電力を変えたときの O⁺ と O₂⁺ の成分比を Fig. 6 に示す。両図から O⁺ がほぼ80%を占めていることや、マイクロ波電力の変化に対し、O⁺ 成分比がほぼ一定になっていることがわかる。後述するように、マイクロ波電力の増加により引出し電流密度が増加していることから、マイクロ波電力の増加は主としてプラズマ密度の増加に寄与し、電子温度の増加には寄与していないと考えられる。この他ガス流量を変えた実験からは、ガス流量の増加により O₂⁺ 成分比がやや増加する傾向が見られるものの、O⁺ 成分比はほぼ80%で一定に保たれており、使用するガス流量範囲（0.5~1.3 sccm）で効率よく一価イオンが生成されていることが分かった。

4.3 引出し電流密度

150 mA を超える大電流ビームをイオン源から引き出すために一般に多孔型引出し電極が用いられる。一方、通常の磁場型質量分離器（半径約50 cm）を結合することを考えると必要とする質量分解能（ $M/\Delta M=8\sim 16$ ）を得るには、イオン源出口でのビームサイズとしては直径2.0~3.5 cm 程度に抑える必要がある。従って直径0.5 cm の孔では配列等を考慮すると6個~13個程度に制限される。このため各孔から引き出されるイオン電流密度としては100 mA/cm² 以上の高い電流密度を与える

Fig. 7 Dependence of extraction current density and plasma density on microwave power.

Fig. 9 Dependence of extraction current on microwave power.

Fig. 8 Dependence of total extraction current on the number of extraction holes.

Fig. 10 Dependence of implantation current on microwave power.

高密度プラズマの生成が必要である。ここではまず直径 0.5 cm の単孔引出しにより、引出し電流密度を詳細に測定した。代表的な一例を Fig. 7 (左スケール) に示す。図で引出し電流密度は、実際に引き出された電流値（電源電流値）を引出し面積で除したものである。また引出し電圧は注入装置に搭載することを考え、実用時の電圧である 50 kV とした。図から引出し電流密度はマイクロ波電力の増大と共に増加し、900 W で最大 130 mA/cm² の値を示している。このときのプラズマ密度を、電子温度としてマイクロ波イオン源の代表的な値である 5 eV を使い、飽和イオン電流密度を与える式を使って計算した。その結果を合わせて Fig. 7 (右スケール) に示した。900 W で $6 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ となり、一般的なマイクロ波イオン源と同等のプラズマ密度が得られていることがわかる。

4.4 大電流引出し

電流増加の目的で多孔引出しを行う場合、引出し孔の増加により生成プラズマの電流密度（引出し電流）が変

わらないことが必要である。このため引出し電極孔（直径 0.5 cm、面積 0.196 cm²）の数を変えたときの引出し電流の変化について測定した。その結果を Fig. 8 (左スケール) に示す。引出し孔数は、配列の関係から 1, 3, 7, 13 個で行った。図から引出し孔数に比例して引出し電流が増加することがわかる。このときの電流密度を計算した結果を同図 (右スケール) に示す。引出し孔数が増加するに従って徐々に電流密度が減少する傾向が見られるが、その変化量は全体で 20 mA/cm² 程度である。この程度の変化量ではビーム発散角やビームサイズ等の引出し結果に大きく影響を与えるものではないことがビーム引出しシミュレーションから確かめられている。図から引出し電極孔数が 7 個以上であれば 100 mA 級の酸素イオン注入電流を得るに十分な 150 mA の引出し電流が得られることがわかる。さらに引出し電極孔数 13 個では 240 mA の引出し電流が得られており、今後予想される 300 mm 直径の SIMOX 基板作製時に必要な 100 mA 以上の大電流酸素イオン注入にも適用可能であることが

わかる。また引出し電流が引出し孔数に比例して増加していること、電流密度に急激な変化がないことから直径0.5 cmの孔を13個配置している領域(外形約3 cm, 放電室直径に対して40%)内ではほぼ均一なプラズマが生成されていると考えられる。

次に Fig. 9 に引出し孔数が7個の場合のマイクロ波電力と引出し電流の関係を示した。マイクロ波電力の増加に対して単調な増加傾向を示しており、引出し時においてもイオン源放電室でのマイクロ波モードの大きな変化はないと考えられる。このときのイオンビームの発散角をイオンビーム形状の写真、ビームダンプにおけるビームの照射痕跡などから計測すると約1°であり、イオンビーム軌道シミュレーションによる解析結果と良く一致することが確かめられた。さらに120時間の連続運転からは電流変動が±4%以内で安定に引出せる結果も得られている。

4.5 イオン注入装置搭載試験

本イオン源を日立 SIMOX 用イオン注入装置 (UI-5000) に取り付けた場合の注入電流について測定を行った。注入装置はイオン源のほか、質量分離器、後段加速管、Q レンズ、偏向器、注入室が順次配置されている¹²⁾。イオン源から注入室までのビームラインの長さは約5 mで、注入電流は注入室にて計測したものである。SIMOX では一般に180 keV で酸素イオン注入されるため、注入電流も180 keV (イオン引出し電圧: 45 kV, 後段加速電圧: 135 kV) で評価した。その結果を Fig. 10 に示す。マイクロ波電力の増加に伴って注入電流も増加し、マイクロ波電力500 W で70 mAの注入電流が得られた。この値で200時間を超える連続動作を確認している。また70 mA で $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ の注入を行う場合、8 インチウェハでは1 バッチ13枚の注入時間は約2.5時間である。さらに最大注入電流の引出し試験では120~200 keV のエネルギーで100 mA の注入電流を確認している。

5. ま と め

SIMOX 基板作製用の大電流酸素イオンビームを引出し可能なマイクロ波イオン源を開発した。本イオン源は、新たに開発した変換導波管を用いることにより、矩

形導波管から円形放電室へ80%の高い効率でマイクロ波を伝送可能である事が分かった。チューニングなどの特別な操作を必要としないため、イオン源動作の立上げ時間についても約30分以内で最大ビーム電流を安定に引出せる。本イオン源では引出し孔の更なる増加により、引出し電流の増加が容易に行える。本イオン源は、300 mm シリコンウェハ時代の到来に向け、SIMOX イオン注入装置に要求されている今後の大電流化にも十分対応可能な性能を備えているといえる。

謝辞

本研究に関し、有益な御討論をいただきました NTT LSI 研究所、泉勝俊部長、NTT エレクトロニクス テクノロジー株式会社、中嶋定夫 技術部長、金沢工業大学 作道訓之教授、日立製作所 国分工場 橋本勲氏、山下泰郎氏、米良和夫氏に深く感謝します。

【文 献】

- 1) 米原隆夫: 電子情報通信学会誌, **80**, No. 7 (1997) 758-762.
- 2) N. Sakudo, K. Tokiguchi, H. Koike and I. Kanomata: Rev. Sci. Instrum., **48**, No. 7 (1977) 762-766.
- 3) 作道訓之, 登木口克己, 小池英巳: 応用物理, **56**, No. 8 (1987) 49-54.
- 4) K. Amemiya, K. Tokiguchi, H. Koike, T. Seki and N. Sakudo: Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., **B37/38** (1989) 87-89.
- 5) N. Sakudo, H. Koike, K. Tokiguchi, T. Seki and K. Sakai: Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., **B37/38** (1989) 184-188.
- 6) K. Izumi, M. Doken and I. Watanabe: Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., **B21** (1987) 178-181.
- 7) 泉 勝俊: 学振第131委員会報告 (1995) 29-35.
- 8) N. Sakudo, H. Koike, T. Seki and K. Tokiguchi: Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., **B55** (1991) 300-304.
- 9) Y. Torii, M. Shimada and I. Watanabe: Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., **B21** (1987) 178-181.
- 10) 倉石源三郎: マイクロ波回路 (東京電機大学出版局, 東京, 1983) 83-89.
- 11) K. Tokiguchi, H. Itoh, N. Sakudo, H. Koike and T. Saitoh: Vacuum, **36** (1986) 11-14.
- 12) K. Tokiguchi, T. Seki, K. Amemiya and Y. Yamashita: Proc. 11th int. Conf. on Ion Implantation Technology, Austin, TX, **1** (1996) 16-21.