

90~65 nmプロセス対応の プラズマ酸化・窒化装置

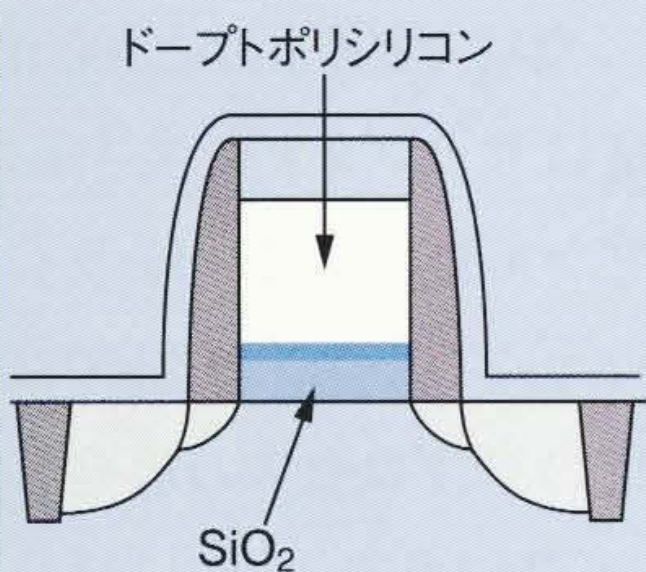
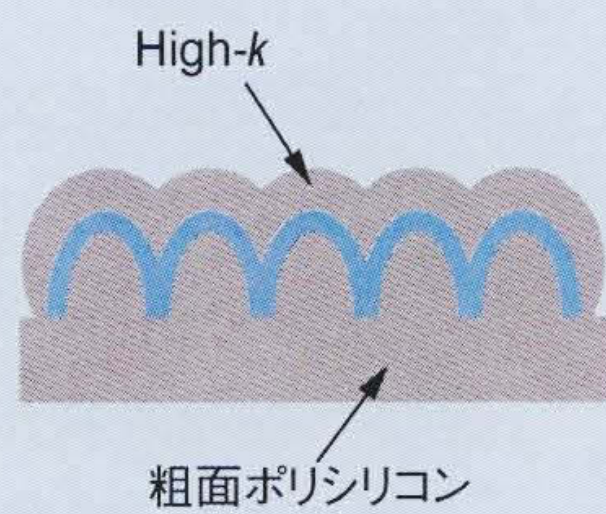
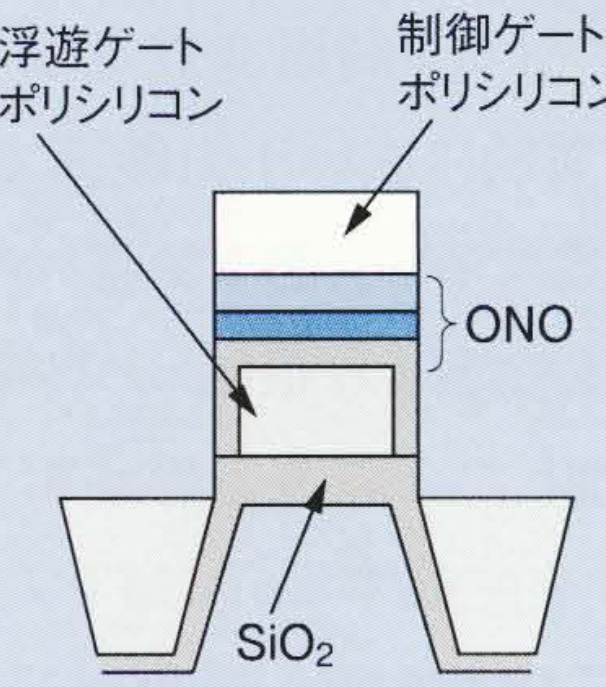
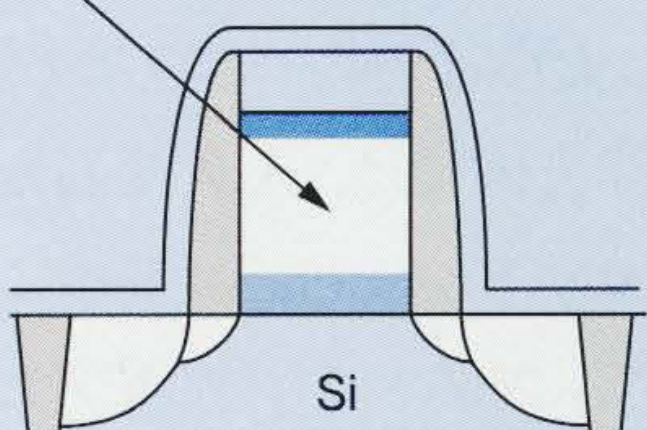
Plasma Oxidation and Nitridation Machine for 90—65 nm Node Processes

小川 雲龍 Unryû Ogawa

佐藤 徳芳 Noriyoshi Satô

示野 和弘 Kazuhiro Shimeno

古川 亮一 Ryôichi Furukawa

	ゲート酸化・窒化	キャパシタ界面窒化	フラッシュメモリ窒化・酸化	High-k 界面酸化・窒化
ニーズ	・リーク電流抑制 ・実効膜厚薄膜化 ・ボロンの突抜け防止 ・プラズマ ダメージ フリー	・下部電極の酸化防止 ・低温化 (<600 °C) ・高ステップカバレッジ ・プラズマ ダメージ フリー	・リーク電流抑制 ・薄膜化 ・信頼性の向上 ・プラズマ ダメージ フリー	・Si表面の酸化防止 ・界面準位低減 ・ボロンの突抜け防止 ・プラズマ ダメージ フリー
構造	 ドーパドポリシリコン SiO₂	 High-k 粗面ポリシリコン	 浮遊ゲート ポリシリコン 制御ゲート ポリシリコン ONO SiO₂	 High-k Si

注1: ■ (MMT窒化), ■ (MMT酸化)

注2: ONO (Oxide-Nitride-Oxide), High-k (高誘電率), MMT (Modified Magnetron Typed)

変形マグネトロン型 (MMT) プラズマ源のアプリケーションのニーズと構造

次世代および次々世代 (90~65 nmノード) LSI (Large Scale Integration) の心臓部となるトランジスタのゲート絶縁膜形成を可能にする、変形マグネトロン型プラズマ処理装置の製品化に成功した。

半導体デバイス製造過程の高度化にこたえるため、株式会社日立国際電気は、次世代以降の半導体プロセス (90~65 nmノード) に有効な変形マグネトロン型低温プラズマ処理装置“MARORA”を開発した。

MARORAは、電子温度が1eV (電子ボルト) 以下のソフトなプラズマを生成するMMT (Modified Magnetron Typed) プラズマ源を用いて、半導体用の高精度組成薄膜を均一性よく低温形成する。特に、MOS (Metal Oxide Semiconductor) トランジスタの心臓部にあたるゲート絶縁膜となる高品質酸化膜を形成すると同時に、表面の窒素プロファイルを高精度で制御する窒化処理を可能にし、65 nmノードで要求される実効酸化膜厚 (EOT: Equivalent Oxide

Thickness) が1.2 nm以下の極薄絶縁膜を形成した。

変形マグネトロン型の低温プラズマ処理方式は、他のプラズマ源方式に比べて約 $\frac{1}{10}$ の低消費電力化が図れ、今後の地球環境適応型半導体処理装置とすることができる。65 nmノード以降の将来技術では、High-k (高誘電率) 膜前処理によるトランジスタの高性能化、フラッシュメモリのONO (酸化膜・窒化膜・酸化膜) 構造形成、DRAM (Dynamic Random Access Memory) 用容量絶縁膜の形成、低温でのVLSI (Very Large Scale Integrated Circuits) 用薄膜形成への適用など、半導体プロセスへの広範な展開を可能にした。

1 はじめに

半導体デバイスの微細化に伴い、デバイスの製造工程で

の熱履歴低減への要求がますます強まっている。高温処理で対応してきた従来のプロセスに代わり、プラズマを用いることによって低温で処理できるため、半導体製造技術ではプラズマ応用技術が進展している。プロセスガスを活性化する能力

では、電子温度1 eVのプラズマは10,000 °Cの高温に相当しており、熱エネルギーでは反応しにくい反応種ガスも、プラズマ中で活性化させると容易に反応する。酸素、窒素プラズマを用いると、室温から400 °C以下の低温でも、短時間でさまざまな膜を酸化、窒化処理することができるようになる。

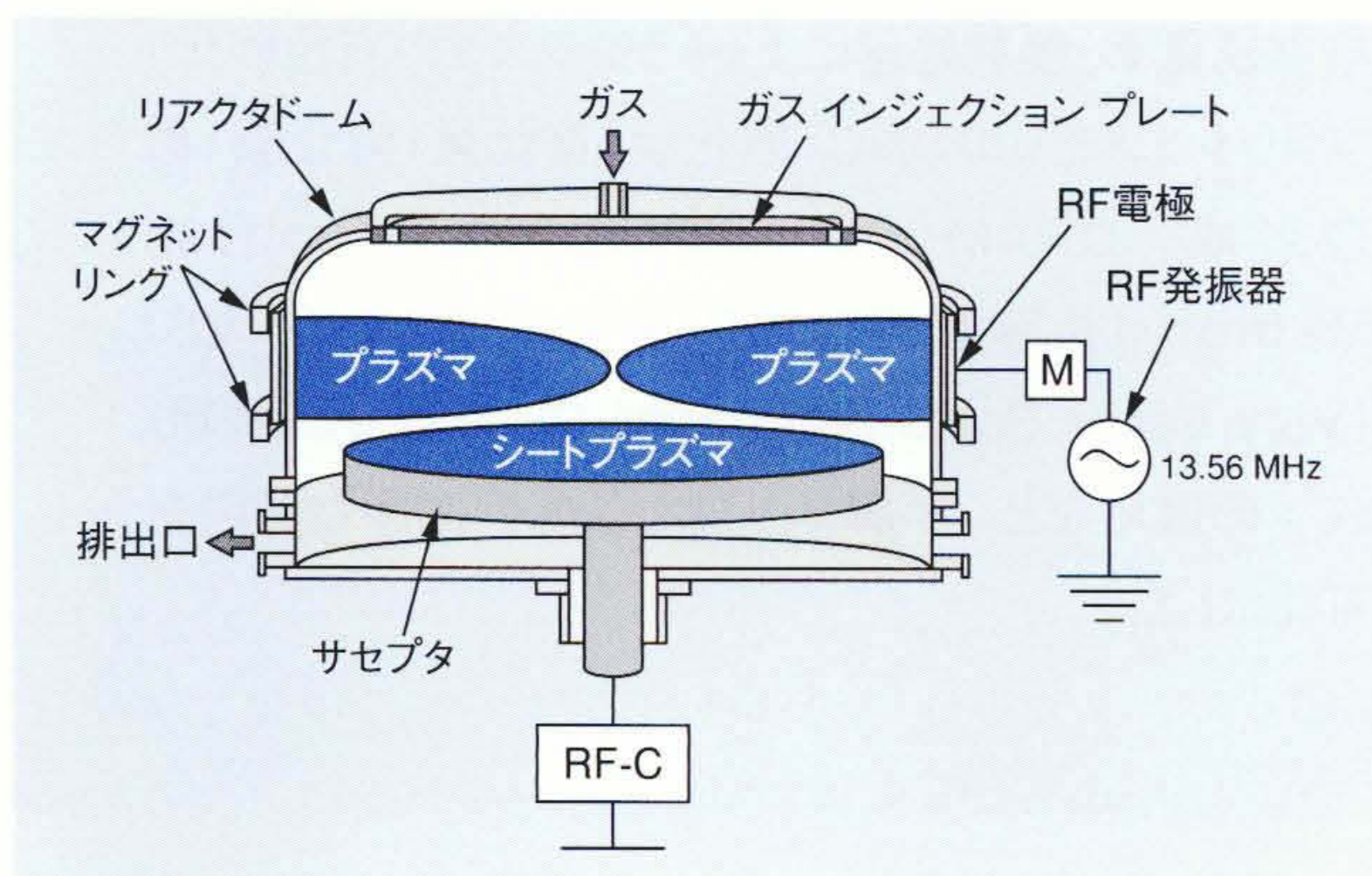
ここでは、MMT (Modified Magnetron Typed) プラズマ酸化・窒化装置とその応用について述べる。

2 MMTプラズマの生成機構および装置の概要

株式会社日立国際電気は、東北大学工学部佐藤徳芳教授の研究室と共同開発したMMTプラズマ源を用いて、プラズマ酸化・窒化装置を開発してきた。MMT方式プラズマは、従来使われているプラズマとは異なり、新しく考案された円筒形多極磁場電極を持つ変形型マグネトロン高周波放電法である。その放電メカニズムにより、本質的に広い圧力範囲で、高密度・大口径の均一プラズマを生成する^{1),2)} (図1参照)。

MMT方式では、永久磁石から生じた磁力線と、リング状RF (Radio Frequency) 電極に印加した高周波電界が相互作用して、マグネトロン放電プラズマを生成する。MMTプラズマは安定性、均一性に優れているだけでなく、基板の近くで1 eV以下の低電子温度の低エネルギープラズマを形成することができるため、ダメージフリーのプラズマ表面処理を可能にする。MMTプラズマの場合は、基板表面のプラズマ電子温度が反応室に入射するRFパワーにほとんど依存しない。このため、高RFパワーでプラズマ密度を高くした場合でも、低い電子温度を維持することができる。さらに、サセプタの下部に設けてある高周波インピーダンス制御機構 (RF-C) の制御により、基板表面に入射するイオンのエネルギーを広い範囲で制御することもできる。

MMT装置はブリッジツールコンセプトに基づいて設計され、



注：略語説明

RF (Radio Frequency), M (Matching Box)

RF-C (高周波インピーダンス制御機構)

図1 MMT反応室の概略

プラズマダメージフリーと、基板に入射するイオンのエネルギー制御が可能であり、プラズマ均一性と再現性に優れている。

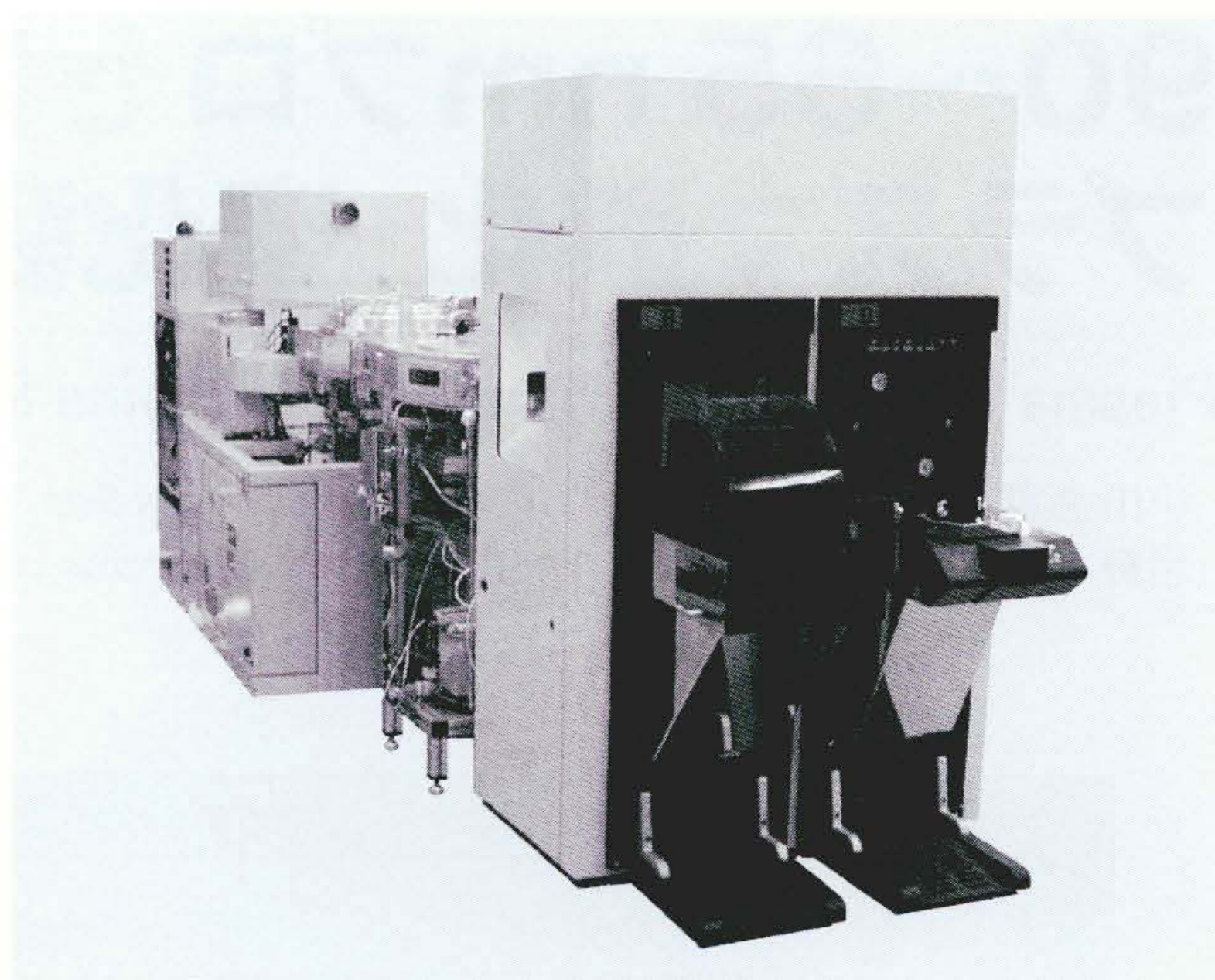


図2 MMTプラズマ表面処理装置“MARORA”の外観

200/300 mmブリッジツールコンセプトにより、高スループット、小ロットプリントを可能にする。

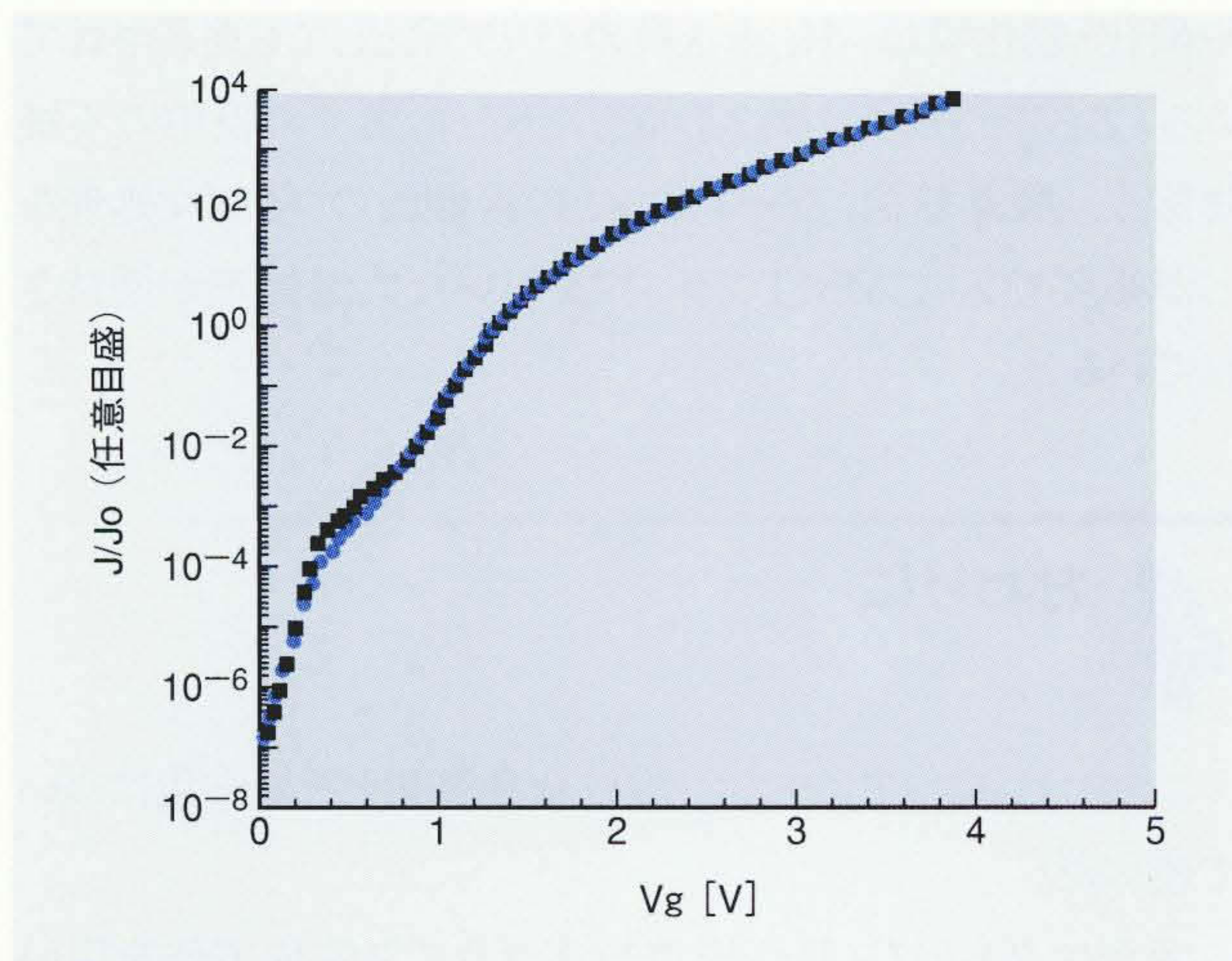
一部の部品を交換するだけで200 mmと300 mmの基板処理に対応できる。反応室はサセプタを交換するだけで200 mmから300 mmへの変更が可能である。インラインタイプのプラットフォームを採用することにより、コンパクトで高速の搬送が可能になり、窒化、酸化の単プロセスの場合、1チャンバで25枚/hのスループットが可能である。すでに製品化されたプラットフォームには2チャンバまで接続でき、装置のフットプリントは6.6m²と小さい(図2参照)。現在、ドーフトポリシリコン、High-k (高誘電率)、RTP (Rapid Thermal Process) などのプロセスモジュールとインテグレーションが可能な4チャンバクラスタ化搬送システムも開発中である。

3 MMTプラズマ源の応用

3.1 90~65 nmノード対応の薄膜ゲート絶縁膜のプラズマ酸化・窒化

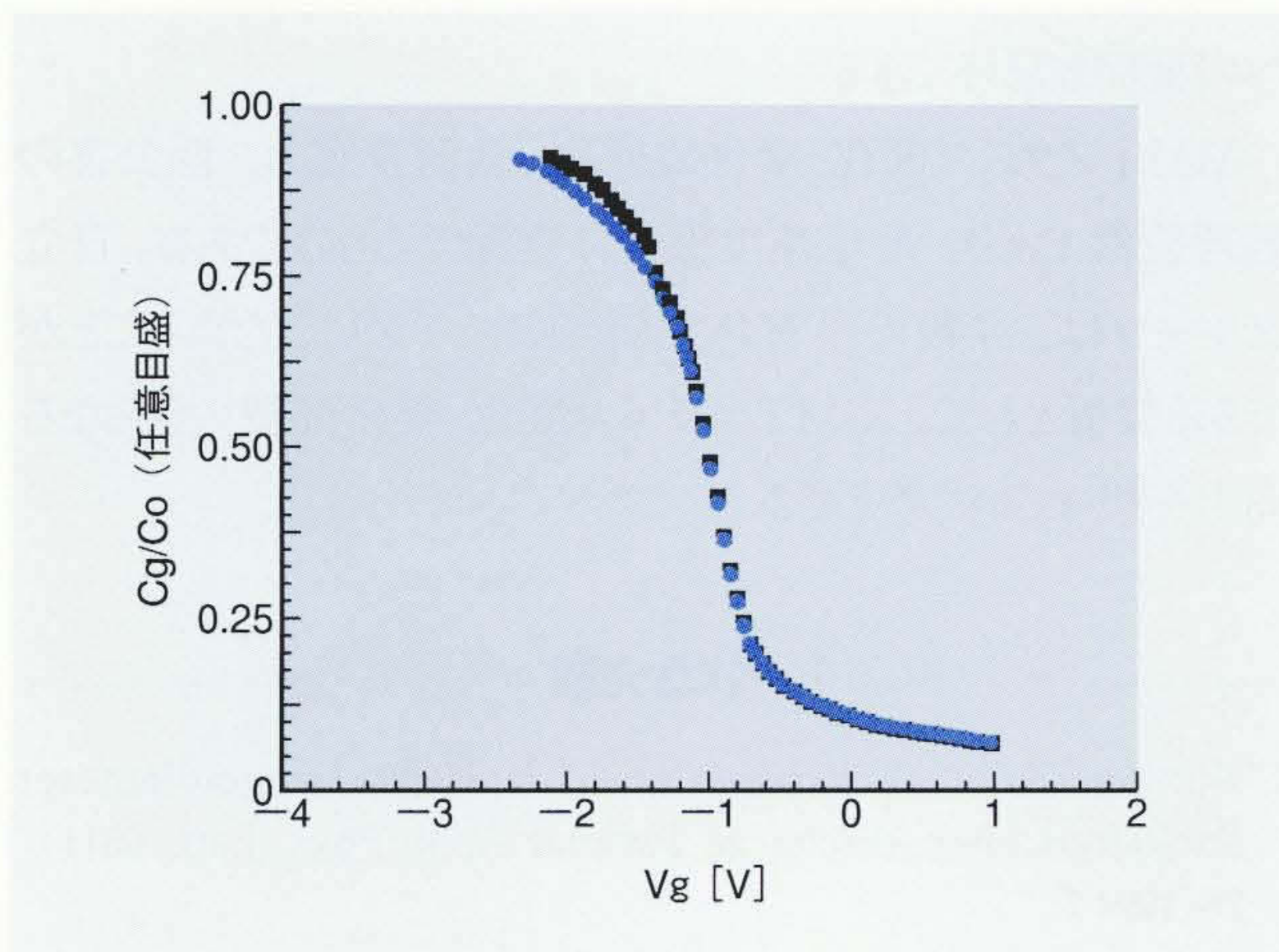
従来の高温酸化プロセスは、格子欠陥を誘発したり、すでに形成されているデバイスの不純物再拡散を引き起こしたりする。また、ウェーハの大口径化によって高温プロセスが引き起こすウェーハの反りも無視することはできない。さらに、直径300 mmの基板上に均一な薄膜を形成するためには、装置上のくふうもさることながら、その酸化反応自体が、温度のばらつきによる影響を最小限度に抑えられるような、極めて小さい活性化エネルギーを持つプロセスであることが望まれる。

MMTプラズマ源を用いると、酸素と不活性ガスの混合ガスをプラズマ化し、400 °C以下の低温でシリコン基板を酸化処理することにより、LSIのゲート酸化膜が形成できる。面内均一性を±1.5%以下にキープしながら、処理時間を変えるだけで、膜厚0.8~4.0 nmの薄膜を再現性よく形成することができる。低温処理でありながら、形成された酸化膜の膜質は、高



注：●(高温酸化)，■(プラズマ酸化)

図3 MMTプラズマ酸化膜と高温酸化膜のゲートリーク電流の比較
高温拡散で形成した酸化膜と同等のリーク電流となることがわかった。



注：●(高温酸化)，■(プラズマ酸化)

図4 MMTプラズマ酸化膜と高温酸化膜のゲート絶縁膜容量の比較
高温拡散で形成した酸化膜と同等のキャパシタンスを示す。

温で形成した酸化膜と比べて同等以上であることが確認されている(図3, 4参照)。

電子デバイスの高速化・微細化に伴い、ゲート絶縁膜の薄膜化の要求が高まっている。しかし、ゲート絶縁膜の薄膜化は経時絶縁破壊特性の低下によるデバイス信頼性確保が困難で、ストレス誘起リーク電流の増加によるデバイス性能劣化などの問題を引き起こす。さらに、ボロンドープゲート電極を用いた場合には、ボロン突抜け耐性の低下により、デバイス特性のばらつきが大きくなる。このため、90 nmノード以降の最先端デバイスでは、ゲート絶縁膜の薄膜の酸窒化技術で高速化と低消費電力化を両立するプロセスへの要求が高まっている。その対策として、窒素プラズマを用いたゲート酸化膜の窒化が有望視されている。

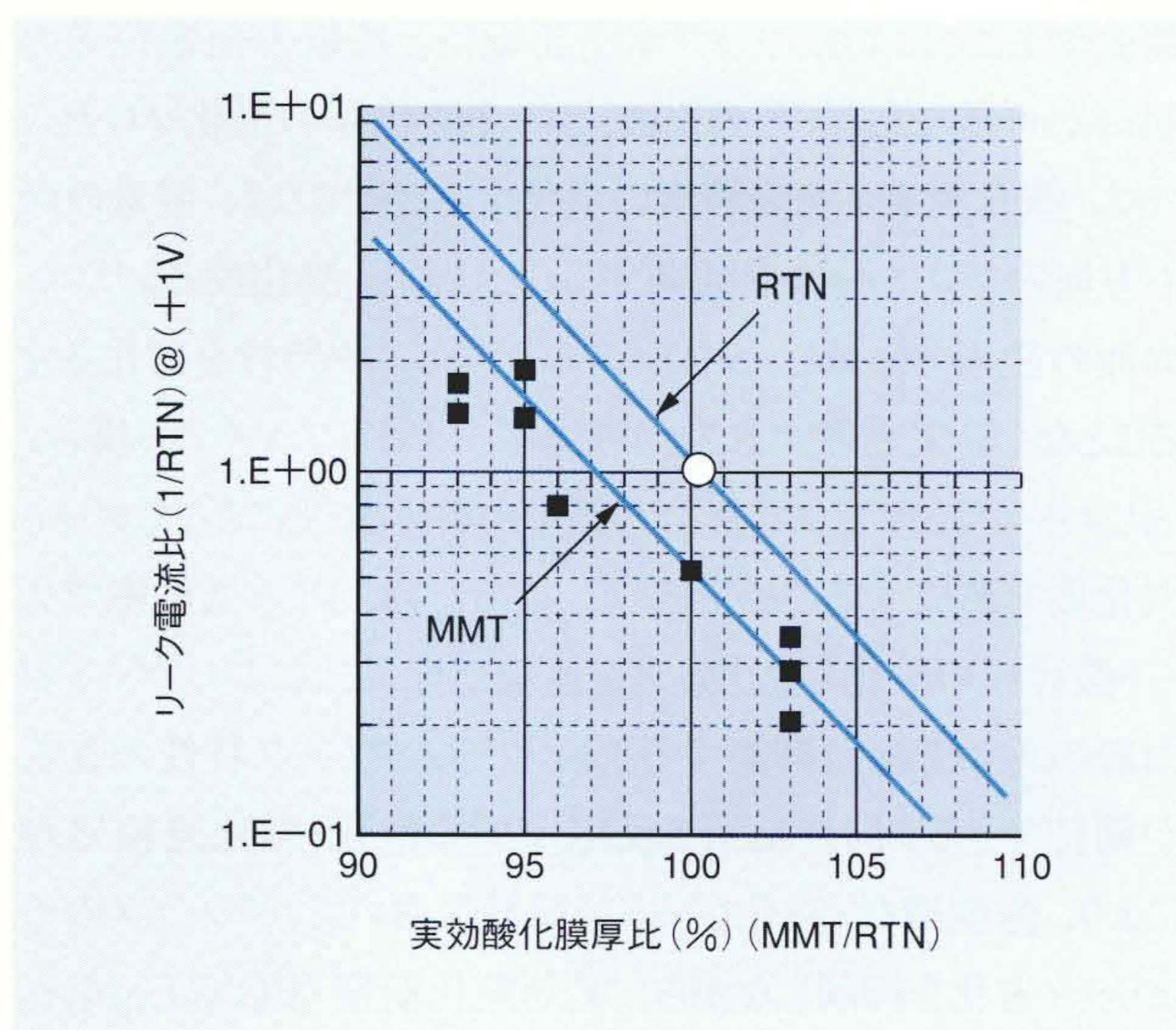
MMTプラズマ装置は、サセプタの高周波インピーダンスを

制御することにより、プラズマ空間電位と基板表面電位差の制御が可能である。そのため、ゲート酸化膜の窒化プロセスでは、酸化膜表面を高濃度に窒化するだけでなく、窒素の深さ方向のプロファイルを制御することにより、酸化膜とシリコン界面の窒素を低減し、デバイスのトランジスタ特性を劣化させることなく窒化処理することができる。MMTプラズマの場合、同じハードウェアでプロセスガスを切り替えることによってゲート酸化膜を形成することができる。このため、同一反応室でゲート酸化膜の酸化と窒化処理を連続で行うことにより、ゲート界面層の汚染を極力抑制することができ、デバイス特性の改善が期待できる。同一MMT反応室での酸化・窒化連続処理により、薄膜酸化・窒化ゲート絶縁膜において、デバイスのモビリティ劣化を抑制しながら、実効酸化膜厚(EOT:Equivalent Oxide Thickness)を1.2 nm以下まで低減し、ピュア酸化に比べてリーク電流を1けた以上低減でき、65 nmノードのプロセスに対応できる見通しが得られた。また、MMTプラズマの場合は基板に対するプラズマダメージが極めて少ないため、400℃以下の低温で酸化、窒化しても、プラズマダメージ回復のためのポストアニール処理をする必要がなく、良好なデバイス特性を得ることができる。また、アルゴンなど希釈ガスを添加する必要もなく、窒素だけでも低パワーで安定したプラズマを生成することができる。

3.2 DRAMキャパシタ絶縁膜形成への応用

400℃以下の低温で面内均一性を±2%以下にキープしながら、シリコン表面を1～50 nmの範囲で酸化、窒化処理することができる。MMTの場合は、プラズマ生成効率が高いので、低RFパワーでの高速酸化、窒化が可能である。プラズマ酸化、窒化処理は気相反応を伴わない基板表面反応処理なので、厳しいアスペクト比を持つパターン構造でもコンフォーマリよく窒化、酸化処理ができる。トレンチ構造を持つDRAMキャパシタ絶縁膜は、依然として窒化膜と酸化膜のスタック構造が主流である。通常、窒化膜はLP-CVD (Chemical Vapor Deposition)で成膜するが、ピンホールなどによるリーク電流が深刻な問題になっており、すでにCVDでの対応は限界まできている。株式会社日立国際電気は、プラズマ窒化・酸化技術を用いて、トレンチ構造キャパシタ絶縁膜形成を試みている。

DRAM (Dynamic Random Access Memory) またはメモリ混載デバイスの場合、 Ta_2O_5 のようなHigh-k膜をメモリの絶縁膜として用いるプロセスでは、熱負荷低減とデバイス性能向上のために、High-k膜を形成する前に低温で下部電極表面をプラズマ窒化処理することが有効な方法であると確認されている。さらに、High-k膜形成後の膜質改善にも低温窒素プラズマ処理が非常に有効である(図5参照)。



注：略語説明 RTN (Rapid Thermal Nitridation)

図5 リーク電流の低減効果

High-*k*キャパシタ絶縁膜 (Ta_2O_5) のバリア膜を熱で窒化して形成した場合と、MMT窒素プラズマを用いて窒化した場合の絶縁膜全体のリーク電流低減効果を表す。

3.3 その他のアプリケーション

フラッシュメモリのトンネルゲートでは、経時劣化を抑制するために酸化膜を窒化する必要があるが、MMT窒素プラズマで窒化することにより、トンネルゲート膜の大幅な信頼性の改善効果が確認できた。さらに、プラズマ酸化はフローティングゲート電極上のONO (酸化膜・窒化膜・酸化膜) プロセスにも適応可能である。

MPU用CMOSを始め、45 nmノード以降のデバイスのゲート絶縁膜として、高誘電率のHigh-*k*材料を用いることが検討されている。良好なデバイスの電気特性を確保するためには、High-*k*膜とシリコン基板の間に薄膜のインタフェースレイヤを形成する必要がある。MMTプラズマで形成した極薄酸化膜

や酸化・窒化膜は、High-*k*膜のバリア膜としても期待されている。さらに、High-*k*膜を形成した後、低温での膜中の不純物除去、酸素補給、ゲート電極との接触面のプラズマ処理などが必要であり、MMTプラズマを用いた低温処理が期待されている。

4 おわりに

ここでは、MMTプラズマ酸化・窒化装置とその応用について述べた。

変形マグネトロン型高周波放電プラズマ生成方法を用いて、ゲートの酸化・窒化処理をすることで、65 nmプロセスに対応できる見通しが得られている。その他にも、DRAMキャパシタ絶縁膜の形成、フラッシュプロセスへの適用、さらに、将来使われるHigh-*k*ゲート絶縁膜の前後処理などへの実用化や、その見通しを得ているほか、これ以外の低温プロセスへの展開も期待できる。

MMTプラズマ酸化・窒化装置は、低消費電力、低公害の処理装置であり、地球環境保全に貢献するものである。日立グループは、今後の半導体製造でのニーズにこたえることができる装置として、MMTプラズマ酸化・窒化装置のさらなる向上を図っていく考えである。

参考文献

- 1) Yunlog LI, et al.: Production of Uniform Large-diameter Radio-frequency Discharge Plasma, Appl. Phys. Lett. 65(1), 28 (1994.7)
- 2) Yunlog LI, et al.: Production of Large-diameter Uniform Plasma by Modified Magnetron-typed Radio-frequency Discharge, Jpn. J. Appl. Phys. 36, 4554 (1997)

執筆者紹介



小川雲龍

1997年株式会社日立国際電気入社、電子機械事業部 富山工場 MMTプロジェクト 所属
現在、半導体製造装置の開発に従事
工学博士
応用物理学会会員
E-mail: ogawa.unryu@h-kokusai.com



示野和弘

1992年株式会社日立国際電気入社、電子機械事業部 富山工場 MMTプロジェクト 所属
現在、半導体製造装置の開発に従事
E-mail: shimeno.kazuhiro@h-kokusai.com



佐藤徳芳

東北大学工学部 名誉教授
現在、プラズマ物理基礎の研究に従事
工学博士
応用物理学会会員、物理学会会員、プラズマ核融合学会会員
E-mail: nsato@ecei.tohoku.ac.jp



古川亮一

1990年日立製作所入社、デバイス開発センタ プロセス開発部 所属
現在、CVD・エピプロセスの開発に従事
E-mail: furukawr@ddc.hitachi.co.jp