

MRAMデバイス量産用スパッタおよびエッチング装置

松浦正道 (株) アルバック

Sputtering Apparatus and Etching Equipment for Mass Production of MRAM Devices

M. Matsuura ULVAC Inc.

Sputtering apparatus and Etching equipments for mass production of MRAM devices under development are reviewed in this paper. A semiconductor devices production sputtering tool, which is UHV (Ultra High Vacuum) compatible, should satisfy following requirements: (1) very uniform tunneling Al_2O_3 layer formation, i.e., Al film deposition of $\pm 0.5\%$ uniformity, followed by damage free oxidation of the film, (2) high productivity, i.e., high throughput and short scheduled down time of ~ 6 hrs, and (3) multi-layers film deposition of nm order thickness, where number of the layers is ~ 12 . A reactive ion etching (RIE) equipment should satisfy following requirements: (1) ferromagnetic material etching, where vapor pressures of the etching products are as low as about 1/1000,000 of Si etching products, (2) residue free on a side wall of TMR devices after etching, (3) endpoint monitor in order to stop etching just at the tunneling Al_2O_3 layer. The development of RIE tool is behind the schedule, and this is considered to hold a key to the development of MRAM devices production now.

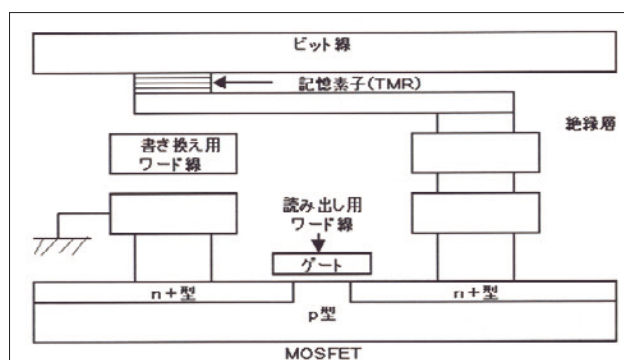


図1. MRAMデバイスの模式図

Fig. 1. Schematic drawing of MRAM device

1 はじめに

現在想定されているMRAMデバイスの代表的な構造例を図1に示す。MRAM製造プロセスとは一言でいえばMOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) の上にTMR (Tunneling Magnetoresistive) 素子を作りこむ半導体デバイスと磁性体デバイスのプロセスインテグレーションである。個々の量産技術としては前者は半導体業界においてはほぼ完成された技術であるが、後者は先行している磁気ヘッド業界においてもまだ試作段階に手が届くかといった開発要素の多い技術である。特に $<0.5\%$ の均一性と $\sim 20\text{\AA}$ と超極薄で 0.1\AA の膜厚制御が要求される成膜技術、安定なトンネル酸化膜を作るためのアルミニウム酸化技術、微細加工に不可欠な磁性体膜用リソグラフィ技術

やRIE (Reactive Ion Etching) 技術などの困難性が指摘されている。他方プロセスインテグレーションを考えた場合、トンネル接合素子の数が磁気ヘッドプロセスでウエハ一枚あたり \sim 数万個に対しMRAMでは \sim 数十億個と桁違いに多く、生産性も一桁大きいものが要求されるため、パーティクルや均一性、再現性、装置の信頼性など格段に厳しくなる。またプロセス温度一つにしても現行の半導体では約 450°C とTMRデバイスの許容温度 $\sim 350^\circ\text{C}$ を超えており、その他耐水素アニール、遷移金属によるプロセス汚染、各種材料の不純物許容量の吟味など数多くの難しい問題を抱えている。さらにMOSFETの上にTMRを作るのに不可欠な平坦化技術についても、従来のCMPの仕上げ(欠陥)レベルでnmオーダーのTMR素子を再現性・歩留り良くできるとは考えにくく、ここでもブレークスルーが必要であろう。

本解説ではこれらMRAM量産実現に向けて解決すべき各種デバイス技術・プロセス技術・装置技術のうち、生産装置技術、特にその中心となる成膜装置およびエッチング装置技術に話題を絞り以下に紹介する。

2.成膜装置

2.1 量産用成膜装置に求められる条件

従来の半導体成膜プロセスと比べTMR成膜装置が際立って異なっているのは、

- (i) 7 \sim 12層程度の多層膜、しかも各層が数 \AA 以下

と極めて薄い人工格子的な多層膜を成膜する必要があるので、多数のスパッタリングカソードあるいはガンを備えたUHV (Ultra High Vacuum) 対応の成膜装置であること。

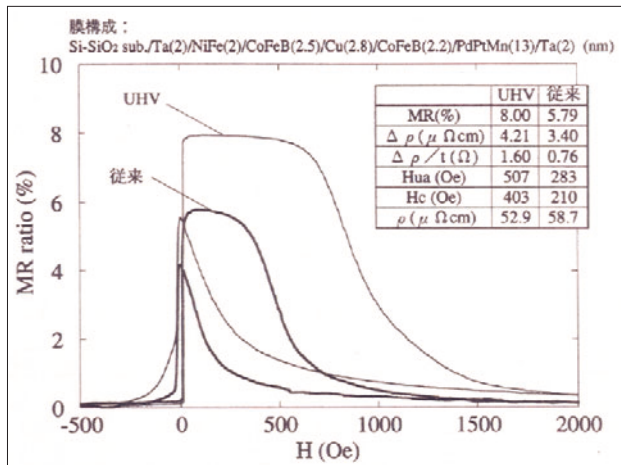


図2. 超高真空成膜によるGMR特性向上¹⁾
 Fig. 2. Improvement of magnetic properties of a GMR Film by UHV sputtering deposition¹⁾

図2¹⁾に、TMR膜とはアルミナトンネル層を除きほぼ同じ膜構成のGMR (Giant Magnetro-resistive) 再生磁気ヘッド用スピバルブ成膜における、UHVスパッタの優位性を示す。

(ii) 多層膜の途中に~20Åのアルミナトンネルバリア層が挿入されており、この層は当然このデバイスの要であり、次のようなことを留意する必要がある。

- ① この層は大気中に取り出すと、大気中の水分吸着

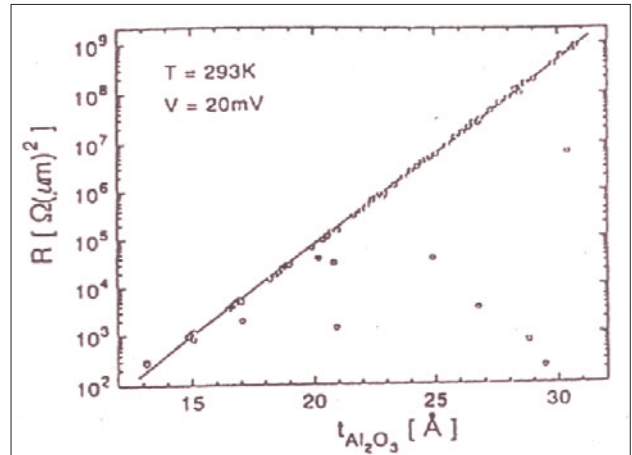


図3. トンネル接合抵抗のアルミナ膜厚依存性²⁾
 Fig. 3. Al₂O₃ thickness dependence of tunneling junction resistance²⁾

によりアルミ膜酸化条件が不安定になるので、成膜と酸化が連続して形成できる複合装置となっていること。なお酸化法としてはプラズマ酸化やラジカル酸化がよく用いられている。

② トンネルバリア層の抵抗は指数関数的で酸化層の膜厚依存性が極めて大きいため (図3²⁾ 参照、縦軸・横軸のスケールに注意)、アルミニウム膜厚分布が<0.5%と極めて均一性の良い成膜ができる装置であること。などがあげられる。

さらに半導体デバイス製造の観点より要求される共通事項としては、

- (1) パーティクルや信頼性などの点より、半導体生

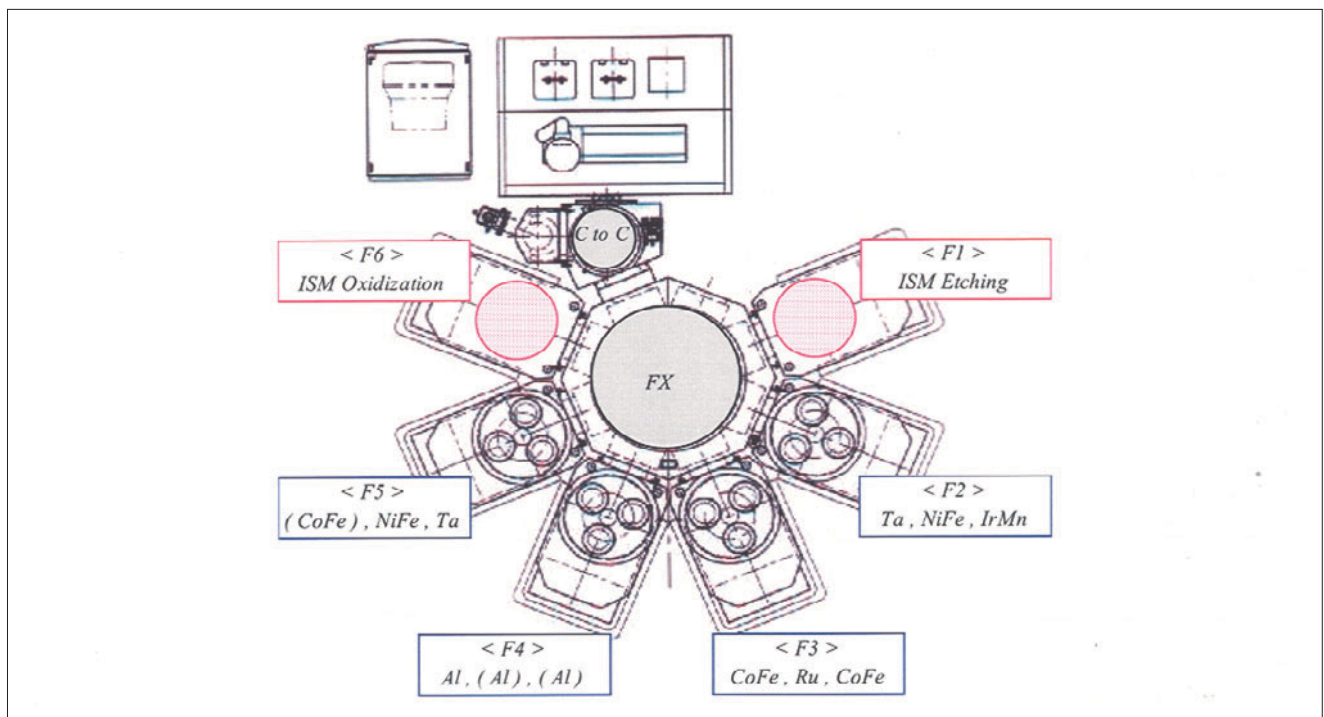


図4. MRAMデバイス生産用超高真空スパッタ装置
 Fig. 4. UHV sputtering apparatus for mass production of MRAM devices

産装置をベースにしたもの。

(2) 半導体メモリデバイス生産装置の常として生産性が高いこと。

(3) メンテナンスなどによるいわゆるスケジュールドダウンタイムが4~6時間と短いこと。

などがあり、これらの条件を満たす装置であることが求められている。これらのコンセプトを基に、現在世界の装置メーカーが量産装置開発にしのぎを削っている状況である。

これらの装置の多くは多元スパッタ装置と推定されるが、均一性が良く良質なアルミ膜を成膜できることを特長とするイオンビーム成膜装置、あるいはイオンビーム+スパッタ複合装置の開発もなされている。

以下本解説ではスパッタ装置について紹介する。

2.2 スパッタ成膜装置

図4は現在我々が開発を進めているクラスター型UHVスパッタ装置の1例である。以下ここでは本スパッタ装置を例にして、スパッタ成膜装置を用いるTRM膜作成法について紹介する。

この装置では、標準的膜構成のTMR膜、例えば基板/バッファ層 (Ta, NiFe) /反強磁性層 (PtMn) /積層フェリピン層 (CoFe, Ru, CoFe) /アルミナ層 (Al→酸化) /フリー層 (CoFe, NiFe) /キャップ層 (Ta) を、モジュール間を順次一方向に移動することにより、生産性を落とすことなく堆積できるようになっている。この装置は前項に述べた要件を十分考慮して設計されており、スループット (通常1時間あたりの処理枚数で表記) が~12枚/Hrと低い以外はほぼ要件を満たしている。この装置に使われている要素技術の概略は以下の通りである。

(1) 真空特性：

この装置はアルミニウム製で、真空チャンバー壁の表面処理や使用する部品、排気ポンプ、ガスラインなど随所に超高真空装置技術やウルトラクリーン技術が盛り込まれている。真空排気系は、クライオパネル、クライオトラップ、クライオポンプ、ターボ分子ポンプ、ドライポンプを有機的に組合わせた完全ドライシステムである。スパッタ成膜室の到達圧力は $<3 \times 10^{-7}$ Paとなっている。

図5は、ほぼ同じ槽構造のアルミニウム製成膜モジュールの排気特性を示す。大気解放後6時間で 9×10^{-7} Paに到達している。現在の磁気ヘッド用UHVスパッタ装置 (ステンレス鋼製) が1~2日かかるのに比べ、大幅にスケジュールドダウンタイムが短縮できることがわかる。

図4のようなクラスター装置の場合、基板をある成膜モジュールから次のモジュールに移動する際、コア室の真空度が悪いと、搬送の間に、堆積した膜表面に H_2O 分子が吸着し (H_2O 分圧 5×10^{-6} Paの場合、約10秒/1分子層吸着)、その上の膜の結晶成長を著しく阻害する。このためコア室のウエハ搬送ロボットは 10^{-7} Pa台の真空で作動できるUHV対応のものが必要となる。著者らはUHVロボットを用いることにより、膜磁気特性が劣化しないことを確認している。

(2) アルミニウム成膜：

前述の如くMRAMデバイス抵抗はトンネル用アルミナ膜の膜厚に敏感であり、 $\pm 0.5\%$ 程度のアルミニウム膜厚均一性が要求されている。この均一性は、基板とターゲットの中心が同軸で、面が対向している従来のターゲット/基板配置では達成困難である。このために考案されている一つの方法として、基板の中心をターゲットの中心からずらし、基板を回転しながら成

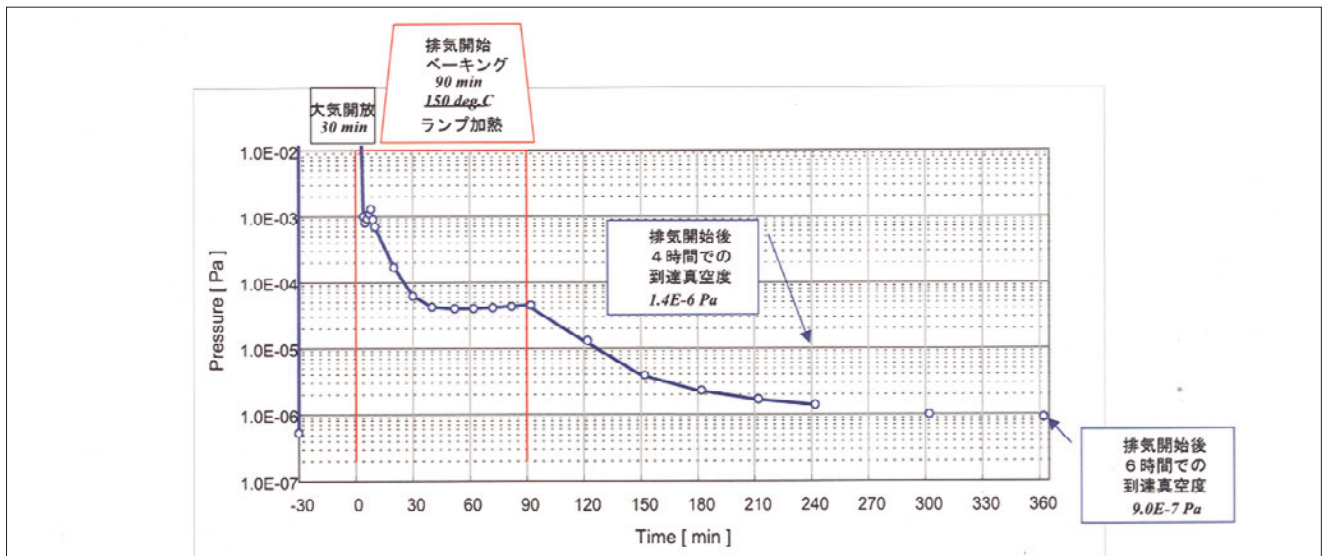


図5. アルミニウム製UHVスパッタモジュールの真空排気特性

Fig. 5. Vacuum pumping characteristic of an aluminum UHV sputtering module

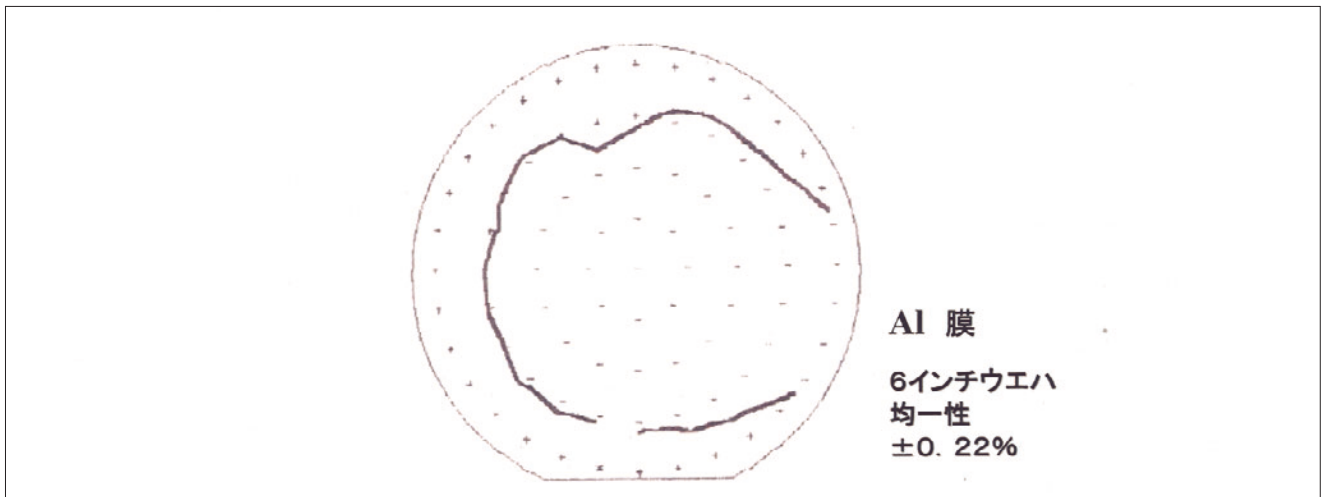


図6. オフセットしてスパッタ成膜したAl膜の均一性 (6インチSi基板)

Fig. 6. Uniformity of an Al film by off-set sputtering deposition (6 inches ϕ Si wafer)

膜するオフセット成膜法がある。図6はこの方法で6インチ基板上に成膜したアルミニウム膜の膜厚分布の例を示す。膜厚分布は4端子法で測定したものであるが、Max \pm Minで $\pm 0.22\%$ を達成している。

アルミニウム成膜では均一性以外に注意すべき点として、MR比低下の大きな原因になる磁性金属不純物の混入がある。このため磁性膜成膜室とアルミニウム膜成膜室を別にするなどの磁性膜クロスコンタミ防止対策が不可欠である。

(3) アルミニウム膜酸化：

均一性の良いMRAMトンネルアルミナ膜を得る方法として、前述のように先ず均一性の良いアルミニウム膜を成膜し、次いで均一性の優れた酸化源でアルミニウム膜を酸化する必要がある。MRAMデバイス製造には生産性などの観点より、プラズマ酸化法ないしはラジカル酸化法が採用されると予想される。ラジカル酸化法では、酸素プラズマをプラズマ発生室に閉じ込め、そこよりマルチアパーチャーを通して漏れ出でてくる中性の酸素ラジカルを用いてアルミニウム膜を酸化する。プラズマ源にはRF誘導結合プラズマ (ICP) が用

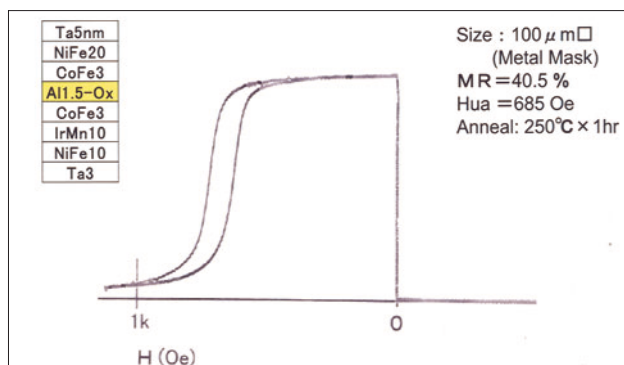


図7. ICPプラズマ酸化法でアルミナトンネル層を作成したTMR膜のMR特性

Fig. 7. MR characteristic of a TMR film of which Al layer was oxidized using ICP oxygen plasma

いられる例が多い。図7に我々がICPプラズマ酸化で得たTMR膜のMR測定結果の例を示す。ICPプラズマの均一性を良くする為、単純なRFアンテナコイルでなく種々の工夫が施されているものもあり、図4の装置でも磁石と組み合わせる方法³⁾ (ISMプラズマ) を採用している。その均一性は $\pm 3.8\%$ で、さらに高均一化の試み

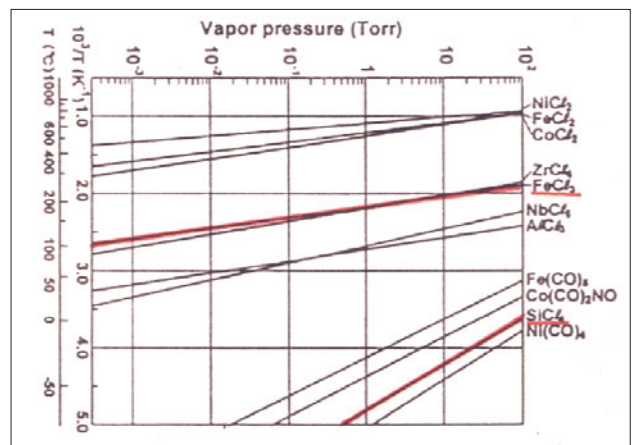


図8. 遷移金属塩化物およびカルボニル化合物の蒸気圧³⁾

Fig. 8. Vapor pressure of various transition metal chlorides and their carbonyl compounds

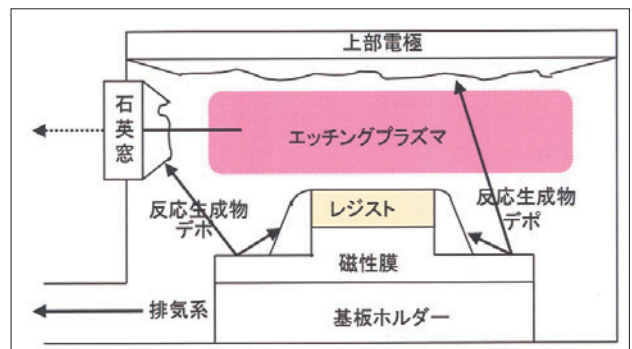


図9. 低揮発性反応生成物エッチングにおけるエッチング残渣のチャンバー内付着状況の模式図

Fig. 9 Schematic drawing of low volatile residue deposition in an etching chamber during reactive ion etching process

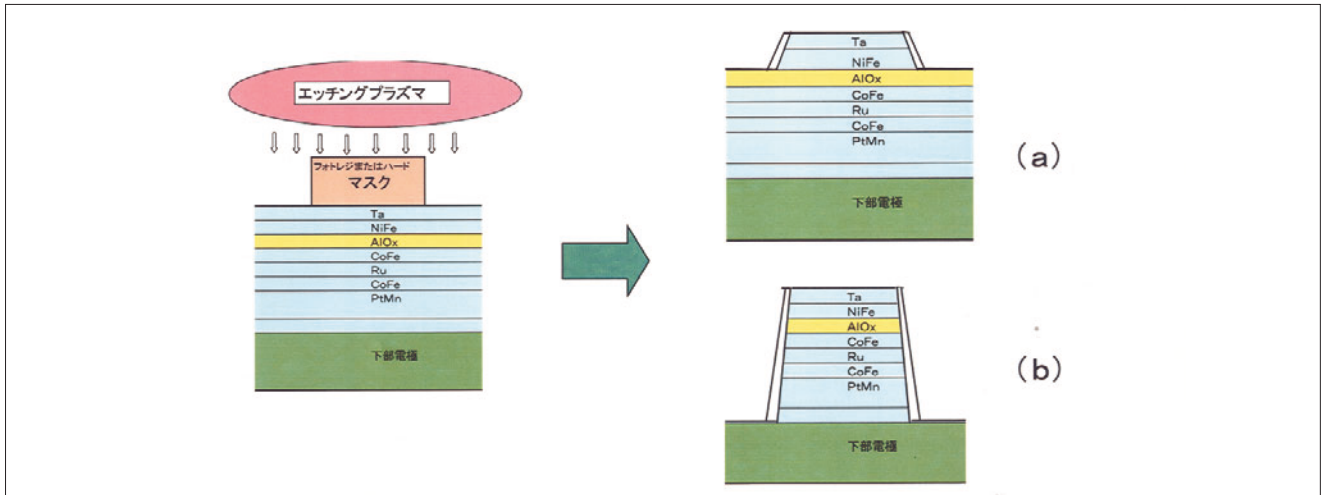


図10. TMRデバイスのエッチング加工法
Fig. 10. Etching procedures of TMR devices

を行っている。

各所で、プラズマ酸化法とラジカル酸化法の優劣の評価が行われている。我々も両方の手法によるトンネル膜へのダメージや膜諸特性評価をしているが、まだその決定的な優劣は世の中と同様に定まっていない。

3.エッチング装置

3.1 TMR磁性膜エッチングの困難性

磁性体膜エッチングの最大の問題点はRIE (Reactive Ion Etching) 用の反応生成物で高い蒸気圧を示す適当な反応ガスが見つかっていない点にある。図8⁴⁾は代表的な塩化物などの蒸気圧を示すが、例えばFeCl₃をSiCl₄と較べると室温では6~7桁も小さい。従っていきおい物理的エッチング作用を強めると図9のAr

イオンミリングでの例が示すような膜側壁や装置内壁へのエッチング生成物の膜付着の問題が生じる。膜側壁への付着は、TMRの場合アルミナトンネル絶縁膜のショートとなるので特に深刻である。これを緩和する一つの方法が反応温度を上げることで、例えば300℃ではFeとSi塩化物の蒸気圧差は3桁近くまで縮まる。またこれら従来Siデバイス製造でよく用いられてきたハロゲン系ガスに替わる、CO+NH₃系ガス⁵⁾など反応生成物が高い蒸気圧を示す新しいエッチングガス系を探索する試みがなされている。

TMRデバイスのエッチングには、大別すると図10に示す2つの方法が考えられている。この内、(a)のアルミナ層の上(～中)面でエッチングを止める方法は、TMRの極薄アルミナトンネルの絶縁がアルミナ水平面を使って行なえるため、側壁付着物によるショートを

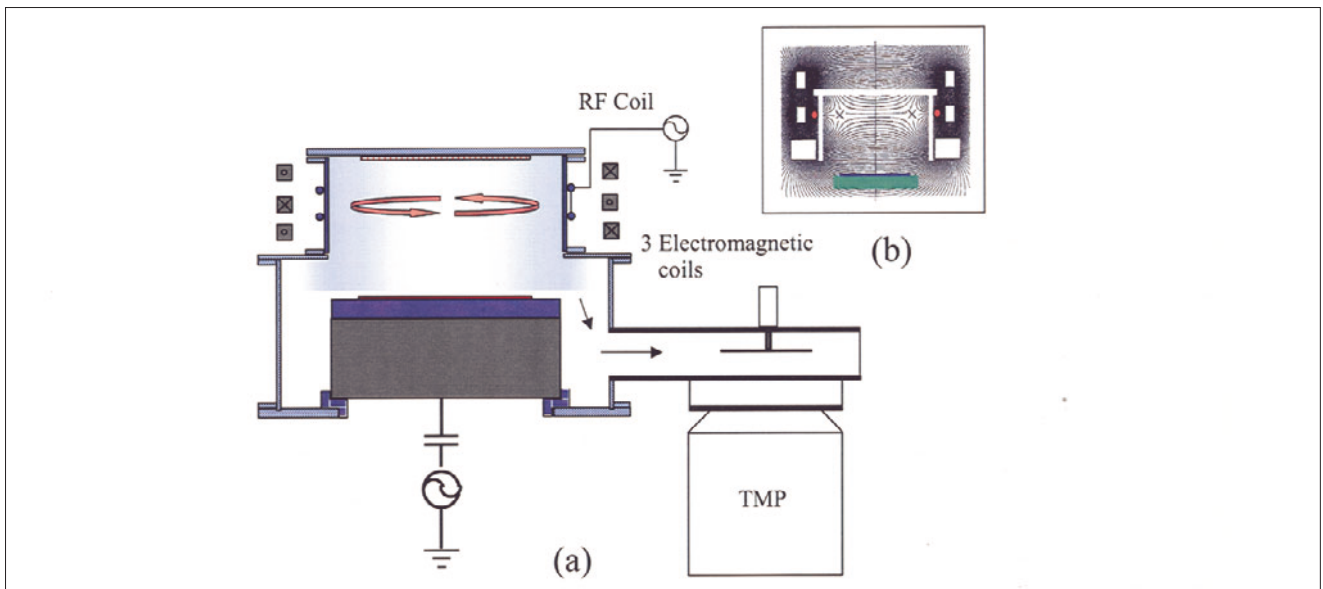


図11. NLD (Magnetic Neutral Loop Discharge Plasma) エッチング装置: (a) 装置構造図、(b) 等磁位線図
Fig. 11. NLD (Magnetic Neutral Loop Discharge Plasma) etching apparatus: (a) a cross-sectional view, (b) Magnetic equipotential

防止するには有効であろう。このようないわゆるジャストエッチをさせるためには正確なエッチング終点モニターの開発が不可欠になる。それ以外にもアルミナ膜/磁性膜のエッチング選択比を上げてアルミナ層を少しでもエッチングストップとして機能させることや、極めて均一性のよいエッチング法の開発も重要である。これは成膜装置の膜厚均一性が、現状では多くの場合エッチング装置の均一性より良好なためである。

MRAMデバイスの書込みは、図1に示すワード線とビット線に流す電流により形成される磁界でフリーの磁化方向を反転させて行なうが、この反転に要する電流はTMR素子の断面積などの形状に依存するため、エッチングによる形状の均一性や再現性が必要である。これは高集積化し素子サイズが小さくなるほどより重要な課題になると予想されている。

このばらつきを抑えるのに必要な加工精度を高めるために、パターンニングマスク材料の吟味やマスク形状加工などリソグラフィ技術の開発も必要である。先に述べたように磁性材料が難エッチング性なため、マスク材料としてフォトリソ以外にSiO₂などのハードマスクの使用も検討されている。

3.2 RIEエッチング装置

このような諸要求を満足させるエッチング装置の様子は下記ようになる。

(1) 比較的高密度なプラズマが得られ、エッチングダメージを軽減するため荷電粒子の基板入射エネルギーが制御できること。また均一性が重要である。プラズマソースとしては誘導結合のものが多い。

(2) エッチングレートをあげるため、基板温度をあげられるホットプレートを使用。また反応生成物を速やかに除去するため大排気量の排気系を取り付ける。

(3) 塩素系エッチングガスを用いる場合、塩化物は大気中に出すと吸湿して腐食するので、in situの湿式処理室(ウエットステーション)をエッチング装置に組み込む必要がある。

(4) アルミナトンネル膜上面でジャストエッチさせるため、終点制御用プロセスモニターを備えていること。終点制御モニターとしては光学式のものが多い。

現在量産用磁性膜エッチャーとされて開発中のいるものは大体このコンセプトに基づいて作られている。その例として我々が開発中のNLDエッチング装置を図11に示す。このNLD (Magnetic Neutral Loop Discharge) プラズマ⁶⁾では、エッチングチャンバー内に3つの電磁石でつくる磁気中性線にそってRFプラズマを発生し(図11 (b))、プラズマ生成機構が誘導結合とは異なっている。このプラズマの特長は、0.1Pa台の低圧放電が

可能で、電子温度が2~3eVと低く、また磁気中性線位置を最適化できるため均一性が極めてよいことがあげられる。我々はこのNLDエッチャーを用いて、高集積のMRAMの実現をするべく開発を行っている。

4.おわりに

MRAMデバイスの開発は、1995年東北大学宮崎教授グループにより実用的なTMRの発見がなされて以来、直ちにMRAM应用に取り組んだ米国が先行しており、2003年ごろまでに量産試作デバイスの開発を進めると発表されている。しかしこれまでに著者が知りえた限りでは、スパッタ成膜装置はともかく、磁性膜の反応性エッチング装置およびプロセスの開発が困難でなかなか進まず、今後のMRAMデバイス製造プロセス開発の鍵を握っていると考えられているようである。適切なエッチングガス系の開発が待たれている。

参考文献

- 1) 田中厚志：第5回ASET磁気記録研究成果報告会—40Gbit/in²用磁気記録の要素技術—, p. 62 (1998年10月)
- 2) 猪俣浩一郎、斎藤好昭、中島健太郎、砂井正之：日本応用磁気学会 第112回研究会資料, p. 35 (1999年11月)
- 3) 渡辺一弘、生田美植、遠藤光弘：特許、特開平7-161488、特開平8-316210
- 4) 市原勝太郎：日本応用磁気学会 第108回研究会資料, p. 75 (1999年1月)
- 5) 中谷 功：日本応用磁気学会 第103回研究会資料, p. 87 (1998年1月)
- 6) 陳 魏、林俊雄、伊藤正博、坪井秀夫、内田岱二郎：J. Plasma and Fusion Research, Vol. 74, p. 258 (1998)



松浦 正道 (まつうら まさみち)

1967年早稲田大学理工学部金属工学科卒業、1978年同大学理工学研究科資源および金属工学博士課程修了、1981年工学博士、1983年日本真空技術④(現アルバック)に入社、超材料研究所にてCVD、イオン注入表面改質、スパッタ成膜の開発に従事し現在に至る。応用物理学会、日本金属学会、日本応用磁気学会会員

FED レビュー, Vol.1 No.26, 2002年3月14日 第1版

* 著作権は新機能素子研究開発協会に帰属します。



この事業は、オートレースの補助金を受けて実施したものです。