

トピックス

特集：磁性材料の微細加工

磁性体薄膜の微細加工

Fabrications of Microstructures of Magnetic Materials

中谷 功 科学技術庁金属材料技術研究所

I. Nakatani, National Research Institute for Metals

Microfabrication techniques for magnetic materials will open a new field of research and application of magnetic materials, and will become a crucial process for future magnetic devices which include high-density magnetic recording heads, high-density patterned media, magnetic quantum devices, micromagnetic devices, etc. The microfabrication technique consists of the process of pattern definition, e.g. electron-beam writing, followed by the process of the pattern transfer. Critical issues of the microfabrication process for magnetic materials is the pattern transfer technique of the reactive-ion etching. This paper reviews the recent advance of the microfabrication for the magnetic materials. An emphasis is given to the reactive-ion etching methods that has been tried in the past experiments and that has been newly developed in recent experiments.

Key words: magnetic material, microfabrication, electron-beam writing, reactive-ion etching

はじめに

磁性体材料の微細加工技術はバブル磁区の駆動のためのパーマロイ磁気回路が、1960年代の末頃、光リソグラフィと湿式エッチング法により作製されたのが最初である¹⁾。現在でも、光リソグラフィとアルゴンイオンミリング法あるいはメッキ法を組み合わせ、薄膜磁気ヘッド、磁歪センサー、マイクロトランス、マイクロインダクターなどがつくられている。磁性体の微細加工技術は現在そのサイズがやっと数ミクロンの領域に入ったところで、半導体の微細加工技術に比べると、1キロビットのシリコンMOSFETメモリが発表された1970年頃に相当しており、約4半世紀遅れていると思われる。このように磁性体に対する微細化の指向が遅れていることは意外に思われることであるが、その理由は、磁性体材料は半導体材料に比べるとはるかに種類が多く、多彩であるので、磁気デバイスの機能性を追求するのに、半導体におけるように一定の素材に加工や装飾を施して目的を達成するよりも、むしろ新しい素材の開発により解決してきた現在までの発展の歴史によっていると思われる。また微細パターンの正確な転写技術として半導体SiやGaAsで大いに成功した反応性イオンエッチング法が遷移金属元素を主成分とする磁性体

では容易でないことも、磁性材料の微細加工を遅らせてきた要因の一つである。現在に至って、磁性体の微細加工技術の開発を促している要因の一つは、高密度磁気記録用のスピナル磁気ヘッドならびにパターンドメディアなどの高密度磁気記録媒体のいっそうの高密度化の要求である。他の重要な要因は、1980年代の後半から始まったスピナル磁気抵抗効果^{2), 3)}、スピナル効果⁴⁾、スピナル極電子トンネル効果⁵⁾など磁性体の基礎ならびに応用分野における新しい展開である。これらの現象は微小なサイズの磁性体に特徴的な量子効果に基づくものであり、磁気の根元である交換相互作用そのものを制御したり、スピナル極電子の運動を制御することにより発現する現象で、今まで磁性材料の応用でもっぱら用いてきた保磁力や残留磁化など技術磁化にかかわる古典的な現象とは本質的に異なる現象である。このような量子効果の研究やそれを応用した磁気デバイスの実現には磁性材料のナノメートルサイズの微細加工技術が必須となってくる^{6), 7)}。

磁気素子が半導体素子と異なる点は三次元的な構造をもつことである。書き込み用の薄膜コイルと読み出し用のスピナル素子が結合した高密度磁気記録用磁気ヘッドは複雑な三次元的構造物であり、その他、CPP構造のGMR素子、またコアとその周囲にコイルを巻き付けたマイクロトランスなど、いずれも三次元的な構造をもっている。そのため磁性体の微細加工技術はプレーナー技術だけでは不十分なことは疑う余地がなく、微細多層化技術が将来の開発課題であろう。

磁性体の微細加工プロセスは化学的組成、結晶構造において多種類にわたる磁性体に対して汎用的であることが望ましい、それと同時にマスク物質とそれぞれの磁性体との間で、また種類の違う磁性材料間で適切な選択性がなくてはならない。微細加工の対象となる磁性体の多くは多結晶体であるから、結晶粒のサイズ、結晶方位による化学的性質の違いなどを考えると、単結晶を主な加工対象としている半導体の微細加工に比べて問題がいっそう複雑である。磁性体の微細加工は以上のような問題を考えると、アルゴンイオンミリング法のような物理的エッチング法ではなく、狭く深い加工が可能であり、物質に対する選択性がある反応性イオンエッチング法のような化学的作用をもった洗練されたエッチング法が半導体の場合以上に重要になっ

てくと思われる。

1. 磁性体のマイクロリソグラフィ

マイクロリソグラフィはFig.1に示すとおり、レジスト膜上への図形形成と磁性体薄膜への図形転写という二つのプロセスを組合せて行われる。図形の形成は電子線描画法あるいはイオン線描画法により行われる。両者ともそれ自身に図形を発生する機能があり、目的とする図形のデータを入力し、それに忠実に電子線あるいはイオン線をレジスト膜上に走査し、露光するものである。それらの分解能の限界は両者ともサブ10 nmである⁸⁾。現在のところ電子線描画法がイオン線描画法に比べて信頼性を含め完成度が高く、ネックになっていた小さなスループットは整形ビームを用いる方法、部分一括露光法⁹⁾、電子線鏡筒アレイを用いる方法¹⁰⁾などが開発され、量産的なレベルにまで改善されている。電子線描画法については本学会誌解説⁶⁾に詳しく述べられているので、ここでは省略する。

転写技術は描画で作製したレジスト図形を加工対象の薄膜などに写し、目的の素子を形成する過程である。転写法にはFig.1に示すように、エッチング法、リフトオフ法、およびメッキ法がある。エッチング法は基板上に作製した磁性体薄膜に直接レジストを塗布し、レジスト膜に図形を形成した後、レジスト図形をマスクとし、エッチングによりその下の磁性体薄膜に図形を転写し、つづいてレジストを別のエッチング法により除去するプロセスである。エッチング法としては、後で詳しく述べるように反応性イオンエッチング法、アルゴンイオンミリング法、および湿式化学エッチング法などがある。反応性イオンエッチング法は

微細加工には最も有力な転写法であるが、磁性材料に対しては反応性イオンエッチング法が困難なことから、主として後二者の方法で転写が行われているのが現状である。

一方、リフトオフ法⁶⁾やメッキ法¹¹⁾では、基板上に塗布したレジスト膜に図形を形成した後に磁性体薄膜をそれぞれ真空蒸着法、あるいはメッキ法により形成した後、有機溶剤による溶解などによりレジストを除去する。ここではレジストパターンは磁性体膜に対してフレームの役割をなしている。したがって先のエッチング法で作製する図形とは相互にネガとポジの関係にある。リフトオフ法では回り込みが少ない真空蒸着法などにより磁性体膜を形成してはならない。また作製した磁性体の微小構造体にバリが生じやすいと同時に深い構造を作製することが困難である。メッキ法はアスペクト比の大きい深い構造体をつくることができるが、ディープサブミクロン以下の狭い幅の加工は困難であると考えられている。

2. エッチングによる転写技術

2.1 エッチングにおいて必要な条件

磁性体に対して有効なエッチング法を開発することは磁性体を微細加工する上で決め手となる重要な課題である。微細加工のためのエッチング法で必要とする一般的な条件は、エッチングの速さが大きいこと、異方性が高いこと、マスクに対して選択比が大きいこと、再付着が少ないこと、化学的汚染ならびに結晶学的損傷が小さいこと、さらに大面積が均一にエッチングされることなどである。

磁性薄膜のエッチング速さは速いほどよいわけであるが、0.1 $\mu\text{m}/\text{min}$ 程度の速さが実用性の下限のようである。

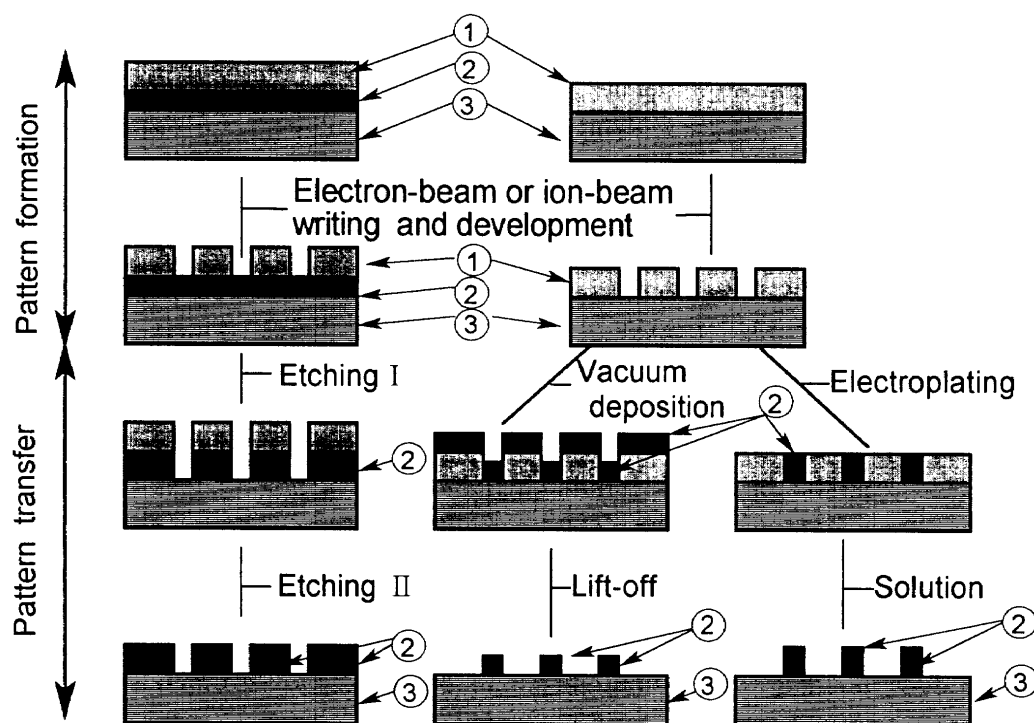


Fig. 1 Schematic representation of lithography processes: ①resist resin; ②magnetic film; ③substrate.

異方性は、Fig. 2 に示す模式図のとおり、エッチングの方向性のことである。マスクに覆われていない部分から等方的にエッチングが進行する等方性エッチング (Fig. 2(a)) に対して、異方性エッチング (Fig. 2(b)) はマスク面に対して横方向より縦方向のエッチング速さが圧倒的に大きいエッチングのされ方である。加工しようとする線幅が小さくなるのに伴い、また深い加工を必要とするとき、異方性が高いことが重要になってくる。なおエッチングの異方性は側壁面が基板面に対して張る角度 θ により評価される。選択比はエッチング対象物質のエッチング速さのマスク材料のそれに対する比であり、選択比が大きいことはマスクの形状を正確に転写するために必要なことである。選択比が小さい場合にはエッチングプロセス中にマスクの後退が起こり、深く鋭い形状にエッチングすることが困難である。

先に述べた 3 種類のエッチング方法の特徴を化学的作用と物理的作用の座標で表現した図が Fig. 3 である。湿式化学エッチング法は酸やアルカリ水溶液と加工対象物質との化学反応を用いてマスクで覆われていない個所を溶解する方法で、純粋に化学的な方法である。湿式化学エッチング法は物質の種類、それに含まれる不純物の濃度差、結晶方位の違いなどにより強い選択性が得られること、ならび

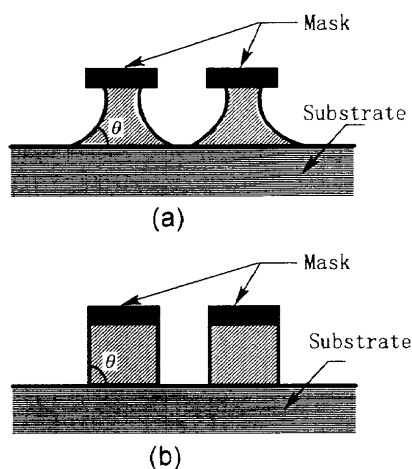


Fig. 2 Schematic illustration of (a) an isotropic and (b) an anisotropic etching.

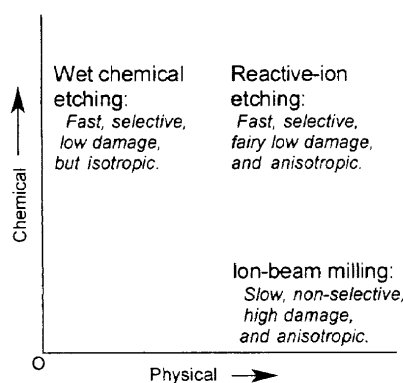


Fig. 3 Reactive-ion etching combines the chemical and the physical etching.

に処理速さが大きいことなどの特徴をもつ。しかしながらエッチングが等方的に進むので、微細加工には不向きである。そのためリソグラフィが用いられるようになって主流技術ではなくなった。

一方、イオンビームミリング法は電界で加速されコリメートされたアルゴンイオンなどを加工対象物質にあて、そのスパッタリング作用により、マスクで覆われていない個所をはぎ取る方法であり、純粋に物理的な方法である。この方法では、ある程度のスパッターイーールドをもつ物質であればほとんど何でもエッチングすることができる代わりに、物質の種類やそれに含まれる不純物の種類などによる選択性は得られない。またこの方法は加工対象物質に結晶学的損傷を与えやすいので、構造敏感な物質に適用することは好ましくない。イオンビームミリング法によるエッチング形状はスパッターイーールドの入射角依存性を反映した形になるので、原理的に高い異方性を示さない¹²⁾。そのため実際にはイオンビームに対して基板法線を傾けながらミリングを行い、異方的な形状に近づけるようにしている¹³⁾。エッチングの速さは化学的な方法よりはるかに小さい。

反応性イオンエッチングは、次節で述べるとおり、化学的作用と物理的作用が合わさって進行する作用であり、微細加工エッチングの要求条件を最もよく満足する方法である。

2.2 反応性イオンエッチング法による転写技術

反応性イオンエッチングの原理を模式的に Fig. 4 に示す。反応性のガス XY を反応容器に導入しながら排気し、

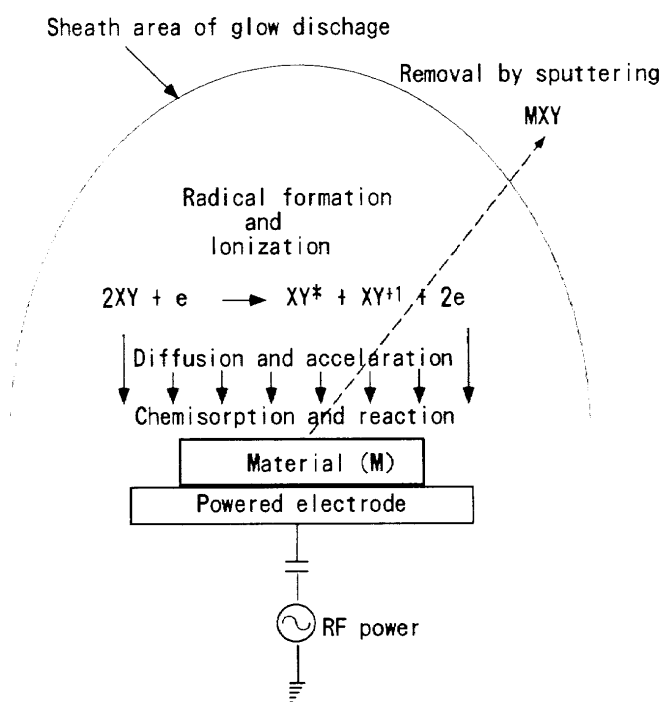


Fig. 4 Schematic view of the reactive-ion etching.

反応容器全体を接地し、それと絶縁した電極上に加工対象物質を保持し、その電極に高圧高周波を加えることにより、反応容器内のガスは電離し、グロー放電プラズマが形成される。イオンと電子の移動度の差により高周波電極は負に帯電し、その周囲に電位勾配が大きいシース領域が形成される。シース領域の中でガス分子 XY は電子、イオンとの衝突励起を受け、反応性に富んだラジカル XY^* とともにイオン XY^{+1} が生成される。 XY^* は拡散により材料表面に到達し、材料 M と反応し、結合エネルギーの小さい表面反応層 MXY を形成する。材料はシース領域の電界により垂直に加速されたイオン XY^{+1} のシャワーに曝されているので、結合が緩んだ表面反応層はスパッタリング作用、あるいは真空中への蒸発作用により除去されていく。このようにして反応性イオンエッチング法では材料のエッチング速さが横方向よりも縦方向の方が速くなり、異方性が得られるわけである。したがって一般にプラズマの圧力を低くしたとき、エッチングの速さは減少するが、イオンの平均自由行程が長くなり、イオンが材料表面に垂直に当たる割合が増加するので、加工の異方性はより強くなる。以上の作用は通常冷却された基板の上で進行する。

ここで、表面で形成される反応物質の結合エネルギーが小さいことは、一般にその物質が低い融点および沸点をもち、高い蒸気圧をもつことで評価することができる。反応性イオンエッチング法で一般的なハロゲンガスを用いた場合に、材料表面で形成されると思われる種々の金属ハロゲン化物の化学的性質を比較すると、強磁性合金のベースの元素である鉄族遷移金属 Cr, Mn, Fe, Co, および Ni に加え反応性イオンエッチング法が困難なものとして知られている導電材料の Cu はそのハロゲン化物が例外なく高い融点と沸点をもち、常温で低い蒸気圧を示す。またそれらの蒸発熱が大きいことが特徴である。すなわち、これらの化合物がプラズマ化学反応により材料表面に形成された場合、それらは除去されにくいことを示している¹⁴⁾。ただし強磁性合金ベースに添加して用いられる遷移金属 Ti, V, Zr, Nb, Pd, Hf, Ta, W, Pt などと比較的反應性イオンエッチングを受けやすいと考えられる¹⁴⁾。一方、半導体材料は、そのベース元素である Si, Al, Ga, In, P, As, Sb などの塩化物は昇華性または揮発性が強く、塩素系ガスを用いた反応性イオンエッチングに適した材料であることが理解される¹⁴⁾。この点が磁性体のエッチングが半導体技術の延長線上では解決できない理由である。磁性体に対して有効な反応性イオンエッチング法としては別の反応系を考えなくてはならない。

3. 一酸化炭素プラズマを用いた反応性イオンエッチング

金属カーボニル ($M_m(\text{CO})_n$) は原子価 0 の遷移金属原子 (M) に一酸化炭素 (CO) が炭素上の孤立電子対を与えて配位した共有結合性の錯化合物であって、遷移金属に限りこ

の種の化合物を形成する。金属カーボニルは常温で液体または固体の安定な化合物であり、遷移金属の化合物としては異例の強い揮発性または昇華性を有している¹⁴⁾。例えば鉄カーボニル ($\text{Fe}(\text{CO})_5$) の蒸気圧は水とほぼ同じである。そのほか遷移金属のビスシクロペンタジエニル錯塩 ($(\text{C}_5\text{H}_5)_2\text{M}$)、ベンゼン錯塩 ($(\text{C}_6\text{H}_6)_2\text{M}$) などの遷移金属有機化合物も比較的安定で蒸気圧が高い化合物である。

Ni-Fe 合金の反応性イオンエッチングを、古く CO-Ar 混合ガスプラズマ¹⁵⁾、あるいは $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-O}_2$ 混合ガスプラズマを用いて行った研究¹⁶⁾ がなされている。これらは上記の遷移金属錯化合物の生成を予想して試みられた例である。しかしながらそれらの方法ではエッチング速さの著しい向上は認められず、よい結果が生まれなかった。この理由は CO ガスあるいは CH_4 がプラズマ中で分解し、遊離した C が遷移金属カーバイトという形で被加工物表面を覆うためだと考えられている。磁性材料に対する反応性イオンエッチングに関して、最近、一酸化炭素 (CO) ガスとアンモニア (NH_3) ガスのプラズマを用いる方法が研究され、電子線描画法とそれを組み合わせて Fe, Ni-Fe 合金、ならびに Co-Cr 合金の超微細加工がなされている^{17), 18)}。この方法はエンハンサとして NH_3 を使うことにより、CO 分子の分解を防ぎ、CO ガスプラズマによる遷移金属カーボニルの生成効率を高めようという実験である。この実験において用いられた装置は、Fig. 5 に示すとおり、13.56 MHz の容量結合型平行平板電極の RIE 装置である。試料を保持するカソードは水冷され、カソードの有効面積は 4000 mm^2 である。またカソードとそれに対向した接地電極間の距離は 27 mm である。なおカソード、接地電極、真空槽の内張り板、ならびにシャッターなどプラズマに接触する

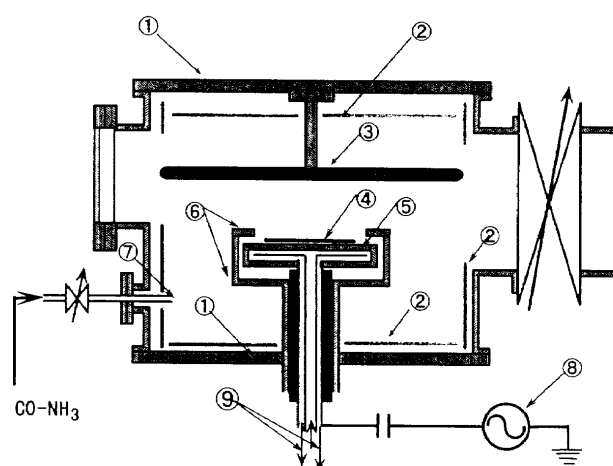


Fig. 5 A diagram of the reactive-ion etching reactor equipped for magnetic materials: ① reaction chamber (steel); ② inner wall plate (Ti); ③ grounded electrode (Ti); ④ sample susceptor (Ti); ⑤ powered electrode (Ti); ⑥ earth shield (Ti); ⑦ reaction gas nozzle (Ti); ⑧ 13.56 MHz rf power; ⑨ coolant.

内部構造物は純チタン製である。

加工対象物質はコーニング 7059 ガラス基板上にスパッタ法により作製した Fe 薄膜, Co 合金の代表として Co-9.8%Cr 薄膜ならびに Ni 合金の代表として Ni-20%Fe (80 パーマロイ) 薄膜である。それらの薄膜上に、電子線リソグラフィとリフトオフ法により、種々のサイズの多数個の矩形 Ti パッドのマスクを作製した。

CO ガスに添加する NH_3 ガス濃度を变化させ、パーマロイに対するエッチング速さを測定した一連の実験から、CO 単体、あるいは NH_3 単体プラズマを用いたときはほとんどエッチング作用を示さないのに対して、両者を混合して用いたとき、エッチング速さが著しく増大し、40~50 mol% NH_3 -CO のガス組成で極大を示すことが実験的に示されている¹⁷⁾。この事実は CO と NH_3 が共存することが

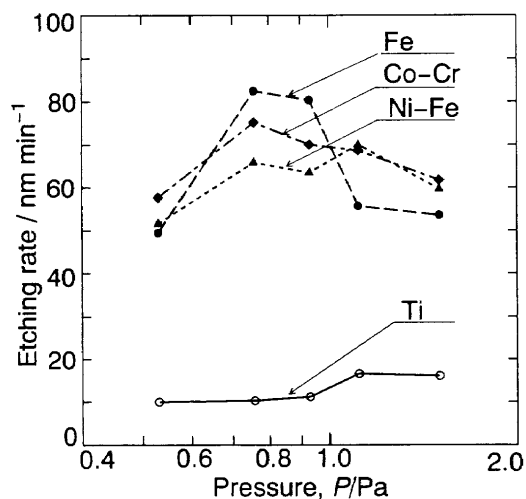


Fig. 6 Etching rate vs. pressure: The reactor is operated at $3.7 \times 10^4 \text{ W/m}^2$.

パーマロイの反応性イオンエッチングにおいて本質的に重要であることを意味している。

Fig. 6 は最も効果が大きい 48 mol% NH_3 -CO の混合ガスを導入し、 $3.7 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ の高周波電力で、種々の圧力のもとで行った上記の Fe, Co-Cr, Ni-Fe に対するエッチング速さを示したものである。また比較のためにマスクとして用いた Ti 薄膜に対するエッチング速さも同時に示した。Fe, Co-Cr, Ni-Fe に関してエッチング速さは圧力約 0.8 Pa 近傍で極大を示し、それぞれ 83, 75, および 65 nm である。また Ti に対する選択比は 7~8 である。圧力がより高くなると、プラズマのイオン密度は増大するが、エッチング速さならびに Ti に対する選択比はむしろ減少する傾向が見られる。

Photo. 1 はエッチング速さが極大を示す 0.76 Pa の圧力で、 2.5×10^4 および $3.7 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ の電力のもとでそれぞれ反応性イオンエッチングを行ったとき、各々の材料のエッチングプロファイルを示した走査型電子顕微鏡写真である。Fe は側壁の形状は乱れており、鋭いエッチング形状を呈さない。またエッチングが進行していく際の Fe 表面も著しくラフな形状を呈している。その傾向は電力密度が大きい場合により顕著である。一方、Co-Cr ならびに Ni-Fe については側壁の乱れは少なく、比較的鋭い形状を得ることができることがわかった。両者について異方性を表す側壁の傾斜角は約 74° であった。

以上述べてきたように、チタン製の反応容器と、CO- NH_3 混合ガスプラズマを用いる方法により Co および Ni を主成分とする磁性材料は有効な反応性イオンエッチングが可能である。一方、Fe を主成分とする合金系についてはエッチング条件の改善が必要である。いずれの合金系についても、プラズマのイオン密度を大きくしながら、エッチ

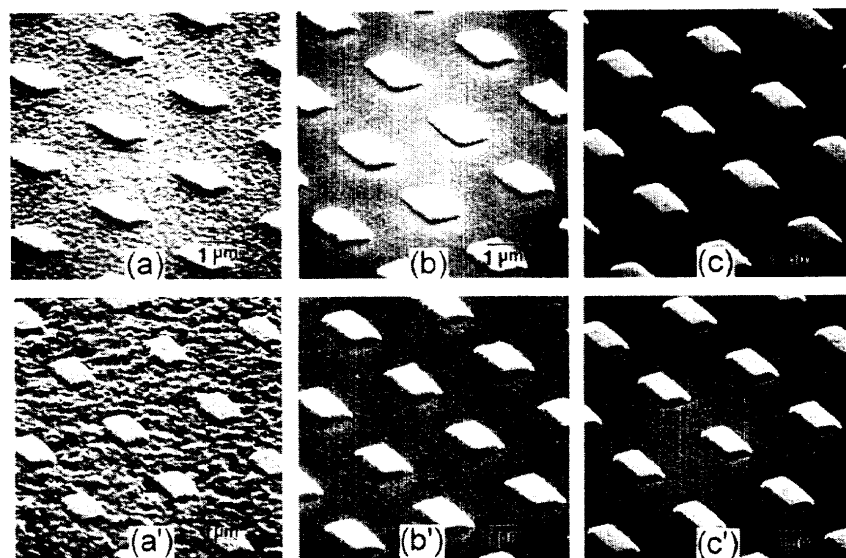


Photo. 1 Reactive-ion etching profiles: (a) (a') Fe, (b) (b') Co-10%Cr, and (c) (c') Ni-20%Fe; (a) (b) (c) etched by the rf power of $2.5 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ and (a') (b') (c') etched by $3.7 \times 10^4 \text{ W/m}^2$.

ング速さをさらに大きくするとともに、異方性をさらに強くするための検討が今後必要である。またこの研究では NH_3 を CO 系プラズマ化学反応のエンハンサとして用いたが、同様な作用を果たす他の分子種の検討も必要である。

4. 反応性イオンエッチング法におけるいくつかの問題

4.1 再付着

再付着は被加工物質あるいは反応生成物がイオンのスパッタリング作用により側壁に再付着する現象であり、イオンミリング法のように物理的なエッチング法ではほとんどといってよいほど必ず起こる現象である。その断面形状を模式的に Fig. 7 に示す。再付着が著しいとき、マスクを除去した後にバリ状の耳 (selvedge) が残る。Photo. 2(a) および (b) は CO-NH_3 プラズマを用いた Ni-Fe 合金の反応性イオンエッチングにおいて、成分ガスの流量比 $V_{\text{CO}}/(V_{\text{CO}} + V_{\text{NH}_3})$ をそれぞれ 0.53 および 0.75 としてエッチングを行ったときの再付着層の形態を示した写真である。CO 濃度が高い場合は再付着層が著しいのに対して、 NH_3 濃度が高くなるのに伴い、再付着層は減少する¹⁹⁾。

4.2 ローディング効果

ローディング効果は一つの反応槽に同時に多量のウェハーを装填したとき、少量のウェハーを装填したときよりエッチング速さが減少するという現象のことである。これはプラズマに接触しているエッチング対象物質表面に対して、中性活性種が欠乏することによっている。同様な効果

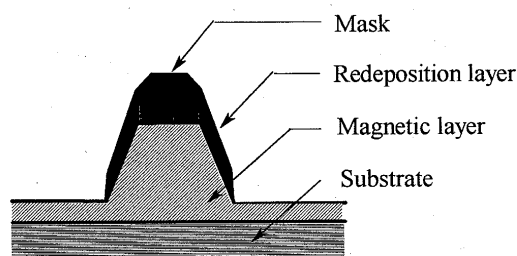


Fig. 7 Schematic illustration of the redeposition.

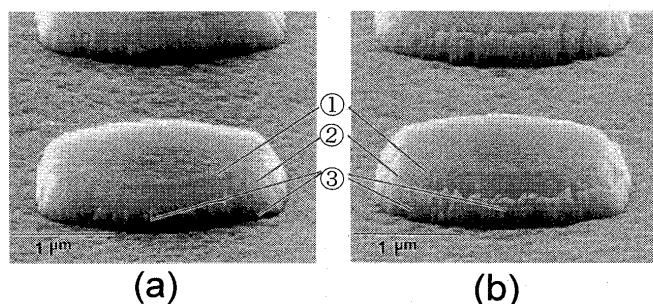


Photo. 2 Redeposition layers on side walls of small rectangular permalloy dots etched with plasma (a) $\text{CO}/(\text{CO} + \text{NH}_3) = 0.53$ and (b) 0.75: ① titanium mask; ② permalloy; ③ redeposition layer.

は反応槽内壁や反応槽内部の構造物表面で消耗する中性活性種についても考慮しなくてはならない。磁性体に対するエッチング速さを大きくしたいとき、鉄族遷移金属を成分とするステンレススチール製の反応槽を用いることはローディング効果の点から好ましくない。ローディング効果によるエッチング速さの減少を防ぐためには、同じ動作圧力を実現するのに、大量の反応性ガスを導入しながら、大排気量の真空ポンプで排気することである。

4.3 マイクロローディング効果

先のローディング効果はアスペクト比が大きい深溝の加工をしようとするときにも微視的な規模で発生する。この現象はマイクロローディング効果と呼ばれている。例えば Fig. 8 に示すように、空間に開放された部分に比べて、溝部分のエッチング速さがそのアスペクト比の増大に伴い減少するという現象である。この現象も中性活性種の拡散が深溝部分で制限されるために起こる現象である。Photo. 3 は Ni-Fe 合金薄膜の CO-NH_3 反応性イオンエッチングにおいて図形の密集度だけが異なる同等な試料を同時にエッチングを行って比較した写真である。まばらな図形 Photo. 3(a) に対して、密集した図形 Photo. 3(b) ではエッチングの深さが浅いことが認められる。なお密集した図形においては異方性角度が小さく、また側壁面への再付着層が比較的に顕著に見られるのは、密集した図形では溝部分で中性活性種が欠乏し、イオン性が強い物理的なエッチングの作用を受けるためと考えられる。

4.4 マイクロトレンチング

深い加工を行ったとき、Fig. 9 に示すような、マスクで覆われた個所の周囲が縁取りされたように彫り込まれる形状がしばしば見られる。この現象はマイクロトレンチング

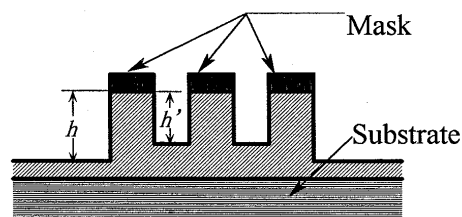


Fig. 8 Schematic illustration of the microloading effect.

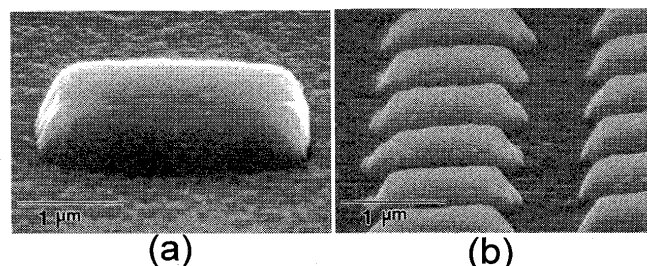


Photo. 3 Representation of a microloading effect: (a) widely separated features; (b) narrow features.

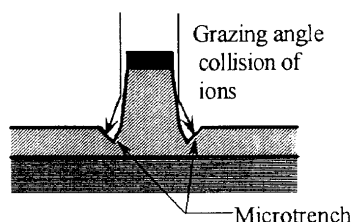


Fig. 9 Schematic illustration of microtrenching.

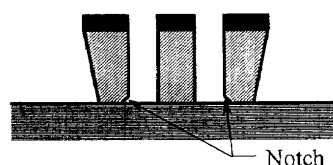


Fig. 10 Schematic illustration of notching.

と呼ばれ、基板面に垂直、すなわち側壁に低角度で入射するイオンが側壁で散乱され基板面をスパッタするために生じる現象である。マイクロトレンチングは物理的作用が強いエッチング方法、すなわちイオンビームミリング法や集束イオンビーム加工法において強く見られる。

4.5 ノッチング

大きなアスペクト比で密集した深溝の加工を行ったとき、Fig. 10 に示すように、開放した端部の側壁が内側に削られ、かつ内壁にノッチが形成される。これらはノッチングと呼ばれ、プラズマ中の電子の基板面への到達がシールドされることにより、プロファイルが周辺に対して局所的に帯電するためと考えられている。パルスエッチングがノッチングの低減に著しい効果をもつことが指摘されている。

おわりに

磁性材料の微細加工のプロセスの概要を述べた。電子線描画法により作製したパターンを目的の磁性体薄膜に転写するためのいくつかの方法について述べ、その特徴を比較し、磁性体薄膜の転写法として有効な反応性イオンエッチング法が磁性体の微細加工にとって鍵技術となることを指摘した。そのような技術的要求に対して、最近研究されている一酸化炭素とアンモニアの混合ガスプラズマを用いる反応性イオンエッチング法について紹介するとともに、エッチング法における細かな問題のいくつかを紹介した。

参考文献

- 1) A. H. Bobeck, R. F. Fischer, A. J. Perneski, J. P. Remeika, and L. G. Van Uitert: *IEEE Trans. Magn.*, **5**, 544 (1969).
- 2) M. Johnson and R. H. Silsbee: *Phys. Rev. B*, **37**, 5326 (1988).
- 3) M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen, van Dau, F. Petriff, P. Etienne, G. Creuset, A. Friedrich, and J. Chazelas: *Phys. Rev. Lett.*, **61**, 2472 (1988).
- 4) B. Dieny, V. S. Sperious, S. S. P. Perkin, B. A. Gurney, D. R. Wilhoit, and D. Mauri: *Phys. Rev. B*, **43**, 1297 (1991).
- 5) S. Maekawa and U. Gafvert: *IEEE Trans. Magn.*, **18**, 707 (1982).
- 6) 中谷 功: 日本応用磁気学会誌, **19**, 831 (1996).
- 7) 中谷 功: 日本金属学会誌「まてりあ」, **35**, 854 (1996).
- 8) T. H. Chang, D. P. Kern, E. Kratschmer, K. Y. Lee, H. E. Luhn, M. A. McCord, S. A. Rishton, and Y. Vladimirovsky: *IBM J. Res. Develop.*, **3**, 462 (1988).
- 9) 安田 洋: ポスト 0.1 μm 技術と産業に関する調査報告書 I, 電子材料技術委員会編集, p. 21 (日本電子工業振興協会, 東京, 1997).
- 10) E. Kratschmer, H. S. Kim, M. G. R. Thomson, K. Y. Lee, S. Rishton, M. L. Yu, and T. H. P. Chang: *J. Vac. Sci. Technol.*, **B13**, 1 (1995).
- 11) B. E. Becker *et al.*: *Microelec. Eng.*, **4**, 35 (1986).
- 12) H. Tsuge, S. Esho, and H. Gokan: *J. Vac. Sci. Technol.*, **19**, 221 (1981).
- 13) T. Kawabe, M. Fuyama, and S. Narishige: *J. Electrochem. Soc.*, **138**, 2744 (1991).
- 14) 中谷 功: 日本応用磁気学会第 103 回研究会資料, 湯河原, 1998, p. 87 (日本応用磁気学会, 東京, 1998).
- 15) M. J. Vasile and C. J. Mogab: *J. Vac. Sci. Technol.*, **A4**, 1841 (1986).
- 16) B. Khamsehpour, C. D. W. Wilkinson, and J. N. Chapman: *Appl. Phys. Lett.*, **67**, 3194 (1995).
- 17) I. Nakatani: *IEEE Trans. Magn.*, **32**, 4448 (1996).
- 18) 中谷 功: 日本応用磁気学会第 106 回研究会資料, 東京, 1998, p. 1 (日本応用磁気学会, 東京, 1998).
- 19) 中谷 功: 日本応用磁気学会 1998 年学術講演会概要集, 札幌, 1998, p. 413 (日本応用磁気学会, 東京, 1998).

(1998 年 8 月 24 日受理)



中谷 功 なかたに いさお

昭 45. 3 広島大学大学院理学部修士課程
修了, 昭 45. 4 科技厅金属材料技術研
究所研究員, 昭 60. 7 同研究所構造制御研
究部研究室長, 昭 63. 4 同研究所機能特
性研究部研究室長, 平 9. 4 同研究所第 4
グループ第 3 サブグループリーダー, 現在
に至る。

専門 磁気物性, 磁性体微粒子, 磁性流体,
微小磁気学, 宇宙材料科学 (理博)