

## 受賞記念講演：平成16年度技術進歩賞

## 量産対応型 ECR スパッタ装置によるフェライト薄膜の低温高速製造技術の開発

山本 節夫<sup>★1</sup>, 松浦 満<sup>★1</sup>, 岡田 繁信<sup>★2</sup>, 下里 義博<sup>★2</sup><sup>★1</sup>山口大学大学院理工学研究科, 〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1.<sup>★2</sup>(株)島津製作所, 〒259-1304 秦野市堀山下 380-1.

## Development of Low-Temperature and High-Rate-Deposition Technology for Ferrite Thin-Films using ECR Sputtering Apparatus designed for Mass Production

Setsuo Yamamoto<sup>★1</sup>, Mitsuru Matsuura<sup>★1</sup>, Shigenobu Okada<sup>★2</sup> and Yoshihiro Shimosato<sup>★2</sup><sup>★1</sup>Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University, 2-16-1 Tokiwadai, Ube 755-8611, Japan.<sup>★2</sup>SHIMADZU CORPORATION, 380-1 Horiyamashita, Hadano 259-1304, Japan.

Received April 20, 2006

## SYNOPSIS

Reactive sputtering apparatus utilizing electron cyclotron resonance (ECR) microwave plasma was developed for deposition of ferrite thin-films. High deposition rate of 44 nm/min. was achieved using a conic alloy target, and the deposited soft ferrite thin films successfully crystallized without heat treatment during film deposition and post annealing. Magnetic and physical properties for the films were analyzed in terms of saturation magnetization, coercivity, uniformity of film thickness, and inner stress. These properties were proved to be good enough as soft magnetic films. The result described that the oxygen partial pressure ratio to deposition rate strongly affected the magnetic properties. Well crystallized ultra thin (3-nm-thick) ferrite films were also successfully deposited on MgO(100) underlayer. These results imply that ECR sputtering method is one of the most effective deposition methods for highly crystallized polycrystalline thick and thin films. Low target voltage sputtering as low as -100 V successfully improved crystal orientation of the ferrite films by suppressing the affect of recoiled argon ion bombardment to the substrate.

## KEY WORDS

ECR, electron cyclotron resonance, sputtering, reactive sputtering, ferrite

## 1 緒 言

酸化物系磁性薄膜(フェライト薄膜)が近年, トンネル磁気抵抗効果を利用した磁気ヘッドや, CoCrPt-SiO<sub>2</sub>など酸化物複合型の垂直磁気記録メディアなどの電子デバイスに利用されるようになってきている。また, 高周波インダクタなどに酸化物磁性薄膜を使用する試みも進められている。そのため, 再現性の良い酸化物薄膜を量産できる製造技術が必要になってきた。従来方式のスパッタ法で酸化物薄膜を製造しようとすると, (1)低い基板温度では酸化度の進んだ薄膜を得るのが難しい, (2)金属ターゲットを使用する場合, ヒステリシス現象のために膜厚や物性の制御が難しい, (3)酸化物ターゲットを使用する場合にはスパッタ率が低いため, 高速成膜を実現するのが難しいなど, 解決すべき点があった<sup>1-3)</sup>。

組成の厳密制御, 高い再現性, 低温・高速成膜を実現するためには, 酸化物薄膜の製造方法およびスパッタ装置の大幅な見直しが必要である。この課題を解決するために, 筆者ら

山口大学と(株)島津製作所のグループでは, スパッタ装置の開発と製造プロセス技術の開発を共同で実施した<sup>4)</sup>。

本報告では, 電子サイクロトロン共鳴(ECR)現象を利用して生成したマイクロ波プラズマを活用した反応性スパッタ(反応性 ECR スパッタ)装置を開発し, これを使用して高品質な軟磁性フェライト(Ni-Zn フェライト)薄膜の低温高速作製の可能性について検討した結果について紹介する。

## 2 電子サイクロトロン共鳴(ECR)スパッタ装置の開発

ECR現象を利用してマイクロ波で生成したプラズマは, 低ガス圧( $10^{-2}$ ~ $10^{-1}$  Pa)でも放電が可能, 低いエネルギー(数 eV ~ 数十 eV)領域でイオンエネルギーを制御することが可能, イオン化率が高い, などの特徴を持つ。これをプラズマ源として使ったスパッタ方式による薄膜形成法(ECR スパッタ法)<sup>5-7)</sup>は, 最近, 各種薄膜材料への応用が試みられ, プラズマ生成とスパッタ機構が独立していることによる制御性の

良さと、制御範囲の広さ、大量の活性なプラズマの基板照射による薄膜形成のアシストなど、徐々にその優れた特徴が認められるようになってきた。特に、酸化アルミニウム、酸化シリコン、チタン酸ストロンチウム、フェライトなど、各種の酸化物薄膜・窒化物薄膜の作成にECRスパッタ法を応用すると、低い基板温度でも結晶性の良い薄膜が得られることが報告されている<sup>4,7-12)</sup>。

筆者らが開発したECRスパッタ装置は、現在、磁気ヘッドの製造現場でDiamond Like Carbon (DLC) 保護膜の形成に使用されているECRプラズマCVD装置<sup>13,14)</sup>をベースとして、ECRマイクロ波プラズマ生成部と成膜チャンバサイズはそのままに、スパッタリングターゲットおよびターゲットに印加するためのバイアス電源などを追加して、ECRスパッタ装置に変更したものである。

Fig.1に、本装置主要部分の断面積構造を示す。プラズマ生成室の周りに巻かれたコイルによって、プラズマ生成室内に87.5 mT (875 Gauss) の磁場が作られる。周波数が2.54 GHzのマイクロ波は、スリースタブチューナによってインピーダンスマッチングをとり、導波管を通してプラズマ生成室内に導入される。この磁場とマイクロ波の組み合わせは、ECR条件： $f_c = qB/2\pi m$  ( $f_c$ : 共鳴周波数,  $q$ : 電荷,  $B$ : 磁場,  $m$ : 質量) を満たし、効率良くプラズマが生成される。スパッタターゲットは、プラズマ生成室の端に設けられたプラズマ引き出し口の近傍に配設され、プラズマ中の正イオン(アルゴンイオン)を引き込んでスパッタを起こすために、負のバイアス電圧が印加される。プラズマ中の電子は、磁場強度の高いプラズマ生成室から強度の低い成膜室側に磁場勾配によってドリフトし、それとともに電荷中性条件を満たすため、アルゴンの正イオンもプラズマ生成室から成膜室側に移動し(両極拡散)、プラズマが成膜室に流れる。基板は、このプラズマ流を浴びる位置に配置される。ECRプラズマ生成室と成膜室とは、空間的に分離しており、プラズマ生成とスパッタ機構を独立に制御することができる。

ECRスパッタ装置を用いて酸化物薄膜の低温・高速作成を実現するためのコンセプトとしては、まず、高密度で活性な

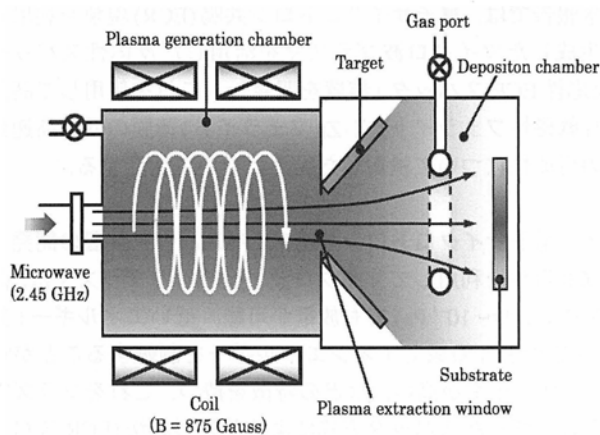


Fig.1 Cross sectional image for ECR sputtering apparatus.

プラズマを生成することが重要であり、そのためにはECRマイクロ波プラズマを利用することの他に、マイクロ波電力を増した場合にも、マッチングをとりやすいように、マイクロ波をプラズマ生成室である円筒キャビティ内に軸方向に導入する方式とすること、高出力(最大900 W)のマイクロ波電源を用意することが有効である。次に、このプラズマを有効に活用して、スパッタ成膜を行う必要がある。一般に、ターゲットが金属からその酸化物になると、スパッタ率が大きく減少する。高速成膜を実現するには、ターゲットには金属のものを用意し、しかもその表面が酸化しない状態(メタルモード)で使用するのがよいと考えられる。ターゲットは、プラズマ引き出し口のできるだけ近くに配置して、高密度なプラズマをスパッタに有効利用できるようにするとよい。既存の多くのECRスパッタ装置では、ターゲットの形状は円筒型であり、プラズマ引き出し窓の軸上に設置している。そのため、ターゲット面と基板面とが90°の角度をなす配置となり、成膜速度の点で好ましくない。これに対して、Fig.1に示すように、ターゲット面を基板面に対して45°の角度に向いた配置にして、スパッタ原子の基板への飛来確率を高くすると成膜速度の増大が図れる。さらに、この配置にすることによって、マイクロ波導入用の石英窓がコンタミネーションによって汚れる恐れも少なくなるという利点もある。本研究で開発した装置では、Fig.2(a)に示すように、100 mm角の板状ターゲット(Ni<sub>13</sub>-Zn<sub>24</sub>-Fe<sub>63</sub> (wt.%)粉末成型合金ターゲット)3枚を開き加減に組み合わせ配置したものと同図(b)に示すように45°のスラント角を持つ円錐状のターゲットの2種類を使用した。Fig.3には、Fig.2(b)に示す円錐状ターゲットを搭載した時のスパッタ成膜室内部の写真を示す。基板の近くには酸素ガスの導入チューブが設けられ、そのチューブの基板に向かい合う側には、ガスの噴出し口が設けてある。

金属のターゲットを使用してメタルモードで動作させる場合には、基板表面での薄膜形成において、酸素原子を効果的かつ厳密に制御された形で取り込み、所望の組成の酸化物を得る必要がある。その点で、酸素ガスの導入位置および導入量の最適化は非常に重要である。本研究では、アルゴンガス

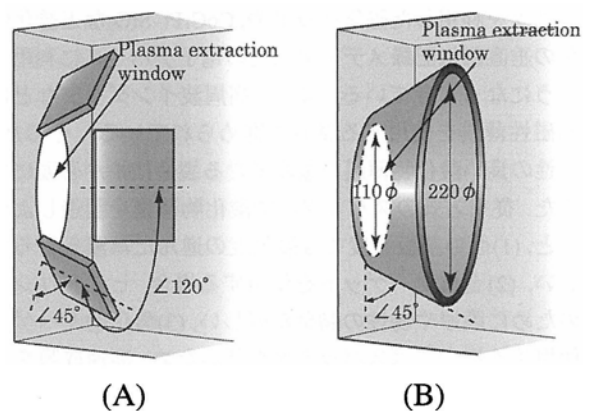


Fig.2 Target configurations, (a) platelet targets and (b) conic target.

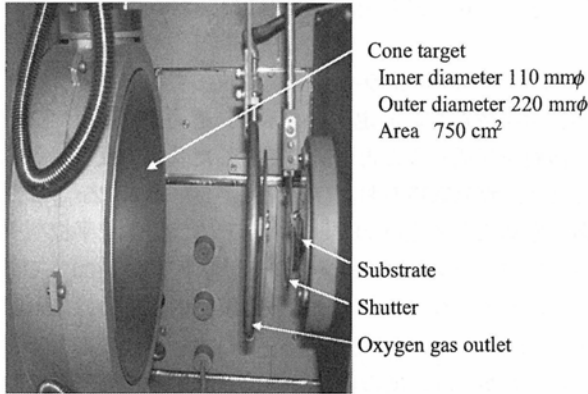


Fig.3 Photograph of conic target.

は常にプラズマ生成室に導入し、酸素ガスはプラズマ生成室と基板近傍に導入する2通りについて検討した。ECRスパッタ法においては、スパッタされた原子および酸素ガス分子はプラズマ流の中を通過して基板に達するので、かなり高い割合でイオン化している。このことは、マイクロ波電力を増加させて高密度プラズマ状態にした場合に、成膜室内のプラズマ色が明らかに変わることからも確認している。本実験においては、ヒーターなどで基板を加熱することは行わなかったが、プラズマ照射によって、薄膜形成開始直後から基板温度は自然に上昇し、十数分後には200℃程度の定常状態に至った。

3 フェライト薄膜の作製

ECRスパッタ装置のターゲット電流対ターゲット印加電圧特性をFig.4に示す。一般的なスパッタ法であるマグネトロンスパッタ法においては、200V程度以上のターゲット電圧領域で、電圧をわずかに増加しただけでターゲット電流が急峻に増加する特性を示すのに対して、ECRスパッタ法の場合には、ターゲット電圧を増加させても、ターゲット電流の増加はごくわずかである。ECRスパッタ法では、ターゲット電流はマイクロ波電力に大きく依存している。これは、ECRスパッタ法では、プラズマ生成はマイクロ波の投入によって起こり、ターゲット電圧はプラズマ生成にほとんど関与せず、ターゲット近傍のプラズマ中のアルゴンイオンを電場でターゲットに引き込む働きのみをしているためである。したがって、高速成膜を実現するためには、マイクロ波電力は、安定したプラズマが得られる範囲内で、なるべく大きく設定したほうが良い。

Ni-Znフェライト薄膜(厚み200nm)の飽和磁化と成膜速度の酸素ガス分圧依存性をFig.5に示す。ここで、酸素ガス分圧は、アルゴンと酸素ガスを混合した全ガス圧に対する酸素ガス分圧の割合(百分率)で定義した。酸素ガス圧が4%以上になると、酸化が進み、飽和磁化は急激に減少した。10nm/min.以上の高い成膜速度は、酸素ガス分圧7%までは維持されて

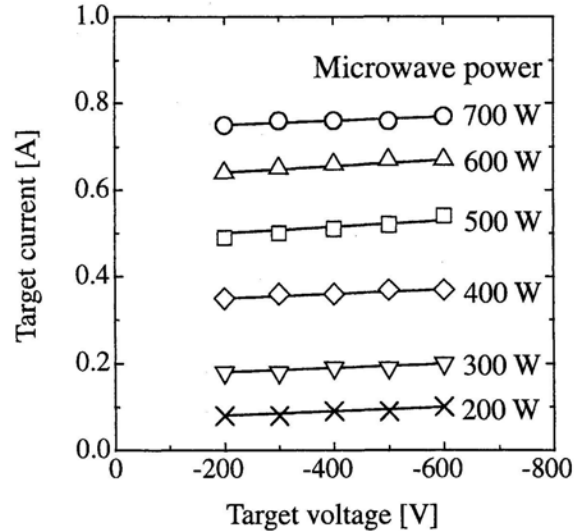


Fig.4 Target voltage dependence of target currents.

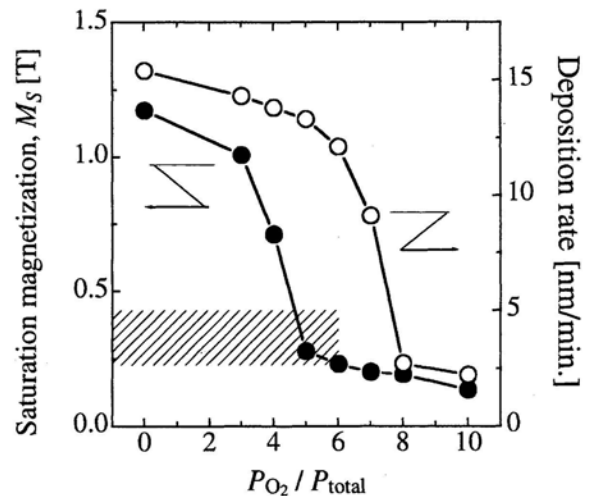


Fig.5 Oxygen partial gas pressure dependence of saturation magnetization and deposition rate.

いる。酸素ガス分圧0~6%では、スパッタターゲットの表面が“メタルモード”、8%以上の領域では、成膜速度が低い値を示したことから“酸化物モード”であると思われる。酸素ガスを成膜室内の基板近傍に導入した場合には、プラズマ生成室に導入した場合に比べて、高い成膜速度が高酸素分圧領域まで維持され、一方、飽和磁化は大幅に減少した。このことは、酸素ガスを基板近傍に導入した方が、ターゲット表面は酸化し難く、基板表面での薄膜の酸化は促進されることを示している。Fig.5中の斜線部は、使用した金属ターゲットが酸化してNi-Znフェライトとなったときの予想される飽和磁化の値(バルク値)を示している<sup>15,16</sup>。飽和磁化がこの範囲内になったときに軟磁気特性は急激に向上し、飽和磁化が281 mT (224 emu/cc)、抗磁力は1.5 mT (15 Oe)、振動試料型磁

力計 (VSM) で測定した直流での初透磁率は 47 (比透磁率) という良好な特性が得られた。また, この傾斜範囲において, スピネル単相で (100) 面が配向し, 結晶性が良好な薄膜が得られることを X 線回折によって確認している。

Fig.6 に成膜速度のターゲット電流依存性を示す。100 mm 角の平板型のターゲット 3 基 (総面積 300 cm<sup>2</sup>) を使用した場合と, コーン状のターゲット (総面積 750 cm<sup>2</sup>) を使用した場合について検討した。前者のターゲットでは, 18 nm/min. が最高の成膜速度であったが, 後者のコーン状ターゲットの場合には 48 nm/min. という 2.7 倍の成膜速度を実現できた。これはターゲットをコーン状に変更することによって, ターゲットの面積を 2.5 倍に増加できたことに加えて, ターゲットの端部を, 密度の高いプラズマが得られるプラズマ引き出し口に, いっそう近づけることができたためである。

磁気特性を成膜速度当たりの酸素ガス分圧に対してプロットした結果を Fig.7 に示す。同図には形状の異なるターゲット (コーン型および平板型) を使用して, マイクロ波電力, ターゲット印加電圧, 酸素ガス流量比をそれぞれ変化させて作製したすべての Ni-Zn フェライト薄膜のデータがプロットされている。ここで, 酸素ガス分圧は, 酸素ガス流量比 (%) とプロセスガス圧 (Pa) の積として定義した。成膜速度当たりの酸素ガス圧に対する飽和磁化と抗磁力の両方の依存性は, ターゲット投入電力やターゲット印加電圧を変えた実験において, ともに一本の曲線で描かれることがわかった。Fig.7(a) からわかるように, 飽和磁化は成膜速度当たりの酸素ガス分圧の増加に伴って減少している。Ni-Zn フェライトのバルクの飽和磁化である 251~377 mT (200~300 mu/cc) を実現するには, 成膜速度当たりの酸素ガス圧を  $1.7 \times 10^{-1} \sim 2.5 \times 10^{-1}$  Pa/(nm/min.) の範囲にすることが必要である。Fig.7(b) より, この範囲において, 抗磁力が小さな, すなわち軟磁気特性に優れたフェライト薄膜を得るためには, 成膜速度当たりの酸素ガス

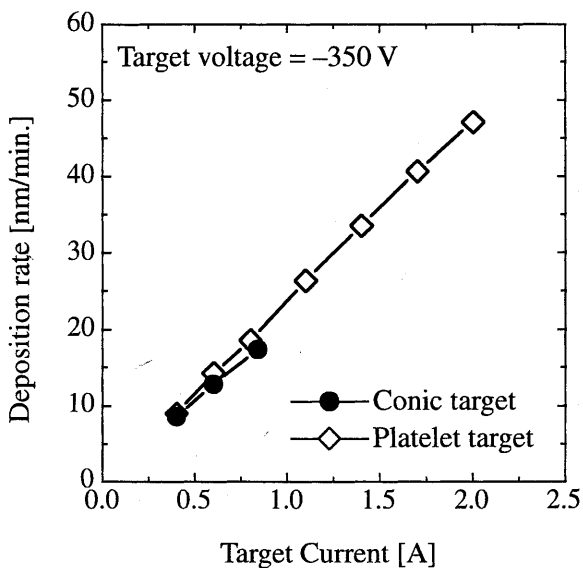


Fig.6 Relationship between deposition rate and target currents.

分圧を  $1.8 \times 10^{-1}$  程度の狭い範囲に調整することが重要である。

Fig.8 に, Ni-Zn フェライト薄膜に内在する応力のターゲット印加電圧依存性の測定結果を示す。応力は, 基板にフェライト薄膜を形成したことによって生じた基板の反り量から算出した<sup>17)</sup>。軟磁気特性および結晶性が良好な Ni-Zn フェライト薄膜が得られるときのターゲット印加電圧は, 平板型ターゲットでは, -350 V, コーン型ターゲットでは -300 V であった。このときの Ni-Zn フェライト薄膜の内部応力は  $4 \times 10^8$  N/m<sup>2</sup> ( $4 \times 10^9$  dynes/cm<sup>2</sup>) 程度である。このオーダーの応力であれば, 厚みが数  $\mu$ m 程度の薄膜を作成した場合にも薄膜が基板から剥離する恐れは少なく, 筆者らは実際に 3  $\mu$ m 厚の Ni-Zn

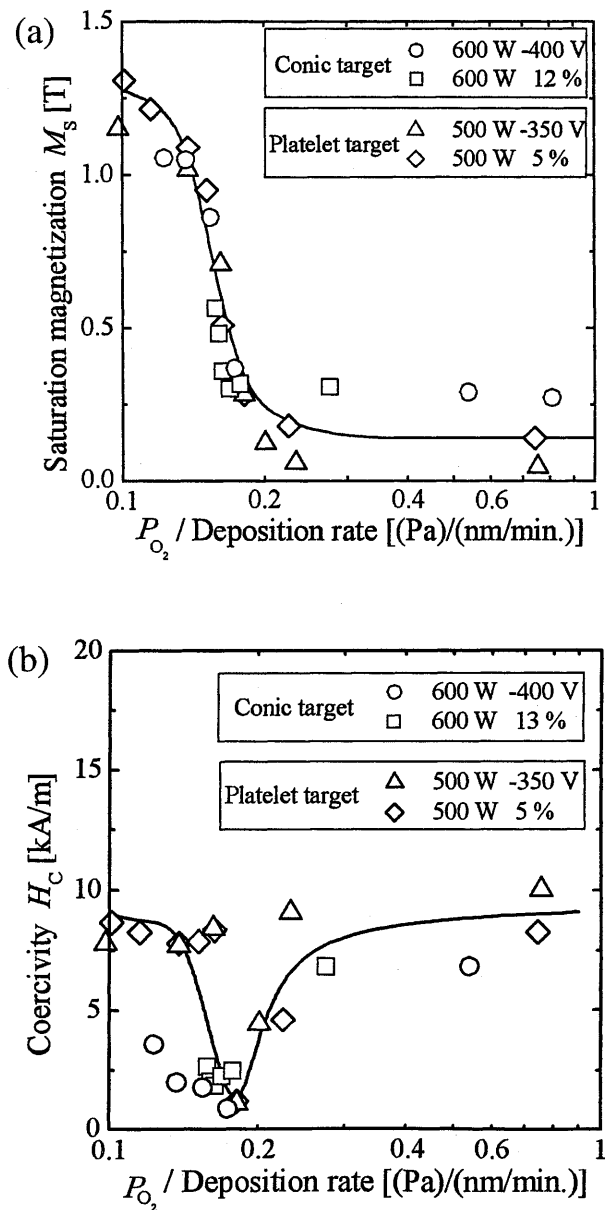


Fig.7 Dependence of saturation magnetization and coercivity on oxygen partial gas pressure divided by deposition rate.

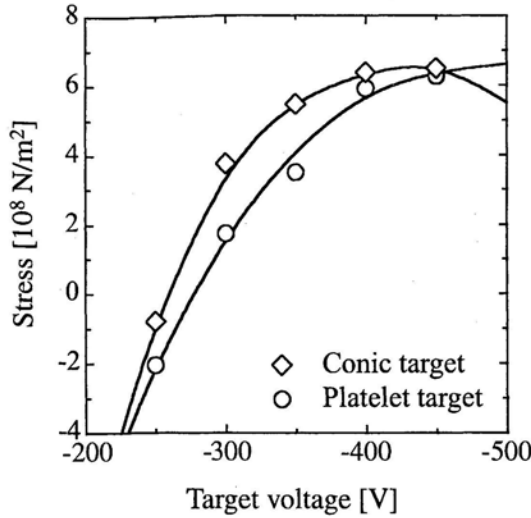


Fig.8 Internal stress.

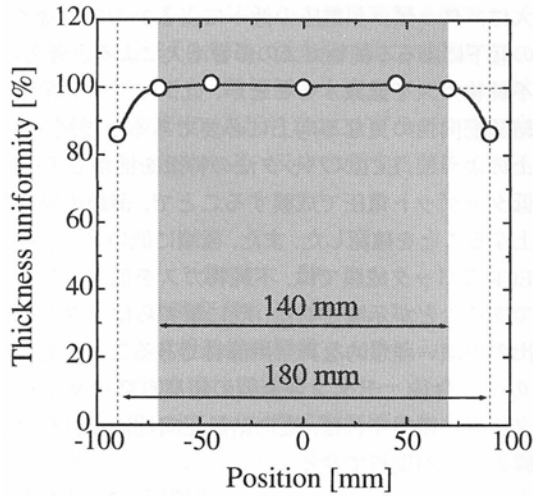


Fig.9 Film thickness uniformity.

フェライトを作製して剥離が生じないことを確認している。本法で作製したNi-Znフェライト薄膜とSi基板との密着力を、ダイヤモンド圧子を用いた荷重連続可変式の薄膜用走査型スクラッチテスト(株)島津製作所SST-101)を用いて評価した。その結果、反応性ECRスパッタ法で作製したNi-Znフェライト薄膜はAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>TiC基板上にECRプラズマCVD法で作製したDLC薄膜(厚み3nm)以上の臨界剥離荷重を示し、基板との密着性が優れていることがわかった。これはフェライト薄膜を堆積する前処理として、ECRプラズマ照射による基板のクリーニングを行っていることによる効果、およびプラズマ照射しながらの薄膜堆積であるために密度の高い薄膜が形成されていることによると思われる。

8インチSiO<sub>2</sub>/Si基板上に堆積させた薄膜の膜厚分布をFig.9に示す。コーン型ターゲットを用い、ターゲットと基板間距離を55mmとし、基板回転を行いながら薄膜形成した。直径

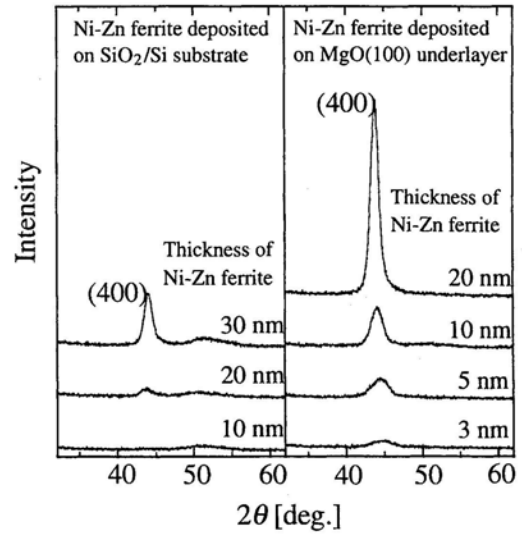


Fig.10 XRD patterns for Ni-Zn ferrite films deposited on 5-nm-thick MgO(100) underlayer.

180mmおよび140mmの領域内では、それぞれ15%および1%以下の膜厚分布であった。直径6インチ(152mm)内では、極めて均一な膜厚分布が実現されていることがわかる。

#### 4 フェライト超薄膜の製造

厚みが数nmという薄いフェライト薄膜は、スピニエレクトロニクス分野において、トンネル磁気効果等を利用したデバイスへの応用が期待されている。そこで、極薄い膜厚領域で結晶性・結晶配向性に優れたNi-Znフェライト薄膜を、MgO(100)下地層上に製造することを試みた。

Ni-Znフェライト(100)とMgO(100)とは、格子ミスマッチが0.27%と非常に小さく、MgO(100)が下地層として効果的に機能する可能性がある。RFマグネトロンスパッタ装置を使用し、反応性スパッタ法によって、熱酸化シリコン基板上に下地層となるMgO(100)薄膜を作製した。反応性ECRスパッタ法によって、熱酸化シリコン基板上に直接、およびその上に形成したMgO(100)下地層上にNi-Znフェライト薄膜を成膜し、MgO下地層の有無によるNi-Znフェライト薄膜の結晶性の違いを検討した。

熱酸化シリコン基板上に成膜したMgO下地層上に膜厚20nmのNi-Znフェライトを成膜し、下地層として機能するMgO薄膜の薄さの限界を推定した。その結果、MgOの膜厚が5nm以上の場合にNi-Znフェライト(400)のX線回折ピーク強度が顕著に現れ、その強度は厚み3nm以下のMgO上に成膜したNi-Znフェライトのものより20倍程度大きな値を示した。これは、MgOが膜厚5nmから格子を組み始めていることを示している。よって、下地層として機能するMgO薄膜の膜厚は5nmであると推測される。

Fig.10に熱酸化シリコン基板上および膜厚5nmのMgO(100)下地層上に成膜したNi-Znフェライト薄膜のX線回折

(XRD)ダイアグラムを示す。熱酸化シリコン基板上的Ni-Znフェライト薄膜は、膜厚20 nm以下ではNi-Znフェライト(400)回折ピークは確認できなかった。一方、MgO下地層上にNi-Znフェライトを成膜した場合には、Ni-Znフェライト(400)の回折ピーク強度は強く、Ni-Znフェライト薄膜の厚みが3 nmの場合でもNi-Znフェライト(400)の回折ピークを確認することができた。また、3 nmという厚みは単位格子約4個分に相当し、極薄領域でNi-Znフェライト薄膜を結晶化することができたことを示している。これは、格子ミスマッチの小さなMgO(100)を下地層として用いたことでヘテロエピタキシャル成長が実現でき、極薄領域でもNi-Znフェライトが結晶格子を組み始めたためである。

以上のように、5 nm厚のMgO(100)下地層を用いることにより、膜厚が3 nmと薄くても結晶性に優れたNi-Znフェライト薄膜を作製できることを実証した。

### 5 低電圧スパッタ

ECRスパッタ法では、プラズマ生成をスパッタ機構とはほぼ独立して制御できるので、ターゲット印加電圧を従来のスパッタ法ではプラズマの維持が困難となる-200 V以下に下げても、薄膜形成が可能である。低いターゲット電圧で動作させれば、反跳アルゴンによる膜へのダメージを低減でき、組成ずれが少なく高配向・高結晶性の薄膜形成が期待できる。そこで、ECRスパッタ法による低ターゲット電圧でのNi-Znフェライト薄膜の作製について、結晶配向性の観点から検討した。

Fig.11に、Ni-Znフェライト(400)回折線のロッキングカーブを示す。ターゲット電圧の低下に伴い、反跳アルゴンによる膜へのダメージが低減されることで、ロッキングカーブの半値幅( $\Delta\theta_{50}$ )は減少し、結晶配向性が向上した。しかしながら、ターゲット電圧-100 V未満の領域では $\Delta\theta_{50}$ は増加し、結

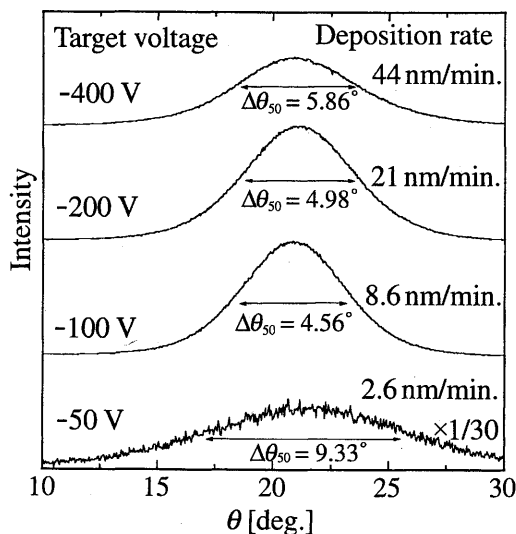


Fig.11 Rocking curves for Ni-Zn ferrite (400) peaks.

晶配向性が低下した。Fig.12に $\Delta\theta_{50}$ の成膜速度依存性を示す。ターゲット電圧の低下に伴い成膜速度は遅くなり、結晶配向性が向上したが、8.6 nm/min.未満の領域では $\Delta\theta_{50}$ は増加し、結晶配向性が低下していることがわかる。これは、ターゲット電圧を低下させたことにより、成膜速度が4 nm/min.と非常に遅くなり、単位面積あたりに毎秒入射するスパッタ原子および成膜室内に内在する不純物ガスのうち、不純物ガスの割合が成膜速度8.6 nm/min.の場合と比べ、1/4.5から1/2へと相対的に大きくなるために、膜の結晶化および結晶配向性が妨げられたことが原因であると考えられた。そこで、ターゲット電圧-100 Vでマイクロ波投入電力を低下させ成膜速度をターゲット電圧-50 Vの場合とほぼ同等の2.9 nm/min.として成膜し、結晶配向性の低下が、低ターゲット電圧によるものか、成膜速度に起因する不純物ガスの影響によるものかを調べた。この成膜速度では単位面積あたりに毎秒入射する不純物ガスの割合は1/1.5であった。得られた薄膜の $\Delta\theta_{50}$ を図中に■で示す。同図から、成膜速度8.6 nm/min.以下の領域の $\Delta\theta_{50}$ の増大は、ターゲット電圧の低下によるものではなく、成膜速度の低下による不純物ガスの影響増大によると考えられる。この不純物ガスを低減することが、低ターゲット電圧成膜による結晶配向性の更なる向上に必要であると推測される。

以上のように、ECRスパッタ法の特徴を活かして-100 V程度の低ターゲット電圧で成膜することで、薄膜の結晶配向性が向上することを確認した。また、極端に低いターゲット電圧でのECRスパッタ成膜では、不純物ガスを低減させることが重要であることが示唆された。既に筆者らはチタン合金がガス放出の少ない理想的な真空用部材であることを見出している<sup>18)</sup>ので、今後、チタン合金製の超高真空チャンバーをスパッタ装置に採用すれば、更に結晶配向性に優れたフェライト薄膜の作製が期待できる。

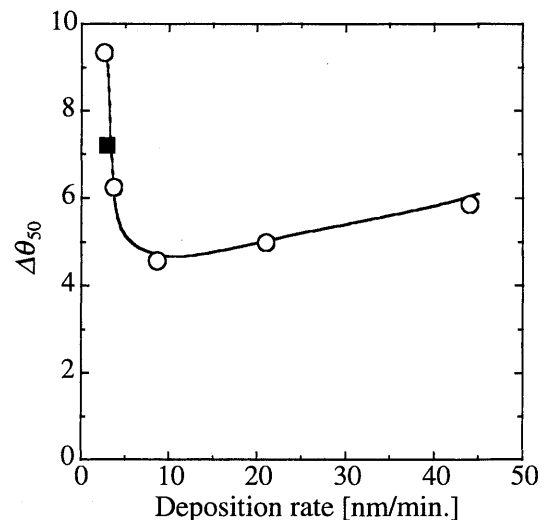


Fig.12 Relation between full width at half maximum of rocking curves for Ni-Zn ferrite (400) and deposition rates.

## 6 結 言

ECR プラズマ CVD 装置をベースにして、ECR スパッタ装置を開発した。この装置を用いた反応性スパッタ法によって、①飽和磁化 281 mT (224 emu/cc)、抗磁力 1.5 mT (15 Oe)、初透磁率 47 (比透磁率) という良好な軟磁気特性を示し、スピネル単相で (100) 面が配向し、結晶性に優れた Ni-Zn フェライト薄膜を、毎分 48 nm という高い成膜速度と 200°C という低い基板温度で、直径 6 インチの領域内に均一な膜厚で作製すること、② MgO (100) 薄膜を下地層として用いることによって、わずか 3 nm の極薄い膜厚でも結晶性・結晶配向性に優れた Ni-Zn フェライト薄膜を作製すること、③本装置では従来のスパッタ装置では不可能な低いターゲット電圧 (-100 V 以下) でも薄膜成形が可能で、 $\Delta\theta_{50}$  が 4.56° という良好な結晶配向のフェライト薄膜を作製できること、などを示した。なお、筆者らは本装置で作製した Ni-Zn フェライト薄膜を使用して高周波インダクタの試作も行っている<sup>19)</sup>。

ECR スパッタ法は、プラズマ生成とスパッタ機構が機能分離しており、プロセスパラメータの制御範囲を従来のスパッタ法よりも格段に広げられる。従来法では二律相反していたプロセス条件の場合でも、最適解や大きなマージンを見出せる可能性がある。高密度・高活性な ECR プラズマを利用できるので、酸化物や窒化物など、反応を要する薄膜の製造にも適している。

## 謝 辞

本研究の一部は、経済産業省 地域新生コンソーシアム研究開発事業「モバイル情報通信機器用フェライトの薄型化技術開発」(管理法人: (財)中国技術振興センター)として実施されました。また本研究には、(財)加藤科学振興会および山口大学大学院ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー教育研究施設の支援を受けました。阿部正紀東京工業大学教授、直江正彦東京工業大学名誉教授、中村慶久東北大学電気通信研究所教授よりご指導と激励をいただきました。心より感謝申し上げます。

## 文 献

- 1) Nihon Gakujutu Shinko Kai, Tohmei Sannkabutu Hikari: Denshi Zairyō Dai 166 Hinkai: Tohmei Dohdenmaku No Gijutu, Ohmsha, (1999)170.
- 2) H.Kobayashi: Supatta Hakumaku -Kiso to Ouyou-, Nikkan Kogyo Shinbun-sha, (1993)90.
- 3) K.Wasa and S.Hayakawa: Supatta Gijutu, Kyoritsu Shuppan, (1988)93.
- 4) H.Wada, S.Yamamoto, H.Kurisu, M.Matsuura, Y.Shimosato and S.Okada: "Low-temperature deposition of Ni-Zn ferrite thin-films by reactive ECR sputtering", Journal of the Magnetism Society of Japan, 27(2003)363-366.
- 5) M.Matsuo and K.Ono: "Magnetic field gradient effects on ion energy for electron cyclotron resonance microwave plasma stream", J. Vac. Soc. Technol., A6(1)(1988)25-28.
- 6) C.Takahashi, M.Kikuchi, T.Ono and S.Matsuo: "An electron cyclotron resonance plasma deposition technique employing magnetron mode sputtering", J. Vac. Soc. Technol., A6(4) (1988)2348-2352.
- 7) S.Matsuoka and K.Ono: "ECR sputter deposition technologies", J. Magn. Soc. Jpn., 14(1991)554-559.
- 8) O.Kinoshita: Koumitsudo Purazuma Ouyou Purosesu Gijutu, Realize-Sha, Tokyo, (1993)160.
- 9) S.Miyake, T.Baba and K.Numata: "Low temperature syntheses of high quality SrTiO<sub>3</sub> thin films", J. Vac. Soc. Jpn., 45(2002) 26-32.
- 10) S.Yamamoto, K.Sato, H.Kurisu and M.Matsuura: "Co-Cr perpendicular magnetic recording media prepared by sputtering using ECR microwave plasma", J. Appl. Phys., 79(1996)4896-4898.
- 11) K.Sato, S.Yamamoto, H.Kurisu and M.Matsuura: "Magnetic properties of Co-Cr perpendicular magnetic anisotropic film prepared by ECR sputtering", J. Magn. Soc. Jpn., 20(1996) 57-59.
- 12) K.Hirata, S.Yamamoto, H.Kurisu, M.Matsuura, T.Doi and K.Tamari: "Co-containing ferrite thin-film disc prepared by reactive sputtering method", J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, 48(2001)742-747.
- 13) J.Suzuki, M.Suzuki and S.Okada: "Deposition of DLC thin films by ECR plasma CVD method and its application to magnetic heads for hard disk drives", SHIMADZU REVIEW, 54(1997)135-141.
- 14) N.Akita, Y.Konishi and S.Ogura: "Developments of DLC protective layer deposition apparatus for GMR magnetic head and its preparation process", SHIMADZU REVIEW, 58(2001) 59-66.
- 15) T.Hiraga, K.Okuya and T.Ojima: Ferrite, Maruzen, (1986)106, 116.
- 16) T.Fujii: "Recent topics on ferrite thin-films", J. Magn. Soc. Jpn., 23(1999)2065-2070.
- 17) H.Kobayashi and N.Hosokawa: Hakumaku Gijutu Nyuumon, Sougou Denshi Shuppan, (1992)149.
- 18) M.Matsuura, S.Yamamoto, H.Kurisu and N.Hesaka: "Study on Titanium material with superior vacuum properties", Titanium, 52(2004)118-120.
- 19) S.Yamamoto, K.Harada, H.Kurisu and M.Matsura: "Inductor using Ni-Zn ferrite thin-film", J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, 51(2004)184-189.