

反応性電子サイクロトロン共鳴 (ECR) スパッタ法による
フェライト薄膜の低温高速作製*

田中 輝光*¹・大城 和宣*²・藤森 宏高*²・栗巢 普揮*¹
下里 義博*³・岡田 繁信*³・松浦 満*¹・山本 節夫*²

Low Temperature and High Rate Deposition of Ferrite Thin Films
by Reactive Sputtering Method Using Electron Cyclotron Resonance

Terumitsu TANAKA*¹, Kazunori OSHIRO*², Hirohisa FUJIMORI*², Hiroki KURISU*¹,
Yoshihiro SHIMOSATO*³, Shigenobu OKADA*³, Mitsuru MATSUURA*¹ and Setsuo YAMAMOTO*²

*¹Faculty of Engineering, Yamaguchi University Tokiwadai 2-16-1, Ube 755-8611, Yamaguchi

*²Applied Medical Engineering Science, Graduate School of Medicine, Yamaguchi University
Tokiwadai 2-16-1, Ube 755-8611, Yamaguchi

*³SHIMADZU CORPORATION Horiyamashita 380-1, Hadano 259-1304, Kanagawa

(Received September 22, 2005, Accepted May 13, 2006)

A reactive sputtering apparatus utilizing electron cyclotron resonance (ECR) was developed for the deposition of thick oxide or nitride films usable in electric devices. A high deposition rate of 44 nm/min. was achieved using a conic alloy target and the deposited soft ferrite thin films were successfully crystallized without heat treatment during film deposition. Magnetic and physical properties for the film were analyzed in terms of saturation magnetization, coercivity, uniformity of film thickness, and inner stress. Obtained properties were consistent with soft magnetic films. The result confirms the oxygen partial pressure ratio to deposition rate strongly affected the magnetic properties. Well crystallized, ultra thin 3-nm-thick Ni-Zn ferrite (100) films, were also successfully deposited on MgO (100) underlayers. These results imply the ECR sputtering method is one of the most effective deposition methods for highly crystallized polycrystalline thick and thin films. Crystal orientation was improved by low target voltage sputtering as well as a relatively low deposition rate. Further improvement is considered to be possible by deposition at lower base pressures.

1. はじめに

近年、トンネル磁気抵抗効果を利用した磁気ヘッドや、CoCrPt-SiO₂ 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酸化物系薄膜が利用されるようになり、量産性に優れ、再現性の良い酸化物薄膜の作成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作製するには、

- (1) 低い基板温度で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の解決すべき点がある¹⁻³⁾。組成の厳密制御、高い再現性、低温・高速成膜を実現するには、酸化物薄膜の作製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、筆者ら山口大学と岐阜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てきた⁴⁾。

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

装置 (反応性 ECR スパッタ) を開発し、これを使用した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

ECR 現象を利用して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、数 eV~数十 eV の低い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)⁵⁻⁷⁾は、近年、各種薄膜材料への応用が試みられており、プラズマ生成機構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、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、各種の酸化物薄膜や窒化物薄膜の作製に 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^{4,7-12)}。

筆者らが開発した ECR スパッタ装置 (SLC-75ES) 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 (島津製作所製 DLC-MR2, DLC-MR3)¹³⁻¹⁴⁾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、

* 平成17年7月15日日本真空協会スパッタリングおよびプラズマプロセス技術部会第94回定例研究会で発表

*¹ 山口大学工学部 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

*² 山口大学大学院応用医工学系専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

*³ 株式会社島津製作所 (〒259-1304 神奈川県秦野市堀山下380-1)

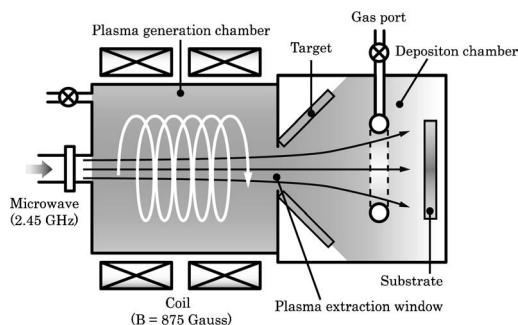


Fig. 1 Cross sectional view of ECR sputtering apparatus.

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、87.5 mT (875 Gauss) の磁場がプラズマ生成室内に作られる。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ている。

ECR スパッタ装置を用いて酸化物薄膜の低温・高速作製を実現するには、高密度で活性な ECR マイクロ波プラズマを生成することが重要である。また、マイクロ波電力を増した場合でもマッチングを容易に確保できるように、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氧化物になると、スパッタ率が大きく減少する。そのため、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い、その表面が酸化しない状態を使用するのがよいと考えられる。また、ターゲットはプラズマ引き出し口の近くに配置し、高密度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、成膜速度の面で好ましくない。これに対して、Fig. 1 のように、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、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のコンタミネーションも少なくなるという利点もある。

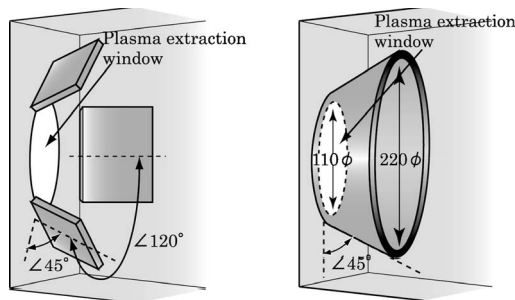


Fig. 2 Target configurations, (a) platelet targets and (b) conic target.

本研究で開発した装置では、Fig. 2 に示すように、100 mm 角の板状ターゲット ($\text{Ni}_{13}\text{-Zn}_{24}\text{-Fe}_{63}$ (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て配置したものと、 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。

金属ターゲットを使用する場合は、薄膜形成時に酸素原子を効果的かつ厳密に制御して取り込み、所望の組成の氧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 スパッタ法では、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ため、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。本実験では、基板加熱は行わなかったが、プラズマ照射により、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°C 程度の定常状態に至った。

3. 実験結果

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. 3 に示す。マグネトロンスパッタ法では 200 V 程度以上のターゲット電圧において定電圧特性を示すのに対し、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、ターゲット電圧にほとんど依存しない。これは、ECR スパッタ法では、プラズマ生成が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。

作製した薄膜 (厚み 200 nm) の飽和磁化と成膜速度の酸素ガス分圧依存性を Fig. 4 に示す。ここで、酸素ガス分圧とは、アルゴンガス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) と定義した。 10 nm/min. 以上の高い成膜速度は、酸素ガス分圧 7% まででは維持されている。つまり、酸素ガス分圧 $0\sim 6\%$ ではターゲットの表面は酸化しておらず、 8% 以上の領域ではターゲット表面が酸

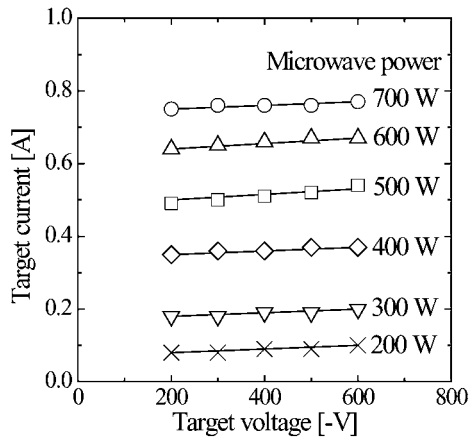


Fig. 3 Target voltage dependence of target currents.

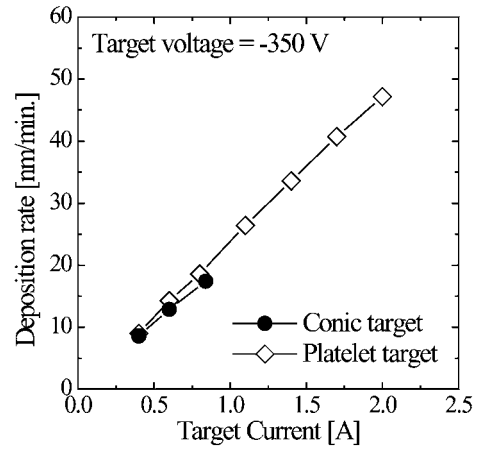


Fig. 5 Relationship between deposition rate and target currents.

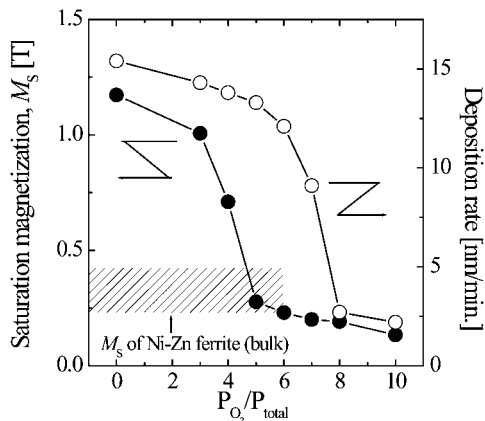
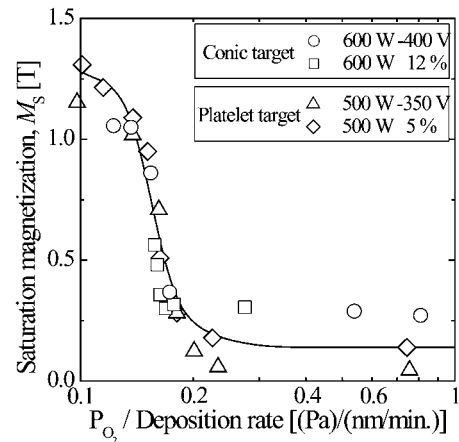


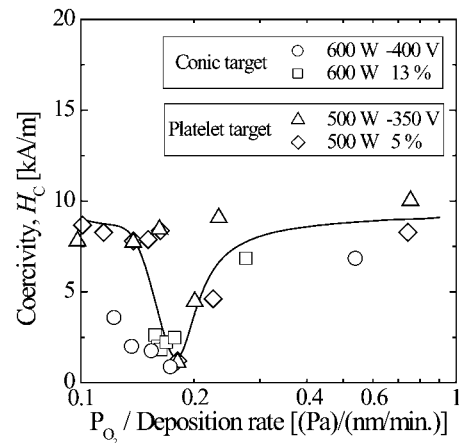
Fig. 4 Oxygen partial gas pressure dependence of saturation magnetization and deposition rate.

化したため、成膜速度が低減したと考えられる。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ている。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. 4 中の斜線部は、Ni-Zn フェライトの飽和磁化の値（バルク値）を示している^{15,16}。飽和磁化がこの範囲内になった場合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 1.5 mT (15 Oe)、初透磁率 47 (比透磁率) という良好な特性が得られた。また、この斜線部において、スピネル単相で(100)面が配向し、結晶性に優れた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. 5 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 cm²) を使用した場合と、コーン状のターゲット (総面積 750 cm²) を使用した場合について検討した。平板型ターゲットでは、18 nm/min. が最高の成膜速度であったが、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。これはターゲット形状をコーン型に変更することにより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



(a)



(b)

Fig. 6 Dependence of saturation magnetization and coercivity on oxygen partial gas pressure normalized by deposition rate.

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. 6 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、マイクロ波投入

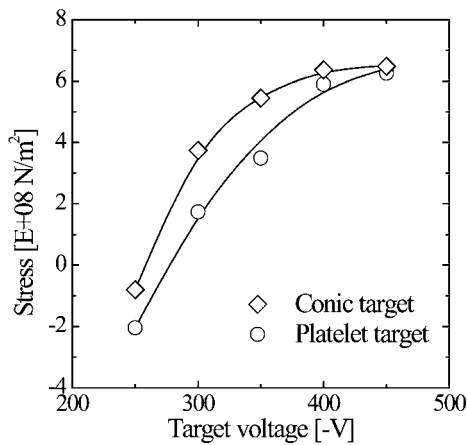


Fig. 7 Residual stress of Ni-Zn ferrite films.

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全ての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。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。Fig. 6(a)より, Ni-Zn フェライトの飽和磁化のバルク値 (251~377 mT (200~300 emu/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.) の範囲にする必要があることがわかる。同図(b)に示されるように, この範囲においても, 酸化度・磁気特性・結晶性が同等の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分圧を一定となるように調整することが重要であることがわかる。また, 成膜速度当たりの酸素ガス圧が 1.0×10^{-1} (Pa)/(nm/min.) 程度の場合には酸素不足のため Ni-Zn フェライトは形成されず, Ni, Zn および Fe の相が現れ, 2.5×10^{-1} (Pa)/(nm/min.) 以上になると非磁性である α フェライト相が形成¹⁷⁾されることを X 線回折によって確認している。

Fig. 7 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を示す。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 4×10^8 N/m² (4×10^9 dynes/cm²) 程度である。このオーダーの応力であれば, 厚みが数 μ m 程度の場合でも膜が基板から剥離する恐れは少ない。筆者らは, 実際に 3 μ m 厚の Ni-Zn 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タ (株式会社 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 Al₂O₃TiC 基板上に ECR プラズマ

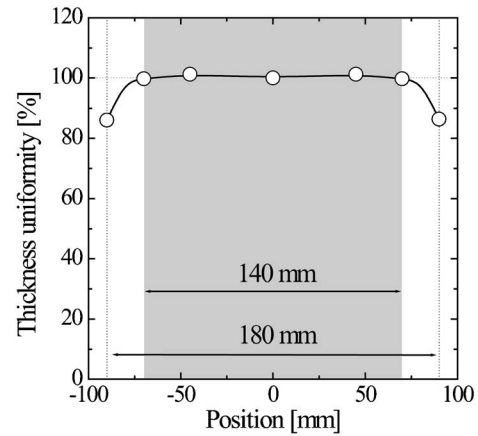


Fig. 8 Uniformity of film thickness.

CVD 法で作製した DLC 薄膜 (厚み 3 nm) 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 SiO₂/Si 基板上に堆積させた薄膜の膜厚分布を Fig. 8 に示す。コーン型ターゲットを用い, ターゲットと基板間の距離を 55 mm とし, 基板回転を行いながら薄膜を形成した。直径 180 mm および 140 mm 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 (152 mm) 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. 超薄膜

厚みが数 nm という薄いフェライト薄膜は, スピン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¹⁸⁾。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)下地層上に形成することを試みた。

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。また, 反応性 ECR スパッタ法によって, 熱酸化シリコン基板上および MgO(100)下地層上に Ni-Zn フェライト薄膜を成膜し, MgO 下地層の効果について検討した。

熱酸化シリコン基板上に成膜した MgO 下地層上に膜厚 20 nm 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 5 nm 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 3 nm 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 5 nm 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 5 nm であると推測される。

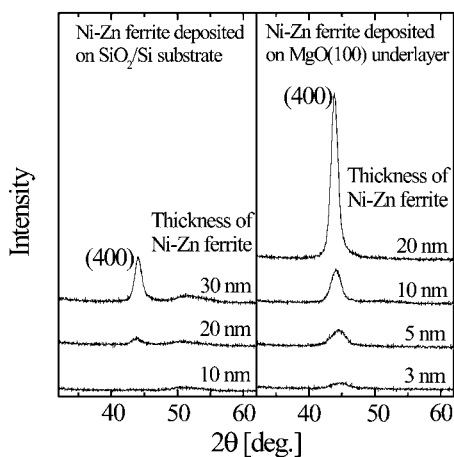


Fig. 9 XRD patterns for Ni-Zn ferrite films deposited on 5-nm-thick MgO(100) underlayer.

Fig. 9に熱酸化シリコン基板上および膜厚5 nmのMgO(100)下地層上に成膜したNi-Znフェライト薄膜のXRD測定結果を示す。熱酸化シリコン基板上の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ため、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以下にターゲット印加電圧を下げても、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、組成ずれの少ない高配向・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. 10に、Ni-Znフェライト(400)回折線のロックンクカーブを示す。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、ロックンクカーブの半値幅($\Delta\theta_{50}$)は減少し、結晶配向性が向上したものと推測される。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、結晶配向性が低下した。Fig. 11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

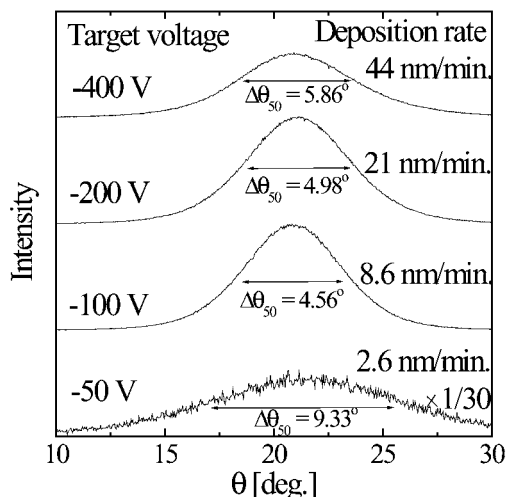


Fig. 10 Rocking curves for Ni-Zn ferrite (400) peaks.

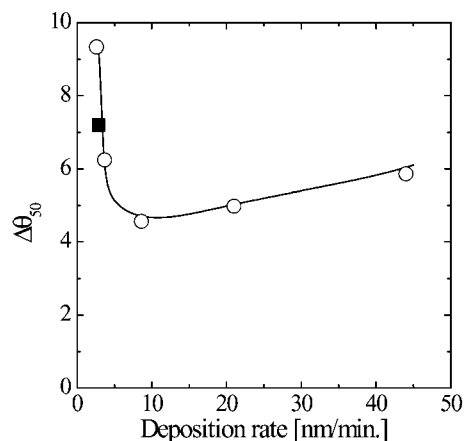


Fig. 11 Relation between full width at half maximum of rocking curves for Ni-Zn ferrite (400) and deposition rates.

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で成膜速度が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る。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■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ものと考えられる。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と推測された。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¹⁸⁾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。

6. ま と め

製造現場において実績のある ECR プラズマ CVD 装置をベースに、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、結晶配向性のよい Ni-Zn フェライト薄膜を低温で高速に、直径 6 インチの領域に均一な厚みで製造できることを示した。

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ることができる。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：財団法人中国技術振興センター)として実施された。また本研究には、財団法人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いた。心より感謝申し上げます。

〔文 献〕

- 1) 日本学術振興会透明酸化物光・電子材料第166委員会：透明導電：スパッタ薄膜 (日刊工業新聞社, 1993)
- 2) 小林春洋：スパッタ薄膜 (日刊工業新聞社, 1993) 4th ed. Chap. 5, p. 90.
- 3) 和佐清孝, 早川 茂：スパッタ技術 (共立出版, 1988).
- 4) 和田宏文, 山本節夫, 栗巢普揮, 松浦 満, 下里義博：日本応用磁気学会誌, **27** (2003) 363.
- 5) M. Matsuo and K. Ono: J. Vac. Sci. & Technol., **A6**(1) (1988) 25.
- 6) C. Takahashi, M. Kikuchi, T. Ono and S. Matsuo: J. Vac. Sci. & Technol., **A6**(4) (1988) 2348.
- 7) 松岡茂登, 小野堅一：日本応用磁気学会誌, **14** (1991) 554.
- 8) 木下治久：高密度プラズマ応用プロセス技術, リアライズ, 東京 (1993) 160.
- 9) 三宅正司, 馬場 創, 沼田 乾：J. Vac. Soc. Jpn., **45** (2002) 26.
- 10) S. Yamamoto, K. Sato, H. Kurisu and M. Matsuura: J. Appl. Phys., **79** (1996) 4896.
- 11) 佐藤王高, 山本節夫, 栗巢普揮, 松浦 満：日本応用磁気学会誌, **20** (1996) 57.
- 12) 平田 京, 山本節夫, 栗巢普揮, 松浦 満, 土井孝紀, 田万里耕作：粉体粉末冶金, **48** (2001) 742.
- 13) 鈴木準一, 鈴木正康, 岡田繁信：島津評論, **54** (1997) 135.
- 14) 秋田典孝, 小西善之, 小倉伸一：島津評論, **58** (2001) 59.
- 15) 平賀貞太郎, 奥谷克伸, 尾島輝彦：フェライト(丸善, 1986).
- 16) 藤井達生：日本応用磁気学会誌, **28** (2004) 1130.
- 17) 三浦義正：セラミックス, **24** (1989) 21.
- 18) 松浦 満, 山本節夫, 栗巢普揮, 部坂直樹：チタン, **52** (2004) 118.