

# ウェハレベルの磁性薄膜における高周波磁気透磁率・磁歪定数評価法の開発

## In-site measurement of permeability and magnetostriction constant of magnetic films deposited on Si wafers

森 修<sup>a)†</sup>・遠藤 恭<sup>b),c)</sup>・島田 寛<sup>b)</sup>・藪上 信<sup>d)</sup>・内海 良一<sup>a)</sup>

<sup>a)</sup> 株式会社 東栄科学産業, 名取市愛島台一丁目 101 番 60 号 (〒981-1251)

<sup>b)</sup> 東北大学大学院工学研究科, 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-04 (〒980-8579)

<sup>c)</sup> 東北大学スピントロニクス学術連携研究教育センター, 仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980-8577)

<sup>d)</sup> 東北学院大学工学部, 多賀城市中央一丁目 13-1 (〒985-8537)

O. Mori<sup>a)†</sup>, Y. Endo<sup>b),c)</sup>, Y. Shimada<sup>b)</sup>, S. Yabukami<sup>d)</sup>, R. Utsumi<sup>a)</sup>

<sup>a)</sup> Toei Scientific Industrial Co., Ltd, 1-101-60 Medeshimadai, Natori, 981-1251, Japan

<sup>b)</sup> Graduate School of Engineering, Tohoku University, 6-6-04 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

<sup>c)</sup> Center for Spintronics Research Network, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan

<sup>d)</sup> Faculty of Engineering, Tohoku Gakuin University, 1-13-1 Chuo, Tagajo 985-8537, Japan

A small microstrip-line probe developed to measure the RF properties of magnetic materials for a wide frequency range has been successfully applied to the on-site permeability measurement of thin films on Si wafers. In this study it is applied to determine the saturation magnetostriction constants of films on Si wafers. The results suggest that on-site and simultaneous measurements of permeability and magnetostriction for films on Si wafers are possible.

**Key words:** magnetostriction, permeability, thin film, Si wafer, tensile stress, magnetostrictive effect

### 1. はじめに

スマートフォンや PC などの電子デバイスには、多くの薄膜磁性材料が利用されている。これらの薄膜は一般的にウェハ上に製膜され、透磁率や磁歪定数などの磁気特性の計測が必要となる。しかし、磁歪については、光てこ法等による従来の評価方法は、評価用にサンプルを切り出す必要があり、煩雑かつ破壊検査となっている。これに対し、藪上<sup>1)</sup>らは、非破壊で高周波計測が可能なマイクロストリップライン (Microstripe Line : MSL) 構造のプロープを用いた計測システムを開発してきた。さらに、この MSL プロープを応用して、Si ウェハ基板上的薄膜試料の局所的な透磁率測定を可能にした高周波磁性薄膜評価装置を開発した。本装置ではウェハや角型基板上的磁性薄膜を 40GHz までの透磁率測定が可能であることが報告されている<sup>2)</sup>。

本稿では、このプロープを応用して、透磁率評価と同時に飽和磁歪を計測する方法について報告する。

この計測方法により、ウェハ上の磁性膜の局所的な透磁率と磁歪を非接触、非破壊で同時計測することが可能となり、従来困難であった生産工程における磁性膜評価に有用な方法と考えられる。

### 2. 磁歪測定原理および計測システム

#### 2-1 磁歪測定原理

本研究における磁歪の計測原理について説明する。

Fig. 1(a)のように、基板上に製膜された磁性薄膜の共鳴周波数  $f_{r0}$  と磁気異方性  $H_{kf}$  の関係は(1)式で表される<sup>3)</sup>。

$$f_{r0} = \frac{\gamma}{2\pi} \sqrt{H_{kf} \cdot 4\pi M_s} \quad (1)$$

これに対して、Fig. 1(b)のように一定の曲率半径  $r$  で基板を湾曲させて磁性膜に張力を印加すると、磁気弾性効果によって共鳴周波数が高周波または低周波にシフトする。この時の共鳴周波数を  $f_{r+}$  とすると、(2)式ようになる。

$$f_{r+} = \frac{\gamma}{2\pi} \sqrt{4\pi M_s (H_{kf} + H_{k\sigma})} = \frac{\gamma}{2\pi} \sqrt{4\pi M_s \left( H_{kf} + \frac{3\lambda_s h_s E_f}{2r M_s} \right)} \quad (2)$$

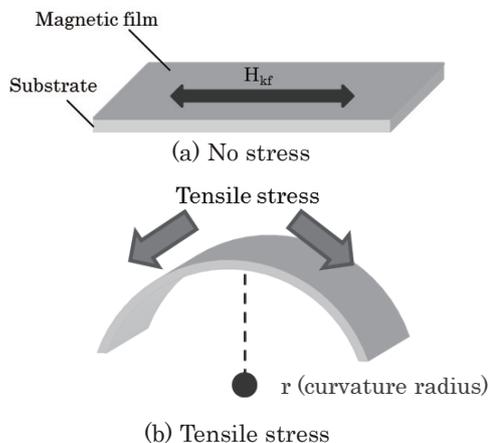


Fig. 1 Stress applied to magnetic thin film.

この時、 $M_s$  は磁性膜の飽和磁化、 $E_f$  は磁性膜のヤング率、 $h_s$  は基板厚、 $H_{ko}$  は磁気弾性効果による異方性磁界、 $\lambda_s$  が磁性膜の飽和磁歪定数である。外部磁場  $H_{ex}$  を印加した場合、(1)式、(2)式より  $f_{r0}$  と  $f_{r+}$  は(3)式の関係で表され、(4)式が成り立つ。

$$f_{r+}^2 = f_{r0}^2 + \left(\frac{\gamma}{2\pi}\right)^2 (4\pi M_s + H_{ex}) \left(\frac{3\lambda_s h_s E_f}{2r_+ M_s}\right) \quad (3)$$

$$\frac{f_{r+}^2 - f_{r0}^2}{f_{r0}^2} = \frac{1}{H_{kf} + H_{ex}} \left(\frac{3\lambda_s h_s E_f}{2r_+ M_s}\right) \quad (4)$$

(4)式により、 $H_{ex}$  を掃引して  $f_{r0}$  と  $f_{r+}$  を測定すると、(4)式の比例係数から  $\lambda_s$  を求めることができる。

## 2-2 測定サンプル

本実験では 0.2 mm 厚の 4 インチ Si ウェハ基板上面に 500 nm 厚の Co-Zr-Nb 膜を RF スパッタにより製膜した。Fig. 2 では、円弧状の治具に沿わせてウェハを固定し、Co-Zr-Nb 膜に張力を印加している。

## 2-3 計測システム

Fig. 3 は磁歪計測システムの構成を示したものであり、MSL プロブ、電磁石、レーザー変位計、ネットワークアナライザ(アジレントテクノロジー製 N9928A)および PC から構成される。測定は MSL プロブを厚さ 20 $\mu$ m のポリスチレンフィルムを介して測定サンプルに近接配置する。MSL からの高周波磁界は薄膜の張力方向に直交する方向 (Fig.2 の紙面垂直方向) に印加され、高周波磁界方向の磁気共鳴周波数を検出する。この状態で Fig.4 のように電磁石から張力方向に 1100 Oe の直流磁界 ( $H_{ex}$ ) を印加し、試料の磁化を飽和させた状態でネットワークアナライザをキャリブレーションする。次に  $H_{ex}$  を変化させつつ透過係数 ( $S_{21}$ ) を測定する。この測定を無負荷状態および張力を印加した状態で繰り返し、 $S_{21}$  から共鳴周波数を決定し、(4)式から磁歪  $\lambda_s$  を算出した。レーザー変位計で測定した応力印加時のウェハの曲率半径  $r$  は、278 mm であった。

なお、本計測の際には、Co-Zr-Nb 膜の作製時に形成された磁気異方性の磁化困難軸方向を MSL の幅方向と平行にした。

## 3. 測定結果

Fig. 5 は、Co-Zr-Nb 膜に  $H_{ex}$  (130~975 Oe) を印加した際の共鳴損失に相当する  $(1-S_{21})/S_{21}$  を測定した結果である。破線は無負荷時、実線は張力負荷時を示している。共鳴周波数  $f_r$  は、張力負荷によって、 $H_{ex}$  の増加にともない 30 MHz から 4 MHz 程度、低周波数帯域へシフトしている。Fig. 6 は、Fig.5 のピーク値より求めた、 $(f_{r+}^2 - f_{r0}^2)/f_{r0}^2$  と  $1/(H_{kf} + H_{ex})$  の関係をプロットしたグラフである。これらのパラメータは線形関係となっていて、(1)式によるフィッティングが可能である。このフィッティングにより得られた傾きが  $(3\lambda_s h_s E_f / 2r M_s)$  にあたるので、 $\lambda_s$  を算出したところ、 $-7.2 \times 10^{-7}$  であった。

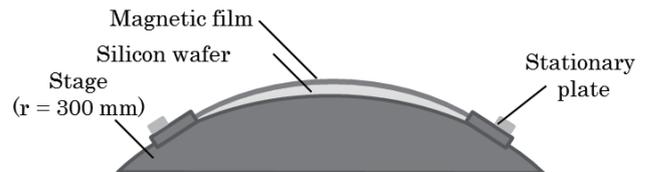


Fig. 2 Measurement sample.

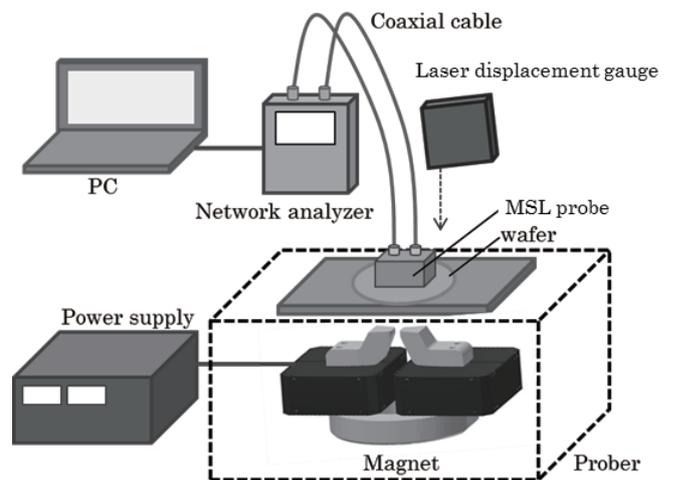


Fig. 3 Magnetostriction measurement system.

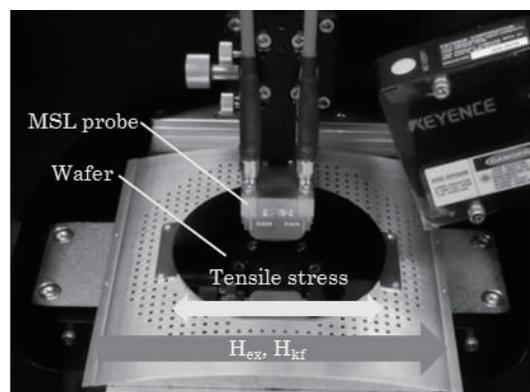


Fig. 4 The state of the measurement.

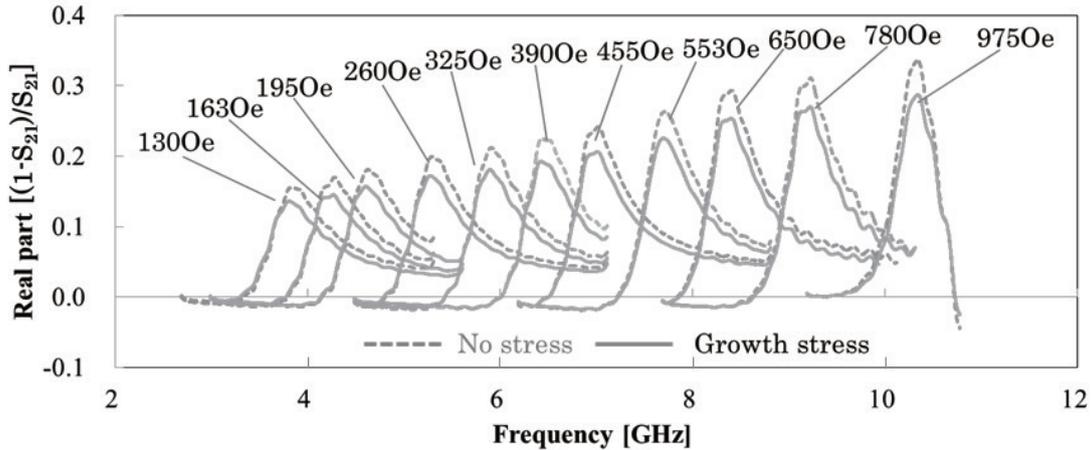


Fig. 5 FMR profiles of 500nm CoZrNb film with and without stress

Table 1 は膜厚 500 nm, 250 nm, 50 nm, の Co-Zr-Nb 薄膜を本測定法および光てこ法(東栄科学製薄膜磁歪測定装置)にて磁歪  $\lambda_s$  を測定した結果を比較したものである。光てこ法による測定 <sup>4)</sup>は、短冊形ガラス基板の上に Si ウェハ基板と同時作製した Co-Zr-Nb 薄膜を用いて行った。Fig. 7 は Table 1 の本測定法および光てこ法による各膜厚の磁歪測定値を比較したもので、測定値は直線上にあるが、本測定法の値が光てこ法の値に比べて若干小さくなる傾向がある。

#### 4. 考察

本研究の結果から、本測定法について以下の利点が考えられる。

1. 本実験の薄膜試料に制御された応力を印加する方法では、 $10^{-9}$  の測定感度を持ち、従来の光てこ法では困難であった 5nm 以下の極薄の試料も測定対象になる。
2. MSL プローブのサイズ程度の局所的な計測が可能であり、プローブを小型化する事で、MSL の線路長に応じてウェハ上の薄膜の透磁率、磁歪定数の分布が同時測定できる。
3. 本実験で示された、光てこ法による静的な磁歪と磁気共鳴による動的な磁歪に差が生じていることは、実験システムによる誤差、あるいは何等かの物理的理由がある可能性を考察中である。

#### 5. 結言

薄膜試料の応力と強磁性共鳴周波数の関係を利用して磁歪定数を求める方法を提案し、その有用性を検証した。今後の課題として、プローブの小型化と高感度化、測定対象の拡大、実用システムの製作などを準備中である。

**謝辞** Co-Zr-Nb 膜に関しては、東北大学電気通信研究所の石山和志教授、柘修一郎准教授にご提供いただきました。ここに深謝します。本研究の一部は宮城・仙台富県チャレンジ応援基金事業の成果である。

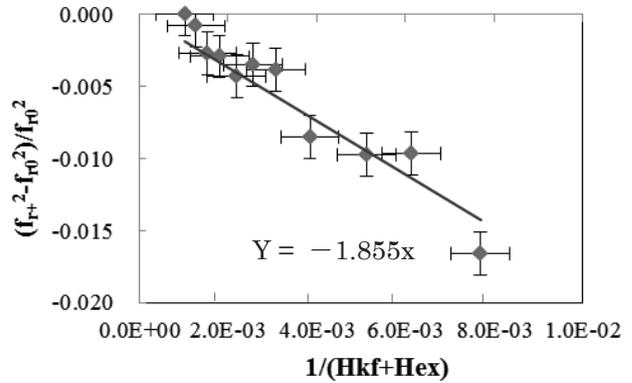


Fig. 6 Magnetic field dependence of resonance frequency.

Table 1 Results for different film thicknesses.

Magnetic film	Film thickness [nm]	$\lambda_s$ (this measurement)	$\lambda_s$ (cantilever method)
Co-Zr-Nb	500	$-7.19 \times 10^{-7}$	$-1.36 \times 10^{-6}$
Co-Zr-Nb	250	$-2.31 \times 10^{-6}$	$-3.07 \times 10^{-6}$
Co-Zr-Nb	50	$-4.29 \times 10^{-6}$	$-6.44 \times 10^{-6}$

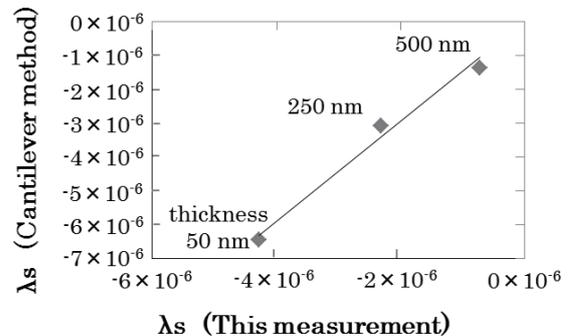


Fig. 7 Comparison between present and cantilever methods.

## Reference

- 1) S. Yabukami, A. Sato, J. Takahashi, T. Ozawa, Y. Miyazawa, K. Yanagi, Y. Shimada, M. Munakata, T. Shirokawa: *IEEE Trans. Magn.*, **47**, 2570(2011).
- 2) S. Yabukami, K. Kusunoki, H. Uetake, H. Yamada, T. Ozawa, R. Utsumi, T. Mori izumi, Y. Shimada: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **41**, 25(2017).
- 3) C. Kittel: *Phys. Rev.*, **73**, 155(1948).
- 4) A. C. Tam and H. Schroeder: *J. Appl. Phys.*, **64**, 5422(1988).

**Received Oct. 12, 2017; Accepted Jun. 11, 2018**