# フィゾー光干渉法による磁歪測定装置の作製

## System for measuring magnetostriction of magnetic thin films with Fizeau Interferometer

梅津勝平 ・高橋豊 ・稲葉信幸<sup>†</sup> 山形大学大学院理工学研究科,山形県米沢市城南4丁目 3-16(〒992-8510)

S.Umetsu, Y.Takahashi, and N.Inaba<sup>†</sup>

Graduate School of Science and Engineering, Yamagata Univ. ,4-3 -16 Jonan, Yonezawa, Yamagata, 992-8510, Japan

We developed a system for sensitively measureing the magnetostriction of magnetic thin film specimens that uses Fizeau interference. When a magnetic field is applied parallel to the film plane of a cantilevered specimen, the magnetostriction of the film makes the specimen slightly bend, and the movement of the interference patterns is observed depending on the deflection *d* of the specimen. The variation in *d* can be detected with a precision of about one thousandth of the wavelength of a laser beam. The magnetostriction constant  $\lambda_{110}$  of Fe(001) single crystal thin film with a thickness 62 nm deposited on GaAs(001) single crystal substrate was estimated to be  $(-1.0 \pm 0.6) \times 10^{-5}$  from a deflection of  $1.2 \pm 0.6$  nm.

Key words: magnetic single crystal thin film, magnetostriction, Fizeau interferometer

## 1. はじめに

Fe-Ni 系多結晶合金においてダンピング定数と磁歪 *λ* の値に相関があることが報告<sup>1)</sup>されたり, Fe-Ga 薄膜な どの高磁歪材料<sup>2)</sup>は振動発電デバイス<sup>3)</sup>やセンサー 応 用<sup>4)</sup>といった分野で注目されている. 磁歪の結晶方位依 存性を測定するためには単結晶薄膜試料を用いて測定を 行う必要があるが, ヤング率の大きい MgO,GaAs 基板上 に作製した単結晶薄膜試料では磁歪による変位量が小さ くひずみゲージや光梃子法を用いた装置では測定が困難 であった. このため, マイケルソン光干渉磁歪測定装置を 作製し, 2.6 nm の変位が測定可能であることを報告<sup>5)</sup>し てきた. この測定法では,磁歪による試料のたわみ量を観 測し, 以下の(1)式<sup>6)</sup>を用いて磁歪を算出するという点で は共通である.

$$\lambda = \frac{1}{3} \frac{E_{\rm s}(1+\nu_{\rm f})}{E_{\rm f}(1-\nu_{\rm s})} \frac{t_{\rm s}^2}{t_{\rm f}l^2} d \tag{1}$$

ここで、 $E_s$ :基板のヤング率、 $E_f$ :膜のヤング率、 $v_s$ :基板の ポアソン比、 $v_f$ :膜のポアソン比、 $t_s$ :基板厚、 $t_f$ :膜厚、 $l: \nu -$ ザースポットの位置、d:たわみ量である.

例えば、基板厚 0.2 mm の MgO 単結晶基板に膜厚 60 nm の Fe 単結晶基板を成膜した試料を片持で磁歪測定を行った場合、 $\lambda_s = 1.0 \times 10^{-6}$ 程度の磁歪によって固定端から 7 mm の位置に生じるたわみ量は 1.2 nm となる. また、基板厚を 1.5 倍の 0.3 mm とすると、たわみ量は基板厚の 2

乗に反比例するため 0.5 nm となる. このため, サブナノ オーダーの磁歪によるたわみ量を測定し基板や膜厚によ る制限を緩和するために分解能の向上が必要となった. 光 干渉法は光路長が一定の参照光と, 磁歪によるたわみに よって光路長が変化する測定光の位相差から生じる干渉 縞を用いて測定を行う. マイケルソン光干渉法では, 参照 光と測定光の2つの光路が別であるため, どちらかに外乱 が混入するだけで干渉縞が変化することとなり, 分解能の 向上が困難であった. 本研究では共通しない光路を少なく することが可能な同軸型干渉計 (フィゾー干渉計) に着目 し, 高い分解能を有する磁歪測定装置を作製したので報告 する.

#### 2. 磁歪測定装置の構成

## 2.1 フィゾー光干渉法による測定原理

作製した磁歪測定装置はフィゾー光干渉法の原理を応 用した.この装置の構成図を Fig.1 に示す.ハーフミラー A,ハーフミラー B,試料および検出器を同軸上に配置し ている.ハーフミラー A で光源からの光の向きを軸方向 に変更している.ハーフミラー B は反射して検出器へ向 かう参照光と透過して試料へ向かう測定光に入射光を分 離する.試料で反射された光は再度ハーフミラー B を通 過し,参照光と重なって検出器に到達する.このとき,検 出器には参照光と測定光の位相差に対応した干渉縞が投 影される.

試料が磁歪により d たわむと, 測定光の光路長は 2d 変



**Fig. 1** Schematic picture of measurement system with Fizeau interferometer.

化するため, 参照光と測定光の位相差が変化し検出器で観 測される干渉縞は ΔL 移動する. このとき, *d* と ΔL の関 係は

$$d = \frac{\lambda_{\rm L} \Delta L}{2L_{\rm pp}} \tag{2}$$

で表される. ここで, $\lambda_L$  は光源の波長であり,  $L_{pp}$  は観測さ れた干渉縞の一波長分の幅である. d が  $\lambda_L/2$  たわむと, 干 渉縞は  $\Delta L = L_{pp}$  移動することとなる. フィゾー光干渉法 では, ハーフミラー B と検出器の間では参照光と測定光 が重なっているため, 外乱は参照光と測定光の両者に同様 に影響を及ぼすこととなり, 外乱による位相差の変化が生 じにくい. 外乱が生じた場合に参照光と測定光の位相差に 影響するのはハーフミラー B から試料の間のみとなる.

## 2.2 作製した磁歪測定装置の構成

作製した磁歪測定装置の写真を Fig.2 に示す. 光源, ハーフミラーなどの光学系部品は空気式除震台上に設置 した. 電磁石は重量バランスの問題や冷却水の振動が光 学系に影響を与えるのを防ぐために,除震台とは別に架 台を準備し設置した. 試料は除震台端からホールピース のギャップに伸ばしたアームの先端に取り付けており, 架台からの振動を受けないようにしている. 試料は,短 冊形状の長軸方向の一端を片持で保持し,基板の長軸,あ るいは短軸と平行に磁界を印加できるようにした. 光源 は He-Ne レーザー (波長  $\lambda_L$  = 633 nm) を使用した. 写真 中のハーフミラー A,B がそれぞれ Fig.1 のハーフミラー A,B に対応している. ハーフミラー B は測定光単独の光 路長を削減するために, 試料に最も近いアームの根本に設 置した.この配置により、参照光、測定光それぞれが単独な 光路部分を持つマイケルソン光干渉磁歪測定装置に比べ て、単独な光路長を 1/3 に削減することができた. 検出器 には 4K 解像度のミラーレスデジタルカメラ (Nicon 1J5) を使用し、検出器直前に置かれた対物レンズで拡大された



**Fig. 2** Picture of magnetostriction measurement system with Fizeau interferometer.

干渉縞を撮像素子に直接投影している. ND フィルターは 光量が過大であることによる撮像素子の飽和や, 熱の影響 を防止するために設置した. バイポーラ電源を用いて電磁 石を  $-80 \le H \le 80$  kA/m( $-1.00 \le H \le 1.00$  kOe)の範囲 で変化させて測定を行った. 電磁石のホールピース中心近 傍 20 mm の領域で磁界が一定であるため, 短冊状試料の 長軸方向の長さが 20 mm 以下となるようにした試料を測 定に用いた. 試料近傍に設置したホール素子を用いて, 試 料に印加された磁界の大きさを測定した.

## 3. 実験方法

#### 3.1 試料の準備

作製した磁 歪測 定装置の性能を評価するため, GaAs(001)単結晶基板, MgO(001)単結晶基板の2種類 を準備し, RF マグネトロンスパッタ装置を用いてそれ ぞれの基板上に膜厚 62 nm の Fe(001)単結晶薄膜を成 膜した. GaAs 基板, MgO 基板のヤング率は 83 GPa<sup>7)</sup>, 245 GPa<sup>8)</sup>であり,同じ磁性膜を形成した場合,たわみ量 は約3倍の差となる. GaAs(001)基板は厚さ 0.32 mm であり, 劈開を利用して 20 mm × 7 mm の短冊状に切 り出した. GaAs 基板と Fe 薄膜との結晶成長の関係は Fe(001)[110]//GaAs(001)[110]であり,基板の長軸方向 は Fe[110] となっている. 一方,MgO(001)基板は厚さ 0.26 mm であり,GaAs 基板と同様に劈開を利用して短冊 状基板を切り出した. MgO 基板と Fe 薄膜の結晶成長関 係は Fe(001)[110]//MgO(001)[100]であり,基板の長軸方 向は GaAs 基板試料と同様に Fe[110] となっている.

これらの基板と Fe 単結晶薄膜の磁歪測定に関するパラ メーターを Table 1 に示す.

Single crystal	GaAs	MgO	Fe
Young's module E	83 GPa <sup>7)</sup>	245 GPa <sup>8)</sup>	208 GPa <sup>9)</sup>
Poisson's ratio v	0.31 7)	0.23 8)	0.29 9)
Thickness t	0.32 mm	0.26 mm	62 nm

Table 1 Parameters of single crystal substrate GaAs,MgO and thin film Fe

## 3.2 磁歪測定方法

磁界を上述の短冊状試料の長軸方向, あるいは短軸方向 に印加して長軸方向である Fe[110] 方向のたわみ量を測 定した. 上述の Fe(001) 単結晶試料について,(001) 面内で 印加磁界方向を変化させたとき, 試料の長軸方向である Fe[110] 方向の磁歪と印加磁界方向の関係<sup>10)</sup>は,磁歪を 観察している方向の試料の長さ L<sub>s</sub>, 長さの変化分を δL<sub>s</sub> とすると

$$\frac{\delta L_{\rm s}}{L_{\rm s}} = \frac{1}{4}\lambda_{100} + \frac{3}{4}\lambda_{111}\sin 2\theta \tag{3}$$

となる. このとき, *λ*<sub>100</sub>, *λ*<sub>111</sub> はそれぞれ [100] 軸方向, [111] 軸方向の磁歪定数であり, θは Fe[100] 方向と印加磁界の なす角である. 短冊状試料の長軸方向と平行に磁界を印加 したときの磁歪は

$$\lambda_{110\parallel} \equiv \left(\frac{\delta L_{\rm s}}{L_{\rm s}}\right)_{110\parallel} = \frac{1}{4}\lambda_{100} + \frac{3}{4}\lambda_{111} \tag{4}$$

であり,短軸方向と平行に磁界を印加した時の磁歪は

$$\lambda_{110\perp} \equiv \left(\frac{\delta L_{\rm s}}{L_{\rm s}}\right)_{110\perp} = \frac{1}{4}\lambda_{100} - \frac{3}{4}\lambda_{111} \tag{5}$$

となる. (4),(5) 式の関係を整理すると

$$\lambda_{100} = 2(\lambda_{110\parallel} + \lambda_{110\perp})$$
(6)

$$\lambda_{111} = \frac{2}{3} \left( \lambda_{110\parallel} - \lambda_{110\perp} \right)$$
(7)

となり, $\lambda_{110\parallel}$ , $\lambda_{110\perp}$ を用いて $\lambda_{100}$ , $\lambda_{111}$ を算出できる. この ため, 試料長軸方向, 短軸方向の2方向に磁界を印加して 磁歪の測定を行った.

H ≤ 1.00 kOe) の範囲で磁界を印加し, 磁界増加時と減少 時に1回ずつ測定した.各印加磁界におけるたわみ量は,3 回の測定により得た6点の平均値とした.エラーバーは, 各印加磁界におけるたわみ量の平均値と測定値との差の 絶対値の平均値を用いた.

Python<sup>11)</sup>で作製した半自動測定プログラムにより磁界 を制御し,経過秒数や印加磁界をログへ書き出した.測定 による干渉縞の動きはカメラの動画モードで記録し,動画 より切り出した干渉縞画像から離散フーリエ変換を用い て干渉縞の成分を取り出し,干渉縞の幅とピークの位置を 算出した. 干渉縞の幅, 干渉縞のピーク位置, 印加磁界の ログを用いて解析し磁歪によるたわみ量を算出した.

#### 4. 実験結果

## 4.1 Fe/GaAs 試料の測定

### 4.1.1 干渉法の異なる磁歪測定装置の感度比較

同一の Fe/GaAs 試料を用いてマイケルソン光干渉磁歪 測定装置とフィゾー光干渉磁歪測定装置の性能を比較し た. 短冊状試料の長軸方向が印加磁界と平行になるように 固定し, 試料支持端から l = 7.0 mm の位置にレーザー光 を当て Fe[110] 方向の磁歪測定を行った. 測定試料の条件 を Table 1 に示す. バルク Fe 単結晶試料の [110] 方向の 磁歪 <sup>12)</sup>  $\lambda_{110} = -1.0 \times 10^{-5}, l = 7.0$  mm と Table 1 の条件 を(1)式に代入し推定すると、たわみ量は d = -1.2 nm と なる.

マイケルソン光干渉磁歪測定装置によるたわみ量の印 加磁界依存性の測定結果を Fig.3 に示す. 各磁界における 測定結果は 2.5 nm 程度のばらつきを有した. 上述したよ うに本試料のたわみ量が 1.2 nm 程度であるため, 磁歪に よる試料のたわみが測定のばらつきに埋もれてしまい,有 意なたわみ量を見出すことはできなかった.

上記と同一の試料のたわみ量をフィゾー光干渉磁歪測 定装置を用いて測定した. 測定のために、マイケルソン光 干渉磁歪測定装置の構成から参照光反射用の固定ミラー を取り去り、参照光分離用のハーフミラー B を設置した. その他の条件はマイケルソン光干渉磁歪測定装置による 測定と同じである. ハーフミラー B を試料から 30 cm の 測定は, 消磁状態から開始し −80 ≤ H ≤ 80 kA/m(−1.00 ≤ 位置に配置 (Fig.2 の配置に対応) したときの測定結果を Fig.4 に示す. レーザースポットの位置はマイケルソン光 干渉磁歪測定装置と同じ (l = 7.0 mm) とした. 薄膜が飽 和する領域の磁界 |H| ≥ 31.8 kA/m( |H| ≥ 400 Oe) を印 加した時のたわみ量は d = -1.2 nm となり一定値を示し た. このときのたわみ量のばらつきは ±0.6 nm であり,マ イケルソン光干渉磁歪測定装置によるばらつきの 1/4 を 示した. また, ハーフミラー B を試料から 45 cm の位置に 配置し測定光単独の光路長を上述の場合に比べて 1.5 倍 にすると、たわみ量のばらつきは 1.5 nm であった. この値



**Fig. 3** Applied magnetic field dependence of deflection for Fe(001)/GaAs(001) specimen measured by magnetostriction measurement system with Michaelson interference.

は、マイケルソン干渉磁歪測定装置に比べて 40% の改善 されたものの、上述したハーフミラー B を試料から 30cm の位置においた場合に比べてたわみ量のばらつきが約 2.5 倍に増加した.以上の測定結果から、分解能の向上は、同 軸型であるフィゾー光干渉法を用いることで参照光と測 定光の光路を共通化し、さらにハーフミラー B を試料の 近くに配置することで、外乱の影響を受けやすい測定光単 独の光路長を短縮したことによるものと考えられる.結 果、マイケルソン光干渉磁歪測定装置より1桁程度小さな たわみ量を識別する感度を得た.

 $d = -1.2 \pm 0.6$  nm,l = 7.0 mm と Table 1 を (1) 式に代入 し Fe[110] 方向の磁歪を算出すると  $\lambda_{110} = (-1.0 \pm 0.6) \times 10^{-5}$  となった. この値は, バルク Fe 単結晶試料の [110] 方向の磁歪 <sup>12)</sup> と良い一致を示した.

## 4.1.2 フィゾー光干渉磁歪測定装置の再現性検証

同一の Fe/GaAs 試料を測定し, 異なる測定条件で測定 した場合においても結果の再現性を示すか検証した. 試 料は短冊状試料の短軸方向が印加磁界と平行になるよう に固定し,Fe[110] 方向のたわみ量から磁歪を測定した. 変 化させる測定条件として試料支持端からレーザースポッ トまでの距離を  $l_1 = 7.3 \text{ mm}, l_2 = 8.0 \text{ mm}, l_3 = 9.5 \text{ mm} と$ した. 試料の長辺方向の長さが異なる場合を考慮して, 設 計で想定した標準的な試料の取り付け方を行った場合の レーザースポットまでの距離を  $l_2$ , 設計で許容される最小 長を  $l_1$ , 最大長を  $l_3$  としている.

得られた磁歪の印加磁界依存性を Fig.5 に示 す. 各レーザースポットの位置における, 飽和磁界 |*H*| ≥ 31.8 kA/m(|*H*| ≥ 400 Oe)の平均たわみ量と, その



**Fig. 4** Applied magnetic field dependence of deflection for Fe(001)/GaAs(001) specimen measured by magnetostriction measurement system with Fizeau interference.

値から算出した磁歪  $\lambda_{110\perp}$  を Table 2 に示す. 磁歪の算出 には Table 1,2 の *l* と *d* を (1) 式に代入した. 測定値から 算出された磁歪の平均値は  $\lambda_{110\perp} = 1.8 \times 10^{-5}$  となった. この磁歪定数のばらつきは  $0.4 \times 10^{-5}$  程度であり, たわみ 量のばらつきが算出した磁歪に与える影響による値と同 程度であることから測定条件による測定誤差の影響は見 られず, 測定の再現性を示す.

測定した GaAs 基板試料の  $\lambda_{110} \ge \lambda_{110\perp}$  の値のばらつ きを考慮した上で (6),(7) 式を用いて  $\lambda_{100} \ge \lambda_{111}$  を算出 すると,  $\lambda_{100} = (1.7 \pm 2.1) \times 10^{-5}$ ,  $\lambda_{111} = (-1.9 \pm 0.7) \times 10^{-5}$ となる. この値は Table 3 に示すようにバルク Fe 単結晶 の磁歪と良い一致を示した.

## 4.2 Fe/MgO 試料の測定

GaAs 基板よりもヤング率の大きい MgO 基板を用い た Fe/MgO 試料についてフィゾー干渉磁歪測定装置を用 いて磁歪を測定した.短冊状試料の長軸方向 (Fe[110] 方 向) が印加磁界と平行になるように固定し,レーザー光を 試料支持端から l = 12.5 mm の位置に当て Fe[110] 方向 のたわみ量より磁歪  $\lambda_{110}$  を測定した.試料の条件を Table 1 に示す.たわみ量の印加磁界依存性の結果を Fig.6 に示 す.磁化が飽和する領域  $|H| \ge 31.8$  kA/m( $|H| \ge 400$  Oe) におけるたわみ量はほぼ一定値を示し,その平均値は -2.5 nm,平均からのばらつきは 0.6 nm 程度であり,d = $-2.5 \pm 0.6$  nm が得られた.この値を (1) 式に代入して Fe[110] 方向の磁歪を計算すると $\lambda_{110} = (-1.3 \pm 0.3) \times 10^{-5}$ となる.この値は、文献 5 にて報告している Fe/MgO 試料をマイケルソン光干渉磁歪装置によって測定した  $\lambda_{110} = (-1.4 \pm 0.3) \times 10^{-5}$  と良い一致を示した.

上述の試料について短軸方向と平行に磁界を印加し

Laser spot distance <i>l</i> [mm]	Deflection d [nm]	Magnetostriction $\lambda_{110\perp}$
7.3	$1.6 \pm 0.6$	$(1.6 \pm 0.5) \times 10^{-5}$
8.0	$2.9 \pm 0.6$	$(1.9 \pm 0.4) \times 10^{-5}$
9.5	$4.1 \pm 0.6$	$(2.1 \pm 0.3) \times 10^{-5}$
	Average $\lambda_{110\perp}$	$(1.8 \pm 0.4) \times 10^{-5}$

Table 2 Magnetostriction measurement conditions and measurement results in Fe [110] direction

Samples	$\lambda_{110}$	$\lambda_{110\perp}$	$\lambda_{100}$	$\lambda_{111}$		
Fe bulk single crystal	$-1.0 \times 10^{-5}$	$2.0 \times 10^{-5}$	$2.0 \times 10^{-5}$ <sup>12)</sup>	$-2.0 \times 10^{-5}$ <sup>12)</sup>		
Fe(001)/GaAs(001)	$(-1.0 \pm 0.6) \times 10^{-5}$	$(1.8 \pm 0.4) \times 10^{-5}$	$(1.7 \pm 2.1) \times 10^{-5}$	$(-1.9 \pm 0.7) \times 10^{-5}$		
Fe(001)/MgO(001)	$(-1.3 \pm 0.3) \times 10^{-5}$	$(1.7 \pm 0.4) \times 10^{-5}$	$(0.8 \pm 1.4) \times 10^{-5}$	$(-2.0 \pm 0.5) \times 10^{-5}$		

**Table 3** List of magnetostriction constants of Fe single crystal

5.0 4.0 Magnetostriction  $\lambda$  ×10^{-5} 3.0  $=(1.8\pm0.4)\times10^{-5}$ 2.0 1.0 0.0 -1.0  $l_1 = 7.3 \text{ mm}$ =8.0 mm-2.0 =9.5 mm -3.0 -60 -40 -20 0 20 40 60 80 -80 Applied field H (kA/m)

**Fig. 5** Variations in deflection *d* for Fe(001)/GaAs(001) specimen with external magnetic field applied perpendicular to Fe[110] direction. The deflections were measured by the Fizeau interferometric magnetostriction measurement system with different laser positions,  $l_1 = 7.3$  mm,  $l_2 = 8.0$  mm, and  $l_3 = 9.5$  mm.

Fe[110] 方向のたわみ量を測定し磁歪  $\lambda_{110\perp}$  を求めた. こ のとき, レーザー光の位置は l = 10.8 mm である. たわ み量の印加磁界依存性の結果を Fig.7 に示す. 飽和磁界  $|H| \ge 31.8$  kA/m( $|H| \ge 400$  Oe) におけるたわみ量はほぼ 一定値を示し, その平均値は 2.7 nm, 平均からのばらつき は 0.6 nm 程度であり,  $d = -2.7 \pm 0.6$  nm が得られた. この 値と Table 1 の条件を (1) 式に代入して計算すると磁歪は  $\lambda_{110\perp} = (1.7 \pm 0.4) \times 10^{-5}$  となった.

測定した Fe/MgO 試料の  $\lambda_{110} \geq \lambda_{110\perp}$  の値のばらつき を考慮した上で (6),(7) 式を用いて  $\lambda_{100} \geq \lambda_{111}$  を算出す ると,  $\lambda_{100} = (0.8 \pm 2.1) \times 10^{-5}$ ,  $\lambda_{111} = (-2.0 \pm 0.7) \times 10^{-5}$ となる. Table 3 に示すように  $\lambda_{110}$ ,  $\lambda_{110\perp}$  の値は GaAs 基 板試料の測定と比べて  $-0.3 \times 10^{-5}$  程度変化した.



**Fig. 6** Variations in deflection d for Fe(001)/MgO(001) specimen with external magnetic field applied parallel to Fe[110] direction.

これは、基板と薄膜の格子間隔の違いから生じる膜応力 によるものと考える. MgO の格子間隔は Fe の格子間隔 より MgO を基準として 5% 程度広いため、Fe は引張応力 を受けて伸長した状態となる. よって、(001) 面内の磁歪が 収縮する変化を見せたと考えられる. 一方、Fe/GaAs 試料 の測定結果は、Fe と GaAs 基板の格子間隔の関係は Fe が 0.1% 程度基板より広い程度の差しかないため、基板との 応力が小さくバルク Fe 単結晶試料の値と良い一致を示 した.

ー連の実験から作製した測定装置は測定結果の再現性 を示すことを確認できた. 分解能に関して 0.6 nm のたわ み量を測定可能な分解能を持つ. 測定のばらつきの要因と して外乱と画像の量子化誤差が考えられる. 現在,3 波長 分の干渉縞が 4K 画像 (横方向:3840 pixel) に収まるよう に記録している. He-Ne レーザー ( $\lambda_{\rm L} = 633$  nm)を使用し た場合の干渉縞画像 1 ピクセルあたりの移動量は (2) 式



**Fig. 7** Variations in deflection d for Fe(001)/MgO(001) specimen with external magnetic field applied perpendicular to Fe[110] direction.

を用いて計算すると約 0.3 nm となる. この測定分解能の 限界は測定のばらつきの半分程度を占めるため無視でき ない. 対策として撮像素子に投影する干渉縞を拡大して記 録する方法が考えられるが, 干渉縞の移動からたわみ量を 精度良く検出するためには一定の干渉縞の本数が必要で あるため採用できない. このため, 干渉光の検出方法を検 討する必要がある. 他にたわみ量のばらつきの原因として 周囲の振動や温度変化によって測定装置を構成する部品 が伸縮し, 光路長が変化するといった外乱の影響が考えら れる. 対策として熱膨張率の小さく剛性のある材料を使用 する必要がある.

#### 5. 結言

フィゾー干渉法の原理を応用した磁歪測定装置を新た に作製した. Fe(001)/GaAs(001) 試料のたわみ量につい て,このフィゾー干渉磁歪測定装置と既存のマイケルソ ン光干渉磁歪測定装置を用いて比較測定を行ったとこ ろ,既存の装置では測定値に 2.5 nm 程度のばらつきがあ り,磁歪による有意なたわみ量の変化を検出できなかっ た.一方,フィゾー光干渉磁歪測定装置では *d* = -1.2 nm のたわみ量を 0.6 nm のばらつきで測定できた. 得られた 結果から Fe[110] 方向の磁歪定数を算出すると  $\lambda_{110} =$ (-1.0±0.6)×10<sup>-5</sup>となり,バルクの値と良い一致を示し た.これらの結果から,新規に作製したフィゾー干渉磁歪 測定装置では 0.6 nm のたわみ量が検出可能な分解能を有 し,マイケルソン光干渉磁歪測定装置に比べて 1/4 の大き さのたわみ量を検出可能な感度を持つことを確認できた. フィゾー干渉法では参照光と測定光の光路が共通であり, 外乱の影響に弱い単独の光路部分が測定光だけとなり,そ の光路長も削減できたことから,外乱の影響が低減され分 解能の向上をもたらしたと考えられる.

サブナノオーダーの測定では、外乱の要因として周囲の 温度変化や振動によるたわみ量の変化に加えて、本装置の 検出方式の場合は干渉縞を撮像素子で電子画像化する際 の量子化誤差が課題となる.さらなる測定性能の向上のた め、外乱対策や干渉光の検出方法を検討する必要がある.

**謝辞** 装置作製に協力いただいた,山形大学工学部鈴木貴 彦技術職員に感謝する.

#### References

- 1) Y. Endo, Y. Mitsuzuka, Y. Shimada, and M. Yamaguchi: J.Appl. Phys, 109, 07D336 (2011).
- N. Srisukhumbowornchai and S. Guruswamy: J. Appl. Phys., 90, 5680 (2001).
- S. Dong, J. Zhai, F. Bai, J. Li, D. Viehland and T. A. Lograsso: J. Appl. Phys. ,97, 103902 (2005).
- R. R. Basantkumar, B. J. H. Stadler, W. P.Robbins and E. M. Summers: *IEEE Trans. Magn.*, 42, 3102 (2006).
- M. Sato, Y. Yoshida, T. Suzuki, Y. Takahashi, K. Koike, and N. Inaba: *T. Magn. Soc. Jpn.* (Special Issues), 3, 39 (2019).
- 6) A. C. Tam, and H. Schroeder: IEEE Trans. Magn., 25, 2629 (1989).
- http://www.neotron.co.jp/crystal/4/GaAs.html(As of December 24, 2020).
- Y. Yoji: Sosei no Butsuri (in Japanese), Vol.1, p.68 (Kitamori, Tokyo, 2011).
- 9) G. R. Speich, A. J. Schwoeble and W. C. Leslie: *Metallurgical Transactions*, **3**, 2031 (1972).
- K. Ota: Jikikougaku No Kiso (in Japanese), Vol.1, p.243 (Kyoritsu, Tokyo, 1973).
- 11) https://www.python.org(As of December 24, 2020).
- Y. Tanji, Y. Shirakawa and H. Moriya: J Magn. Soc. Jpn., 4,417 (1970).

Recieved Dec. 31, 2020; Revised Feb. 11, 2021; Accepted Feb. 25, 2021