

フリップチップボンディングによる高周波駆動薄膜磁界センサモジュール

Coplanar line type thin film magnetic field sensor with flip chip bonding

工藤春陽^{a)†}・植竹宏明^{b)}・小野寺英彦^{c)}・トンタット ロイ^{a)}・沖田和彦^{d)}・藪上 信^{a)d)}・早坂淳一^{b)}・荒井賢一^{b)}

^{a)} 東北大学大学院工学研究科, 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-5 (〒980-8579)

^{b)} 電磁材料研究所, 富谷市成田 9-5-1 (〒981-3341)

^{c)} 東北学院大学, 多賀城市中央 1-13-1 (〒985-8537)

^{d)} 東北大学大学院医工学研究科, 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-5 (〒980-8579)

H. Kudo^{a)†}, H. Uetake^{b)}, H. Onodera^{c)}, L. Tonthat^{a)}, K. Okita^{d)}, S. Yabukami^{a)d)},

J. Hayasaka^{b)}, and K.I. Arai^{b)}

^{a)} Graduate School of Engineering, Tohoku Univ., 6-6-5 Aramaki Azaaoba, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

^{b)} Research Institute for Electromagnetic Materials, 9-5-1 Narita, Tomiya 981-3341, Japan

^{c)} Tohoku Gakuin Univ., 1-13-1 Chuo, Tagajo 985-8537, Japan

^{d)} Graduate School of Biomedical Engineering, Tohoku Univ., 6-6-5 Aramaki Azaaoba, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

A very sensitive thin-film sensor was developed by using a straight coplanar line-type sensor with flip chip bonding. SrTiO film (about 3- μm thick), amorphous $\text{Co}_{85}\text{Nb}_{12}\text{Zr}_3$ film and Cu/Cr film (2 $\mu\text{m}/0.2 \mu\text{m}$) were fabricated. We discuss the high-frequency characteristics and sensitivity of the sensor element through comparison of cases with and without flip chip bonding. Good sensitivity with a phase change of over 290 degrees/Oe was obtained with flip chip bonding.

Key words: magnetic sensor, thin film, coplanar line, flip chip bonding

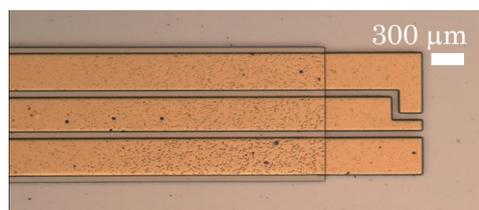
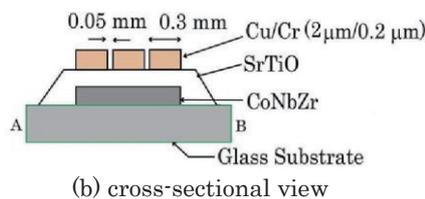
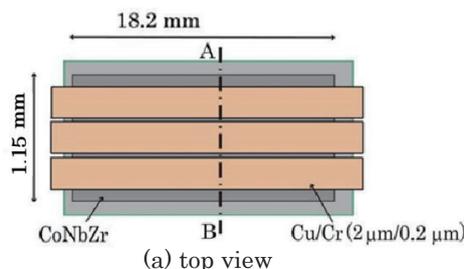
1. はじめに

代表的な高感度磁界センサとして超伝導量子干渉磁束計(SQUID)^{1)~2)}や光ポンピング法³⁾があり, 生体磁気計測, 非破壊検査等へ応用されている. しかし SQUID 磁束計は超伝導現象を利用するためセンサヘッドを液体ヘリウム等で冷却する必要があり, 高コストかつ煩雑なメンテナンスが要求されることから, 一部の医療機関や研究機関に限定的に設置されている. 一方, 近年は室温で動作する高感度磁界センサの研究も活発に行われており, フラックスゲートセンサ⁴⁾, MIセンサ⁵⁾, GMRセンサ⁶⁾, TMRセンサ⁷⁾の高感度化も報告されている.

筆者らはこれまで磁性薄膜を伝送線路構造に構成し, GHz帯の高周波キャリア通電による表皮効果, 強磁性共鳴を利用したセンサを開発し, 磁気シールドなしで健常者の心磁界多点計測に成功した^{8)~9)}. また高周波駆動に関するセンサ素子の感度等を検討してきたものの^{10)~13)}, センサモジュール全体として高周波動作に関する検討はほとんど行ってこなかった. 本センサは他のセンサと異なり 1 GHz以上の高周波キャリアでを使用することから, センサ素子の感度を損なうことなく, 基板等を実装したモジュールとして安定的に動作させることは本センサ開発および応用を検討する上で, 重要な技術的課題である.

そこで本稿では, 伝送線路および磁性薄膜を薄膜プロセスにより一体化した直線コプレーナ構造の薄膜磁界センサを作製し, フリップチップボンディングによりインピー

ダンス整合を極力維持できるモジュールを開発した. その結果, 1.5 GHz程度までのキャリアであればセンサ素子単独とフリップチップボンディングで実装したセンサの高周波特性, 磁界に対してほぼ同等の感度等が得られた. フリップチップボンディングにより実装したセンサにおい



(c) photograph of sensor
Fig. 1 Schematic view of sensor.

Table 1 Film thickness and sensor number

Thickness (μm)		Number of samples	
CoNbZr	SrTiO	Before bonding	After bonding
1.0	3.0	10	10
2.0	3.0	10	10
5.0	3.0	10	9
6.3	3.8	10	9
8.0	4.8	10	10
10.0	8.0	10	2

Table 2 Sputtering conditions

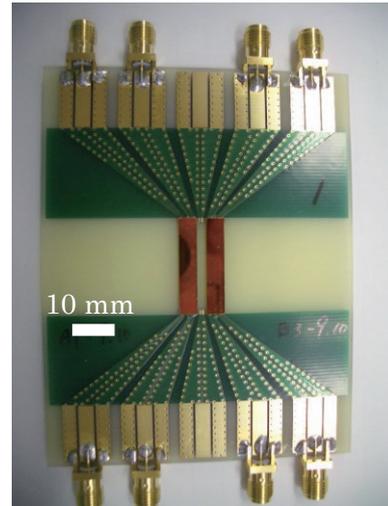
	CoNbZr	SrTiO	Cu / Cr
Power (W)	200	200	200
Ar pressure (mTorr)	5	20	20
Thickness (μm)	1-10	3	2 / 0.2

てキャリア信号の振幅と位相差における感度の相違点, CoNbZr 薄膜の膜厚に対する感度の依存性等について明らかとしたので報告する.

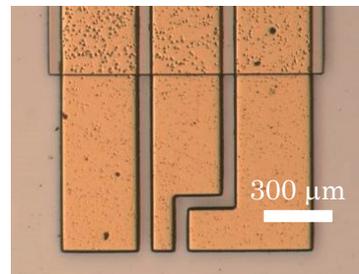
2. 実験方法

Fig. 1 は直線コプレーナ型線路により構成される薄膜磁界センサ素子の構造を示したもので, Fig. 1(a)は上面図, Fig. 1(b)は(a)の AB 断面図, Fig. 1(c)は上部からのセンサ素子端部付近の写真を示している. Table 1 は今回試作したセンサの膜厚およびセンサの個数, Table 2 は成膜条件を示している. センサ素子は CoNbZr 薄膜の上部に直線コプレーナ構造(長さ 19.8 mm)を有する. ガラス基板 (25 mm \times 25 mm, 1 mm 厚)上にアモルファス CoNbZr 薄膜(1.15 mm \times 18.2 mm)を成膜し, SrTiO 薄膜(約 3 μm 厚)を介して Cu 薄膜によるミアンダコプレーナ線路(300 μm 幅, ギャップ 50 μm , 2 μm 厚)をそれぞれリフトオフにより作製した. SrTiO 薄膜と Cu 薄膜の間には Cr 薄膜(0.2 μm 厚)を中間層として積層した. コプレーナ導体パターンは特性インピーダンスがほぼ 50 Ω になるように作製した. ただし磁性薄膜を密着配置しているため, 特性インピーダンスは 50 Ω から大きく変化するとともに虚数分も生じる. CoNbZr 薄膜は RF スパッタにより成膜し, 回転磁界中熱処理(300 $^{\circ}\text{C}$, 2 時間, 0.3 T)の後, 静磁界中熱処理(300 $^{\circ}\text{C}$, 1 時間, 0.3 T)を施して, コプレーナ導体の幅方向へ磁気異方性を誘導した. SrTiO 薄膜は基板加熱しながら RF スパッタにより成膜し, 成膜時の基板加熱温度は 160 $^{\circ}\text{C}$ とした. キャリア信号はコプレーナの中心導体流れ, CoNbZr 薄膜には導通しない. SrTiO 薄膜は既報¹³⁾と同一条件で成膜していることから, その比誘電率はおおよそ 31 と考えられる.

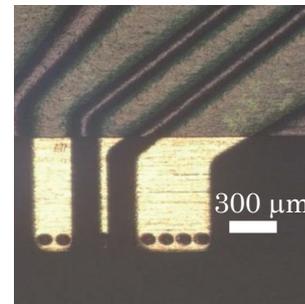
Fig. 2(a)はフリップチップボンディングによりセンサ素子(写真ではセンサ素子の裏面が見えている)とプリント基板を接続した写真である. Fig. 2(b)はセンサ素子の導体薄膜の写真を表し, Fig. 2(c)はプリント基板側導体パターンを表している. Fig. 2(b)と Fig. 2(c)の導体間を銀ペー



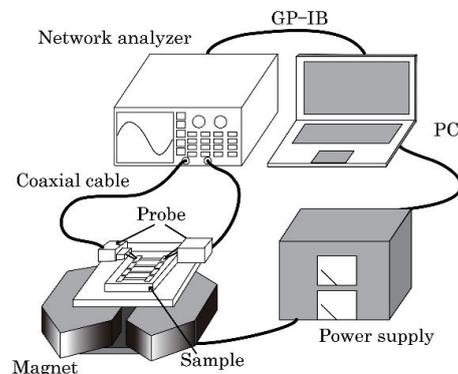
(a) photograph of sensor element set on printed circuit board



(b) conductor of sensor element



(c) conductor of printed circuit board

Fig. 2 Photograph of sensor and printed circuit.**Fig. 3** Schematic diagram of experimental setup.

ストにより電氣的に接続した. プリント基板のコプレーナ導体パターンはおおよそ 50 Ω の特性インピーダンスにな

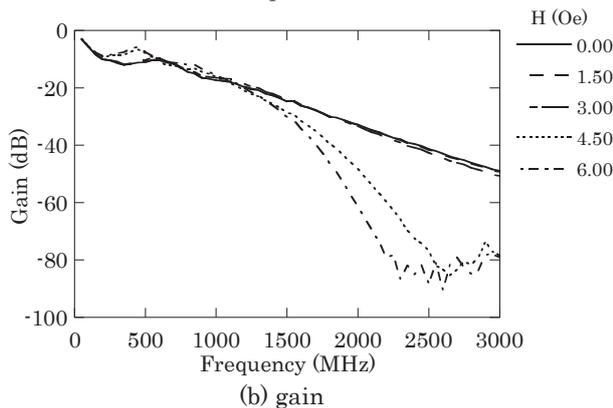
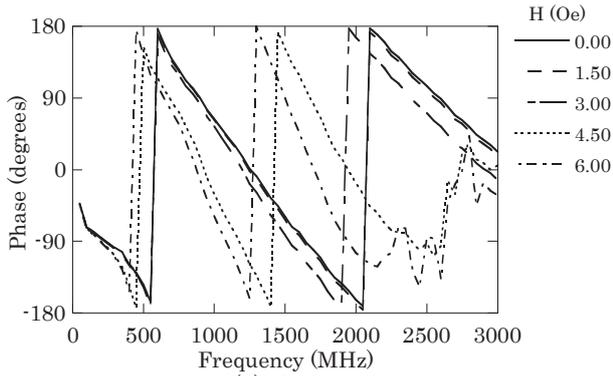


Fig. 4 Output of sensor element (CoNbZr film thickness was 1 μm).

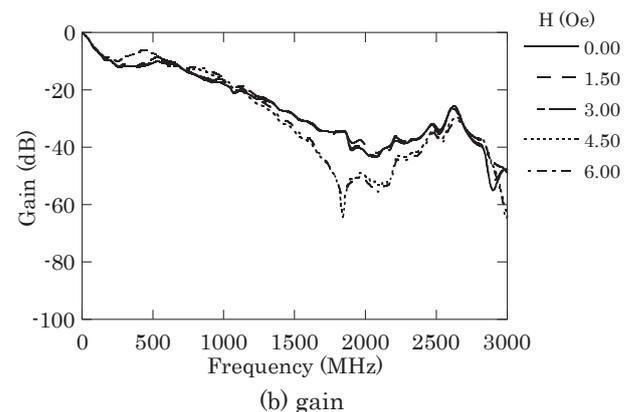
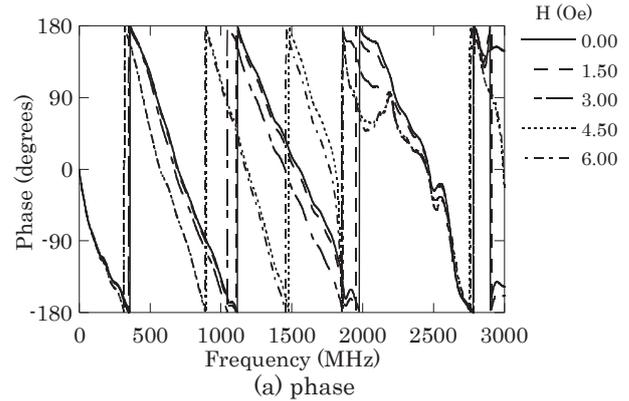


Fig. 5 Output of sensor after flip chip bonding (CoNbZr film thickness was 1 μm).

るように作製した。フリップチップボンディングはコネクテックジャパン株式会社で実施した。

Fig. 3 は磁界に対するセンサの応答性の計測方法を模式的に示したものである。センサの評価には市販のウエハプローブ(GSG-40-150A)を用いてセンサ素子と電気的に接続し、ゆっくりとバイアス磁界を変化させて、ネットワークアナライザ(HP8722ES)の透過法測定によりキャリアの振幅変化および位相変化を求めた。周波数範囲は 10 MHz-10 GHz とし、バンド幅は 1 kHz、平均化回数は 16 回、RF 投入電力は 0 dBm とした。キャリブレーションは予め無磁界でセンサ素子の代わりに十分短いスルーのコプレーナ線路(特性インピーダンスは 50 Ω)をウエハプローブに接触し、ネットワークアナライザのスルー測定により、同軸ケーブル、ウエハプローブの分の電気長、損失、接触抵抗等を校正し、その後主測定を行った。

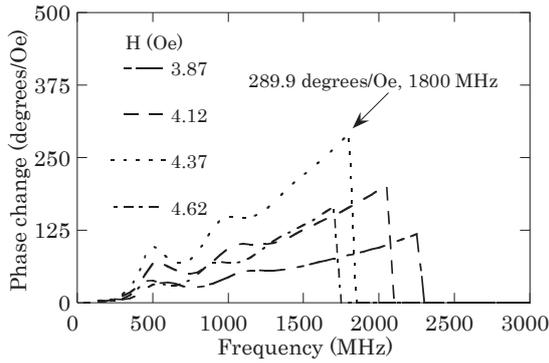
3. 測定結果

Fig. 4 は Fig. 1 のセンサ素子単独において、磁界に対するキャリアの位相変化、振幅変化を周波数に対して示したものである。CoNbZr 薄膜の膜厚は 1 μm 厚とした。コプレーナ線路長手方向(磁化困難軸方向)への直流磁界を 0 Oe から大きくすることにより、センサ素子においてコプレーナ線路幅方向(磁化容易軸方向)における CoNbZr 薄膜の透磁率は増加する。これにより Fig. 4(a)によれば磁界印加に伴うキャリアの位相は周波数が高くなるに従っ

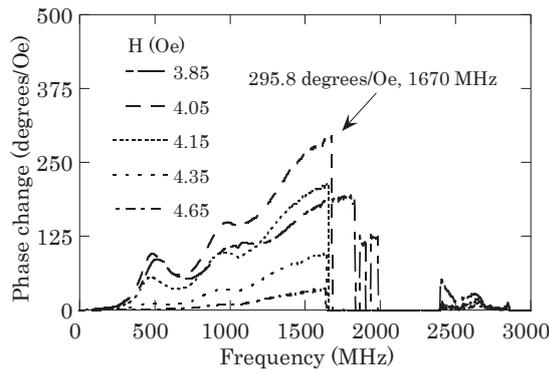
て、大きく変化している。これは CoNbZr 薄膜の透磁率が増加したことにより実効的な伝送線路の波長が短くなったため、位相変化が大きく観測されたためと考えられる。一方透磁率が大きくなることでインピーダンス不整合および CoNbZr 薄膜の強磁性共鳴に基づく損失が大きくなり、振幅は 1.5 GHz 以上では急速に減少し、フィルタ的な周波数依存性となっている。

Fig. 5 は同一センサをフリップチップボンディングした後の磁界に対するキャリアの位相変化、振幅変化を周波数に対して示したものである。Fig. 4 に比較して、1.5 GHz 以上の帯域では磁界を変化させた場合における位相変化および振幅変化が鈍くなっており、高周波域での透磁率変化が測定されにくくなっている。この原因としては Fig. 2(a)におけるプリント基板の取り出し部分におけるコプレーナ線路の内部導体幅が一部不連続に作製され、その部分における多重反射が反映されたものと考えられる。

Fig. 6 はセンサ単独とフリップチップボンディング後の周波数に対する位相変化感度を示している。いずれも振幅の減衰が -40 dB 以上確保出来る範囲で表している。これは心磁界計測等の微弱磁界検出における SN 比を確保する観点からの目安として設定した^{8)~9)}。振幅の減衰が -40 dB 以上を満たす範囲でセンサ素子単独で位相変化感度が最大となるのは約 1.8 GHz で 290 degrees/Oe を得た。一方フリップチップボンディング後には上記の一部が不整合である等により、最適条件におけるキャリア周波数

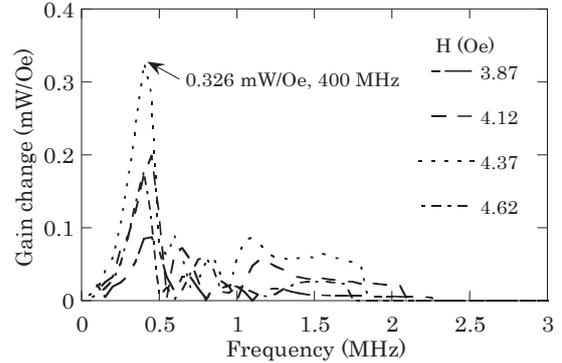


(a) sensor element (before flip chip bonding)

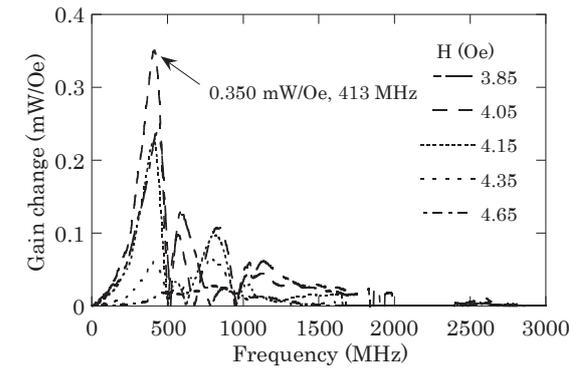


(b) after flip chip bonding

Fig. 6 Phase change of sensor output (CoNbZr film thickness was 1 μm).



(a) sensor element (before flip chip bonding)



(b) after flip chip bonding

Fig. 7 Gain change of sensor output (CoNbZr film thickness was 1 μm).

は低周波化し、約 1.7 GHz で 296 degrees/Oe とほぼ等しい高感度化が得られた。本センサ素子の高感度化される周波数帯(1.8 GHz 前後)ではフリップチップボンディング用基板の一部不整合の影響は限定的であったためと考えられる。

一方 Fig. 7 は周波数に対する振幅変化感度を示した。センサ素子単独およびフリップチップボンディング後ともに約 400 MHz においてキャリアの振幅変化感度は最大となった。振幅の減衰が -40 dB 以上を満たす範囲の振幅変化感度はフリップチップボンディング前後でセンサ素子単独に比較してほぼ等しい感度となった。一方 1.8 GHz 以上では、フリップチップボンディング後の振幅変化感度はセンサ単独の場合に比較しておおよそ 50% 以下へ極端に劣化した。振幅検出と位相検出での感度を比較すると、最高感度を得たバイアス磁界強度はほぼ一致するものの、最適なキャリア周波数は大きく異なった。これは検出方法の違いによるものと考えられる。位相変化を検出する場合には、磁性薄膜の強磁性共鳴周波数付近において複素透磁率の位相変化が最大となることから、高周波動作が有利であることが了解される。一方、振幅変化を検出する場合にはキャリア信号強度が最も大きく変化する条件であることから、減衰がさほど顕著でない数 100 MHz 付近となったためと考えられる。

Fig. 8, 9 は 10 個のサンプルでの CoNbZr 薄膜の膜厚に対するセンサの位相変化感度、振幅変化感度の平均値およ

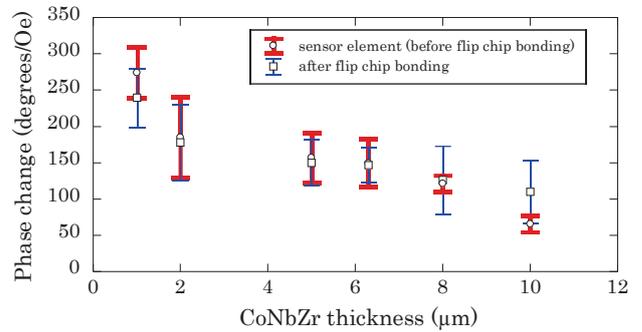


Fig. 8 Maximum phase change as function of CoNbZr film thickness.

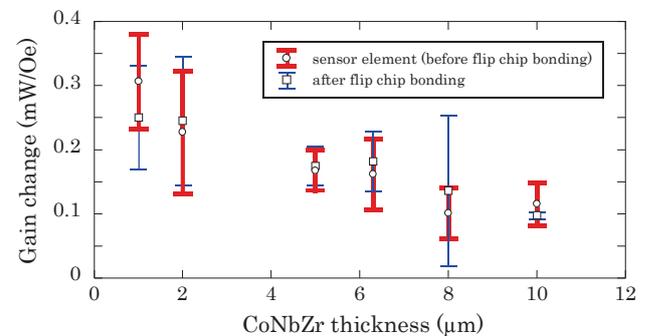


Fig. 9 Maximum gain change as function of CoNbZr film thickness.

び標準偏差を示したものである。それぞれセンサ素子単独とフリップチップボンディング後の結果を併記している。なおセンサの SN 比を良好に保つために透過係数(S_{21})の

ゲインは−40 dB以上を満たす範囲に限定して抽出している。Fig. 8, 9によれば CoNbZr の膜厚が薄いほどセンサの位相変化感度・振幅変化感度は高くなった。これは膜厚が薄い方が形状磁気異方性により面内の反磁界が弱まるため、面内の透磁率が大きくなると考えられる¹⁴⁾が、さらに CoNbZr 薄膜の膜厚が薄くなると磁性体の体積が減るためセンサ感度は悪化するものと考えられる。一方センサ単独とフリップチップボンディング後を比較すると、1 μm 厚の場合はセンサ単独の方が感度は高かったものの、全体的には感度の平均値はほぼ等しかった。これはゲインが−40 dB を超える条件を加味すると最適周波数が 1.0 GHz-1.7 GHz 程度となり、フリップチップボンディング電極のインピーダンス不整合の影響を比較的受けにくいためと考えられる。

4. まとめ

1. アモルファス CoNbZr 薄膜と SrTiO 薄膜を組み合わせた直線コプレーナ線路薄膜磁界センサを薄膜プロセスにより一体的に作製し、フリップチップボンディングによるモジュールを開発した。
2. フリップチップボンディング後のセンサ素子では 1.8 GHz 付近に共振が見られ、帯域が制限された。これはプリント基板の不整合部分の影響と考えられる。
3. CoNbZr 薄膜の膜厚が 1 μm の際に磁界に対する位相変化および振幅変化の感度は最も高くなった。センサ素子とフリップチップボンディング後で感度はほぼ等しかった。

謝辞 本研究の一部は科研費(16H04378)の研究成果である。

References

- 1) T. Tsuji and M. Kotani: *The Japanese journal of medical instrumentation*, **60**, 327–332 (1990).
- 2) T. Tomita, A. Arakawa, K. Shinada, N. Matsuda, K. Nakano, Y. Yamada, and Y. Yoshida: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **22**, 913–916 (1998).
- 3) S. Groeger, G. Bison, P. E. Knowles, R. Wynands, and A. Weis: *Sens. Actuator A Phys.*, **129**, 1–5 (2006).
- 4) T. Uchiyama: *J. Inst. Elect. Engnr. Jpn.*, **136**, 10–13 (2016).
- 5) I. Sasada, and H. Karo: *J. Inst. Elect. Engnr. Jpn.*, **136**, 18–21 (2016).
- 6) <https://product.tdk.com/info/ja/techlibrary/developing/bio-sensor/index.html> (As of October 10, 2019).
- 7) Y. Ando: *J. Inst. Elect. Engnr. Jpn.*, **136**, 22–25 (2016).
- 8) S. Yabukami, K. Kato, T. Ozawa, N. Kobayashi, and K. I. Arai: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **38**, 25–28 (2014).
- 9) S. Yabukami, K. Kato, T. Ozawa, N. Kobayashi, and K. I. Arai: *IEEJ Trans. Fundam. Mater.*, **133**, 372–375 (2013).
- 10) S. Yabukami, H. Uetake, K. Moriya, T. Tominami, and H. Onodera: *IEEJ Trans. Fundam. Mater.*, **137**, 460–465 (2017).
- 11) H. Uetake, T. Kawakami, K. Moriya, S. Yabukami, and T. Ozawa: *IEEE Trans. Magn.*, **51**, 4005003 (2015).
- 12) H. Uetake, T. Kawakami, S. Yabukami, T. Ozawa, N. Kobayashi, and K. I. Arai: *IEEE Trans. Magn.*, **50**, 4007604 (2014).
- 13) H. Uetake, S. Yabukami, T. Chiba, T. Ozawa, N. Suzuki, N. Kobayashi, and K. I. Arai: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **38**, 83–86 (2014).
- 14) A. Hosono and S. Tanabe: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **17**, S2_69–73 (1993).

2019年10月31日受理, 2020年2月21日採録