

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760273

研究課題名(和文) 磁気 Kerr 効果利用型光プローブ電流センサ及び巨大磁気 Kerr 効果材料の開発

研究課題名(英文) Development of optical probe current sensor using magnetic film with large magnetic Kerr effect

研究代表者

曽根原 誠 (SONEHARA, Makoto)

信州大学・工学部・准教授

研究者番号：30456496

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000 円、(間接経費) 1,050,000 円

研究成果の概要(和文)：磁気Kerr効果のKerr回転角が $0.08^\circ$ と大きく、かつ $150^\circ$ の周囲温度でも磁気特性が4%程度しか劣化しない磁性膜を開発し、その磁性膜を用いた磁気Kerr効果利用型光プローブ電流センサを開発した。500 Aまでの電流(実験上では16 kA/mの磁界に相当)を線形範囲で測定でき、以前試作したセンサよりも約10倍の電流まで測定が可能になった。外乱ノイズにも強い特長ももつため、電気自動車や工場内部の大電流測定用電流センサとしてパワーエレクトロニクス分野への展開が期待される。

研究成果の概要(英文)：A magnetic film with  $0.08 \text{ deg}$  of large Kerr rotation angle was developed. A magnetic characteristic of the film decreased only 4% at  $150 \text{ deg C}$  of ambient temperature. An optical probe current sensor using the magnetic film with large magnetic Kerr effect was fabricated and evaluated. The optical probe current sensor was able to measure up to 500 A (16 kA/m) and respond linearity. A measuring range of current in the sensor was 10 times as wide as that in a conventional sensor. The sensor has noise immunity, so that the optical probe current sensor will be used as the sensor for large current in the power electronics such as the electric vehicles and the factories.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：センシング 磁性材料 光デバイス 磁界・電流センサ 形状磁気異方性

## 1. 研究開始当初の背景

EV (電気自動車) や HEV (ハイブリッド自動車)、FCV (燃料電池自動車) では、バッテリーと交流モータとの間に IGBT (絶縁ゲート型バイポーラ・トランジスタ) を用いた DC-DC コンバータおよびインバータが使用されている。現在の大きな課題は、High side 側と Low side 側の IGBT が同時 ON にならないために設けているデッドタイムを如何に短縮するかであり、これが解決されれば電力変換効率がより向上する。そのためには、IGBT における電流値や ON-OFF の立ち上がり/下がり時間をリアルタイムに精度良く観測しなければならない。ところが、現在利用されているホール素子を用いた電流センサでは、車内および外来の電磁ノイズの影響を受け、精度良く観測できないだけでなく、車内では氷点下から 200 近くまで温度変化が生じるが、温度特性が悪いこともあり、解決できない。加えて、感度を向上させるため磁気ヨークを使用しなければならず、IGBT 直近に配置することが困難である。そのため申請者は、それらを解決した光プローブとし、磁性材料の磁気 Kerr 効果を利用する電流センサ (以下、光プローブ電流センサ) を考案し、開発を進めてきた。

本提案の光プローブ電流センサの特長は次の通りである。

光で測定するため電磁ノイズの干渉を受けない

DC ~ 数百 MHz まで広帯域な測定が可能で線形応答する

EV 等のインバータ等で使用している搬送波周波数にも十分対応

強磁性 / 反強磁性交換結合膜を磁性膜に用いることで、磁性膜が単磁区化され一般的に磁性膜が有するバルクハウゼンノイズが無くなり、センサ自体の S/N 比も向上できる

磁気ヨークは不要なため IGBT 直近に配置可能で、軽量化にもなる

ファラデー素子利用型電流センサよりも安価

ファラデー素子を用いた光プローブ電流センサは国内外で研究されているが、温度特性が悪く、送電・電車等ハイエンド用でセンサ自体が高価で、自動車用センサには不適

## 2. 研究の目的

これまでに光プローブ電流センサを 5 cm 角程度のサイズにまでモジュール化し、実車を模擬した回路で IGBT のエミッタを流れる電流を観測しているが、ホール素子 (磁気ヨーク付) を用いた電流センサと比較し、本課題センサ (ヨークレス) の S/N 比は半分程度であった。

これは、現状の磁性膜 (強磁性; Fe-Si / 反強磁性; Mn-Ir 交換結合膜) では  $\theta_k$  が  $0.04^\circ$

と小さく、大きなセンサ出力が得られていないため、S/N 比が悪いと考察しており、 $\theta_k$  の高い強磁性材料の開発が必要である。加えて、最終的に電気・ハイブリッド自動車に搭載するためには、数 mm サイズに近付ける小型化が必須であり、それらの課題を解決することが本提案の目的である。

## 3. 研究の方法

### (1) 巨大磁気 Kerr 効果をもつ磁性膜の開発

現状の Fe-Si では Kerr 回転角が  $0.04^\circ$  と小さいため、飽和磁化の高い Fe 系磁性材料の中から、目標である  $0.2^\circ$  以上になる材料開発を行なった。初めに、アルニコ系など高周波磁性材料としても実績のある材料で、組成比を変え本センサ要件に最適な条件を調査・開発した。ただし、材料によっては反強磁性材料である Mn-Ir との組合せで大きな交換結合が得られない可能性があるため、反強磁性材料を磁石材料にし積層構造とすることで、磁石からの外部磁界による単磁区化を検討した。なお、いずれの方法も、既存の設備で作製可能であり、また薄膜作製の実績もあった。磁性膜の作製および特性評価は、所属研究室修士生 2 名と共に行なった。

### (2) S/N 比向上のための新検出方式の基礎実験

前記(1)と平行して、S/N 比向上のための新検出方式を検討した。これはレーザ光源を分光し、磁性膜に 2 方向から入射し、その差分を検出する方式で、現方式よりも 2 倍 S/N 比が向上することが計算上では明らかになっており、かつ光学部品を減らすことが可能である。ここでは、光プローブ電流センサに適用する前の予備実験を空間伝播光を用いて行ない、検証した。

ここでは、他学術機関の共同研究者 1 名とモジュール外注先企業 1 社の協力を得て、研究を行なった。

### (3) mm サイズセンサモジュールの開発

(2) の新方式による検証実験の結果を踏まえて、mm サイズ光プローブ電流センサを目標にしたモジュール化を図った。光学ブロックと磁性膜との接合は未だ実施したことが無い点であり、光プローブ電流センサの開発において最重要課題であるため、共同研究者らとよく議論し開発を進めた。センサモジュール試作は、光デバイスの開発・販売に実績がある企業に外注した。特性評価は、所属研究室修士生 2 名と共に行なった。

### (4) mm サイズセンサモジュールの実車搭載模擬実験

(3) で新たに開発した光プローブ電流センサの動作確認後、実車搭載模擬実験を実施する予定であった。

研究全体を通して、所属研究室の上司である信州大学工学部電気電子工学科 教授の佐藤 敏郎 氏に適宜ご助言頂いた。

#### 4. 研究成果

(1) 巨大磁気 Kerr 効果をもつ磁性膜の開発  
 本センサ実現のために巨大磁気 Kerr 効果をもつ磁性材料の開発は重要である。同時に EV などパワーエレクトロニクス用電流センサとして利用するのであれば、500 A までの電流（実験上、16 kA/m の磁界強度に相当）を流しても磁気飽和せずに測定でき、かつ環境温度が 200 °C でも磁気特性が劣化しない磁性膜の開発を目標とした。これに対して耐熱性に優れたアルニコに注目し組成を変更するなど研究を進めたが、磁気 Kerr 効果は目標値 0.2° に達せず、かつ大きな誘導磁気異方性を付与できなかった。そこで高温でも磁気異方性に影響しない形状磁気異方性に注目し、そのための短冊状磁性膜の研究を進めた結果、温度と最大電流測定に対する要件を満足した。磁性材料には開発期間内で 0.08 ° と最高の磁気 Kerr 効果が得られた Fe<sub>89</sub>Si<sub>11</sub>(at.%) を用い、図 1 に示すような短冊形状の寸法は長さ 10 mm、幅 10 μm、厚さ 120 nm とした。本磁性膜の磁気特性を測定したところ、異方性磁界  $H_k$  は 25 kA/m、線形範囲は ±16 kA/m と見積もられ、目標値を満足した。また周囲温度 150 °C までしか実験できなかったが、150 °C でも異方性磁界は室温に対して 4 % の減少に抑えられ、これらの結果は、旧試作モジュールに搭載した反射磁性膜の特性よりも優れていることが確認できた。なお周期配列にした理由は、センサモジュールを組み立てる際にレーザ光を磁性膜に当て易くするためである。また短冊状磁性膜間を 50 μm にした理由は、それよりも狭くすると隣接する短冊状磁性膜の磁気的な影響である静磁結合の効果が大きくなり、短冊状磁性膜としての形状磁気異方性の効果が弱くなってしまったためである。なお、本手法は新規性があつたため特許を出願した。

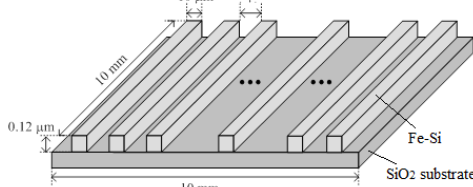


図 1 Fe-Si 周期配列反射磁性薄膜の模式図

(2) S/N 比向上のための新検出方式の基礎実験

実施期間前の光プローブ電流センサは、図 2 に示すような構造であつた。測定の原理としては、図 2 中の ① の位置に磁性膜を設置し、② の順にレーザ光を照射し、磁性膜の Kerr 効果を利用し、反射光を P 波と S 波に分離して両者を差動検出することにより、電流検出を行なうものである。Kerr 回転角  $\theta_k$

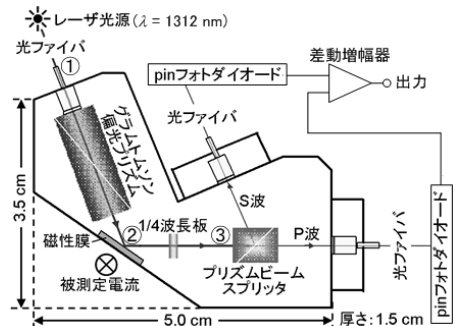
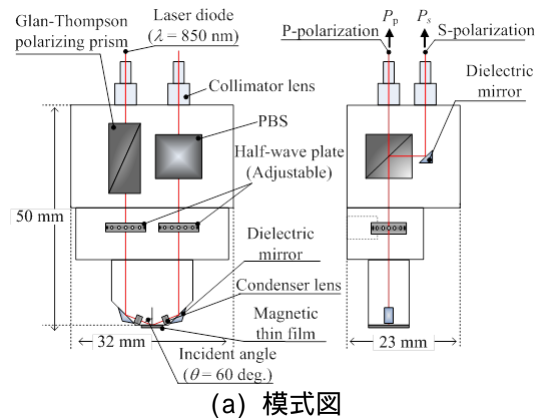
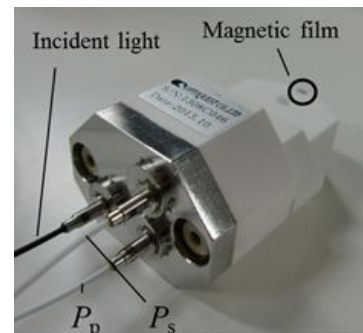


図 2 実施期間前の光プローブ電流センサの模式図



(a) 模式図



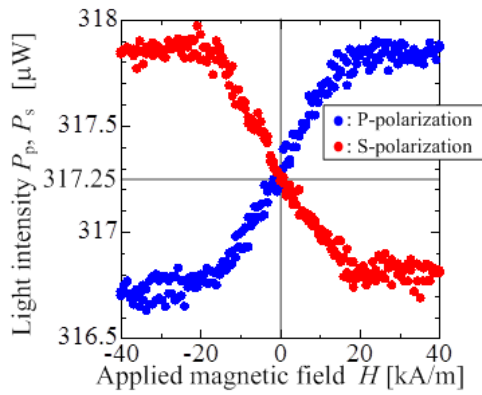
(b) 外観写真

図 3 実施期間内に開発した光プローブ電流センサ

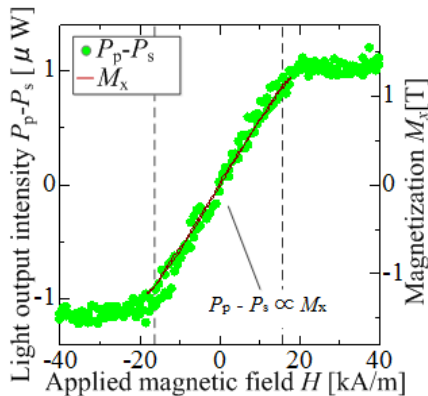
は磁界の強さに比例し、磁界の強さは電流に比例するため、電流の大きさを検出することができる。ただし、光ファイバ 3 本がセンサ筐体から異なる方向に伸び、センサを振動させると各ファイバの振動周期・位相が異なるためセンサ出力が変動し、EV 内では困難と判断された。そこで実施期間内に開発したセンサモジュール（図 3）は、基本的な構造・測定原理は変わっていないが、新たに全反射ミラーを導入して入出力の光路を全て一方向とし振動に強い構造とした。

(3) mm サイズセンサモジュールの開発

申請時では、光学ブロックを用いてセンサヘッドを小型化するとしたが、加工が難しく実施期間内では困難と判断し、その拡大モデルのセンサモジュールを図 3 の通り開発した。実施期間後も MEMS を利用しセンサを小型にする検討を行なっていく予定である。



(a) 外部磁界  $H$  に対する反射光 P, S 成分の光出力  $P_p, P_s$



(b) 外部磁界  $H$  に対する反射光 P, S 成分の光出力の差分  $P_p - P_s$  とセンサ感度方向の静磁化曲線  $M_x$

図 4 開発された光プローブ電流センサの基礎特性

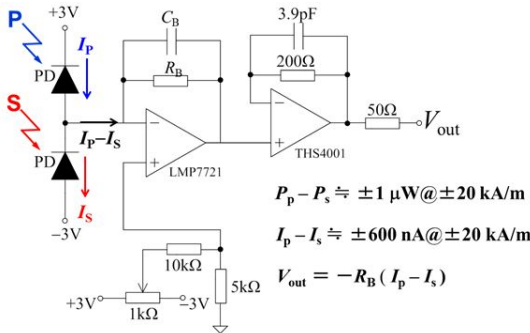


図 5 光 - 電気変換回路

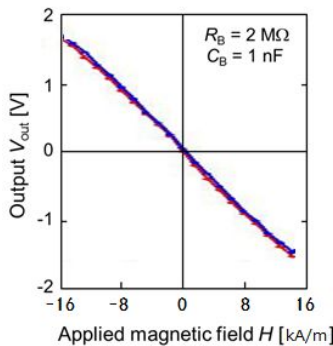


図 6 開発された光プローブ電流センサに光 - 電気変換回路を接続した際の外部磁界差動出力

(4) mm サイズセンサモジュールの実車搭載模倣実験

図 4(a)に外部磁界  $H$  に対する反射光 P, S 成分の光出力  $P_p, P_s$  の測定結果, 同図(b)に外部磁界  $H$  に対する反射光 P, S 成分の光出力の差分  $P_p - P_s$  (センサ出力に相当) とセンサ感度方向の静磁化曲線  $M_x$  の測定結果を示す。なお、光出力は光プローブ電流センサの反射光用光ファイバの先端に光パワーメータを接続した際の光パワーメータ出力値である。図 4 より、センサ出力に相当する  $P_p - P_s$  と反射磁性膜のセンサ感度方向の静磁化曲線  $M_x$  がよく対応していることが分かり、 $H_k = \pm 25$  [kA/m] 付近で飽和する傾向が得られた。線形応答の範囲は、 $P_p - P_s$  が  $\pm 16$  kA/m の範囲と見積もられ、旧試作モジュールに比べ約 10 倍も測定範囲が広がった。また、このセンサを例えば幅 13 mm, 厚さ 2 mm の断面を有するバスバーの厚さ方向に密接して設置する場合、バスバーに流す電流を  $\pm 500$  [A] まで測定できることが電磁界解析からも予測されている。

図 5 に光プローブ電流センサにおける反射光 P, S 波それぞれ 2 本の光ファイバの先端に接続した PiN フォトダイオードおよび光 - 電気変換回路 (反転出力型トランス・インピーダンス回路) の回路図を示す。また図 6 に光プローブ電流センサと光 - 電気変換回路を接続した際の外部磁界差動出力 (センサ出力)  $V_{out}$  と外部磁界  $H$  の関係を示す。光 - 電気変換回路を接続した場合でも前述の結果と同様に  $\pm 16$  [kA/m] の範囲で線形応答する良好なセンサ出力が得られていることが明らかになった。また S/N 比は約 30 dB であり、旧センサモジュールよりも向上した。この理由の一つとして、前述の入出力の光路 (光ファイバ) を全て一方向とし振動に強い構造としたためと推察される。

以上より、工場内や電気自動車内部などの電流センサとして期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

K. Ogawa, S. Suzuki, M. Sonehara, T. Sato, K. Asanuma, Optical Probe Current Sensor Module using the Kerr Effect of Exchange-coupled Magnetic Film and its Application to IGBT Switching Current Measurements, *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 査読有、5 巻、2 号、pp.347-361、2012

〔学会発表〕(計 5 件)

北澤 真, 柄澤 大樹, 曽根原 誠, 佐藤 敏郎、パワーエレクトロニクス用光プローブ電

流センサの試作と特性評価、平成 26 年電気学会 A 部門大会、2014 年 8 月 22 日、長野(予定)

柄澤 大樹, 森崎 裕基, **曾根原 誠**, 佐藤敏郎, 浅沼 和志、パワーエレクトロニクス用光プローブ電流センサの基礎特性、平成 26 年電気学会全国大会、2014 年 3 月 20 日、愛媛

森崎 裕基, 柄澤 大樹, **曾根原 誠**, 佐藤敏郎, 高木 宏幸, 井上 光輝、パターン化 Fe-Si/Ru 形状磁気異方性膜の磁区構造、電気学会マグネティックス研究会、2013 年 12 月 19 日、金沢

S. Suzuki, H. Morisaki, **M. Sonehara**, K. Ogawa, T. Sato、Linearity evaluation for optical probe current sensor using the magnetic Kerr effect、*Internat. Conf. of the Asian Union of Magnetic Societies (ICAUMS) 2012*、2012 年 10 月 2 日、奈良

森崎 裕基, 鈴木 伸, 佐藤 敏郎, 浅沼 和志, **曾根原 誠**、二軸方式光プローブ電流センサの基礎検討、平成 24 年度第 1 回電気学会東海支部(信州大学スピンドバイステクノロジーセンター共催)若手セミナー、2012 年 8 月 10 日、長野

〔産業財産権〕

出願状況(計 4 件)

名称：形状磁気異方性を有する磁性膜を用いた光プローブ電流センサ

発明者：佐藤 敏郎, **曾根原 誠**

権利者：国立大学法人信州大学

種類：特許

番号：特許願 2013-140477 号

出願年月日：2013 年 7 月 4 日

国内外の別：国内

名称：光プローブセンサ装置

発明者：**曾根原 誠**, 佐藤 敏郎

権利者：国立大学法人信州大学

種類：特許

番号：特許願 2013-015500 号

出願年月日：2013 年 1 月 30 日

国内外の別：国内

名称：磁気光学効果素子を有する装置

発明者：**曾根原 誠**, 佐藤 敏郎

権利者：国立大学法人信州大学

種類：特許

番号：特許願 2012-288117 号

出願年月日：2012 年 12 月 28 日

国内外の別：国内

名称：光プローブ電流センサ

発明者：**曾根原 誠**, 佐藤 敏郎

権利者：国立大学法人信州大学

種類：特許

番号：特許願 2012-130323 号

出願年月日：2012 年 6 月 8 日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

長野県のものづくりを応援するサイプラス (Sai+)

<http://saipius.jp/special/2010/12/104.php>

信州大学 信州地の森

<http://www.shinshu-u.ac.jp/special/cooperation/2011/02/37552.html>

信州大学工学部電気電子工学科 先端磁気デバイス(佐藤・曾根原)研究室 ホームページ

<http://amd1.shinshu-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

曾根原 誠 (SONEHARA, Makoto)

信州大学・工学部・准教授

研究者番号：30456496