

氏名	宮本 光教
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲 第 709 号
学位授与の日付	平成 31 年 3 月 20 日
学位授与の要件	信州大学学位規程第 5 条第 1 項該当
学位論文題目	ファラデー効果型光プローブ電流センサ用磁性薄膜 ファラデー素子の作製と評価
論文審査委員	主査 教 授 佐藤 敏郎 教 授 水野 勉 主席研究員 小林 伸聖（（公財）電磁材料研究所） 准教授 曾根原 誠 准教授 宮地 幸祐

論 文 内 容 の 要 旨

インバータやコンバータといった電力変換器がフル SiC 化することで、これまで以上にスイッチング周波数が高周波化し、低スイッチング損失や耐圧の向上によって大電流化していく。このようなパワーエレクトロニクス機器における電流計測は精密なパワーコントロール、省エネルギーの為に必須であり、機器内部での in-situ（その場）計測、DC～高周波の広帯域応答、低い挿入インピーダンス、安定した温度特性、高い電磁ノイズ耐性などの複数の要求を同時に満足する電流計測システムが求められている。現在、多くのシステムで利用されているホール素子型をはじめとする磁気センサではこれらすべてを満足することは困難である。本研究は、従来ある電流センサの課題を克服した“超小型ヘッドを備えるファラデー効果型光プローブ電流（磁界）センサ”の実現を目指し、センサに適した磁界感应素子（磁性薄膜ファラデー素子）開発の基礎検討を行ったものである。ファラデー効果は、磁性体中を偏光が進行し、それと並行して磁界が印加された時に偏光面の旋光として観測される現象である。この現象において、一般に光の透過率とファラデー効果はトレードオフの関係にあり、両立することは難しい課題である。透明ファラデー素子の代表である希土類置換鉄ガーネット（R:YIG）材料はアイソレータ等に用いられ、磁気センサ用ファラデー素子としても古くから考えられてきた。しかし、上述したパワエレ機器の計測ニーズに追従することは難しい。これに代わる新たな透明強磁性材料の作製と光学構造を併用した多層膜によって、より高い性能指数（透過損失あたりの飽和ファラデー回転角と定義）を有するファラデー素子を得ることを本研究の目的とした。

第 1 章では、社会的背景と電流計測の必要性について述べ、各産業界から抽出した主要な電流計測ニーズを列挙し、目指すべき電流センサに求められる性能について整理した。

第 2 章では、偏光と磁気光学効果の基本的性質に触れ、本研究で提案するセンサ光学系の基本構造と動作原理について解説した。また、本センサを用いてどのような電流磁界を計測対象とすべきか、そして対象とする磁界からセンサへ要求される事項について述べた。

第 3 章では、磁気センサ用ファラデー素子として、巨大ファラデー効果をもつ強磁性金属の利用を検討した。Fe、Co 薄膜を光が透過できる厚さで作製し、そのファラデー効果が磁界に対して線形応答することを示した。また、金属薄膜の最大の弱点である透過率の低さに対して、アドミッタンス整合させた誘導透過干渉フィルタの設計手法を取り入れることで、単層時の性能指数と比べ、約 1.27 倍（0.32°/dB）にまで向上した。強磁性金属薄膜がファラデー素子として、特に強磁場で利用可能であることを示した。

第 4 章では、磁気センサ用ファラデー素子として、誘電体中に強磁性金属微粒子が分散したグラニューラー薄膜の基礎検討を行った。Co と MgF₂ で構成したグラニューラー薄膜を選択し、はじめに体積比率と成膜基板温度の影響を調べた。体積比 Co:MgF₂ = 1:2、成膜基板

温度が高いほど性能向上することがわかった。成膜基板温度の影響は強く、低温では微粒子径が小さく超常磁性を示すが、高温では超常磁性の臨界粒径を超え強磁性を示すことが TEM 像や磁気特性の評価から明らかになった。Co-MgF₂ グラニューラー薄膜は赤外域で大きな透過率（低い消衰係数）を示すが、基板温度上昇に伴い微粒子サイズが増大し、微粒子間距離が広がることによる粒子間電界強度の低下が起因していると考えた。その他、MgF₂ の結晶性向上による影響、Co 微粒子周囲のフッ化物生成の可能性といった観点から透明性の考察を行った。Co-MgF₂ グラニューラー薄膜が持つファラデー効果と消衰係数は、Maxwell-Garnett 有効誘電媒質近似を用いて計算し、各実測値と比較検証した。体積比 Co:MgF₂ = 1:2、成膜基板温度 450 °C の条件下で最大性能指数 0.247 °/dB を得た。また、各試料を 500 °C×4h でポストアニールを行い、最大性能指数 0.283 °/dB まで上昇することが確認された。本章で得られた Co-MgF₂ グラニューラー薄膜は、周囲温度（350 °C 以下）に対して磁気特性がほぼ変化しない耐熱性の高い材料であることを明らかにし、従来の鉄ガーネット系材料を超える性能を有していることを示した。

第 5 章では、Co-MgF₂ グラニューラー薄膜の透明性を生かし、Fabry-Pérot 共振器構造を導入した結果を示した。マルチキャビティ構造周期 $y = 2$ (3 Cavity) のとき、単層と比較して飽和ファラデー回転角は約 3.1 倍 ($-1.12^{\circ}/\mu\text{m}$)、性能指数 FOM は約 1.5 倍 ($0.196^{\circ}/\text{dB}$) にまで向上することを示した。これらはマトリックスアプローチ法によって計算したファラデー効果性能指数と比較検証した。

第 6 章では、3~5 章で得られた試料の性能を比較評価した。本研究の全構造体のうち、体積比 1:2、成膜基板温度 450 °C、500 °C ポストアニールした Co-MgF₂ グラニューラー膜が最大性能指数 $1.5 \times 10^{-6}^{\circ}/(\text{A} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{dB})$ を示した。そして、Co-MgF₂ グラニューラー膜がセンサ用ファラデー素子として駆動できることを確認した。

第 7 章で、本論文によって得られた成果を要約して述べた。