

学位被授与者氏名	岡田 章 (Akira Okada)
学位の名称	博士 (工学)
学位番号	博 (二) 第 1 号
学位授与年月日	平成 22 年 3 月 20 日
論文題目	短波長光用希薄磁性半導体 $A^{II}_{1-x}Mn_xB^{VI}$ 膜の光磁気特性とその応用に関する研究
論文題目 (英訳または和訳)	The Study of magneto-optical properties of diluted magnetic semiconductor $A^{II}_{1-x}Mn_xB^{VI}$ films for optical short wavelengths from the viewpoint of applications
論文審査委員	論文審査委員会 委員主査 : 福岡工業大学大学院物質生産システム工学専攻教授 今村 正明 同審査委員: 福岡工業大学大学院物質生産システム工学専攻教授 師岡 正美 同審査委員: 福岡工業大学大学院物質生産システム工学専攻教授 山口 俊尚 同審査委員: 福岡工業大学大学院知能情報システム工学専攻教授 内田 一徳
論文審査機関	福岡工業大学大学院工学研究科
論文内容の要旨 (和文)	<p>本論文は、短波長可視光領域での希薄磁性半導体 (Diluted Magnetic Semiconductor : DMS) の応用化を目指して、分子線エピタキシャル法による薄膜作製とその磁気光特性に関して行った研究の成果を学位論文としてまとめたものである。</p> <p>近年、感電などに対して安全性が高く、事故時電流の計測が可能な高磁場、高周波にも応答する線形性に優れた電流センサの開発が求められている。また近年、高密度記録技術のカギを握る光ピックアップの短波長化が進められており、そこでの光アイソレータは可視短波長域で動作する必要がある。すなわち、使用されるレーザダイオード (Laser Diode : LD) が赤 LD から緑 LD、さらに青 LD へと短波長領域に拡大している状況に対応できる磁気光膜が必要となる。磁気光センサや光アイソレータ用磁性薄膜として、ファラデー回転性能の高いビスマス (Bi) 置換磁性ガーネット (Bi:YIG) 薄膜があるが、磁性ガーネットはフェリ磁性であるための磁気飽和現象と若干の非線形性や、$1 \mu m$ 以下の波長領域に強い吸収帯が存在し、短波長帯での使用が困難である。また、DMS である $Cd_{1-x}Mn_xTe$ は、光アイソレータとして実用化されているもののバルク材としての応用である。また、光吸収端が $600 nm$ 辺りに止まることから、緑 LD や青 LD の波長領域での使用は難しい。さらに、環境負荷物質である Cd を含むため今後の産業応用は見込めない。このようなことから、線形性に優れ、磁気飽和が無く、高い周波数でも動作し、かつ $600 nm$ 以下の短波長領域においても使用可能な、小型化に適した磁気光センサ用薄膜が求められている。</p> <p>よって、上述した要求を満たす DMS 膜の応用化検討として、短波長領域においても使用可能な Zn 系の DMS 膜の作製と評価、および実際のデバイスのセットアップに近い測定系でのファラデー回転信号の測定、つまりは波形データの観測に関する研究が必要である。</p> <p>第 1 章では、研究の背景として、DMS についての概要と CdTe をベースとした DMS の問題点、および本研究の目的について述べた。</p> <p>第 2 章では、DMS の特徴と基礎的性質として、</p> <ul style="list-style-type: none"> ・広い範囲で混晶をつくる多元化合物であり、バンドギャップや格子定数を広範囲に変化させながら高品位の結晶が作製可能であること ・直接遷移型のエネルギーバンド構造のものが多く、電子移動度が、Si や Ge の元素半導体に比べて大きいこと ・DMS の磁気光学効果は、sp-d 交換相互作用により非常に大きいこと <p>について述べた。</p> <p>第 3 章では、実験方法として、まず MBE 装置による DMS 膜の作製ならびに作製条件、DMS 膜の基本評価として、反射高速電子回折 (Reflection High Energy Election Diffraction: RHEED)、X 線回折、エネルギー分散型 X 線マイクロアナライザー (Energy Dispersive X-ray Spectrometer: EDS)、水晶振動子膜厚計、タリストエップ、分光光度計、試料振動型磁力計 (Vibrating Sample Magnetometer: VSM) について述べた。次に応用化に向けた DMS 膜の光磁気特性の評価方法として、直交偏光子法によるファラデー回転の測定、および実際のデバイスのセットアップに近い測定系でのファラデー回転信号の観測のために新たに構築した回転中のリング磁石により発生する交番磁界での評価</p>

について述べた。具体的には、緑 LD (532 nm) を用い、32 極に着磁したリング磁石の回転により発生する交番磁界 (~1.6 kHz) での磁気光特性の評価である。

第 4 章では、結果と考察として、まず DMS 膜の基本評価結果についてまとめた。本研究にて取り上げた DMS 膜は、 $Cd_{1-x}Mn_xTe$, $Cd_{1-x}Mn_xCo_yTe$, $Zn_{1-x}Mn_xTe$, $Zn_{1-x}Mn_xCo_yTe$, $Zn_{1-x}Mn_xSe$ の 5 種であり、基本評価として行った実験から、

- ・ RHEED と X 線回折の結果から、サファイア基板では Zn 系の DMS 膜においてもエピタキシャル成長するが、石英ガラス基板では、エピタキシャル成長しない (111) 面優先配向の多結晶膜が得られること、
- ・ Cd 系膜から Zn 系膜へ、また Te 系膜から Se 系膜へという構成元素の変更により、吸収端波長が短波長領域へと拡大 (ブルーシフト) し、それに伴いバンドギャップエネルギーは増大すること、

等がわかった。次に DMS 膜の光磁気特性の評価結果として直交偏光子法による直流磁場ファラデー回転の測定、および交番磁界ファラデー回転の評価を示した。光磁気特性として、

- ・ 何れの DMS 膜においても、負のピークを有するファラデー回転の波長依存性を示すこと、
- ・ Cd 系膜から Zn 系膜へ、また Te 系膜から Se 系膜へという構成元素の変更により、負のピークは短波長側へとシフトし、 $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 膜では 540~550 nm, $Zn_{1-x}Mn_xSe$ 膜では 460~470 nm の波長域に負のピークがあること、
- ・ 実際のデバイスのセットアップに近い測定系である緑 LD (532 nm) を用いた、32 極に着磁したリング磁石の回転により発生する交番磁界 (~1.6 kHz) において得た $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 膜のファラデー回転信号波形は、リファレンスの信号波形同様、低磁界でも歪まないこと、

がわかった。応用化に向けて、電流センサを応用対象に想定した DMS 膜適用の可能性検討を行い、適用可能性が高いことがわかった。

第 5 章では結論として、本論文の主要な結果を要約した。

常磁性特性を有する DMS で大きな磁気光 (ファラデー回転) 特性が得られれば、DMS 膜特有の線形性と高速度磁界反応性が利用でき、電流センサや回転センサ等のセンシングデバイスとして、またさらには超小型光アイソレータへの応用も可能となる。本研究では、Cd ベースの DMS 膜に加えて、 $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 膜、 $Zn_{1-x}Mn_xSe$ 膜といった Zn ベースの DMS 膜を石英ガラス基板上に作製し、実際のデバイスのセットアップに近い測定系で評価を実施した。その結果、 $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 膜で、フェリ磁性である従来の Bi:YIG 膜では得られない、リファレンス信号波形と同様の低磁界においても歪みのない波形を交番磁界 (~1.6 kHz) において確認することが出来た。本研究で得た受光器出力は、電流センサ (光 CT) への応用を期待できる数値であり、被測定電流線と DMS 膜で構成する光磁気電流センサ (光 CT) を設計できるとの結論を得た。

論文内容の要旨
(英文)

This thesis summarizes the study of magneto-optical properties of magnetic semiconductor $A^{II}_{1-x}Mn_xB^{VI}$ films for optical short wavelengths from the viewpoint of applications. The main purpose of this study is to obtain Faraday rotation in the films of DMS (diluted magnetic semiconductor) deposited on quartz glass substrates utilizing green LD (laser diode) at room temperature.

In the first chapter, as a background of research, the outline and problems about DMS and the purpose of this research are described.

In the second chapter, a survey is given on the theoretical background of DMS. It describes in terms of the crystallographic, magnetic and magneto-optical properties. The Faraday rotation due to large sp-d exchange interaction is discussed from a viewpoint of magnetic and magneto-optical properties of DMS.

In the third chapter, the method and condition of experiments are shown. DMS films were deposited on quartz glass substrates by using MBE (molecular beam epitaxy). The basic principles of measurements are also described. RHEED (Reflection High Energy Election Diffraction), EDS (Energy Dispersive X-ray Spectrometer),

	<p>profilometer (TALYSTEP), spectrophotometer, and VSM (Vibrating Sample Magnetometer) were used for the evaluation of DMS films.</p> <p>In the fourth chapter, five kinds of DMS films ($Cd_{1-x}Mn_xTe$, $Cd_{1-x-y}Mn_xCo_yTe$, $Zn_{1-x}Mn_xTe$, $Zn_{1-x-y}Mn_xCo_yTe$, $Zn_{1-x}Mn_xSe$) that were prepared by MBE are discussed as to the crystallographic, optical, magnetic, and magneto-optical properties. In addition to those properties, the ac magneto-optical properties of the $Zn_{1-x}Mn_xTe$ films grown on quartz glass substrates are evaluated at an AC field of 1.6 kHz utilizing green LD (532 nm) from the viewpoint of applications. Finally, the possibility of application of DMS films for current sensors is shown. In the last chapter, the conclusion of this study is described.</p>
論文審査結果	<p>三菱電機株式会社先端技術研究所所属の岡田章氏が提出した学位論文を審査し、また最終試験を行ったのでその結果について報告する。</p> <p><学位論文の審査結果></p> <p>本学位論文は、短波長領域での適用を目的とした希薄磁性半導体 (Diluted Magnetic Semiconductor : DMS) 膜の作製と磁気光特性の評価、およびその応用化に向けた研究についてまとめたものである。</p> <p>近年、感電などに対して安全性が高く、事故時電流の計測が可能な高磁場、高周波にも応答する線形性に優れた電流センサの開発が求められている。また、光アイソレータ応用では、高密度記録技術のカギを握る光ピックアップの短波長化が進められており、用いるレーザダイオード (Laser Diode : LD) は赤 LD から緑 LD, さらに青 LD へと短波長領域に拡大している。このようなことから、線形性に優れ、磁気飽和が無く、高い周波数でも動作し、かつ 600 nm 以下の短波長領域においても使用可能な、小型化に適した磁気光センサ用薄膜が求められている。そのため短波長領域において使用可能な、Zn 系の DMS 膜の作製と評価、また実際のデバイスのセットアップに近い測定系でのファラデー回転信号の測定、つまりは波形データの観測に関する研究が必要である。本論文は、第 1 章で、研究の背景として、DMS についての概要と CdTe をベースとした DMS の問題点、本研究の目的について述べている。第 2 章では、DMS の特徴と基礎的性質について述べている。第 3 章では、実験方法について述べている。本研究で取り上げた DMS 膜は、$Cd_{1-x}Mn_xTe$, $Cd_{1-x-y}Mn_xCo_yTe$, $Zn_{1-x}Mn_xTe$, $Zn_{1-x-y}Mn_xCo_yTe$, $Zn_{1-x}Mn_xSe$ の 5 種であるが、第 4 章では結果と考察として、それらの DMS 膜の評価結果についてまとめている。第 5 章では、結論として、本論文の主要な結果を要約している。</p> <p>本研究では、Cd ベースの DMS 膜に加えて、$Zn_{1-x}Mn_xTe$ 膜、$Zn_{1-x}Mn_xSe$ 膜といった Zn ベースの DMS 膜を石英ガラス基板上に作製し、実際のデバイスのセットアップに近い測定系での評価を実施し、フェリ磁性である Bi:YIG 膜等では観測できない、リファレンス信号波形に追従した低磁界でも歪みのない信号波形を交番磁界 (~1.6 kHz) において確認している。本論文は本学と三菱電機 (株) との共同研究の成果をまとめた形で執筆されたものであり、本研究で得た受光器出力が電流センサ (光 CT) への応用を十分期待できる数値であることから、被測定電流線と DMS 膜で構成する新しい電流センサ等を開発できることを明確にした内容となっている。</p> <p><最終試験の結果></p> <p>岡田氏は IEEE Trans. Magn., Vol.39, No.5 に第一著者として論文を執筆し、2003 年 4 月に Boston で開催された IEEE Intermag に第一著者として講演を行っている。このことから英語能力には問題がないと判断し、それらを最終試験に代えた。</p> <p>以上より、学位論文審査委員会は、提出論文が学位論文として評価できると判定した。</p> <p>学位論文公聴会において岡田氏は、論文内容に関連する種々の工学的及び技術的な質問に対して適切に回答を行うことができた。学位論文審査委員会は最終審査において、公聴会の結果及び論文内容の評価を行い、氏が学位論文に関連する分野の学識を有し、今後研究を発展させて行くための研究能力を備えていると判断した。</p> <p>以上の結果から、委員会はこの論文が博士 (工学) の学位に適う内容であると判定した。</p>

<p>主な研究業績</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li data-bbox="411 76 1477 235"> <p>1 “磁性半導体A^{II}_{1-x}Mn_xB^{VI}膜(A:Zn,B:Te,Se)の短波長光に対する交流磁気光応答特性” , 日本応用磁気学会誌, Vol.31, No.4, pp.328-332(2007) 著者 : <u>岡田章</u>, 今村正明</p> <li data-bbox="411 271 1477 383"> <p>2 “希薄磁性半導体膜の交番磁界に対する磁気光応答” , 日本応用磁気学会誌, Vol.30, No.2, pp.208-211(2006) 著者 : <u>岡田章</u>, 今村正明</p> <li data-bbox="411 418 1477 618"> <p>3 “Faraday Rotation in Quaternary CdMnCoTe Thick Films Deposited on Transparent Quartz Glass Substrates” , IEEE Trans. Magn., Vol.39, No.5, pp.3175-3177(2003) Authors : <u>Akira Okada</u>, Jin-Yong Ahn, Satoru Inoue, Toshinao Yamaguchi, Masaaki Imamura</p> <li data-bbox="411 654 1477 813"> <p>4 “Magneto-optical Properties of ZnMnTe Films Grown on Sapphire Substrates” , IEEE Trans. Magn., Vol.42, No.10, pp.3078-3080(2006) Authors : Masaaki Imamura, <u>Akira Okada</u></p> <li data-bbox="411 848 1477 1008"> <p>5 “Magneto-optical properties of wider gap II-VI ZnMnTe and ZnMnCoTe films” , J. Appl. Phys., Vol.99, No.8, pp. 08M706 1-3(2006) Authors : Masaaki Imamura, <u>Akira Okada</u>, Toshinao Yamaguchi</p> <li data-bbox="411 1043 1477 1202"> <p>6 “Evaluation of Faraday-rotation characteristics with CdMnCoTe and CdMnTe films” , J. Appl. Phys., Vol.95, No.11 pp.6876-6878(2004) Authors : Masaaki Imamura, Jin-Yong Ahn, <u>Akira Okada</u>, Kazuo Takashima</p>
---------------	---