

Magneto-Optical Response to AC Magnetic Fields in DMS Films

A. Okada, and M. Imamura*

Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corp., 8-1-1, Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki 661-8661

* Department of Electrical Engineering, Fukuoka Inst. of Tech., 3-30-1, Wajirohigasi, Higashi-ku, Fukuoka 811-0295

We previously developed quaternary diluted magnetic semiconductor (DMS: CdMnCoTe) films that exhibit a large Faraday rotation in the visible region at room temperature. We newly prepared four types of DMS films deposited on quartz glass substrates by molecular beam epitaxy (MBE). The compositions of the DMS films are CdMnTe, CdMnCoTe, ZnMnTe, and ZnMnCoTe. To determine the basic characteristics of these DMS films, we evaluated their transparency and Faraday rotation, and evaluated the ac magneto-optical properties of the DMS film (CdMnCoTe) at 500 Hz. Finally, we discussed the potential of these DMS films in the development of applications such as optical CT.

Key words: magneto-optical property, Faraday rotation, diluted magnetic semiconductor (DMS)

希薄磁性半導体膜の交番磁界に対する磁気光応答

岡田章・今村正明*

三菱電機(株)先端技術総合研究所, 兵庫県尼崎市塚口本町8-1-1 (〒661-8661)

*福岡工業大学工学部電気工学科, 福岡市東区和白東3-30-1 (〒811-0295)

1. はじめに

電力分野では分散化電源の普及が加速することが予想される。そこで、コンパクトでかつ設置が容易であり、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にも応答する線形性に優れたかつ高速応答の電流センサの開発が求められている¹⁾。一方、周波数特性に優れた高速応答の磁気センサは、制御の精密化が進む制御用電動機²⁾の速度制御のために不可欠である。磁気光センサに利用可能な磁性薄膜として、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。この薄膜はファラデー回転能が高いと同時に、可視光領域での透明性が高く、現在この種の応用については最も実用向きと考えられる。しかし Bi:YIG 膜が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、磁化変化速度の上限が数百 kHz あたりに来る問題点がある。また光アイソレータは、主に通信分野で利用される 1.3~1.5 μm の長波長帯と光ピックアップ等に利用される 0.8 μm 以下の短波長帯に分けられるが、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いる。しかし Bi:YIG は 0.9 μm 帯以下で挿入損失が大きく使用できない問題点がある。このようなことから、磁気飽和が無く、より高い周波数で動作し、短波長領域においても使用可能な磁気光センサ用薄膜が求められている。

われわれはこれまで、分子線エピタキシャル法により作製する希薄磁性半導体 (Diluted Magnetic Semiconductor:DMS) 薄膜の研究を行ってきた。DMS 薄膜は常磁性の磁性膜であり、ファラデー回転を有するが、高磁界まで飽和しない。母材とした II-VI 族の DMS は、陽イオンの一部を遷移金属元素の Mn あるいは Fe で置換した閃亜鉛鉱型またはウルツ鉱型の三元系半導体化合物であるが、特に CdMnTe は、Mn²⁺イオンの 3d 電子とバンド電子との sp-d 交換相互作用による励起準位の大きなゼーマン分裂のため、室温においてファラデー効果を示す DMS として知られている³⁾。しかし CdMnTe は光アイソレータとして一部では実用化されてい

る³⁾ものの、感度面の問題で、薄膜化に向かない。この母材に他の遷移金属元素 Co を含ませた四元系の DMS 薄膜では、エンハンス効果による光磁気特性の向上が見られることを、これまで示した^{4), 5)}。

透過空間光を利用するデバイスへの応用については、単にファラデー回転の値というよりは実際のデバイスのセットアップに近い測定系でファラデー回転信号を測定できるかが重要となる。つまり、DMS 膜と基板を透過するレーザ光信号を受光器が捕らえ、受光器が適当な大きさの電圧信号を出さないと使えないため、基板のファラデー回転が問題となる。さらに、磁界とファラデー回転 (磁化) 間の位相差 (ヒステリシス) も問題であり、波形データの取得は実用化に向けて必要不可欠である。すでに、実際のデバイス適用に向けた第 1 歩として、基板の磁気光 (ファラデー回転) 特性の把握⁶⁾、交番 (0.1 Hz) 磁気光特性の評価⁷⁾を行った。

本論文では、短波長帯での適用を目的とした新たな組成となる DMS 膜 (ZnMnTe, ZnMnCoTe) と従来の DMS 膜 (CdMnTe, CdMnCoTe) の作製と磁気光特性の評価、および主として商用周波数帯に適用する電流センサ (光 CT) への応用を目的として、10 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 (~500 Hz) での磁気光特性の評価を行ったので報告する。

2. 実験方法

2.1 DMS 膜の作製

本実験では、3本の分子線蒸発源セル (Knudsen-cell:Kセル) と2基の E 型電子銃 (E-gun:Eガン) を備えた分子線エピタキシャル (Molecular Beam Epitaxy:MBE) 装置を用いて、DMS 膜の作製を行った。今回は、3本の Kセルにそれぞれフレーク状の純度 5N の CdTe と純度 4N の MnTe、純度 5N の ZnTe また Eガンには純度 3N の Co を充填した。基板は 0.5 mm 厚さ、10×10 mm の石英ガラスを用いた。基板は洗浄後、交換室で 500 °C、30 分間前処理した。その後、成長室に移し、MnTe および CdTe または

ZnTe の K セルをそれぞれ 1000~1030 °C, 390 °C, 465~475 °C で加熱, E ガンエミッション電流を約 20 mA として, 厚さ 2 μm 程度の DMS 膜を得た. CdMnTe, CdMnCoTe の作製には, CdTe, MnTe を充填した 2 本の K セルを, ZnMnTe, ZnMnCoTe の作製には, ZnTe, MnTe を充填した 2 本の K セルを使用した. なお基板温度は 300 °C とし, 蒸着中の真空度は $3\sim 8 \times 10^{-8}$ Torr, 蒸着速度は 1.0~1.5 $\text{\AA}/\text{sec}$ である.

2.2 磁気光特性の測定

ファラデー回転の波長依存性の測定は, DMS 膜に垂直に直線偏波光を入射させて, 磁界印加による偏波面回転を検光子で検知するシングルビーム法によって行った. Fig.1 に装置構成を示す. 印加磁界は 560 mT とした. 偏光子と検光子は, それぞれの光軸を 90° 近くに設定した直線偏光板を用いた. 光源はハロゲンランプを使用し, モノクロメータにより分光して単一波長の光を得た. 単一波長光は偏光子を通して直線偏波光となり, 励磁コイル内に設置した試料を通過する際, 偏波面がファラデー回転を生じる. その後, 単一波長光は検光子を経て光電子増倍管で受光され, 光を電圧に変換し, 18bit の A/D 変換器を通してコンピュータに入力される. 測定電圧を, 検光子の回転で得られる電圧と比較し, 試料のファラデー回転を得た.

交番磁界における磁気光特性の評価は, サーボモータ (三菱電機製; HF-KP23, 最大 6000 rpm) に接続したリング磁石 (ダイドー電子製; NP-8SR, $\phi=25$ mm, 10 極着磁) の回転により発生する交番磁界 (~500 Hz) により行った. Fig.2 に装置構成を示す. 光源には, 最大出力 4.9 mW, 波長 635 nm のレーザダイオード (エドモンド製; 54024-G), 受光素子には, アバランシェ・フォトダイオードモジュール (APD, 浜松ホトニクス製; C5460) を用いた. APD の信号は, ローパスフィルタモジュール (NF 製; P-86) を介して, デジタルオシロスコープにて観測した. ローパスフィルタの仕様は, 135 dB/oct, 1 Hz~119 kHz の範囲で設定可能であり, 500 Hz の交番磁界の測定では, $f_c = 600$ Hz とした. 偏光子と検光子は, それぞれの光軸を 90° 近くに設定した直線偏光板を用いた. またリファレンスとなる信号波形は, DMS 膜に対向設置したホール IC (Melexis 製; MLX90242, 15 mV/mT) の出力により得た. なお, ZnMnTe 膜の交番磁界における磁気光特性の評価は, 透過率の関係上, 波長 532 nm のレーザ

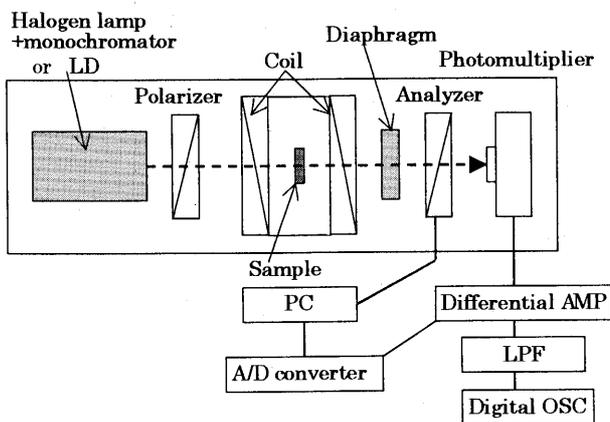


Fig. 1 System for Faraday effect measurement.

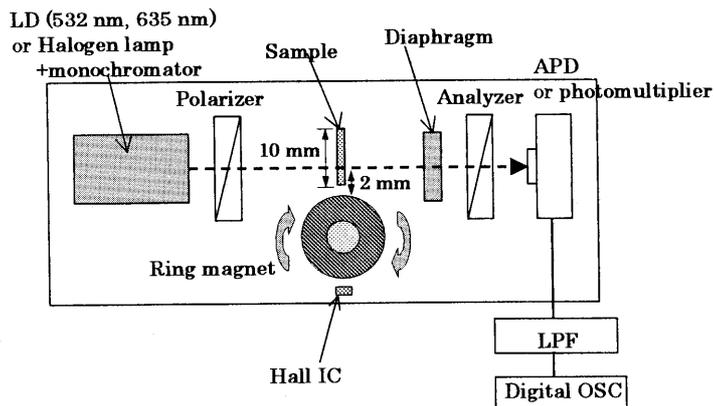


Fig. 2 System for measuring the Faraday effect by using an ac magnetic field.

ダイオードが使用できなかったため, ハロゲンランプとモノクロメータによる 550 nm の単一波長にて行った. また, 光パワーが低下したため, 受光素子を高感度な光電子増倍管 (ATAGO 製; 550) に変更し, $f_c = 600$ Hz にて評価した. 測定は全て, 室温 (約 25 °C) で行った.

3. 結果と考察

3.1 DMS 膜の評価

作製した DMS 膜の評価は, 結晶性を X 線回折装置, 組成をエネルギー分散型 X 線分析装置 (EDS), 透過率の波長依存性を分光光度計 (日立製; U-2000) にて行った. 各 DMS 膜の結晶性は, いずれも (111) 面優先配向の多結晶膜であった. Table 1 に基板, および各 DMS 膜の組成と厚さをまとめ, Fig.3 に各 DMS 膜の透過率の波長依存性を示す.

Fig.3 より, Cd 系膜, Zn 系膜いずれにおいても Co の添加でおよそ 5~10 % 程度の透過率の低下が見られた. また, Zn 系膜は, Cd 系膜に比べて透過率が 80nm 程度, 短波長側にシフトした. 透過率の測定結果からは, 交番磁気光特性測定の光源はできるだけ高い波長の光源が有効と言えるが, 後述のファラデー回転の波長依存性と市販のレーザダイオード波長との兼ね合いで, 今回, Cd 系膜は波長 635 nm のレーザダイオードを選択した. Zn 系膜の交番磁気光特性測定の光源には, 当初波長 532 nm のレーザダイオードを予定していたが, 本波長近傍では透過率が 5 % 以下と非常に小さいため, ハロゲンランプを使用して, 波長 550nm にて評価した.

3.2 DMS 膜の磁気光特性

Fig.4 に各 DMS 膜のファラデー回転の波長依存性の測定結果を

Table 1 Specifications of films and substrate.

No.	Samples	Composition	Thickness (μm)
—	Substrate	Quartz glass	500
1	Film	Cd _{0.65} Mn _{0.35} Te	1.73
2	Film	Cd _{0.60} Mn _{0.37} Co _{0.03} Te	1.94
3	Film	Zn _{0.82} Mn _{0.18} Te	2.16
4	Film	Zn _{0.81} Mn _{0.18} Co _{0.01} Te	2.14

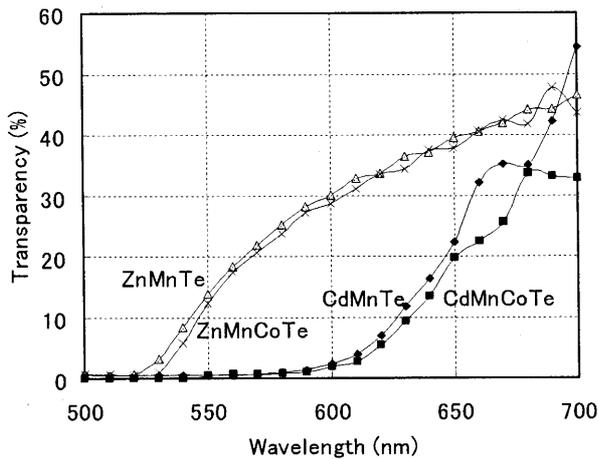


Fig. 3 Transparency of DMS films.

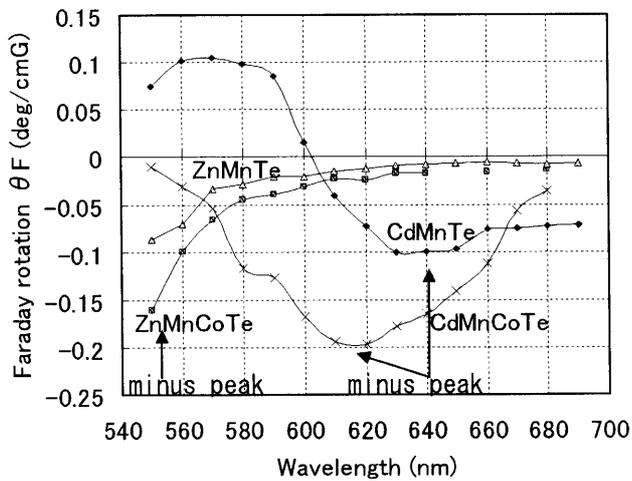


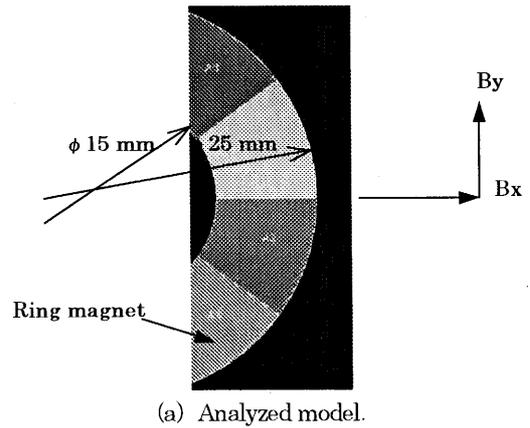
Fig. 4 Faraday rotation of DMS films with respect to the wavelength.

示す。Fig.4のDMS膜のファラデー回転角は、石英ガラス基板のファラデー回転角を除いたDMS膜正味の回転角のプロットである。Co添加量に違いがあるが、Cd系膜はCoの添加によりファラデー回転角に顕著な増加が確認でき、Zn系膜はCd系膜ほど大きな差はないものの、Co添加の影響と見られる差異は確認できる。Fig.4に示すように、ファラデー回転角の負のピークは、Cd系膜で610~650 nmにあり、Zn系膜はこの測定範囲では550 nm近傍と、Zn系膜ではCd系膜と比較して80 nm程度短波長側にシフトした。これは母材であるZnTeのバンドギャップが大きいことに起因すると考えられる。

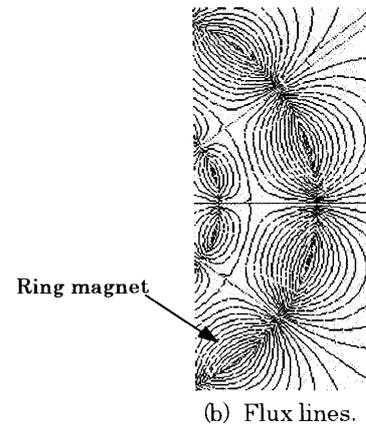
今後、各DMS膜のバンドギャップの詳細検討、および良好なファラデー回転特性を得るためのCo添加量の最適化検討、性能指数の評価を進める予定である。

3.3 DMS膜の交番磁気光特性

交番磁気光特性の評価時に使用するホールICからの出力信号の妥当性、及び波形歪を確認するために、リング磁石の仕様(保磁力: 480 kA/m)を基に、有限要素法を用いた磁界解析ソフトウェアを使用して、リング磁石近傍の磁束密度変化を求めた。Fig.5にリング磁石のモデルと近傍の磁束線図の一部、Fig.6にリング磁石の外径側面からの距離特性を示す。Fig.5 (a)において、解析モデ



(a) Analyzed model.



(b) Flux lines.

Fig. 5 Analysis results.

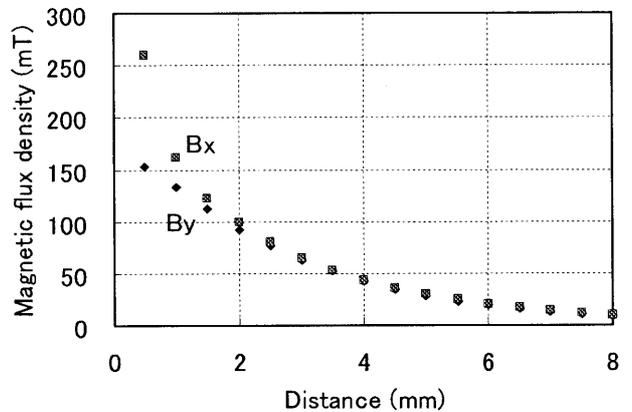


Fig. 6 Distance characteristics of flux density.

ルの濃淡はリング磁石の異なる磁極を示す。Fig.6において、Bxは磁石外径側面に垂直方向、ByはBxに対して鉛直方向の磁束密度を示し、それぞれが最大となる位置での距離特性を示した。DMS膜はBy、ホールICはBxを検出し、両者ともリング磁石の2極で1波を出力する。BxとByの最大となる磁極の位置が異なるため、各素子の特性に位相遅れがなければ、それぞれの出力波形は電気角で90°の位相ずれとなる。Fig.5よりリング磁石に近づくと歪を含んだ波形となることから、リング磁石の外径側面からおよそ2 mm離れた点を観測点とし、DMS膜は半径方向に膜面が平行になるよう設置した。膜面垂直方向にかかる磁束密度は最大約100mTで、モータの最大回転数6000 rpm (500 Hz) まで評

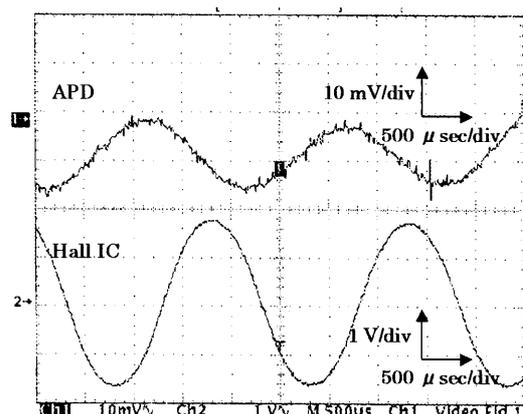


Fig. 7 Detected signal indicating Faraday rotation of CdMnCoTe film on a QG substrate at a frequency of 500 Hz in an alternating magnetic field of ± 110 mT.

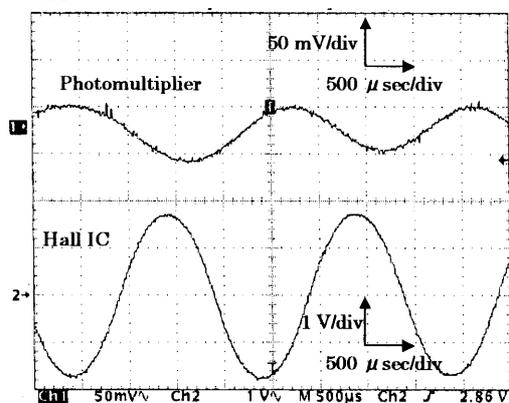


Fig. 8 Detected signal indicating Faraday rotation of ZnMnTe film on a QG substrate at a frequency of 500 Hz in an alternating magnetic field of ± 110 mT.

価を行った。

Fig.7にCdMnCoTe膜の500 Hzの交番磁界における各出力波形(上: APD出力, 下: ホールIC出力)を示す。測定は、偏光子と検光子の軸方向を、 90° から 10° 程度回転して行い、DMS膜のファラデー回転が負の回転であることから、DMS膜の出力波形はホールIC出力に対して逆相となる。Fig.7において、ややノイズは含んでいるものの、CdMnCoTe膜は常磁性の線形特性を有する約15 mV_{PP}の出力波形が確認できた。なおこの出力波形には石英ガラス基板のファラデー回転がDMS膜のそれを低める形で含まれている。すなわち、石英ガラス基板は正のファラデー回転、DMS膜は負のファラデー回転を有するため、ここでの出力波形はDMS膜のみのファラデー回転より25%程度小さくなっている。

両出力の位相ずれは、リング磁石の作る磁界 B_x , B_y が最大となる位置の違いに起因するものであり、これは本質的な位相差を示すものではない。ホールIC出力から換算した測定位置での磁束密度は110 mT、磁界解析の結果は100 mTであることから、それはほぼ妥当な結果である。

Fig.8にZnMnTe膜の、500 Hzの交番磁界における各出力波形(上: 光電子増倍管出力, 下: ホールIC出力)を示す。光源はハロゲンランプで、波長は550 nmに設定した。Fig.8において、Fig.7のCdMnCoTe膜と同様に、ZnMnTe膜においても常磁性の線形特性を有する出力波形(約60 mV_{PP})が確認できた。なおこの出力波形にも、石英ガラス基板の寄与が含まれている。

以上の結果、実際のデバイスのセットアップに近い測定系、つまり受光器の出力として、応用の期待ができる波形を得た。今後は、DMS膜の高感度化、耐ノイズ性の向上といった課題に取り組み、電流センサ(光CT)等への応用化について検討を進める予定である。

4. まとめ

DMS膜で大きな磁気光(ファラデー回転)特性が得られれば、常磁性膜の線形特性と高速度磁界反応性が利用でき、また、超小型光アイソレータへの応用も可能である。今回、4種の組成のDMS膜を石英ガラス基板上に作製し、フェリ磁性である従来のBi:YIG膜にはない常磁性の線形特性を、交番磁界中において確認した。本検討で得た受光器出力は、電流センサ(光CT)への応用を十分期待できる数値であり、今後、アプリケーション開発を視野に入れ、さらに検討を進める計画である。

References

- 1) M.Imamura, M.Nakahara, and S.Tamura: *IEEE Trans. Magn.*, **33**, 3403 (1997).
- 2) J.K.Furdyna: *J.Appl.Phys.*, **64**, R29 (1988).
- 3) K.Onodera, T.Masumoto, and M.Kimura: *Electron. Lett.*, **30**, 1954 (1994).
- 4) J.Y.Ahn, M.Tanaka, and M.Imamura: *J.Appl.Phys.*, **89**, 7395 (2001).
- 5) J.Y.Ahn, M.Tanaka, and M.Imamura: *J.Magn.Magn.Mat.*, vol.226-230, 1995 (2001).
- 6) M.Imamura, J.Y.Ahn, K. Takashima, and S. Inoue: *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 3237 (2002).
- 7) A.Okada, K. Takashima, J.Y.Ahn, and M.Imamura: Digest of the 27th Annual Conf. On Magn., **27**, 19pD-1 (2003).

2005年10月6日受理、 2006年1月16日採録