

横磁場中における等方性媒質の透過光の挙動

Transmitted light behavior of isotropic media in transverse magnetic field

濱田亮輔 東海林篤

山梨大学大学院工学専攻先端材料理工学コース

Yamanashi Univ. Hamada Ryosuke Syoji Atsushi

E-mail: g24tz013@yamanashi.ac.jp

Abstract

We investigated the behavior of circularly polarized light passing through an isotropic medium (Faraday rotation glass) under a transverse magnetic field. Previous experiments suggested that only circularly polarized light induces beam shift in the magnetic field direction. Through verification experiments, we successfully detected a minute beam shift via PSD only when circularly polarized light was incident. Furthermore, we theoretically examined beam shift from the perspective of photoinduced polarization, demonstrating that circularly polarized light incidence is essential for the rotation of polarization in the magnetic field direction. This represents a first step toward compact polarization detection devices.

1. はじめに

横磁場中に置かれた等方性媒質に直線偏光の光を透過させると、磁場の方向と光の進行方向に対し垂直な方向にビームがシフトする可能性が理論的に予測されている。[1] その現象は、誘電率テンソルの非対角成分が実数である磁性体誘電体に直線偏光のレーザーを入射した際に観測される磁気複屈折(Cotton-Mouton 効果等)によるものであり、この報告ではポインティングを使った理論的考察がなされている。

しかし、同論文の結果ではそのようなシフトは実験的に観測されておらず、代わりに非対角成分が虚数の材料を用い、また直線偏光ではなく円偏光を入射したときに、磁場の方向へのビームシフトが観測されて

いた。

非対角成分が虚数の材料を使った外部磁場によるビームシフトは円偏光だけをシフトさせることができることから、円偏光を直線偏光にすることなく、直接検出することのできる装置として、装置のコンパクト化が期待される。

2. 実験方法

本研究における光学測定系の配置をFig.1に示す。試料にはファラデー回転ガラス(住田光学ガラス VR1000)を用いた。このガラスは誘電率テンソル非対角成分が虚数を示す常磁性体であり、磁場によって一軸異方性が生じる等方性媒質として機能する。

レーザー光源には波長 $\lambda = 532\text{nm}$ のレー

ザーを用い、偏光制御のために液晶偏光リターダと $\lambda/4$ 波長板を組み合わせて使用した。液晶偏光リターダはコントローラによって制御され、直線偏光、斜め偏光、円偏光を生成した。

試料は $\pm 480\text{mT}$ の範囲で磁場強度が変化する電磁石のギャップ内に設置した。なお、光の進行方向を x 軸、磁場の方向を z 軸のフォークト配置(横磁場配置)とした。

透過光のビームシフト検出には、位置敏感型検出器(Position Sensitive Detector: PSD)を用いた。PSDからの出力信号をロックインアンプに入力し、電磁石の掃引周波数に同期した信号を検出した。これにより磁場強度に依存した微小なビームシフト信号をノイズから分離して測定することが出来る。

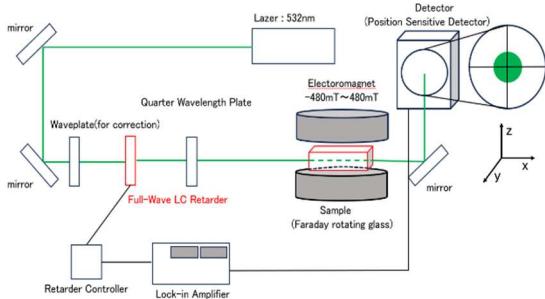


Fig.1 光学測定系の概略図。 x 軸が光の進行方向、 z 軸が磁場の方向、 y 軸が垂直方向となるフォークト配置を採用。

3. 実験結果

Fig. 2 に示すのは、鉛直・水平直線偏光、斜め直線偏光、円偏光の3種類の入射光に対する PSD の検出信号と磁場の時間変化である。

円偏光を入射した場合、検出信号は、磁場強度の時間変化と非常に高い相関を示

し、その動きと同期して変動していることがわかる。この結果は、円偏光を入射した場合に磁場の方向にビームがシフトしていることを明確に示している。検出された信号は非常に微小なシフトではあるが、磁場強度の掃引周波数と完全に同期していることから、磁場誘起効果であると結論づけられる。

一方で、直線偏光および斜め偏光における検出信号は磁場強度との関連性が見られず、円偏光の値と比較してその変化量はノイズレベル以下であり、実質的にビームシフトは観測されなかつたと結論付けられる。

これらの実験結果は円偏光入射時のみにビームシフトが発生するという先行研究の実験結果を裏付けるものとなった。

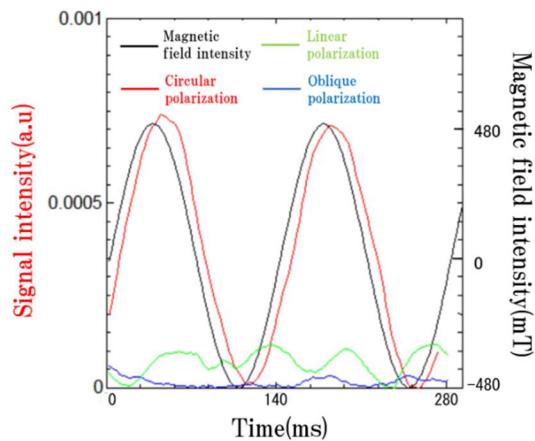


Fig.2 各偏光における検出信号の推移と磁場強度の時間変化。縦軸左に検出値、縦軸右側に磁場強度を示す。黒線は磁場強度の推移、赤線は円偏光、緑線に直線偏光、青線に斜め偏光の検出信号の推移が示されている。

4. 考察

本研究で観測された現象のメカニズム

を、誘電率テンソル ε と電場ベクトル E の関係から生じる光誘起分極 $\mathbf{P} = \varepsilon E$ に基づいて検討する。

まず、誘電率テンソルの非対角成分が実数である場合との関係性を精査するため、誘電率テンソル非対角成分が実数の材料に(直線偏光 E_y を入射した場合)を計算する。ここで磁場は z 軸方向とし、光の進行方向は x 軸方向とする。この時試料に誘起される光誘起分極 \mathbf{P} は、

$$\begin{aligned}\mathbf{P} &= \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & 0 \\ -\varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ E_y \\ 0 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xx} \\ 0 \end{pmatrix} E_y \quad (1)\end{aligned}$$

となる。この場合、生成した分極は y 方向ではなく、回転していることがわかる。分極の回転角 θ_p は

$$\theta_p = \text{Arctan}\left(\frac{\varepsilon_{xx}}{\varepsilon_{xy}}\right) \quad (2)$$

となる。光は横偏光であることから、光は分極の方向とは垂直に進行する。媒質を透過した光の回転角 θ は

$$\theta = -\text{Arctan}\left(\frac{\varepsilon_{xx}}{\varepsilon_{xy}}\right) \quad (3)$$

という角度を持つことになる。この値は、磁気複屈折によるポインティングベクトルの角度を解析した結果[2]とほぼ合致する。この結果からビームのシフトは光誘起分極が偏光と誘電率テンソルの値によって回転角を持つか否かが重要であると考えられる。

本研究の試料である非対角成分が虚数 $i\varepsilon_{xy}$ を持つ場合を考える。誘電率テンソル ε_{imag} は、

$$\varepsilon_{imag} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & i\varepsilon_{xy} & 0 \\ -i\varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} \quad (4)$$

となる。これに各偏光を入射した場合の光誘起分極は以下のようになる

直線偏光 $E = (0, 0, E_z)^T$ の場合

$$\mathbf{P} = \varepsilon_{imag} \mathbf{E} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \varepsilon_{zz} E_z \end{pmatrix} \quad (5)$$

となる。分極は z 方向のままであり、特に何も起こらない。

続いて斜め偏光 $E = (0, E_y, E_z)^T$ の場合

$$\mathbf{P} = \varepsilon_{imag} \mathbf{E} = \begin{pmatrix} i\varepsilon_{xy} E_y \\ \varepsilon_{xx} E_y \\ \varepsilon_{zz} E_z \end{pmatrix} \quad (6)$$

縦波の分極成分(x 成分)が生じているが、 y や z 成分と位相が90度ずれているので、ビームの進行方向には影響がない。

最後に円偏光 $E = (0, E_y, iE_z)^T$ の場合

$$\mathbf{P} = \varepsilon_{imag} \mathbf{E} = \begin{pmatrix} i\varepsilon_{xy} E_y \\ \varepsilon_{xx} E_y \\ i\varepsilon_{zz} E_z \end{pmatrix} \quad (7)$$

となる。この時、 x 成分と z 成分はどちらも虚数で、同位相である。従って、分極の回転が生じ、非対角成分が実数で計算したとき同様に、有限の回転角を示すことが期待される。

磁性ガラスの誘電率テンソル非対角成分に虚数を持つ等方性媒質を横磁場中において一軸異方性を誘起した場合、円偏光入射時にのみ磁場の方向にビームがシフトするという検証実験と同じ結果が非対角成分に実数を持つ媒質を使用する磁気複屈折の原理を応用し、理論的に証明された。

5.まとめと展望

本研究では、横磁場中に置かれた誘電率テンソル非対角成分が虚数の等方性媒質に円偏光を入射すると、磁場の方向にビームがシフトするという現象を実証し、光誘起分極の観点からビームシフトを考察した。

この結果は光の偏光状態を識別する新しいタイプの装置開発への貢献が期待される。今後は以下の 2 点を解明していく計画である。

-微細な値の解析とシミュレーション: ビームのシフト量は極めて微小であるため、実験結果を定量的に裏付けるための数値シミュレーションを現在開発中である。数 nm レベルの解析を行う高分解能な解析または、分解能を補う計算手法が喫緊の課題である。

-光の分割と合成の解明

検出器上で観測されている信号が、透過光の単一ビームのシフトなのか、あるいは異なる偏光成分に分離した複数のビームが合成されて検出されているのかどうかという、現象の物理的な問題が残っている。この問題に対しては解析計算によるアプローチによって解明していく。

6. 参考文献

- [1] G. L. J. A Rikken and B. A van Tiggelen, " Direction of Optical Energy Flow in a Transverse Magnetic Field" , P. R. L. 78, 847 (1997).
- [2] 佐藤勝昭 現代人の物理 1 光と磁気 (改訂版) 朝倉書店
- [3] A. Syouji, et al. J. Magn. Magn. Mater. 347, 47–50 (2013)