

ファラデーセルを用いた磁気光学効果測定装置

A Practical Apparatus for Measuring Kerr Rotation Angle Using Faraday Cell

芳野 俊彦*・平尾 勝彦**・石橋 正三**

Toshihiko YOSHINO, Katsuhiko HIRAO and Shozo ISHIBASHI

1. はじめに

磁性体の磁気光学的カー効果(またはファラデー効果)を利用する光磁気メモリは、現在のビット方式では不可能な書き換えが行える光学的高密度記録方式として強い関心が寄せられている。光磁気メモリ技術の開発に必須な装置として、カー効果測定装置がある。カー効果は通常 1° 以下の微小な偏光面の回転なので、その高精度の測定は容易ではないが、これまでの研究により、カー回転角の測定が、磁化変調法,¹⁾ 偏光変調法,^{2,3)} 零位法,⁴⁾ などにより行えることが明らかにされてきた。しかし、従来の研究は実験室であり、多くの磁気光学関係者が手軽に使えるようになっておらず、実用的で一般性のあるカー回転測定装置の製作が望まれている。筆者らは、このような要求に応えるべく、比較的簡単な測定原理により、高精度のカー測定を行える実用装置を試作した。本装置の概要について述べる。

2. 原 理

磁性体に直線偏光を照射すると、表面で光が反射する際に磁性体の磁化の向きに依存して偏光面が回転する。この回転角をカー回転角というが、これは磁性体の磁化の向きが光の入射方向と反対方向であれば θ_k 度、光の向きと同一方向であれば $-\theta_k$ 度回転する。一般にこの θ_k 度という角は微小である。

偏検光子の偏光面が直交した場の中におかれた磁性材料に、外部から磁界を与えると、偏光面がカー回転角 θ_k 度回転する。このときの光の透過率は $\sin^2\theta_k$ で表されるが、このままでは出力値がリニアリティーを有さないため、補正が面倒である。

以上のような理由で、カー回転角を計測するには、

- ① なんらかの方法を用いて感度を上げる。
- ② 出力がリニアリティーを有すること。

の条件が必要とされる。この条件は、以下に述べる比較的簡単な方法を用いて、解決することができる。

Fig. 1 は偏光面が直交状態にある 2 つの偏光プリズム間にファラデーセルをおき、これを変調した状態でカー

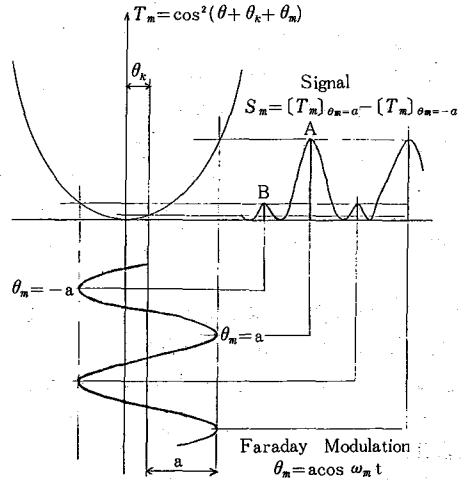


Fig. 1 Principle of polarization modulation method for measuring Kerr rotation.

回転角 θ_k が生じた場合の状態を示す。

縦軸の下にかかっている波形はファラデー変調を、横軸にはその変調に対応した出力信号波形を表す。

この変調された状態での透過率を T_m とすると、

$$T_m = \cos^2(\theta + \theta_k + \theta_m) \dots \dots \dots (1)$$

となる。ここで、

θ : 2 つの偏光プリズム (偏検光子) のなす角

θ_k : カー回転角

θ_m : 変調角 ($\theta_m = a \cos \omega_m t$)

a : 変調振幅

ω_m : 変調角周波数

この変調信号の最大、最小部 (Fig. 1 の $\theta_m = a, -a$ 部) でおおのタイミングをとり、ある時間のみゲートをあけると、A と B のおのおのでゲートをあけた時間分の積分値が得られる。この、おのおの A, B で得られた出力信号の差を取り出し、この値を $S_m(t)$ とすると、

$$S_m(t) = [T_m]_{\theta_m=a} - [T_m]_{\theta_m=-a} \dots \dots \dots (2)$$

と表される。ここで、上式に (1) 式を代入すると、

$$S_m(t) = \cos^2(\theta + \theta_k + a) - \cos^2(\theta + \theta_k - a) \\ = -\sin(2\theta + 2\theta_k) \cdot \sin 2a$$

*東京大学生産技術研究所 第1部
**溝尻光学工業所

研 究 速 報

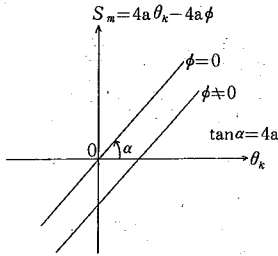


Fig. 2 Output signal S_m versus Kerr rotation angle θ_k .

ここで、 $\theta = 90^\circ - \phi$ とおくと、

$$S_m(t) = \sin(2\theta_k - 2\phi) \cdot \sin 2a \dots\dots\dots (3)$$

$$\approx (2\theta_k - 2\phi) \cdot 2a = 4a\theta_k - 4a\phi \dots\dots\dots (4)$$

Fig. 2 はこの (4) 式を表す。Fig. 2 から明らかなように出力信号は θ_k の 1 次式 (近似的) となっている。また、変調振幅 a に比例しているため、振幅 a はリニアリティーを満足する範囲で大きくふれば、大きな出力信号を得る。

次に、(4) 式の近似の適用範囲について吟味すると、

一般式 $\sin \theta = \theta - \theta^3/6 + \dots$ であり

$$\text{誤差 } R.E. = (\text{真値} - \text{信号}) / \text{信号} = (\sin \theta - \theta) / \theta \dots\dots\dots (5)$$

と表される。

1/100 以内のリニアリティーを満足するには、(5) 式の R.E. の値が 1/100 であればよいわけであるが、これを満足する θ は 14° 以下になる。

ゆえに (3)、(4) 式より、

$$|2\theta_k - 2\phi| < 14^\circ, |2a| < 14^\circ \dots\dots\dots (6)$$

よって、(6) の条件より、 $\phi = 0$ のとき、 a の振幅が $7^\circ - [\theta_k]_{\max}$ 以内であれば、出力信号は 1° のカー回転角に対し 0.01° 以内のリニアリティーを有することになる。

3. 装 置

Fig. 3 は装置全体の配置を示す。光源はハログランプ 50 W で、電源は直流安定化したものを用い、またカー回転角の波長依在性を測定するために、波長範囲 400~900 nm、逆線分散 22 nm/mm の分光器を光源側に設けた。偏検光子は消光比 5×10^{-5} のグラントムソンプリズムを使用した。

ファラデーセルには、ベルデ定数の大きなものとして FR-5 ガラスを使用した。Fig. 4 に本装置で使用したファラデーセルの、波長とファラデー回転角との関係を示す。変調周波数は 215 Hz とし、コイルは水冷式とした。試料にかける電磁石は、最大 $\pm 3000\text{G}$ を目標とし、数秒~数分の設定に対しオートスキャンできるものを使用した。また、ポーラ型カー測定のため、ポールピースの中心に穴をあける等の工夫をした。

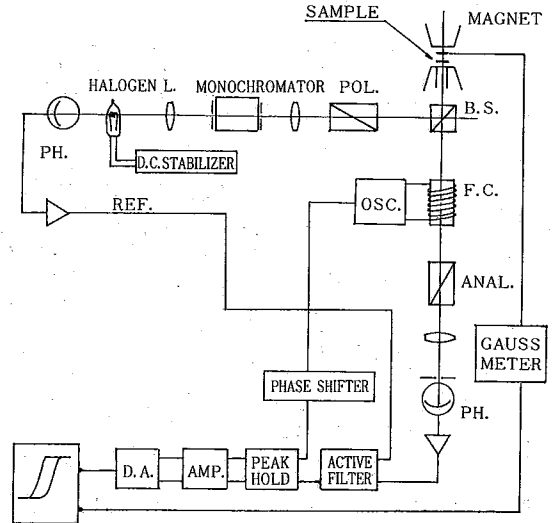


Fig. 3 Schematic diagram for Kerr rotation measuring system.

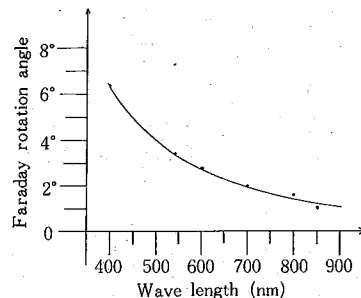
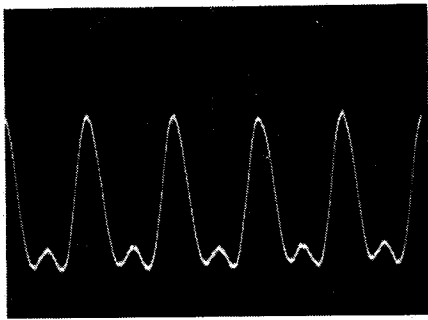


Fig. 4 Wavelength dependence of Faraday rotation angle of FR 5 Faraday cell.

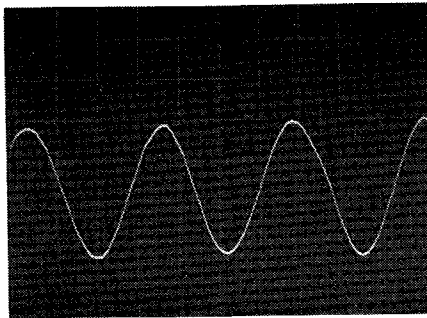
光電変換器にはフォトマルを使用し、感度ピーク波長が 300~800 nm までほぼフラットで、低雑音のものを選択した。

電気系は、光源の光強度変動が誤差になるため、光源側にもフォトマルを設けて、試料側信号を取りこむと同時に光源からリファレンス信号をとり、アクティブフィルターを通し極力光源の変動分をおさえるように努めた。

Fig. 5 にアクティブフィルターを通したあとの出力波形を示す。あるカー回転角度 θ_k を有している状態が Fig. 5 (a) で、 $\theta_k = 0$ の状態が Fig. 5 (b) である。(b) では 2. で述べた A と B の山の高さが等しくなっている。オシレーター (OSC) でファラデーセルを変調する。このときの振幅のおおの最大、最小値で出力を取り出すためのタイミング回路が Fig. 3 のピークホールド回路部である。この最大、最小のタイミング信号は、変調信



(a) Kerr rotation $\theta_k \neq 0$



(b) Kerr rotation $\theta_k = 0$

Fig. 5 Output signals in presence (a) and absence (b) of Kerr rotation.

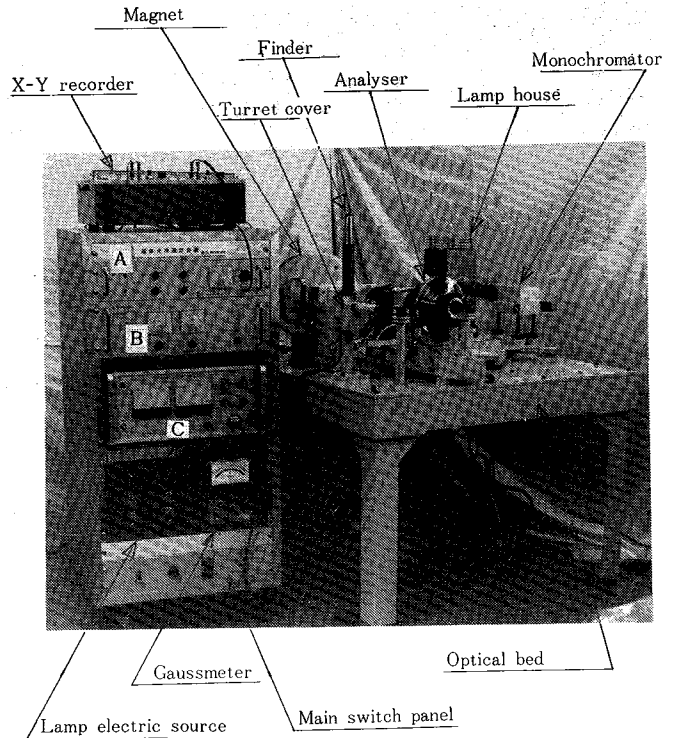


Fig. 6 View of Kerr rotation measuring apparatus.

号がゼロ点をクロスする際に発生させたものを 90° 位相をシフトしている。このピークホールドされた信号 A, B を差動アンプに通して差を検出し、X-Y レコーダに入力する。レコーダのもう一方は Gaussmeter から試料部磁界を入力し、磁界対カー回転のヒステリシス・カーブを得る。

Fig. 6 は本装置の外観写真である。向かって左側が主として電気系で、右側が光学系となっている。電気系は X-Y レコーダ、信号処理系、フォトマル用高圧安定安定化電源 (12 素子)、磁場電源、Gaussmeter 等が配置されている。光学系としては、ランプハウス、分光器、検光子 (0.01° 読取り回転目盛盤に組み込み)、さらに磁場装置等が見える。実際には、これら光学系は磁気シールド板で覆い囲まれている。

4. 結 果

Fig. 3 のような配置によって、カー回転角を調べた。Fig. 7 に、ある試料非晶質垂直磁化膜の測定結果の例を示す。(a) は中心波長 $\lambda = 550 \text{ nm}$ 、半値幅 50 nm の光を照射した場合で、磁界 $H = \pm 3 \text{ KG}$ をかけ、 $\theta_k = \pm 0.42^\circ$ を得た。測定時間は約 2 分である。フォトマル印加電圧は約 400 V で、ファラデー変調角は、Fig. 4 に示されているように約 3.3° である。(b) は、中心波長 $\lambda = 850 \text{ nm}$ 、

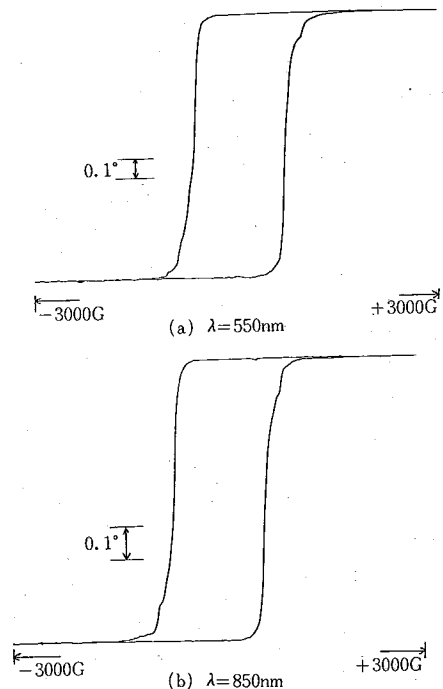


Fig. 7 Kerr rotation signals as a function of magnetic field.

研 究 速 報

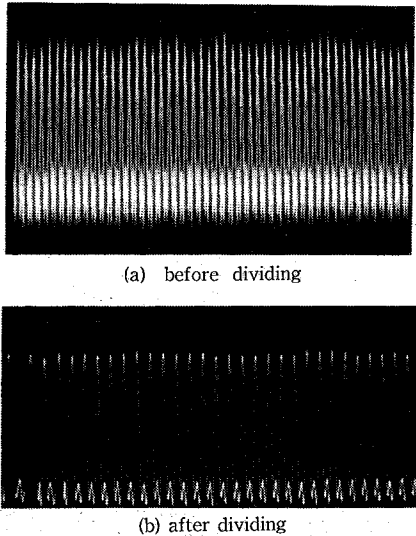


Fig. 8 Effect of light source power fluctuation on output signal.

半値幅 50 nm, 磁界 $H = \pm 3\text{KG}$ で, $\theta_k = \pm 0.67^\circ$ の結果を得た。

両図ともヒステリシス・ループは飽和近辺でよく閉じられているのでドリフト等はかなり小さくおさえられていると判断できる。

5. 検 討

原理のところでも述べたように, カー回転角信号はおのおの A, B の値の差を検出する方式をとっている。このため光源に変動があると, A, B の値が安定せず, 信号にドリフトが出てくるので光源を安定させておく必要がある。

当初は, 明かるい光源を目的として Xe 150 W ランプを使用したが出力が不安定で (Fig. 8 (a)) リファレンス光から割算回路を入れ出力を安定化させた。しかし, Fig. 8 (b) に示されているように, Xe ランプのリプルが影響してまだピーク値が揃っておらず, これを揃えることははなはだ困難であった。このため, 途中から直流安定化電源としたハロゲンランプに切り換えた。これにより, 出力は安定化された。

電磁石で試料部に磁場をかけると, 漏洩磁界が光学部品 (ビームスプリッター, レンズ, ファラデーセル等) にファラデー回転を与えるため, 試料部に非磁性体 (アルミ蒸着膜) をおきこれの影響をみたところ最大 0.15° もの回転角を受けていることがわかった。ガウスメータで漏洩磁界の分布を調べ, 試行錯誤的にはあるが要所々に磁気シールド板を施した。その結果, Fig. 9 に示

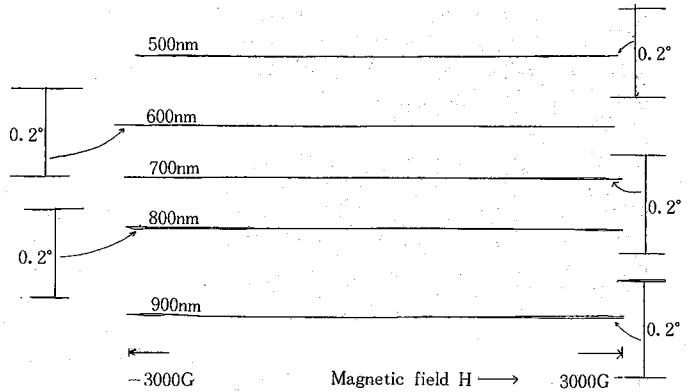


Fig. 9 Output signals in non-magnetic thin film (Aluminium).

A: Signal processor, B: High voltage source for photo-multiplier, C: Current source for electro-magnet.

すように 900 nm でごく僅か 0.006° 開いているが, 他の波長ではほぼ完全に閉じられた直線, 水平性の良いループを得られた。このことは漏洩磁界の影響のみでなく, 光源を含めたドリフトに対しても安定した結果が得られていることを示している。

また, (4) 式で明らかのように, 出力信号はファラデー振幅に比例するので, 変調角は約 6° 以内を目安で可能な限り大きく振り, なをかつ波長に対し依存性をもたせないようにファラデーセルにかける磁界をコントロールして, 変調角が常に一定になるように工夫すれば, 波長に対する補正の手間を省略でき, より使いやすい装置となるが, 今回はそこまで施さなかった。

6. おわりに

磁性体の磁気光学効果を測定する実用的な装置を試作し, 主にその基本的な信号の処理手法およびこれに関することを述べた。本装置は, 測定原理として比較的簡単な, ファラデーセルによる偏光変調法と信号検出手法を用いているが, 光源の安定化と磁気シールドに十分な配慮をするなどにより, 従来発表されているものに比べて, ドリフトの小さい, 0.01° の精度を安定して出せる装置とすることができた。今後, 磁気材料開発の測定器として本装置は十分実用に役立つものと思われる。

(1983年8月23日受理)

参 考 文 献

- 1) T. Yoshino, S. Tanaka, Opt. Commun. 1 (1969) 149
- 2) 野村龍男, NHK 技術研究 32 (1960) No. 159, 30
M. Gomi, M. Abe and S. Nomura, Jpn. J. Appl. Phys., 20 (1981) L 821
- 4) C. C. Robinson, J. Opt. Soc. Amer. 53 (1963) 681