

実験 1-2

1 実験目的

1/2 波長板の回転角 θ に対して直線偏光の偏光面が 2θ 傾くことを実験により確かめ、理論値との比較を行い、誤差の原因について考察する。

2 原理・仮説

2.1 Jones マトリックス

電場 \mathbf{E} の複素振幅の x 成分 E_x と y 成分 E_y をもつベクトル \mathbb{J}

$$\mathbb{J} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

を定義し、これを Jones ベクトルと呼ぶ。

光を偏光子などの偏光状態を変化させる光学素子に通す際に、光学素子が線形応答を示すとする、光学素子透過前後で光の偏光状態を示す Jones ベクトルは線形変換されている。従って、光学素子の特性は 2 行 2 列の行列で表現でき、Jones ベクトルを変換する行列を Jones マトリックスと呼ぶ。

2.2 1/2 波長板の Jones マトリックス

1/2 波長板は、異方性媒質で作られた光学素子であり、透過後の光の位相変化量が電場の x 成分と y 成分で π だけ異なる。1/2 波長板透過後の x 方向の電場の位相は $\pi/2$ だけ遅れ、 y 方向の電場の位相は $\pi/2$ だけ進むことで x 方向と、 y 方向の電場の間で π の位相差が生じる。これにより変換される基底ベクトルは、

$$\mathbb{Y}e_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} e^{i\pi/2} = e^{i\pi/2} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + 0 \times \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = i \times e_1 + 0 \times e_2 \quad (2)$$

$$\mathbb{Y}e_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} e^{-i\pi/2} = 0 \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + e^{-i\pi/2} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \times e_1 - i \times e_2 \quad (3)$$

となるので、1/2 波長板の Jones マトリックス \mathbb{Y} は

$$\mathbb{Y} = \begin{bmatrix} i & 0 \\ 0 & -i \end{bmatrix} \quad (4)$$

となる。

1/2 波長板を光源に対して回転させて使用する場合、表現行列 \mathbb{Y} と Jones ベクトルとの基底を同一にする必要がある。このため、正規直交基底 e_1, e_2 で表現されたベクトルから、 θ 回転した座標系での正規直交基底 e'_1, e'_2 で表現されたベクトルへ変換する行列 \mathbb{T} を求め、正規直交基底を変換する。波長板透過前の Jones ベクトルを \mathbb{E}_1 、波長板透過後を \mathbb{E} とおくと、1/2 波長板透過後の Jones ベクトル \mathbb{E}_2 は

$$\mathbb{E}_2 = \mathbb{T}^{-1} \mathbb{Y} \mathbb{T} \mathbb{E}_1 \quad (5)$$

となる。

\mathbb{T} を求める。図 1 より、

$$\begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} = \cos \theta e_1 + \sin \theta e_2 \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix} = -\sin \theta e_1 + \cos \theta e_2 \quad (7)$$

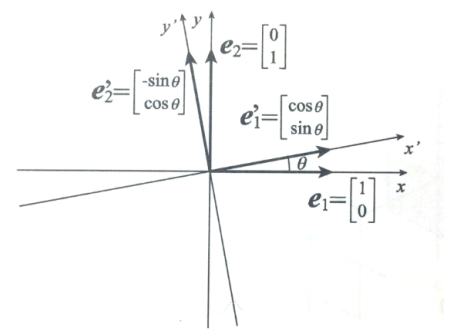


図 1 波長板透過前後の正規直交基底

となり、

$$\mathbb{T} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

を得る。逆行列である \mathbb{T}^{-1} は

$$\mathbb{T}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

以上の式より

$$\mathbb{E}_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \mathbb{E}_1 \quad (10)$$

ここで、透過前の光は直線偏光であるので $\mathbb{E}_1 = {}^t(1; 0)$ とすると、

$$\mathbb{E}_2 = i \begin{bmatrix} \cos 2\theta \\ \sin 2\theta \end{bmatrix} \quad (11)$$

が得られる。これは、 2θ 方向に偏光面を持つ直線偏光を $1/2$ 波長板を用いることで回転させることが出来ることを示す。つまり、実験の仮説としては $1/2$ 波長板を回転角 θ だけ回すと直線偏光の偏光面が 2θ 回転するということである。

2.3 本実験における仮説

本実験では波長板を 10° ずつ回していく。そのためこれに対応して偏光面が 20° ずつ回転して行くことが確認できれば良い。偏光面の確認は、強度計を用いて波長板と偏光板を透過した光の強度が最大となるようにその都度確認することで偏光面の角度を測定する手法をとる。

3 実験手順

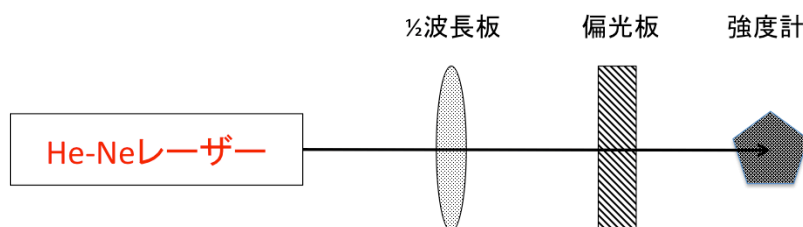


図2 実験 1-2 の光学系

1. 図2に示した光学系を作成した。
2. 波長板の角度を 0° の状態にした。この状態で最大の強度をとなるように偏光板を回した。このときの強度は 3.06mW で偏光板角度は 57° であった。
3. 波長板を 10° 回し、強度が最大となる偏光板角を調整し記録した。
4. 波長板の回転が一周するまで（角度が 360° となるまで）、上記の測定を繰り返した。

4 実験結果

1. $1/2$ 波長板を 10° 回したときの偏光面の変位角度を偏光板角度差として記し、図3の結果を得た。
2. 平均値、標準偏差、偏光板角度差の最大値と最小値を表1に記した。
3. 平均値の結果を見ると波長板 10° に対して偏光面は 20.3° 変化していることが確認された。
4. 強度は 2.90mW 以上 3.46mW 以下であった。

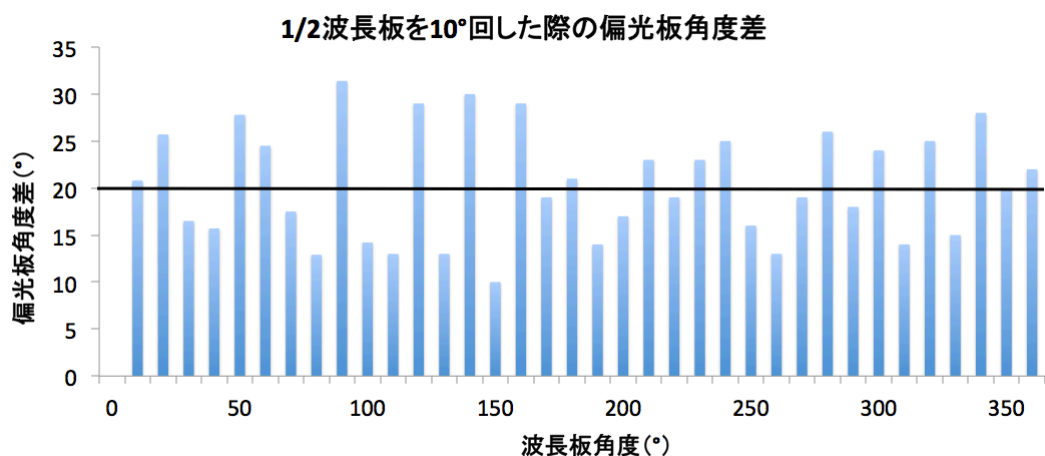


図3 1/2 波長板角の 10° に対応する偏光面角度

表1 1/2 波長板 10° に対応する偏光板角度差の統計結果

標本数	平均値	標準偏差	最大値	最小値
36	20.33°	5.75	31°	10°

5 考察・改善点

1/2 波長板を θ 回転させたとき、透過前後で偏光面は 2θ 変化しているという仮説の元で実験を行った。その結果、波長板を 10° 回転させたときに偏光面は平均 20° 回転していたという結果が得られた。このことから仮説は正しいと確認された。

結果の図3では、偏光板角度差は均一ではなく最大で 31°、最小で 10° の角度差も認められた。原理上はどの測定においても波長板を 10° 回して行ったので、どの測定回においても 20° の変化が見られるべきであったが、平均値ではなく個々のサンプルに注目すると仮説に従わないと思われる場合があった。以下ではその原因と改善点について考察を記す。

5.1 光源レーザーの不安定な出力

実験の原理上、手法上、計測する際の強度は一定であるべきであった。しかし、最大強度と最小強度で 0.6mW 程の差が生じていたため実験誤差の原因光源レーザーの出力が不安定である可能性を考えた。検証するために本測定後、波長板等の光学系に操作は加えず、強度変化を調べた。結果 10 秒間で 0.01mW 程度のぶれが確認された。

測定結果に対して 0.01mW 程度のぶれは有意性のある原因としては考えにくい、誤差の原因にはなり得ないだろう。

5.2 光学系の幾何関係

光学系を組み立てるさいに、レーザー光源、波長板、偏光板は一直線上に配置し、波長板と偏光板は光線に対して垂直になるようにするべきであった。しかし、本実験では目測で以上の器具を配置したため精密性に欠けていた。偏光面の変化角の平均が 20° ではなく 20.3° となった原因としては、この光学系の幾何関係の不十分な配置が系統誤差として表れた結果である可能性があると考えられる。

5.3 波長板・偏光板の局所的格子構造のずれ

厳密に実験を行うためには、光線が波長板と偏光板の中心を通るように調整を行うべきであった。しかし、本実験においては、各光学素子の中心ではなく、各光学素子を通過する程度の精度で光路を設定していた。そのため、波長板や偏光板を

回転させるさいに局所的な格子構造等の光学素子の物理特性の変化が生じ、それが原因となり誤差が生じた可能性がある。

参考文献

- [1] 辻内順平、『理工学基礎講座 11：光学概論 2』pp171-173、S54 年 2 月、朝倉書房
- [2] 『応用物理専攻実験テキスト』pp.84-91、応用理工学類