

物理学実験 I

光波の伝播と回折

実験者番号 72

学籍番号 B9SB2032 木村佑斗

共同実験者 ~~XXXXXXXXXX~~

2022 年 1 月 28 日

目次

1	目的	3
2	原理	3
2.1	偏光	3
2.2	反射と屈折	3
2.3	回折と構造解析	4
3	実験 1:偏光	6
3.1	方法	6
3.2	結果	6
3.3	考察	8
4	実験 2:反射と屈折	9
4.1	方法	9
4.2	結果	10
4.3	考察	13
5	実験 3:屈折率の精密測定	16
5.1	方法	16
5.2	結果	16
5.3	考察	16
6	実験 4:回折と構造解析	17
6.1	方法	17
6.2	結果	17
6.3	考察	19
7	レポート問題	22
7.1	問題 1	22
7.2	問題 2	22
7.3	問題 3	22
8	結論	22
9	参考資料	22

§1 目的

偏光に関するマリユスの法則を実験により検証する。また、物質の特性である屈折率を複数の方法で測定し、最も精密に結果を得られる方法で再度屈折率を測定する。屈折率は光の波長にも依存するのとも実験で確かめる。最後に、回折現象を利用して、物質の構造を解析する。

§2 原理

2.1 偏光

光強度 I は電場振幅 E_0 の 2 乗に比例する。

$$I \propto E_0^2 \quad (1)$$

本実験では光をフォトダイオードに入射させ、その電圧を測定する。今回用いた機器はダイオード内の抵抗 $R = 100\text{k}\Omega$ と、532nm におけるダイオードの受光感度 $S = 0.39\text{A/W}$ であり、光強度 (単位 W) との関係は、

$$I = \frac{V^2}{SR} \quad (2)$$

となる。したがって、測定電圧と光強度は比例するので、電圧をそのまま光強度として考えても本実験に支障はない。

光には直線偏光、円偏光、楕円偏光がある。前者 2 つは楕円偏光の特別な場合である。おおまかに原理を述べる。 z 方向に伝播する光の電場ベクトル \mathbf{E} を x 方向と y 方向の 2 つのベクトルに分解する。当然、光は電磁波であり、振動しているので E_x と E_y には位相差 $\Delta\phi$ がある。 $\Delta\phi = 0$ の時を直線偏光という。また、 E_x と E_y の振幅が等しく、 $\Delta\phi = \frac{\pi}{2}$ の時を円偏光という。

偏光に関する法則である「マリユス (Malus) の法則」とは、入射直線偏光の偏光方向と透過偏光方向のなす角度を \aleph 、入射光強度を I_0 とすれば、透過光強度は

$$I = I_0 \cos^2 \aleph \quad (3)$$

となる、という法則である。

2.2 反射と屈折

異なる物質の境界面で、電磁波は反射・屈折する。入射面は、境界面の法線ベクトルと電磁波の進行方向ベクトルが張る面のことである。入射面に対して平行な電場ベクトルを持つ光を P 偏光、垂直な電場ベクトルを持つ光を S 偏光という。入射角を θ 、反射角を θ' 、屈折角を θ'' とすると、反射の法則および屈折の法則は次の通り。

$$\theta = \theta' \quad (4)$$

$$\frac{\sin \theta}{\sin \theta''} = n \quad (5)$$

ただし、空気の屈折率は真空とほぼ等しく 1 で、物質の屈折率を n とした。光電場の振幅反射率は P 偏光・S 偏光それぞれ、

$$r_P = -\frac{\tan(\theta - \theta'')}{\tan(\theta + \theta'')} \quad (6)$$

$$r_S = -\frac{\sin(\theta - \theta'')}{\sin(\theta + \theta'')} \quad (7)$$

となつて、強度反射率は

$$R_P = |r_P|^2 \quad (8)$$

$$R_S = |r_S|^2 \quad (9)$$

垂直入射 $\theta = 0$ の時は R_P と R_S は等しくなつて

$$R_0 = R_P = R_S = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 \quad (10)$$

となる。P 偏光のみが持つ性質として、ブリュースター (Brewster) 角 θ_B がある。 $\theta_B + \theta'_B = \pi/2$ の場合、強度反射率は $R_P = 0$ となる。 θ_B と n の関係式は

$$\tan \theta_B = n \quad (11)$$

である。

最後にプリズムによる屈折では、最小偏角 δ_{min} なるものが存在する。本実験で用いたプリズムは正三角形であるので、空気からプリズムへの入射角 θ_1 、屈折角 θ'_1 、プリズムから空気への入射角 θ_2 、屈折角 θ'_2 とし、プリズムの屈折率を n 、偏角を δ とすると、それらの関係式は

$$\begin{cases} n = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta'_1} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta'_2} \\ \frac{\pi}{3} = \theta'_1 + \theta'_2 \\ \delta = \theta_1 - \theta'_1 + \theta_2 - \theta'_2 \end{cases}$$

である。偏角 δ は入射角 θ_1 によって変化する。最小偏角になるときは $\theta_1 = \theta_2$ となるときである。最小偏角 δ_{min} と n の関係は

$$\sin \frac{\delta_{min} + \pi/3}{2} = n \sin \frac{\pi/3}{2} \quad (12)$$

である。

2.3 回折と構造解析

スクリーンに映された輝点パターン (回折光) から、開口パターン (単位胞) が決定できる。開口の位置ベクトルを \mathbf{r}_0 、開口の 2 つの基本並進ベクトルを \mathbf{a}, \mathbf{b} とすると、開口の位置は整数 l, m を用いて、

$$\mathbf{r}_0 = l\mathbf{a} + m\mathbf{b} \quad (13)$$

と表せる。回折光の輝点の位置 \mathbf{r}_i は、逆格子ベクトル \mathbf{a}', \mathbf{b}' と整数 l', m' を用いて、

$$\mathbf{r}_i = \frac{\lambda z}{2\pi} (l'\mathbf{a}' + m'\mathbf{b}') \quad (14)$$

ただし、 λ はレーザー光の波長、 z は開口面とスクリーンの距離。本実験のように、開口面とスクリーンが平行であり、それらに垂直方向を z 軸と設定すると、 z 方向単位ベクトルを e_z として、逆格子ベクトルは

$$\mathbf{a}' = 2\pi \frac{\mathbf{b} \times \mathbf{e}_z}{\mathbf{a} \cdot (\mathbf{b}' \times \mathbf{e}_z)}, \mathbf{b}' = 2\pi \frac{\mathbf{e}_z \times \mathbf{a}'}{\mathbf{a} \cdot (\mathbf{b}' \times \mathbf{e}_z)} \quad (15)$$

で与えられる。単位胞中に、 $p\mathbf{a} + q\mathbf{b}$, ($0 \leq p, q < 1$) (ただし $p = 0 \wedge q = 0$ は除く) の位置に別の開口が 1 つある場合、輝点が消滅する。これを消滅則という。これによれば、 $2(pl' + qm')$ が奇数となるときに輝点が消滅する。これを用いると、構造決定ができる。

また、単位胞から出る光と別の開口から出る光の強度が異なる場合は輝点は完全には消滅せずに輝点の明暗が現れる。パターンは l' に対しては p の逆数、 m' に対しては q の逆数が対応する。

§3 実験 1:偏光

3.1 方法

まずはのちの実験のために、フォトダイオード特性を測定した。緑色レーザーを ND フィルター (ND70,50,20,10、ND10 だけ 2 枚あった) を通して、その光出力電圧をデジタルマルチメータで測定した。素子ホルダーにはフィルターが 3 枚セットできた。可能な組み合わせ全てで電圧を測定した。

次に、緑色レーザーを ND70,50,20 の 3 枚を挟んで偏光フィルターに照射した。変更は実験室机に水平な方向にした。偏光フィルターを透過させた後、検光子で角度を 5° ずつ変えながら 0° から 180° まで透過させ、光出力電圧をデジタルマルチメータで測定した。

3.2 結果

バググラウンドは 0mV。測定値からバググラウンドを差し引いた結果が下の表である。グラフを見ると、相対光強度が 0~0.14 では光強度とフォトダイオードの電圧は比例関係にあることがわかる。しかし、それより大きな光強度の領域ではフォトダイオードの電圧は 3V ほどで一定になった。

表1 フォトダイオード特性

相対光強度	電圧 V
1	3.106
0.7	3.094
0.5	3.083
0.35	3.068
0.2	3.041
0.14	2.972
0.1	2.449
0.1	2.383
0.07	1.619
0.07	1.575
0.1	2.275
0.05	1.186
0.05	1.153
0.02	0.484
0.02	0.474
0.01	0.253
0.007	0.169
0.005	0.12
0.002	0.051
0.07	1.54
0.035	0.816
0.035	0.805
0.014	0.327
0.014	0.318
0.01	0.237
0.01	0.231

表2 偏角と光強度

偏光角度 °	光電圧 V
0	0.262
5	0.26
10	0.253
15	0.241
20	0.227
25	0.21
30	0.191
35	0.17
40	0.146
45	0.124
50	0.101
55	0.08
60	0.059
65	0.041
70	0.026
75	0.014
80	0.006
85	0.001
90	0
95	0.003
100	0.009
105	0.02
110	0.033
115	0.05
120	0.068
125	0.088
130	0.111
135	0.132
140	0.155
145	0.176
150	0.194
155	0.212
160	0.226
165	0.237
170	0.245
175	0.249
180	0.251