**１．実験目的**

1. 偏光の性質を学ぶ。
2. 偏光の反射について学ぶ。
3. レーザーの波長を測定する。
4. レーザー光の回折について学ぶ。

**２．実験原理**

(1)偏光

偏光とは光の振動する方向が一方向に決まっていることをいう。偏光板はある特定の方向の光の成分だけを透過する性質を持つ板のことで、その特定の方向のことを透過容易軸とよぶ。図1のように偏光版に透過容易軸とは傾いた偏向を持つ光が入ると光の透過容易軸と平行な成分のみが偏光板を通過する。

α

αcosθ

θ

図1:偏光とエネルギー

(2)反射

反射に関しては光が滑らかな非金属の面で反射されるときに部分偏光するというのを発見したのが、E.L.Malusであり、反射光と屈折光がπ／2をなす時は完全に偏向するという事を実験的に発見したのがD.Brewsterで、反射光は図2で言うと、このレポート用紙に垂直な成分に偏光する。Brewster角については屈折率の定義から、その角度を求めることができる。tanα=n。実験にはガラスを使用し、ガラスの屈折率は1.5のため、理論値は56.3°となるはずである。

α

図2:ブリュースター角

(3)回折

金尺のある目盛と、その隣の目盛にあたって反射している光の行路差は

d(cosα-cosβ)

であり、また、ｘが十分に小さい時には

Cosx＝1－0.5x2

と近似できる。従って、行路差は

0.5d(β2‐α2)＝d/2(β+α)(β-α)…(1)

といえる。ここで、光路差が波長の整数倍に等しい時、波は互いに干渉してその強度を増すので、m次回折光の角βmは

mλ= d/2(βｍ+α)(βｍ-α)

といえる。また、図3を見てもわかるようにLが十分に大きければ、角

α+βm=lm/L

と近似できる。とくに0次光については、α=β0だから、

2α=l0/Lといえるので、(1)式に代入して、

λ＝dlｍ（lｍ‐l0）/２L2mといえる。

この実験で金尺が回折格子の代わりに使えるのは目盛部分では光が乱反射されることによる。

ｄ

β

α

図3:金尺表面

**３．実験方法**

1. 使用器具

電圧計、半導体レーザー、He-Neレーザー、偏光板、検出器、金尺、竹尺、ガラス板、回転台、接続コード

(2) 操作

## 3.1偏光

半導体レーザーと検出器の間に一枚の偏光板を置き、偏光板の回転角φを５ずつ回転させて偏光板を通過したレーザー光の強度を測った。

検出器

半導体レーザー

図4:透過エネルギー強度の測定

偏光板

電圧計

## 3.2反射率

半導体レーザー、ガラス板、検出器を図のように配置し、レーザーの偏光方向を実験台に垂直にして、反射光の強度が入射角θによってどのように変化するのかを測定した。同様にしてレーザーの偏光方向が実験台に平行な場合も測定した。この測定においても角度は５ずつ回転させて測定した。

検出器

半導体レーザー

図5:反射率の測定

電圧計

ガラス板

## 3.3レーザーの波長

(a)図のように、ヘリウム・ネオンレーザー光を金尺の0.5mm間隔の目盛がついた部分に、入射角が90に近くなるように当て、スクリーン上に生じた輝点の位置を測定した。金尺がないときにレーザー光のあたる点を原点として、一番明るい輝点の位置を、それより外側の点の位置を順次、…とし、それよりレーザー光の波長を計算した。

(b)また、金尺を上下にずらして、レーザー光のあたる部分を0.5mm間隔の部分から1mm間隔の部分に変えたとき、スクリーン上の輝点がどのように変化するか、(c)一番明るい点より内側に点は現れるかどうかを観察した。

α

β2

β1

β0

ｌ2

ｌ1

ｌ0

L

図6:回折実験装置

スクリーン

**4．実験結果**

4.1偏光

以下の表１に偏光方向と透過容易軸とのなす角θとそのときの光の強度（電圧及びθ＝０の強度を１としたときの相対強度）、およびCos2θを示す。グラフを巻末に付ける。

　　表１

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 回転角θ (度) | 強度 (V) | 相対値 | Cos2θ |  |  |
| 0 | 1.81 | 1.00 | 1.00 |  |  |
| 5 | 1.76 | 0.97 | 0.99 |  |  |
| 10 | 1.67 | 0.92 | 0.97 |  |  |
| 15 | 1.55 | 0.86 | 0.93 |  |  |
| 20 | 1.42 | 0.79 | 0.88 |  |  |
| 25 | 1.28 | 0.70 | 0.82 |  |  |
| 30 | 1.15 | 0.64 | 0.75 |  |  |
| 35 | 1.01 | 0.59 | 0.67 |  |  |
| 40 | 0.86 | 0.45 | 0.59 |  |  |
| 45 | 0.73 | 0.40 | 0.50 |  |  |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 50 | 0.58 | 0.33 | 0.41 |
| 55 | 0.44 | 0.24 | 0.33 |
| 60 | 0.31 | 0.17 | 0.25 |
| 65 | 0.20 | 0.11 | 0.18 |
| 70 | 0.11 | 0.06 | 0.12 |
| 75 | 0.04 | 0.02 | 0.07 |
| 80 | 0.01 | 0.01 | 0.03 |
| 85 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 90 | 0.04 | 0.02 | 0.00 |

## 4.2反射率

以下の表２、表３にレーザー光のガラス板に対する入射角、そのときの反射光の強度及び反射率を示す。表２はレーザーの偏光方向が実験台に垂直のとき、表３が平行のときを示す。グラフを巻末に付ける。

　　　　　　　　表２　　　　　　　　　　　　表３

|  |  |
| --- | --- |
| 入射角θ | 強度　（Ｖ） |
| ０ | 測定不可能 |
| ５ | 測定不可能 |
| １０ | 測定不可能 |
| １５ | ０．１３ |
| ２０ | ０．１２ |
| ２５ | ０．１１ |
| ３０ | ０．１０ |
| ３５ | ０．０８ |
| ４０ | ０．０６ |
| ４５ | ０．０４ |
| ５０ | ０．０２ |
| ５５ | ０．０２ |
| ６０ | ０．０４ |
| ６５ | ０．０８ |
| ７０ | ０．１８ |
| ７５ | ０．４０ |
| ８０ | ０．８５ |
| ８５ | １．５７ |
| ９０ | 測定不可能 |
|  |  |

|  |  |
| --- | --- |
| 入射角θ | 強度　（Ｖ） |
| ０ | 測定不可能 |
| ５ | 測定不可能 |
| １０ | 測定不可能 |
| １５ | ０．１５ |
| ２０ | ０．１６ |
| ２５ | ０．１８ |
| ３０ | ０．２０ |
| ３５ | ０．２２ |
| ４０ | ０．２６ |
| ４５ | ０．３２ |
| ５０ | ０．３７ |
| ５５ | ０．４４ |
| ６０ | ０．６０ |
| ６５ | ０．７１ |
| ７０ | ０．９６ |
| ７５ | １．３２ |
| ８０ | １．８４ |
| ８５ | ２．４４ |
| 90 | 測定不可能 |

## 4.3レーザーの波長

(a)以下の表にレーザーの波長の観測結果を示す。

ｄ＝0.5mm=5×10-4m

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| m |  | (－)／m |
| ０ | ９．３ | － |
| １ | １１．６ | ２６．６８ |
| ２ | １３．４ | ２７．４７ |
| ３ | １５．０ | ２８．５０ |
| ４ | １６．２ | ２７．９５ |
| ５ | １７．４ | ２８．１９ |
| ６ | １８．６ | ２８．８３ |
| 平均値 | | ２７．９４ |

Ｌ＝1.06m

=9.3cm=9.3×10-3m

ここで

　にそれぞれの値を代入することにより

　λ[m] ＝ [nm] 　とレーザーの波長が求まった。

(b)ｄを０.５ｍｍから１ｍｍに変えた時、輝点の間隔が狭くなり、

(c)一番明るい輝点よりも内側に点が現れたことが観察できた。

**５．考察**

5.1偏光の性質とMalusの法則、実験１について

　光は進む方向と振動の方向が垂直な波、つまり横波である。それを示すのが偏光という性質である。

ふつう光源から出る光は無数の原子や分子が独立に放出する光の波連の混合であり、特別な処理をしない限りはこれら波連の振動方向は全くでたらめである。従ってそのような光では、進行方向に対して垂直なあらゆる方向の振動が平均して均等に含まれていることになる。このような光を偏りのない光という。これに対し、ある特定の方向の振動が他の方向のそれより多く含まれているような光を偏光であるという。光の振動方向が完全に１つの方向に定まっている光を、直線偏光または平面偏光といい、光の進行方向と振動方向を含む面を偏光面または振動面という。

　電気石の板やポーラロイド板は、特定方向に振動する直線偏光だけを通すので、これを用いて偏光を得ることができる（偏光子という）。ｘ方向に進むある光が、振動する***Ａ***の波であったとし、これを例えば*ｘｙ*面を偏光面とする光だけを通す偏光子に当てたとすると、偏光子を通り抜けた光は*Ａｙ*のような振動をする光になっている。*ｘ*、*ｙ*方向の単位ベクトルを***ｊ***、***ｋ***とすると、入射光の***Ａ***の*ｘｙ*平面における振動は、

***Ａ***＝（*Ａｙ０*sin*ｗｔ*）***ｊ***＋（*Ａｚ０*sin*ｗｔ*）***ｋ***　　　　………（２）

となっているが、偏光子は（２）の右辺の第２項を除いてしまい、第１項だけを通すのである。透過光の振幅は入射光のそれのｃｏｓθ倍になっているので、振幅の２乗に比例する光の強度はｃｏｓ２θ倍に減少する。

*Ｉ*＝*Ｉ０*cos２θ 　　　　　　　　　　　　………（３）

これをマルスの法則という。

　以上のことより、実験１について考える。

　実験１で計算した光の強度の相対値は、（３）式の*Ｉ*／*Ｉ０*に等しく、すなわちこの値はcos２θに等しくなるはずである。そこで、それぞれの角度について、実験値とcos２θの値を表にまとめ、グラフを書いてみると、多少のずれはあるもののグラフの形は一致しているといえる。

ずれの原因としては、初期位相つまり回転角０°のときの半導体レーザーの偏光そのものがはじめからずれていたということが考えられる。（実験ではちゃんと０°にあわせた。ということは実験装置そのものが狂っていた！）試しに、得られたグラフを５～10°ずらしてみるとcos２θに重なることが分かる。ということははじめから実験装置は５～10°ずれていたということになる。このことは実験結果が８０・８５°のときに強度が小さくなっていることからも分かる。その他の原因としては角の調節やデータを読むときの誤差などが考えられる。

## 5.2反射率

まず、実験書には反射率を求めることになっているが、入射角が９０°のとき入射光は反射しないので測定しなかった。そのため反射率を求めることは出来なかったが、偏光の実験より観測した電圧の大きさが光の強さと比例していることが分かるので、グラフは反射率ではなくて測定した電圧で作っても問題はない。

反射率の結果より、偏光が実験台に垂直な場合の方が平行な場合よりも反射率が高いことが分かる。

また、偏光が実験台に平行な場合では入射角が５５のとき、反射光がないことが分かる。

これについて詳しく考えてみる。

今、自然光がガラス面で反射されたとする。入射光の入射面（入射光、法線、反射光を含む面）に対して垂直に振動する光（ｓ波）と、入射面に対して平行に振動する光（p波）の成分の反射係数が異なるために、反射光は部分偏光になっている。部分偏光とは、あらゆる方向の振動を含むがその分布が一様でない光のことをいう。

そして、ある特定の角度 の時には、p波成分の光は反射せず、反射光はｓ波成分のみの完全偏光となる。この時の角度 をBrewster（ブルースター）角という。

実験では、自然光ではなく偏光を使用したので、偏光方向を実験台に平行にしたとき、垂直方向の成分がなかったために、ブルースター角になった時、反射光が観察されなっかたのである。

次に、このブルースター角を求めてみる。

まず、ｓ波、ｐ波　それぞれの振幅反射率　ｒ、ｒは次のように書ける。

　　　　（フレネルの式）

ブルースター角 ではｐ波の反射率が０、ｒ＝０であるから、が無限大にならなければいけない。よって 

この時の入射角 がブルースター角であるから として、

屈折の法則　　に代入する











入射光

反射光

屈折光



よってブルースター角は次のように与えられる。



これをBrewster（ブルースター）の法則という。

ここで、実験書によるとガラスの空気に対する屈折率は　およそ１.５であるのでブルースター角を求めると

 =  となる。

実験結果ではブルースター角は５５°となっているが、この誤差の原因としてあげられるのは、角度を５°おきというおおざっぱに取ったこと、しかも、偏光の時にもあげたように角度調整が正確でなかったこと、また、与えられた屈折率は石英ガラスの値であるが、使用したガラスが純粋な石英ガラスとは限らないので、それによっても誤差が生じたと考えられる。

5.3Ｈｅ－Ｎｅレーザーの性質と実験３

（ａ）Ｈｅ－Ｎｅレーザーは、気体レーザーの代表的なもので、ガラスの細管の中にＨｅ：Ｎｅ＝５：１の割合で封入し、蛍光灯と同じくらいの圧力にしたものである。これに電圧をかけて放電させると、連続発振が生じ波長６．３２８×１０－７ｍの赤いレーザー光線が放射される。出力は１ｍＷから１００ｍＷくらいである。Ｈｅ－Ｎｅレーザーの赤い光はネオン原子によるものである。

Ｈｅ－Ｎｅレーザーは波長が６．３２８×１０－７ｍ，１．１５３×１０－７ｍ，３．３９×１０－８ｍで発振が可能になり、希望の波長の光を出すためには共振器の反射鏡に反射波長の選択性を与え、共振器の長さを調整すればいい。この実験で使った波長は６．３２８×１０－７ｍである。

　さてここで、実験３（ａ）の結果は６．２１６×１０－７ｍになった。誤差率にして９８％の違いがある。実験結果としては十分で、誤差が出たとは思えないが、誤差が出る要因について考えてみる。計算式に出てくる変数項は、*ｍ*、*ｌ０*、*ｌｍ*，*ｄ*、*Ｌ*である。*ｍ*は、回折によって現れた輝点の番号である。外側になるにつれて輝点がぼんやりしていたので、数え間違える可能性もある。*ｌ０*はすべての計測値について差をとるので誤差があった場合の影響はかなり大きいが、測定方法は簡単なので誤差が出るとは考えにくい。*ｄ*は定規の間隔で、誤差の出る余地はない。残るは*Ｌ*であるが、これは定規から壁までの距離である。どこから測ればいいのかはっきりしないうえ、５０ｃｍ定規と１ｍ定規で１ｍ近い距離を測ったため、多少の測り間違いが出ておかしくはない。また、この値は最終的に２乗して扱うため影響度も大きい。仮にこの値が２ｃｍ大きかったとすると（すなわち*Ｌ*＝１．０８）、計算値は５．９９×１０－７ｍとなり、理論値から大きく離れる。今回はたまたまうまく実験結果があったが、Lの値がほんの少しずれるだけでこんなに結果が大きく変わるのだから、Lの値の取り方がたまたま良かっただけだと思う。

実験３（ｂ）について

定規の目盛りの間隔を０．５ｍｍから１ｍｍに変えると、輝点の間隔がちょうど倍になって狭くなった。

　これについて考察してみる。

　干渉の幅よりレーザーの波長はで与えられる。これにおいて、*ｄ*が２倍になると、*Ｌ*とλは不変なので、*ｌｍ*（*ｌｍ*－*ｌ０*）／*ｍ*が１／２にならなければいけない。

間隔が倍に密になると、同じ*ｍ*に対して*ｌｍ*は約半分になるので、これは実験結果と一致する。

実験３（ｃ）について

　一番明るい点より内側に輝点が現れるかを調べた結果、αが０°に近いときは現れなかったが、約３°の時に内側にひとつ輝点が現れ、４°、５°の時に２つ目、３つ目の輝点が内側に現れた。

　この現象が起こるのは、α＞βとなるときである。入射角が９０°に近いときは、α＞βとはならないから外側にのみ輝点ができる。入射角が９０°より小さくなると、α＞βとなる場合ができ、そのとき光路差が、*ｄ*（cosα－cosβ）と*ｄ*（cosβ－cosα）の２通りができ、内側にも輝点ができる。以下αがβより大きくなるにつれて、２つ目、３つ目の輝点ができるのである。

**６．参考文献**

「物理学」：小出昭一郎著　裳華堂

「レーザー光線」：山中千代衛著　東海大学出版社

「屈折率」：　山口重雄　共立出版

「ブリタニカ国際百科事典」：F.B.ギブニー編　1974　TBSブリタニカ

｢物理学｣：兼松和男　　　　朝倉書房

「実験書」：

「…その他…」