

实验 32 偏振光的研究

1808 年, 马吕斯 (E. L. Malus, 1775~1812) 发现了光的偏振现象, 通过对偏振现象的深入研究, 人们充分地认识了光的本质--光波是横波. 为了更好地认识和利用光的偏振性, 各种偏振光元件、偏振光仪器应运而生. 偏振光的应用技术也日益发展, 在各个领域都得到广泛应用.

【实验内容】

1. 观察光的偏振现象, 掌握利用偏振器来调节光强度的方法.
2. 了解产生和检验偏振光的原理与方法, 鉴别光的不同偏振状态.
3. 设计实验来测量玻璃堆的玻璃折射率, 利用反射起偏测出布儒斯特角.
4. 了解和观察偏振光的干涉现象

【可供选择的仪器】

计算机与操作控制软件, 格兰傅科棱镜, $\lambda/2$ 波片, $\lambda/4$ 波片, 玻璃堆, 由步进电机控制的调节架, 光电接收系统, H_e-N_e 激光器.

【实验原理】

光的干涉和衍射现象揭示了光的波动性, 光的偏振特性进一步证明了光是横波. 光的偏振现象在工业和生活中的应用广泛, 因此同学们需要理解光的偏振性质, 掌握偏振光检测方法.

1. 光的偏振态

从垂直于光传播方向的平面上观察, 光矢量变化遵从不同的规律, 根据这些规律, 可以把光分成偏振光、自然光和部分偏振光三种.

在垂直于光传播方向的平面上, 光矢量的端点随时间变化如果是有规律的, 则称其为完全偏振光. 完全偏振光包含线偏振光、椭圆偏振光和圆偏振光. 光矢量端点的轨迹是一直线的, 称为线偏振光; 光矢量端点的轨迹是椭圆的称为椭圆偏振光; 光矢量端点的轨迹是圆的称为圆偏振光. 根据振动的合成原理, 线偏振光、椭圆偏振光和圆偏振光均可以等效为振动方向相互垂直、相互关联的两个线偏振光, 并且这两个线偏振光需要具有相同的传播方向和频率, 两者有确定的相位差.

普通光源直接发出的光是自然光. 由于原子(或分子)发光具有随机性和间断性, 不同原子(或分子)在同一时刻和同一原子(或分子)在不同时刻的发光都是不相干的. 普通光源包含大量原子(或分子), 这些原子(或分子)发出光的偏振方向、初相位都是随机的, 因此发出的光波是不相干的. 值得注意的是对于自然光, 由于自然光沿着不同方向振动的各光矢量的振幅和相位都是随机的, 所以自然光可以等效成振幅相等, 振动方向相互垂直, 互不相关的两个线偏振光.

部分偏振光可以看作是自然光和偏振光的叠加.

2. 双折射晶体

一束光入射到晶体界面时会发生折射. 在某些晶体中, 折射光会分成两束, 这就是晶体

的双折射现象。这两束折射光中，一束光遵守折射定律称为寻常光，简称 o 光。另一束光则不遵守折射定律称为非常光，简称 e 光。o 光的传播速率各向同性，e 光的传播速率与传播方向有关，o 光和 e 光都是线偏振光。

在双折射晶体内部，存在某个特殊的方向，当光沿着该方向传播的时候，不发生双折射，这个方向被称为该晶体的光轴。沿着光轴方向，o 光和 e 光传播速度相同；垂直于光轴方向，o 光和 e 光传播速度差异最大。按照光轴的数目不同，可以把双折射晶体分为单轴晶体和双轴晶体。单轴晶体如方解石、冰洲石、石英；双轴晶体如云母、黄玉。本实验中采用的是单轴晶体。

必须注意，只有在晶体内部才有 o 光、e 光之分，光线射出晶体之后都称为线偏振光。

3. 偏振器

获得偏振光的途径很多。当光在介质的界面上发生反射时，可以获得部分偏振光；满足特定条件时，可以获得线偏振光。如地球大气中的微粒、水分子等对阳光的散射，会形成线偏振光和部分偏振光。

在实际工作中，常采用专门的偏振器来获得线偏振光。偏振片是一种可以使入射光通过后变成线偏振光的光学薄膜，它能够吸收某一振动方向的光而透过与此垂直方向振动的光。偏振片允许光矢量透过的方向，称为偏振化方向或者透光方向。按实际应用时所起作用的不同，可以把偏振片分为起偏器和检偏器。用来产生偏振光的叫做起偏器，用来检验偏振光的则叫做检偏器。图 32-1 给出了线偏振光的产生与检测原理示意图。

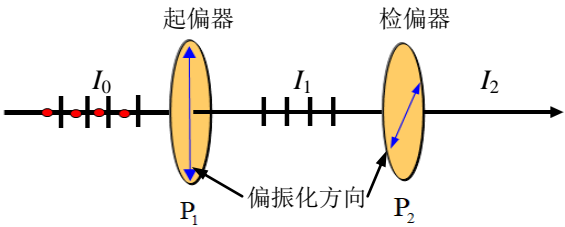
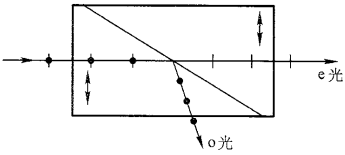


图 32-1 线偏振光的产生与检测

双折射晶体可以把一束光分解成 o 光和 e 光，o 光和 e 光都是线偏振光。利用这一特性，也可以利用双折射晶体制作偏振器。格兰棱镜，全称为格兰·泰勒棱镜，就是由两块冰洲石单轴晶体的直角棱镜组成偏振器。两块冰洲石的中间斜面为空气隙。光轴与入射端界面平行。自然光垂直入射的时候，在第一个直角棱镜内，o 光和 e 光传播方向相同但速度不同，在两个直角棱镜斜面处，e 光传播方向不变，o 光将发生全反射。若将棱镜侧面出射的 o 光吸收掉，则仅留下沿原入射方向传播的 e 光，则此格兰棱镜可以作为起偏器，当然也可以用作检偏器。图 32-2 给出了格兰棱镜的光路图。



32-2 格兰棱镜

4. 波片

波片，也称作相位延迟片，是由双折射晶体做成，是从单轴晶体中切割下来的平面平行板，其表面平行于光轴。如图 32-3 所示。当一束单色平行自然光正入射（垂直于晶体光轴）到波片上时，光在晶体内部便分解为 o 光和 e 光。由于入射光垂直于光轴入射，o 光和 e 光传播方向相同，但是传播速度不同，它们通过厚度确定的波片时的光程也就不同。

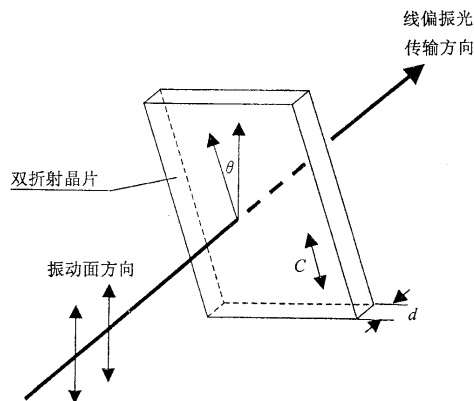


图 32-3 线偏振光在晶体中的传输

设波晶片的厚度为 d ，则两束光通过晶片后，有相位差

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n_o - n_e)d \quad (32-1)$$

式中 λ 为光波在真空中的波长。

单色线偏振光垂直入射到波片内，分解为 o 光和 e 光，o 光和 e 光在入射界面相位差为 0，经过厚度确定的波片后两者产生一附加相位差 δ 。离开波片时两者又合二为一，合成光的性质取决于 δ 及入射光的性质。

(1) 当 $\delta = 2k\pi$ 时，则光程差 $(n_o - n_e)d = k\lambda$ ，即这样的晶片厚度可使 o 光和 e 光的光程差等于 $k\lambda$ ，称为全波片 (λ 波片)。其 o 光和 e 光的合振动为线偏振光，其光矢量的方向与入射光光矢量的方向相同。

(2) 当 $\delta = (2k+1)\pi$ 时，则光程差 $(n_o - n_e)d = (2k+1)\lambda/2$ ，此时晶片的厚度可使 o 光和 e 光的光程差等于 $(2k+1)\lambda/2$ ，称为半波片 ($\lambda/2$ 波片)。其合振动仍为线偏振光，但光矢量的方向相对于入射光的光矢量方向转过 2θ 角 (θ 是入射光振动面与波片光轴间的夹角，如图 32-3 所示)。

(3) 当 $\delta = (2k+1)\pi/2$ 时，则光程差 $(n_o - n_e)d = (2k+1)\lambda/4$ ，晶片的厚度可使 o 光和 e 光的光程差等于 $(2k+1)\lambda/4$ ，称为四分之一波片 ($\lambda/4$ 波片)。其合振动一般为椭圆偏振光。应当注意两种特殊情况：当入射光矢量与波片光轴平行或垂直时，出射光为线偏振光；当入射光矢量与波片光轴夹角为 $\pi/4$ 时，出射光为圆偏振光。

从以上可知 $\lambda/4$ 波片可将线偏振光变成椭圆偏振光或圆偏振光；根据光路的可逆性，它也可将椭圆偏振光或圆偏振光变成线偏振光。

需要强调的是，不论是全波片，半波片 ($\lambda/2$ 片)，还是 $\lambda/4$ 片，都是针对特定波长的光而言的。

5. 布儒斯特定律

光线斜射向非金属的光滑表面上（例如水、木头、玻璃等）时，反射光和折射光的偏振状态都会发生改变，反射光和折射光偏振的程度取决于光的入射角以及反射物的性质。当入射角是某一特定值时，反射光为线偏振光，相应的入射角 i_b 称为布儒斯特角，也称起偏角。起偏角和界面上两种介质的折射率有关：

$$\tan i_b = \frac{n_2}{n_1} \quad (32-2)$$

式中 n_1 和 n_2 分别为入射光和折射光所在介质的折射率. 此关系称为布儒斯特定律. 此时, 不管入射光的偏振状态如何, 反射光的光矢量垂直于入射面, 如图 32-4, 若光是由空气入射到折射率为 n (≈ 1.5) 的玻璃平面上, 则 $i_b = \arctan \frac{n_2}{n_1} = 57^\circ$.

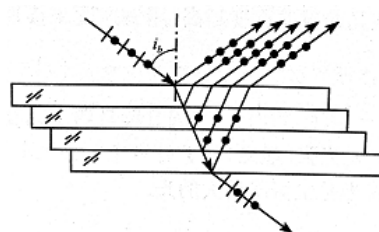


图 32-4 玻璃堆

如果自然光是以 i_b 角入射到玻璃片堆上, 则经过多次反射, 最后从玻璃片堆透射出来的光一般是部分偏振光. 如果玻璃片数目较大, 则透射光近似为线偏振光.

6. 偏振光的检测

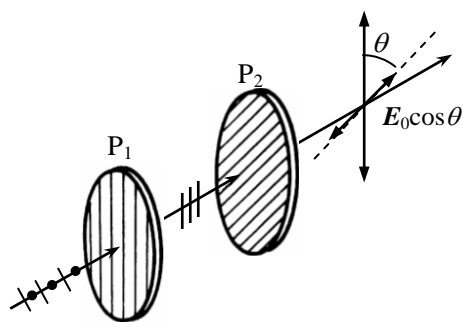


图 32-5 马吕斯定律

探测器只能探测光强的变化, 无法区分偏振光的偏振状态. 只有通过偏振片和波片改变光的偏振, 再通过探测器, 才能区分光的偏振状态. 马吕斯定律在偏振光的探测方面发挥了极为重要的作用.

一束光强为 I_0 的线偏振光, 透过检偏器后其透射光强为

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (32-3)$$

式中, θ 是线偏振光的振动方向 (光矢量) 与检偏器的偏振化方向之间的夹角. 如图 32-5 所示, 这就是马吕斯定律.

这里要特别强调指出, 马吕斯定律只是对入射到偏振片上的光是线偏振光而言, 对于自然光入射到偏振片上, 无论怎样转动偏振片, 出射光强始终不变, 均为入射自然光光强的一半, 即:

$$I = I_0/2 \quad (32-4)$$

当我们用检偏器检验部分偏振光时, 透射光的强度随其偏振化方向而变. 设透射光强的极大值和极小值分别是 I_{\max} 和 I_{\min} , 则两者相差越大就说明该部分偏振光的偏振程度越高. 用偏振度来描述部分偏振光的偏振程度:

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (32-5)$$

实际上, 上式中的分母是两个相互垂直分量的光强之和, 这就是部分偏振光的总光强. 显然, 对于自然光 $I_{\max} = I_{\min}$, $P = 0$; 对于线偏振光 $I_{\min} = 0$, $P = 1$, 即完全偏振光是偏振度最大的光.

当以光的传播方向为轴旋转检偏器时，透射光强将交替出现极大和消光。如果部分偏振光或椭圆偏振光通过检偏器，当旋转检偏器时，虽然透射光强每隔 90° 从极大变为极小，再由极小变为极大，但无消光位置。而圆偏振光或自然光通过检偏器，当旋转检偏器时，透射光光强则无变化。

【实验提示】

1. 光路调节

如图 32-6 所示，调节激光器或者信号接收器，保证激光束射入信号接收器正中的小孔。

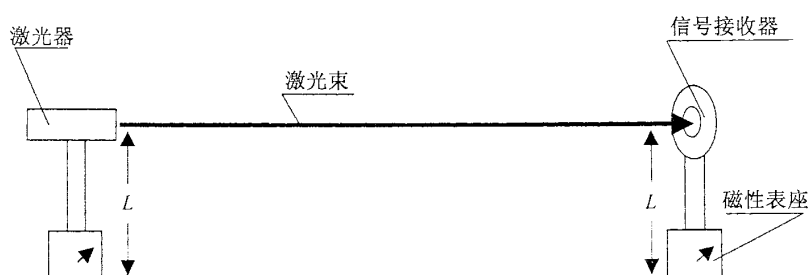


图 32-6 确定系统的基准线

把 P_2 （检偏器或起偏器 P_1 ）摆入系统，首先通过平移和升降调节，使激光束全部通过 P_2 正中的透光部分而达到信号接收器；再左右转动 P_2 （松开磁性表座的锁紧螺钉），使产生的反射光投射回到激光器垂直面上；继而调节 P_2 支架上的水平和俯仰调节螺钉，使反射光斑基本与出射光斑重合，如图 32-7 所示，这表示 P_2 的光学面(主截面)同系统的基准线(即激光束)垂直。

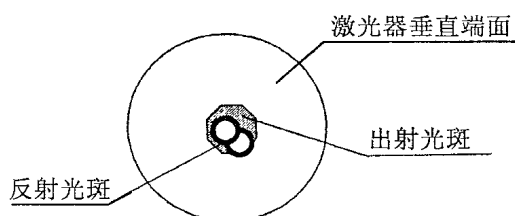


图 32-7 系统准直标准示意

2. 实验内容

(1) 线偏振光的获得与检验，马吕斯定律

- ① 在光源后加入起偏器 P_1 和检偏器 P_2 ，旋转起偏器 P_2 一周，观察光强的变化曲线。
- ② 旋转检偏器 P_2 使出射光强为最大，以该角度为基准（0 度），继续旋转检偏器 180° ，期间每隔 10° ，记录出射光强。最后画出光强随角度变化的曲线（它满足马吕斯定律吗？有何特点？）。
- ③ 读取 I ， $I/2$ ， $I/3$ 对应的夹角。与通过马吕斯定律求出的 I ， $I/2$ ， $I/3$ 对应的夹角比较。

(2) $\lambda/2$ 波片对线偏振光的调整和测量

- ① 旋转检偏器使 P_1 、 P_2 正交.
- ② 在 P_1 、 P_2 之间放入 $\lambda/2$ 波片, 破坏其消光. 转动检偏器 P_2 至消光位置, 并记录检偏器转动的角度, 求出起偏器偏振化方向与 $\lambda/2$ 波片光轴的夹角.

(3) 椭圆和圆偏振光的产生与鉴别

利用 $\lambda/4$ 波片, 改变入射线偏振光的偏振状态, 产生线偏振光、椭圆偏振光和圆偏振光.

- ① 旋转检偏器使 P_1 、 P_2 正交.
- ② 在 P_1 、 P_2 之间放入 $\lambda/4$ 波片, 转动 $\lambda/4$ 波片使消光.
- ③ 以上述得到的 $\lambda/4$ 波片角度为基准, 将 $\lambda/4$ 波片依次转过 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 90° ; 同时, 对于每一个 $\lambda/4$ 波片的角度下, 都将检偏器 P_2 旋转 360° , 观察分析相应的 6 条光强曲线的特征和变化规律, 从而判断 6 个角度产生的偏振光的特性(特别注意曲线的极大值、极小值和有无消光的零点). 最后, 比较记录的 6 条曲线的强度变化特征和消光特征, 画出曲线. 自拟数据表格分析光的偏振状态, 讨论 $\lambda/4$ 波片对光的偏振的影响.

(4) 布儒斯特角的验证

在光源后加入玻璃片堆, 当入射角度 30° 时, 观察反射光的偏振情况. 反射光从检偏器入射, 转动检偏器一周, 观察光强的变化情况, 并记录光强的最大值与最小值, 求出偏振度. 依次改变入射角度为 35° , 40° , 45° , 50° , 55° , 60° , 65° , 每次将检偏器转动一周, 观察反射光的偏振情况, 记录光强的最大值与最小值, 求出偏振度. 以角度为横轴, 偏振度为纵轴作曲线, 从曲线上求布儒斯特起偏角.

3. 实验扩展

利用全波片、 $\lambda/2$ 波片、 $\lambda/4$ 波片及偏振片观察偏振光的干涉现象

- ① 旋转检偏器使 P_1 、 P_2 正交. 分别在在 P_1 、 P_2 之间放入全波片、 $\lambda/2$ 波片和 $\lambda/4$ 波片, 分别转动全波片、 $\lambda/2$ 波片和 $\lambda/4$ 波片一周, 观察光电接收器接收的光强变化.(特别注意有无极大极小值, 如果有, 有几个极大极小值)
- ② 旋转检偏器使 P_1 、 P_2 平行(在光源后加入起偏器 P_1 和检偏器 P_2 , 旋转检偏器 P_2 使出射光强为最大). 分别在在 P_1 、 P_2 之间放入全波片、 $\lambda/2$ 波片和 $\lambda/4$ 波片, 分别转动全波片、 $\lambda/2$ 波片和 $\lambda/4$ 波片一周, 观察光电接收器接收的光强变化.(特别注意有无极大极小值, 如果有, 有几个极大极小值)
- ③ 旋转检偏器使 P_1 、 P_2 既不正交也不平行. 分别在在 P_1 、 P_2 之间放入全波片、 $\lambda/2$ 波片和 $\lambda/4$ 波片, 分别转动全波片、 $\lambda/2$ 波片和 $\lambda/4$ 波片一周, 观察光电接收器接收的光强变化.

【分析讨论题】

1. 在本实验中我们通过计算机来控制电机转动, 系统一共提供了两种控制方式. 这两种方式各有什么特点? 如何正确选用?
2. 在正交的两个偏振片中插入 $\lambda/4$ 波片, 将 $\lambda/4$ 波片旋转一周后, 共出现几个光强极大值?
3. 如何鉴别圆偏振光和自然光? 如何鉴别椭圆偏振光和部分偏振光?

【参考文献】

- 1 吕斯骅, 段家祗. 新编基础物理实验. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- 2 黄建群, 胡险峰, 雍志华等. 大学物理实验. 四川: 四川大学出版社, 2005.
- 3 詹卫仲. 物理实验教程. 大连: 大连理工大学出版社, 2004.
- 4 余虹. 大学物理学(第二版). 背景: 科学出版社, 2008. .

秦颖 王乔 刘渊