

## 第 45 讲 (2) 自然光和偏振光 起偏和检偏 马吕斯定律

教学要求:

理解起偏器的起偏和检偏的作用; 掌握自然光、线偏振光和部分偏振光; 起偏器、透振方向、马吕斯定律。

重点与难点:

重点: 线偏振光和部分偏振光; 透振方向、马吕斯定律。

难点: 线偏振光和部分偏振光。

### 16.1 自然光和偏振光

#### 16.1.1 横波的偏振性

我们知道, 波可以分为横波和纵波。横波的传播方向和质点的振动方向垂直, 通过波的传播方向且包含振动矢量的那个平面称为振动面。显然, 振动面与包含传播方向在内的其它平面不同, 这称为波的振动方向相对传播方向没有对称性, 这种不对称叫做偏振。光的偏振也即是光振动在某一方向的振幅显著较大, 或只在某一方向有光振动。实验表明, 只有横波才有偏振现象。我们来看一个机械波的例子。如图 16-1 (a) 所示, 波的振动方向与缝隙

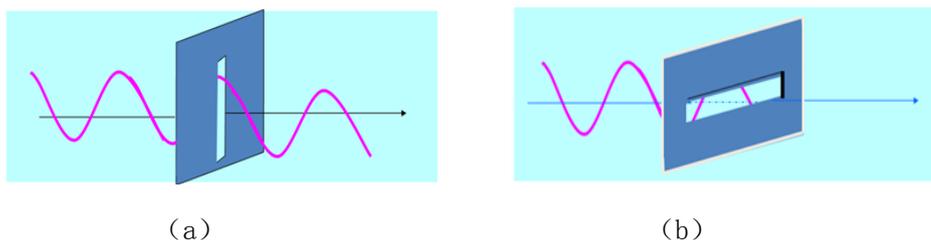


图 16-1 横波的偏振性

方向相同, 于是就有横波通过缝隙沿绳传播; 而 16-1 (b) 图, 波的振动方向与缝隙方向垂直, 于是横波被挡住不能通过缝隙。纵波的振动方向与传播方向相同, 不论缝隙的取向如何, 对波的传播没有任何影响。

光波是特定频率范围内的电磁波, 光矢量  $\vec{E}$  在垂直于光传播方向的平面内振动, 光波是横波。偏振是横波区别于纵波的一个最明显的特点, 光的偏振现象是光是横波的直接证明。当光的传播方向确定以后, 光振动在与光传播方向垂直的平面内的振动方向仍然是不确定的, 光矢量可能有各种不同的振动状态, 这种振动状态通常称为光的偏振态。按照光振动状态的不同, 可以把光分为五类: 圆偏振光、椭圆偏振光、部分偏振光、线偏振光和自然光。

下面仅对后三种光分别予以说明。

### 16.1.2 自然光

普通光源发光是由光源中的原子或分子的运动状态发生变化时辐射出来的,由于分子或原子发光的随机性,普通光源发出的光是大量的不同振动方向的光波列的集合,在与光传播方向垂直的平面内考察,光矢量沿各方向的平均值相等,没有哪一个方向的光振动较其它方向占优势。在垂直于光传播方向的平面内,沿各个方向振动的光矢量都有,平均说来,光振动对光的传播方向是轴对称而又均匀分布的。也就是说,光振动的振幅在垂直于光波传播的

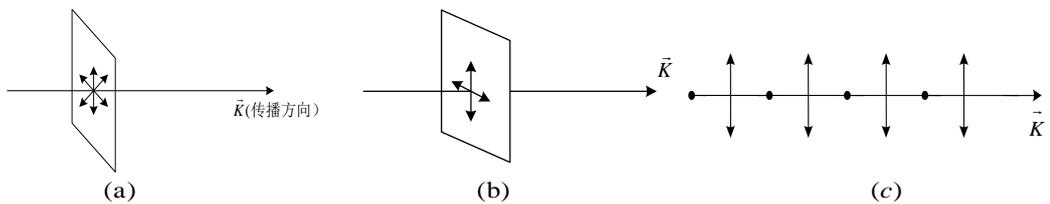


图 16-2 自然光

方向上,既有时间分布的均匀性,又有空间分布的均匀性,具有这种特性的光叫做**自然光**,如图 16-2 (a)所示。为研究问题方便起见,由自然光的性质,在任意时刻,可以在垂直于光传播方向的平面内,把各个光矢量向任意的两个互相垂直的方向进行分解,然后再将所有光矢量的两个分量分别叠加起来,从而得到总光波光矢量的两个分量。这两个分量是互相独立、等振幅、相互垂直的光振动,如图 16-2 (b)所示。但应注意,由于自然光中各个光振动是相互独立的,所以这合成起来的互相垂直的两个光矢量分量之间并没有恒定的相位差,不可能产生干涉效应。显然,每一独立光振动的光强都等于自然光光强的一半。

为了简明表示光的传播,由自然光的分解方法,常用和传播方向垂直的短线表示纸面内的光振动,而用点子表示和纸面垂直的光振动。对自然光,短线和点子均等分布,以表示两者对应的振动相等和能量相等,如图 16-2 (c)所示。

### 16.1.3 线偏振光

在光学实验中,如果采用某种方法,把自然光中两个互相垂直的独立光振动分量中的一个完全消除或移走,只剩下另一个方向的光振动,那么就获得了**线偏振光**(或**完全偏振光**)。因为线偏振光的光矢量与传播方向构成的平面(**振动面**)在空间的方位是不变的,于是线偏振光又称为**平面偏振光**。图 16-3 (a)给出了线偏振光的表示法,图中短线表示线偏振光的光振动在纸面内,点子表示线偏振光的光振动垂直于纸面。

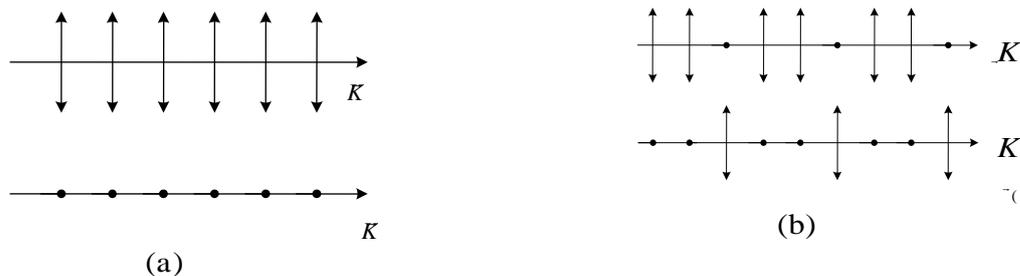


图 16-3 线偏振光和部分偏振光

因为不可能把一个原子所发射的光波分离出来，所以我们在实验中获得的线偏振光，是包含众多原子的光波中振动方向都已相互平行的成分。

#### 16.1.4 部分偏振光

除了上述讨论自然光和线偏振光之外，还有一种介于两者之间的偏振光，这种光在垂直于光的传播方向的平面内，各方向的振动都有，但它们的振幅大小不相等，称为部分偏振光。如只是部分地移走自然光中的一外分量，使得两个独立分量不相等，就获得了部分线偏振光。常将其表示成某一确定方向的光振动较强，与之垂直方向的光振动较弱，这两个方向光振动的强弱对比度愈高，表明其愈接近完全偏振光。部分偏振光可以用数目不等的点和短线表示，如图 16-3 (b) 所示，上图表示纸面内的光振动较强，下图表示垂直纸面的光振动较强。

#### 16.1.5 线偏振光的获得

通常由自然光获得线偏振光, 其方法主要有三种:

1. 由二向色性物质的选择吸收产生线偏振光;
2. 由反射和折射产生线偏振光;
3. 由晶体的双折射产生线偏振光。

从自然光获得线偏振光的装置(或元件)称为**起偏(振)器**, 用于检查线偏振光的装置(或元件)称为**检偏(振)器**。实际上起偏器和检偏器是可以互换的, 它们仅仅是在光路中的作用不同而已。我们将在后续的内容中进行具体讨论。

### 16.2 起偏和检偏 马吕斯定律

普通光源发出的光都是自然光。从自然光中获得偏振光的装置叫做起偏器。利用偏振片从自然光中获得偏振光是最简便的方法。除此之外, 利用光的反射和折射或晶体的双折射也可以获取偏振光。下面我们介绍几种产生和检验偏振光的方法。

### 16.2.1 偏振片的起偏和检偏

偏振片是一种常用的起偏器。偏振片大多是利用二向色性的物质（即能强烈地吸收某一方向的光振动，而与这个方向垂直的光振动则吸收很少的物质）的透明薄体做成或在透明的基片上蒸镀一层二向色性的物质晶粒制成。因此偏振片基本上只让某一特定方向的光振动通过，这个方向称为偏振片的**偏振化方向**，

也称透光轴，用符号“ $\downarrow$ ”表示，如图 16-4

所示，自然光从偏振片  $P_1$  射出后，变成了

光振动方向平行于该透光轴方向的线偏

振光，这一过程称为起偏，在这里偏振片

$P_1$  就属于**起偏振器**。且光强从  $I_0$  变为  $I_0/2$ 。

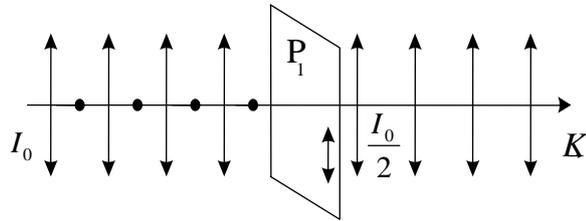


图 16-4 偏振片作为起偏振器

偏振片也可用来检验某一光束是否为线偏振光，称为检偏。用作检验光的偏振状态的偏振片称为检偏器。在图 16-5 中的  $P_2$  作用就是检偏， $P_2$  就是检偏器。当  $P_2$  与  $P_1$  的偏振化方向相互平行时，由  $P_1$  产生的线偏振光能够全部通过  $P_2$ ，而在其后光强最大；如果两者的偏振化方向相互垂直，则光强最弱，称为消光。将  $P_2$  绕光的传播方向慢慢转动，可以看到透过  $P_2$  的光强将随转动而变化，例如由亮逐渐变暗，再由暗逐渐变亮，旋转一周将出现两次最亮和最暗。如果入射到  $P_2$  上的是自然光，上述过程就不会出现；如果入射到  $P_2$  的是部分偏振光，只能观察到两次光强最强和两次光强最弱，但不会出现光强为零的状况。线偏振光透过  $P_2$  后，光强的变化是遵从马吕斯定律。

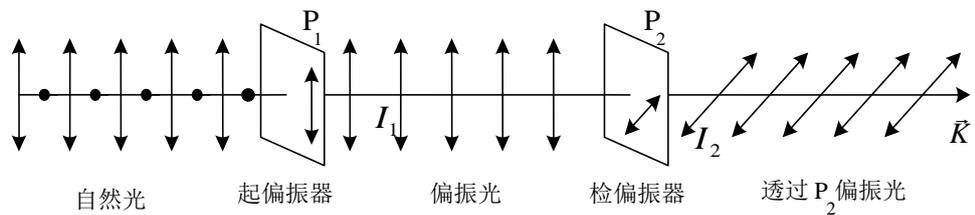


图 16-5 偏振片  $P_2$  作为检偏器

### 16.2.2 马吕斯定律

1809 年马吕斯在研究线偏振光通过检偏器后的透射光光强时发现：如果强度为  $I_1$  的线偏振光入射，通过检偏器后，出射光的强度  $I_2$  为

$$I_2 = I_1 \cos^2 \alpha \quad (16-1)$$

式中  $\alpha$  为检偏器的偏振化方向与入射线偏振光光矢量之间的夹角，上式称为马吕斯定律。现证明如下：

如图 16-6 所示，设  $E_1$  是入射线偏振光的光矢量的振幅， $o\vec{E}_1$  是入射线偏振光矢量的振动方向，

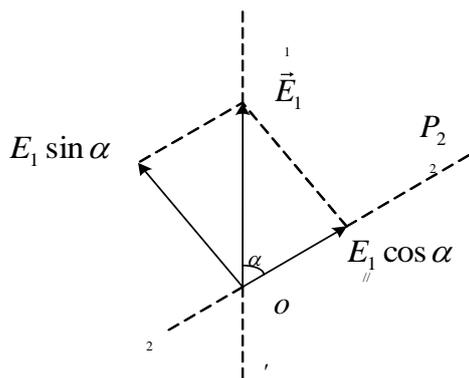


图 16-6 推导马吕斯定律用图

$P_2$  是检偏器偏振化方向，入射光矢量的振动方向

与  $P_2$  间的夹角为  $\alpha$ ，将光振动分解为平行于  $P_2$  和垂直于  $P_2$  的两个分振动，它们的振幅分别

为  $E_1 \cos \alpha$  和  $E_1 \sin \alpha$ ，因为只有平行分量能够通过  $P_2$ ，由于光强和振幅的平方成正比，所以

透过检偏器  $P_2$  的透射光强  $I_2$  和入射线偏振光的光强  $I_1$  之比为

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{(E_1 \cos \alpha)^2}{E_1^2}$$

即 
$$I_2 = I_1 \cos^2 \alpha$$

从马吕斯定律可知，线偏振光通偏振片后，光强随入射线偏振光的振动方向和偏振片的透光轴方向之间的夹角  $\alpha$  的改变而改变。当  $\alpha = 0$  或  $\pi$  时， $I_2 = I_{2\max} = I_1$ ，光强最大；当

$\alpha = \frac{\pi}{2}$  或  $\frac{3\pi}{2}$  时， $I_2 = 0$ ，光强最弱；当  $\alpha$  取其它值时，光强  $I_2$  介于 0 和  $I_1$  之间。

偏振片的应用很广，如汽车夜间行车时为了避免对方汽车灯光晃眼以保证安全行车，所以在所有汽车的车窗玻璃和车灯前装上与水平方向成  $45^\circ$  角而且向同一方向倾斜的偏振片。这样相向行驶的汽车都不必熄灯，各自前方的道路仍然照亮，同时也还不会被对方车灯晃眼了。

**例 16-1** 如图 16-8 所示，三偏振片平行放置， $P_1$ 、 $P_3$  偏振化方向互相垂直，自然光垂直入射到偏振片

$P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  上。问 (1) 当透过  $P_3$  的光强为入射自然光光强  $\frac{1}{8}$  时， $P_2$  与  $P_1$  偏振化方向夹角为多少？

(2) 透过  $P_3$  的光强为零时， $P_2$  如何放置？(3) 能否找到  $P_2$  的合适方位，使最后透过光强为入射自然光强的  $\frac{1}{2}$ ？

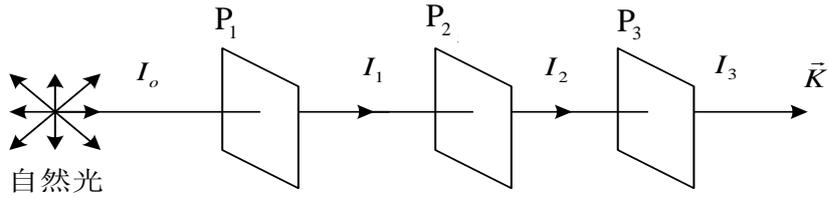


图 16-8 例 16-1 图

解 (1) 设  $P_1$ 、 $P_2$  偏振化夹角为  $\theta$ ，自然光强为  $I_0$ ，经  $P_1$  光强为  $I = \frac{I_0}{2}$ ，经  $P_2$  光强  $I_2$  为

$$I_2 = I_1 \cos^2 \theta = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \theta$$

经  $P_3$  光强  $I_3$  为： $I_3 = I_2 \cos^2(\frac{\pi}{2} - \theta) = I_2 \sin^2 \theta = \left[ \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \theta \right] \sin^2 \theta = \frac{1}{8} I_0 \sin^2 2\theta$

当  $I_3 = \frac{1}{8} I_0$  时， $\sin^2 2\theta = 1$   $\theta = 45^\circ$

(2)  $I_3 = 0$  时， $\sin^2 2\theta = 0$   $\theta = 0^\circ, 90^\circ$ ，即  $P_2$  与  $P_1$  偏振化方向平行或垂直。

(3)  $I_3 = \frac{1}{8} I_0 \sin^2 2\theta$ ， $I_3 = \frac{1}{2} I_0$ ， $\sin^2 2\theta = 4$  (无意义)，即

找不到  $P_2$  的合适方位，使  $I_3 = \frac{1}{2} I_0$ 。

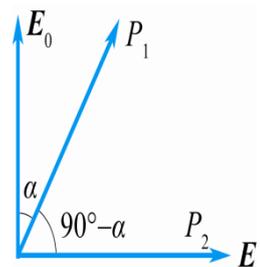
实际上， $I_3 = \frac{1}{8} I_0 \sin^2 2\theta$ ， $(\sin^2 2\theta)_{\max} = 1$ ， $(I_3)_{\max} = \frac{1}{8} I_0$

**例 16-2** 一光束由线偏振光和自然光混合而成，当它通过偏振片时，发现透射光的光强依赖偏振片透光轴方向的取向可变化 5 倍。求：入射光束中两种成分的光的相对强度。

解 设光束的总光强为  $I$ ，其中线偏振光光强为  $I_1$ ，自然光光强为  $I_0$ ，则  $I = I_1 + I_0$ 。

通过偏振片后，自然光光强变为  $I_0/2$ ，且与偏振片的透光轴取向无关。线偏振光的最大光强出现在偏振片的透光轴取向平行于线偏振光的振动方向时，大小为  $I_1$ ，线偏振光的最小光强出现在偏振片的透光轴取向垂直于线偏振光的振动方向时，大小为零，故透过偏振片的混合光强最大为  $I_0/2 + I_1$ ，最小光强为  $I_0/2$ ，所以有  $(I_0/2 + I_1) / I_0/2 = 5$ ，由此得到  $I_1 : I_0 = 2 : 1$ ，即线偏振光  $I_1 = 2I/3$ ，自然光  $I_0 = I/3$ 。

**例 16-3** 要使一束线偏振光通过偏振片后振动方向转过  $90^\circ$ ，至少需要让这束光通过几块理想偏振片？在此情况下，透射光强最大是原来光强的多少倍？



解 至少需要两块理想偏振片(如图 16-9 所示). 其中  $P_1$  透光轴与线偏振光振动方向的夹角为  $\alpha$ , 第二块偏振片透光轴与  $P_1$  透光轴夹角为  $(90^\circ - \alpha)$ . 设入射线偏振光原来的光强为  $I_0$ , 则透射光强

$$I = I_0 \cos^2 \alpha \cos^2(90^\circ - \alpha) = I_0 \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha = \frac{I_0}{4} \sin^2 2\alpha$$

当  $2\alpha = 90^\circ$ , 即  $\alpha = 45^\circ$  时,

$$I = I_{\max} = \frac{I_0}{4}$$

作业: 4、7