

光的偏振及其应用

龙槐生 张仲先 谈恒英 编著

本书为适应光的偏振技术在信息传输、工程精密测量与控制方面飞速发展的需要,比较全面地阐述了光的偏振特性;偏振光的产生和观察;偏振态的改变;偏振光在光测弹性力学、电光、磁光、液晶、光通信、光传感、激光精密测量等方面的应用以及数学处理方法。本书还提供了较多的偏振元器件设计、制造、检验以及应用的具体数据、方法和实例。

本书适用于大专院校有关专业师生、从事光学仪器设计和制造的工程技术人员、从事光通信、光传感及有关科技工作者参考。

光的偏振及其应用

龙槐生 张仲先 谈恒英 编著

*

责任编辑:邱锦来 责任校对:宁秀娥

封面设计:田淑文 版式设计:罗文莉

责任印制:卢子祥

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/32 · 印张 9 · 字数 198 千字

1989年7月重庆第一版·1989年7月重庆第一次印刷

印数 0.001—1.755 · 定价:7.60元

*

ISBN 7-111-00650-X/O·15

目 录

第一章 自然光和偏振光	1
§ 1-1 光的电磁理论和光的偏振性	1
§ 1-2 偏振光	3
§ 1-3 自然光	6
§ 1-4 部分偏振光及偏振度	8
§ 1-5 偏振光的强度	10
第二章 产生偏振光的方法	14
§ 2-1 反射及折射产生的偏振	14
§ 2-2 双折射产生的偏振	39
§ 2-3 利用二色性物质产生偏振光	68
§ 2-4 利用散射产生偏振光	72
§ 2-5 利用金属丝光栅或金属层光栅产生偏振光	77
§ 2-6 真空镀复的金属薄膜产生偏振光	79
第三章 应用波片改变光的偏振态	81
§ 3-1 波片	81
§ 3-2 全波片与半波片的作用	85
§ 3-3 $\frac{1}{4}$ 波片与圆偏振光	88
§ 3-4 波片补偿器	92
§ 3-5 消色差 $\frac{1}{4}$ 波片	93
§ 3-6 如何正确使用波片	96
§ 3-7 自然光、部分偏振光以及各态偏振光的分析与鉴别	98
§ 3-8 波片的制备与检验	102
§ 3-9 应用实例	106
第四章 偏振光的干涉	122

§ 4-1	偏振光干涉的条件.....	122
§ 4-2	平行单色光通过两正交(或平行)偏振棱镜间晶体 时的干涉.....	125
§ 4-3	平行白光通过置于两正交偏振棱镜间的晶体时的干 涉.....	129
§ 4-4	会聚单色光通过两正交偏振棱镜间晶体时的干涉.....	133
§ 4-5	应用举例.....	144
§ 4-6	偏振干涉法.....	156
第五章	人为双折射现象.....	167
§ 5-1	应力或应变引起的双折射.....	167
§ 5-2	电光效应.....	176
§ 5-3	磁光效应.....	182
§ 5-4	人为双折射现象的应用.....	184
第六章	旋光.....	199
§ 6-1	旋光现象.....	199
§ 6-2	旋光现象的解释.....	202
§ 6-3	石英晶体中的波面.....	205
§ 6-4	旋光的应用.....	206
第七章	液晶.....	213
§ 7-1	液晶的类型.....	213
§ 7-2	液晶的各种电光效应.....	216
§ 7-3	液晶的应用.....	227
第八章	光偏振态的教学描述.....	239
§ 8-1	椭圆偏振光的描述.....	239
§ 8-2	光偏振态的邦加表示法.....	243
§ 8-3	斯托克斯矢量表示.....	246
§ 8-4	琼斯表示法.....	251
§ 8-5	密勒矩阵.....	258
§ 8-6	应用举例.....	262

第一章 自然光和偏振光

§ 1-1 光的电磁理论和光的偏振性

麦克斯韦总结了前人在电磁学方面的研究成果后,于1865年在英国皇家学会上作了题为“电磁场动力学理论”的演讲,建立了经典电磁理论,从而导致电磁波的发现。按照麦克斯韦理论,电磁波在真空中的传播速度 c 为

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (1-1)$$

c 只和真空中的介电常数 ϵ_0 和磁导率 μ_0 有关。在实验误差范围以内,常数 c 与已测得的光速相等。在历史上,麦克斯韦曾以此作为重要依据,提出了光的电磁理论:“光本身是一种电磁扰动,它依照电磁学定律以波的形式通过电磁场传播。”

在介质中电磁波的速度 v 为真空中的 $\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$ 倍。

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (1-2)$$

式中 ϵ_r 为介质的相对介电系数, μ_r 为相对磁导率。另外光在透明介质里的传播速度 v 小于真空中的速度 c , c 与 v 的比值是该透明介质的折射率, 即

$$n = \frac{c}{v} \quad (1-3)$$

既然光是电磁波, 将式(1-2)和式(1-3)相比可得

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (1-4)$$

这个公式把光学和电磁学这两个不同领域中的物理量联系起来了。

在麦克斯韦的电磁理论中，电场和磁场紧密联系，磁场随时间变化，在周围空间感应出电场，这种电场具有涡旋性，如图1-1a所示。变化的电场在周围空间产生磁场，这种磁场也具有涡旋性，如图1-1b所示。于是在空间任何一点电场的变化，都要在附近产生磁场的变化，而这磁场的变化也要在较远的区域里引起新的电场变化，如图1-1c所示。这种变化的电场和变化的磁场交替产生，由近及远的传播过程称为电磁波。

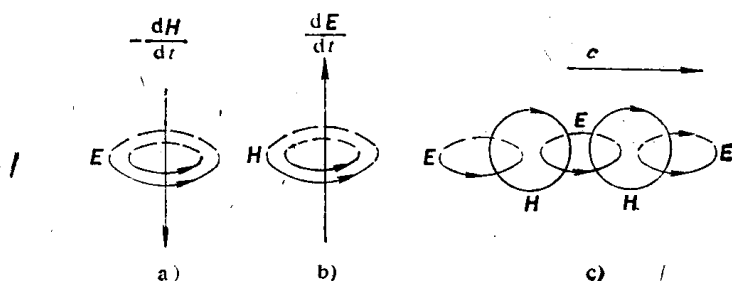


图1-1 电磁场的传播

- a) 变化的磁场感应出涡旋电场
- b) 变化的电场感应出涡旋磁场
- c) 交变电、磁场由近及远的传播

电磁波的电场强度 E ，磁场强度 H 不但互相垂直且都和传播方向 r 垂直， E 、 H 、 r 组成右手螺旋系统，见图 1-2，因而电磁波是横波。

我们知道，振动方向和波的传播方向相同的波称为纵波；而振动方向和传播方向垂直的波称为横波。在纵波的情况下，通过波的传播方向所作的所有平面内，波的运动情况都是相同的，其中没有一个平面显示出比其他任何平面特

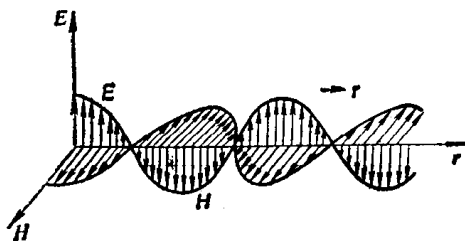


图1-2 电磁波的横向性 E 和 H 垂直传播方向 r

殊，即它具有对称性。对横波来说，通过波的传播方向且包含振动矢量的那个平面显然和不包含振动矢量的任何平面有区别，这说明波的振动方向对传播方向没有对称性。振动方向对于传播方向的不对称性称为偏振。它是横波区别于纵波的一个最明显的标志。只有横波才有偏振现象；反之具有偏振特性的波必为横波。

实验证明，对人眼、照相底片及光电探测器起作用的是电磁波中的电场强度 E ，因此常把电矢量 E 称为光矢量，把 E 的振动称为光振动，在讨论光振动的性质时，只需考虑电矢量 E 即可。

§ 1-2 偏 振 光

一、直线偏振光

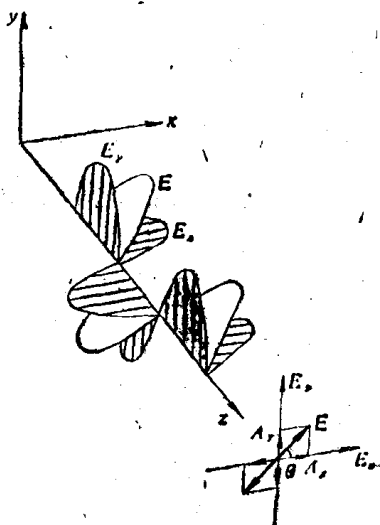
如上所述，电磁波是横波，它在一定的平面内边振动边向前传播，这种波一般叫做偏振波，在光的情况下就叫“偏振光”。在光波的电偶极子辐射模型中，偶极子振荡产生电磁波，因为电场波在包含偶极子的平面内振动，所以从每个偶极子发出的光都是偏振光。设单个偶极子在 $X-Y$ 平面内振动，光波沿 Z 轴传播，则电场波在某一点处为：

$$\left. \begin{aligned} E_x &= A_x \cos(\omega t - kz + \delta) = A_x \cos(\tau + \delta) \\ E_y &= A_y \cos(\omega t - kz + \delta) = A_y \cos(\tau + \delta) \\ E_z &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

式中 $\tau = \omega t - kz$, A_x 、 A_y 分别为电矢量在 x 和 y 轴上的振幅分量, ω 为振动角频率, δ 为振动初位相。它的振动面与 x 轴的夹角为 θ

$$\tan \theta = E_y / E_x = A_y / A_x$$

这种振动面不随时间改变的偏振光称为直线偏振光 (或平面偏振光), 如图 1-3 所示。



二、椭圆偏振光

在两个互相垂直的面内振动的两个直线偏振光的电场用下式表示:

$$\left. \begin{aligned} E_x &= A_x \cos(\tau - \delta_x) \\ E_y &= A_y \cos(\tau - \delta_y) \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

图1-3 直线偏振光

下面研究它们的合成。如果把合成波振幅用一端固定在原点的矢量 E 来表示, 则 (E_x, E_y) 是该矢量另一端的坐标。为了从上式消去 τ , 求出该矢量端点的轨迹, 把上式写成

$$\left. \begin{aligned} \frac{E_x}{A_x} &= \cos \tau \cdot \cos \delta_x + \sin \tau \cdot \sin \delta_x \\ \frac{E_y}{A_y} &= \cos \tau \cdot \cos \delta_y + \sin \tau \cdot \sin \delta_y \end{aligned} \right\}$$

由此求得 $\cos \tau$ 和 $\sin \tau$, 然后取它们的平方和可得

$$\left(\frac{E_x}{A_x} \right)^2 + \left(\frac{E_y}{A_y} \right)^2 - 2 \frac{E_x E_y}{A_x A_y} \cos \delta = \sin^2 \delta \quad (1-7)$$

式中 $\delta = \delta_y - \delta_x$ 。这个表达式是二次式，根据式 (1-6) 可知， E_x 、 E_y 不会大于 A_x 、 A_y ，因此矢量端点和方向都在有规律地变化，光矢量的末端沿着一个椭圆转动的光称为椭圆偏振光。椭圆的形状、转动方向与两个直线偏振光的位相差 δ 及振幅比 A_y/A_x 有关，图1-4是根据式 (1-7) 画出的几种不同 δ 值所对应的椭圆偏振光的形状。在以下两种特殊情况下，两个直线偏振光合成仍为直线偏振光

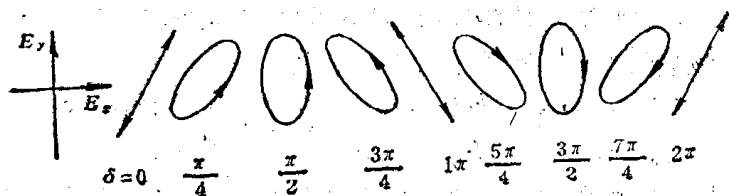


图1-4 不同 δ 值所对应的椭圆偏振的形状

1. $\delta = 0$ 或 $\pm 2\pi$ 的整数倍时，这时 $E_y = \frac{A_y}{A_x} E_x$ ，表示合成电矢量沿着一条经过坐标原点而斜率为 A_y/A_x 的直线振动。

2. $\delta = \pm \pi$ 的奇数倍时，这时 $E_y = -\frac{A_y}{A_x} E_x$ ，表示合成电矢量沿着一条经过坐标原点而斜率为 $-\frac{A_y}{A_x}$ 的直线振动。

椭圆偏振光振动面的旋转方向取决于 $\sin \delta$ 的符号，通常规定，当对着光的传播方向看去，振动面作顺时针方向旋转的称为右旋偏振光，由式 (1-7) 可知，当 $\sin \delta > 0$ 时，为右旋偏振光， $\sin \delta < 0$ 则为左旋偏振光。

三、圆偏振光

式(1-7)中, 如果 $A_x = A_y$ 且 $\delta = \frac{\pi}{2}$ 或 $\frac{3}{2}\pi$, 则该式成为一个圆方程, 我们把椭圆偏振光的这种特殊情况称为圆偏振光。因此振幅为1的圆偏振光的一般表达式为

$$\left. \begin{aligned} E_x &= \cos \tau \\ E_y &= \pm \sin \tau \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

式中 $\pm$ 号对应于左旋和右旋圆偏振光。

两个旋转方向相反而振幅相等的圆偏振光能够合成一个直线偏振光, 这可从下式得到证明:

$$\left. \begin{aligned} E_x' &= \cos \tau \\ E_y' &= \sin \tau \end{aligned} \right\} + \left. \begin{aligned} E_x'' &= \cos \tau \\ E_y'' &= -\sin \tau \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} E_x &= 2 \cos \tau \\ E_y &= 0 \end{aligned} \right\}$$

同样, 可将直线偏振光分解成两个在相反方向上旋转的振幅相等的圆偏振光。

现在我们可以说出一个特定的光波处于何种特殊的偏振状态了。我们把线偏振光或平面偏振光称为处于 $\mathcal{L}$ 态, 把右旋圆偏振光称为处于 $\mathcal{R}$ 态, 左旋圆偏振光称为处于 $\mathcal{L}$ 态, 椭圆偏振光称为处于 $\mathcal{E}$ 态。上面已经看到 $\mathcal{L}$ 态可以用 $\mathcal{R}$ 态和 $\mathcal{L}$ 态的叠加表示, $\mathcal{E}$ 态也一样。

§ 1-3 自然光

一个普通的光源包含着大量的辐射原子或分子, 虽然每个辐射原子每次所发射的是一列平面偏振的电磁波, 但每次发射的时间很短, 大约 10^{-8}s , 在每一次发射之后, 第二次发射又将以新的初位相和新的振动方向重新发光; 同时, 大量发射原子在同一时间内发出的光各自具有不同的初位相和不同的振动方向, 所以通常的光源发出的许多列光波, 它们的振动方向可以分布在一切可能的方位。平均来看, 任何方

向都有相同的振动能量，也就是说，电矢量对于光的传播方向是对称而又均匀分布的，如图1-5a所示。这种由通常光源辐射的光波，其电矢量在垂直光波传播方向的平面上既有时间分布的均匀性，又有空间分布的均匀性，在各个取向上电矢量的时间平均值是相等的，这种光就是自然光，也称它为**非偏振光**。但这种称呼是很不正确的，因为实际上它是由迅速接踵而来的不同偏振态的光所组成的。

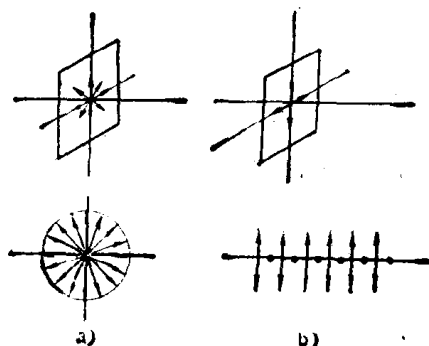


图1-5 自然光

a) 自然光 b) 自然光的分解

在自然光中，任何取向的电矢量 E 都可分解为相互垂直的两个方向（例如 x 方向和 y 方向）上的分量，所有取向的电矢量在这两个方向上的分量的时间平均值必相等，也就是说，自然光可以用强度相等，振动方向互相垂直的两个平面偏振光来表示，如图1-5b所示，图中“ $\cdot$ ”表示电矢量垂直于图面的平面偏振光，“ $\downarrow$ ”或“ $\uparrow$ ”表示电矢量在图面内的平面偏振光。但是必须注意，由于自然光中各电矢量之间没有固定的位相关系，因而其中任何两个取向不同的电矢量不能象偏振光那样合成为一个单独的矢量。即在数学上可用任何两个

振幅相等的非相干的、正交的线偏振光来表示自然光。所谓非相干波就是相对位相差作迅速而无规则变化的波。

§ 1-4 部分偏振光及偏振度

通常，不论是来自自然光或人造光源的光，既不是完全的偏振光，也不是完全的非偏振光，这两者都是极端情况。更普遍的是电场矢量变化方式既不是完全规则的，也不是完全无规则的，这种光称为部分偏振光，如图1-6所示。

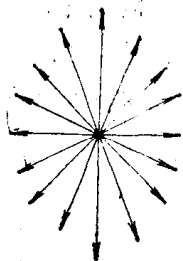


图1-6 部分偏振光

描述这种性质的一个有效方法是把它看成为一定比例的自然光和偏振光叠加的结果，常用偏振度 P 来表示。

$$P = \frac{I_p}{I_p + I_n} \quad (1-9)$$

式中 I_p 和 I_n 分别为偏振光和自然光的强度。显然，自然光的 $P=0$ ，完全线偏振光的 $P=1$ 。 P 的范围是 $0 \leq P \leq 1$ 。例如一部分偏振光束是由 3 W/m^2 的偏振光和 7 W/m^2 的自然光组成，该光束的偏振度 $P=3/3+7=0.3$ 。

当部分偏振光中只是线偏振光和自然光的混合时，我们把自然光分成为两个不相干的正交 $\mathcal{S}$ 态，且其中之一平行于线偏振光，另一束则与之垂直，如图1-6中所示，其强度最大值用 $I_{\max}$ 表示，最小值用 $I_{\min}$ 表示，其中完全线偏振光的强度 $I_p = I_{\max} - I_{\min}$ ，在总强度中自然光的强度是两正交方向分量的总和， $I_n = 2I_{\min}$ ，这样

$$P = \frac{I_r}{I_r + I_t} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (1-10)$$

例如一束自然光，以 57° 角入射在空气-玻璃分界面上 ($n=1.54$)，因而 $R_r=0$ ， $R_s=0.165$ (R_r 表示水平偏振光分量的光强反射率， R_s 表示垂直偏振光分量的光强反射率)，此时透过玻璃的光是部分偏振光，偏振度 P_T 计算如下：

因为 $R_r=I_{rr}/I_{ir}=0$ ，所以对应的透射率

$$T_r = \frac{n_{it} \cos \theta_i}{\cos \theta_t} \frac{I_{ir}}{I_{ir}} = 1$$

因此， $R_r + T_r = 1$ 。同样， $T_s = 1 - R_s$ ，且

$$T_s = \frac{n_{it} \cos \theta_i}{\cos \theta_t} \frac{I_{is}}{I_{is}} = 0.835$$

由于入射光是自然光， $I_{is}=I_{ir}$ ，我们可写出

$$I_{ir}=C, \quad I_{is}=0.835C, \quad C = \frac{I_{ir} \cos \theta_i}{n_{it} \cos \theta_t}$$

将以上数值代入式 (1-10) 可以计算出 $P_T = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} =$

$$\frac{I_{ir} - I_{is}}{I_{ir} + I_{is}} = \frac{C - 0.835C}{C + 0.835C} = 8.9\%。$$

同理可计算出在玻璃表面反射回空气中的光的偏振度 P_R ，

$\because R_r=0, R_s=0.165, \therefore I_{\min}=0, I_{\max}=0.165I_i, P_R=1$ 。式中 $I_{rr}, I_{ir}, I_{rs}, I_{is}, I_{ts}$ 分别表示反射光、入射光、透射光 p 分量的光强及透射光与入射光 s 分量的光强； θ_i 为入射角， θ_t 为折射角， n_{it} 为透射光所在介质的折射率。此例说明以 57° 角入射时的反射光是完全偏振光。后面将会详细讨论这一特殊入射角——布儒斯特角的意义及其应用。

§ 1-5 偏振光的强度

一、偏振器的透光轴

如前所述,普通光源如太阳、电灯、蜡烛发出的都是自然光,经玻璃反射后的太阳光,若入射角为 57° ,其透射光为部分偏振光,反射光为完全偏振光。怎样才能识别光的偏振状态并准确地度量它的偏振度呢?人眼不能区别自然光与偏振光,照相底片也一样,必须利用一种特殊的光学元件——偏振器,如偏振片、偏振棱镜等才能区别。图1-7为自然光通过偏振片后的光强度变化(偏振片是用来产生偏振

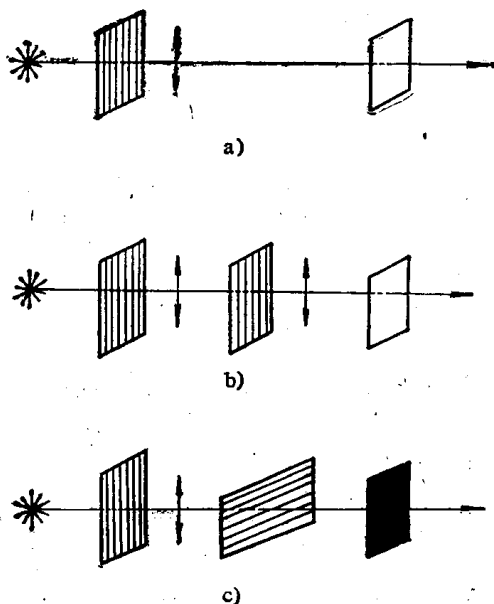


图1-7 自然光通过偏振片后的光强变化

- a) 自然光通过一块偏振片
- b) 自然光通过二块透光轴平行的偏振片
- c) 自然光通过二块透光轴正交的偏振片

光的象塑料那样的材料，详见偏振光的产生)。

偏振片是一种只允许横向分量为某一固定方向的偏振光通过的器件，它内部象有一种看不见的栅缝，当非偏振光通过它时，这种栅缝就使原来极其杂乱的包含所有方向的横向振动光线经过了清滤，使透过它的光线成为只有在一个方向上振动的偏振光。能让光波中电场振动通过的这种栅缝方向称为偏振片的透光轴。其实透光轴是不可见的，图中的栅缝只是表示偏振片内所有点的透光轴组成的共同方向。

二、自然光经过起偏振器的光强

设有一各向电场矢量的振幅都等于 a 的自然光，电场矢量总数为 n ，且 n 是个大得惊人的数目，照射到一个起偏振器上，并假定起偏振器的透光轴与 y 轴方向一致，显然起偏振器不仅容许与 y 轴相同的电场矢量通过，而且还让投影到这个方向上所有的振动分量通过。如果把入射光中每一个电场矢量分解成沿透光轴 y 与垂直透光轴 x 的两个分量，由于 n 个电场矢量在 $0 \sim 2\pi$ 范围内是均匀分布的，所以它们在 x 轴与 y 轴方向上的分量之和应该相等，且其光强度也相等，均等于 I_0 。根据非相干波的合强度等于各个波强度之和可知：

$$\text{入射自然光强度 } I_0 = na^2$$

$$\text{透过起偏振器的光强度 } I = \frac{1}{2} I_0 = \frac{1}{2} na^2$$

由此可知，一个理想的起偏振器的透射率应该等于 0.5，但是实际的透射率总小于 0.5，这是因为任何起偏振器的表面和内部总有反射和吸收，引起入射光能量的损耗。一般所用的起偏振器的透射率都只有 0.25~0.42。

自然光经过起偏振器变成了直线偏振光，而起偏振器其实只是任何一种类型的偏振器(详见第二章)。凡用于使自然

光变成直线偏振光的器件都称之为起偏振器。下面将会见到，凡用于检验某光束是否是直线偏振光的器件均称为检偏振器，两者可以是同一种器件，仅因用处不同而有不同的名称而已。

显然，应用偏振器便可检验自然光、部分偏振光和线偏振光。当绕着光轴旋转偏振器时，自然光透过它的光强度在每一个方位上均相等；部分偏振光透过它的光强度与图1-6所示相似，在某一方位出现 $I_{\max}$ ，其正交方向上出现 $I_{\min}$ ；对线偏振光则只有偏振器的透光轴与之相一致时，透过光最强，而在正交方向上便完全没有光透过，如图1-7b和c所示。因此当绕着光轴旋转偏振器时，若透过它的光会由亮变暗直至全黑，则入射光便是线偏振光。此时偏振器的透光轴与偏振光振动方向正交。因为观察全黑位置比观察最亮位置要灵敏得多，故也可用此方法判定偏振器的透光轴。

三、光线穿越两块偏振器的光强

为了检验偏振器件的质量，采用了图1-8所示的装置，我们使从起偏振器射出来的直线偏振光再通过一块检偏振器，且两器件的透光轴成 θ 角。由于射到检偏振器的是直线偏振光，透过它的光的振幅 A_0 及光强度 I_0 分别为

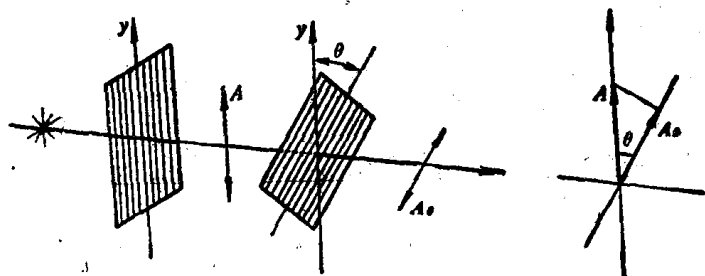


图1-8 光线穿越两块偏振器后的光强

$$A_{\theta} = A \cos \theta, I_{\theta} = (A_{\theta})^2 = A^2 \cos^2 \theta \quad (1-10)$$

式(1-10)称为马吕斯定律,它表明:当光线接连穿过两个偏振器时,透过的光强 I_{θ} 与两器件透光轴交角 θ 的余弦平方成正比。在转动检偏振器时,可以连续地改变透过光的强度。因此两偏振器装置也被用来当作连续可调的减光系统。在这些减光装置中,特别有意义的是那些不会改变光束光谱成分的装置,即中性减光装置。一般的偏振片对不同的波长有不同的吸收系数,不能作中性减光器,需用偏振棱镜等才行。

实际的偏振器件总不是理想的,即自然光透过后得到的不是完全偏振光,而是部分偏振光。即使两个偏振器的透光轴互相垂直,透过光强也不是零,当它们相对转动时,最小透射光强与最大透射光强之比称为消光比,这是衡量偏振器件质量的一个重要参数。消光比越小,偏振器件的质量越高,人造偏振片的消光比约为 10^{-3} 。

3910332