

胶带的色偏振原理及其在演示实验中应用

谢欣, 吕景林

(复旦大学物理学系, 上海 200433)

摘要: 日常用透明胶带以其各向异性可作为实验室中的简易波晶片来使用, 再结合两片偏振片, 即可用来探究光学中色偏振现象的各种规律。通过出射光光强、颜色、纯度等各种属性对胶带样品厚度、两偏振片偏振方向的夹角、胶带的拉伸方向与偏振片偏振方向夹角, 以及观察角度之间的依赖关系, 即可得出胶带的双折射性质; 出射光颜色与胶带厚度的关系; 出射光色纯度与偏振片角度的关系; 出射光颜色与实验者观察角度的关联, 并很好地与有关理论符合。将不同层数的胶带黏贴在两片偏光薄片之间以组成不同颜色的色块, 即可应用上述规律自制一种创新的趣味性色偏振演示实验仪器。

关键词: 胶带; 色偏振; 色纯度; 互补色; 演示实验

中图分类号: O 436.3 文献标志码: A 文章编号: 1006-7167(2012)06-0047-04

Principle of Chromatic Polarization in Scotch Tapes and Its Demonstration in Experiments

XIE Xin, LV Jing-lin

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: The scotch tape can be used as a simple wave plate in laboratories because of its anisotropic refractive index. And by adding two polaroids, various laws with respect to chromatic polarization can be discovered. The birefringence, the relationship between the color of emergent light and thickness of the tape, the relationship between the purity of emergent light and the angle of the polaroids, the relevance of the color of emergent light and the viewing angle of the observer can be obtained by observing the dependence of the properties such as the intensity, color and purity of emergent light on the thickness of the scotch tape sample, the angle between the polarization orientations of the two polaroids and the tensile direction of the tape, which are in good agreement with relevant theory. An amusing and innovative demonstration apparatus can be devised as a practical application of the above principles, if different layers of scotch tapes are put between two thin polaroids to form different color lumps.

Key words: scotch tapes; chromatic polarization; colorimetric purity; complementary color; demonstration

0 引言

色偏振原理在化工、矿物、冶金、生物及医药领域应用广泛^[1], 与其相关的光学理论也比较完整; 它趣味性强, 尤其是作为简易波晶片来使用的透明胶带使得该实

验的可操作性与灵活性都大大增强, 适合在高校的实验教学中开展以增强学生对于有关课堂知识的理解。

目前, 对于胶带产生色偏振现象的教学实验研究集中于出射色光与胶带厚度、胶带拉伸方向与偏振片偏振方向夹角的关系上^[2]。但对出射色光纯度与上述夹角、观察角度的关系等在实验中遇到的诸多现象并未作出详细总结与理论推导。本文通过制作不同胶带样品进行出射色光属性的观察与测量, 更多现象规律得以完善。演示实验仪器的设计也很大发挥了该实验的教学价值。

收稿日期: 2011-11-02

作者简介: 谢欣(1990-), 女, 辽宁辽阳人, 本科生。

Tel.: 021-50681633; E-mail: 09300190078@fudan.edu.cn

通信作者: 吕景林(1959-), 女, 湖南永州人, 副教授, 研究方向为物理实验教学。Tel.: 021-65643756; E-mail: lvjinglin@fudan.edu.cn

1 色偏振原理

用图 1 来说明实现色偏振的方法。2 个偏振片 A、B 间插入 1 个波晶片 3 个元件的平面平行且轴心大致同高,使平行光线正入射。

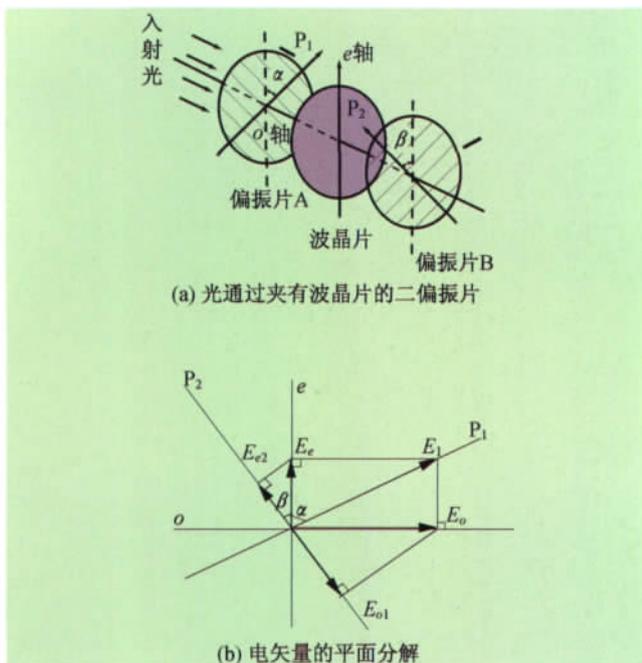


图 1 色偏振的实现方法

图 1 (b) 中 P_1 、 P_2 分别为偏振片 A、B 的振透方向, o 、 e 为波晶片的 o 轴和 e 轴。入射光通过偏振片 A 后呈线偏振,其矢量为 E_1 、振幅为 A_1 。它投射到波晶片上分解为 e 光和 o 光(o 轴为波晶片光轴),设 e 轴与 P_1 夹角为 α 。光线再次通过偏振片 B P_2 与 e 轴夹角是 β 则从偏振片 B 出射的光 E_2 是 E_{e2} 和 E_{o2} 的叠加,根据同方向上简谐振动合成 E_2 的振幅 A_2 应是

$$A_2 = \sqrt{A_{e2}^2 + A_{o2}^2 + 2A_{e2} A_{o2} \cos \delta} \quad (1)$$

A_2 值取决于 α 、 β 和交叉项 δ δ 主要由两个因素决定:

(1) 波晶片引起的相位差 δ_1 。 e 光和 o 光通过波晶片的相位差为

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda}(n_o - n_e) d \quad (2)$$

式中: n_e 、 n_o 分别为 e 光和 o 光的折射率; d 为波晶片厚度; λ 为入射光在真空中的波长。

(2) 坐标轴的投影分量引起的相位差 δ_2 。如果 e 光和 o 光投影在 P_2 上的分量方向一致,则 $\delta_2 = 0$; 若相反,则 $\delta_2 = \pi$ 。综上 $\delta = \delta_1 + \delta_2$ 为总的相位差。

当入射光是白光 (D_{65} ^①) 时,如有某波长 λ_1 满足:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_1}(n_o - n_e) d = 2k\pi \quad (3)$$

式中: k 是整数。则有对 $P_1 \perp P_2$ 时是消光 $P_1 // P_2$ 时是极大; 而 λ_2 满足:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_2}(n_o - n_e) d = (2k + 1)\pi \quad (4)$$

则有对 $P_1 \perp P_2$ 是极大 $P_1 // P_2$ 时是消光。满足式(3)或(4),透过光具组的光成为彩色,此现象即色偏振^[3-13]。

2 胶带实验

透明胶带在制作过程中呈各向异性,因此可用作实验室里的简易波晶片使用。此外,各种透明塑料(聚酯、聚丙烯、聚苯乙烯、有机玻璃、ABS 塑料等)也都可以用作大面积的廉价波晶片。在使用胶带制作波晶片的色偏振实验中可以观察到各种丰富的现象、规律^[14]。

(1) 验证胶带的双折射性质。按照图 1 (a) 的光具组进行实验,用氦氖激光作为光源,用光功率计测量出射光的功率。让胶带的拉伸方向按照图 1 (a) 中的 e 轴取向。当 α 不为 0 或 π 时,连续改变 β ,出射光无明显的消光现象,而呈现椭圆偏振光的特点;当 α 为 0 或 π 时,改变 β 有两次消光现象,即出射光为 P_1 同向的线偏振光。这就验证了胶带纸的双折射属性,而其拉伸方向相当于 e 轴或 o 轴。

改换不同层数与厚度的胶带,仍存在以上关系;只是椭圆的长短轴的方向与相对大小有所不同。这是 e 光和 o 光的不同相位差导致。

(2) 出射色光与胶带厚度的关系。将透明胶带样品 1(乔立牌 6 cm 透明胶带)沿同一方向黏贴在玻璃板上,厚度分别为 1~6 层。只把胶带厚度作为变量,简单设定为 $P_1 \perp P_2$,且胶带的拉伸方向为 2 个偏振片透振方向的角平分线。加以自然光的照射,可以观察到从 1~4 层的透射光分别为黄、黄绿、蓝绿、紫红(见图 2);而没有黏贴胶带的地方没有任何光透出。改换胶带样品 2(宏昌牌 12 cm 透明胶带)重复上述实验,可以看到不同于样品 1 的出射色光,这是由于两种样品的厚度 d 不同造成的。

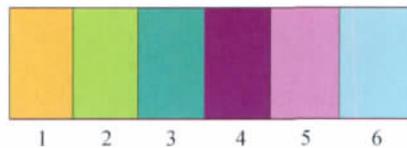


图 2 胶带样品 1 的出射光效果

白光由各种波长的单色光组成,当出射光包含某一波长色光的极大,则会呈现出对应的颜色;而若是某一波长消光,则会呈现它的互补色。因此单纯凭借以上现象不能断定干涉光是加强还是相消。

① 黑体在 6 500 K 时发出的含各波长的光,其能量一波长分布遵从普朗克公式,而不是两种互补色光或三种基色迭加而成的白光。

实验中,当胶带装置的层数增加至 5 或 6 层以上时,透射光就会明显颜色变淡而接近于白光,且色调种类减少,如只有亮粉和亮蓝。这一现象不会因改换样品或者旋转偏振片和波晶片的角度而消失,它是由于发生 k 级干涉的某波长可能与 $k-1$ 级较长的另一波长在同一波晶片厚度条件下得到加强,因此两种色光混合,使得色纯度变差,即白光占到了更多比例。

(3) 色纯度与偏振片角度的关系。将 P_2 转到与 P_1 平行而其他保持不动(振幅分解见图 3),记录胶带样品 1 的 1~4 层的目测颜色分别为蓝、蓝紫、黄、黄绿,即恰为 $P_1 \perp P_2$ 时各色光的互补色。这就验证了 $P_1 \perp P_2$ 时消光(极大)的波长在 $P_1 // P_2$ 时成为极大(消光)。

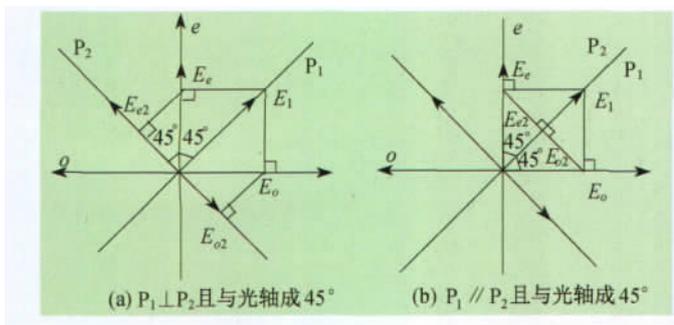


图 3 实验中设定的两种特殊情况振幅分解图

更进一步:固定 $\alpha = 45^\circ$,使 P_2 、 P_1 夹角 γ 从 0 逐渐变到 45° ,发现相同层数胶带出射光的色调不发生改变,但是色纯度逐渐变低;而在 $45^\circ \sim 90^\circ$ 出现前一色光的互补色,色纯度逐渐增大。

事实上,此时有:

$$A_{e2} = \frac{A_1}{\sqrt{2}} \cos\left(\frac{\pi}{4} - \gamma\right), \quad A_{o2} = \frac{A_1}{\sqrt{2}} \sin\left(\frac{\pi}{4} - \gamma\right) \quad (5)$$

以 γ 作自变量,出射光的相对振幅 A_{e2} 、 A_{o2} 可以做出图 4 的关系图。图中 45° 、 135° 、 225° 、 315° 对应于其中一振幅的反向,即变色出现的位置。 γ 在 $0 \sim 45^\circ$ 时, A_{e2} 、 A_{o2} 只有部分光发生干涉,剩余振幅以白色背景光出现,使色光看起来更淡而偏于白色,这就是色纯度减小的原因;在 $45^\circ \sim 135^\circ$,两个振幅反向,所以 45° 即为变色位置,成为之前色光的互补色。这种方法也是一种判断光轴方向的途径。

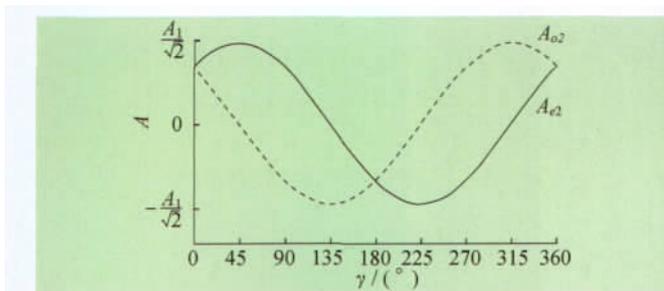


图 4 A_{e2} 、 A_{o2} 与 γ 的关系

(4) 出射色光与观察角度的关系。保持两个偏振片与胶带样品的平面平行,使入射光方向偏离胶带法向一个很小的角度 θ ,从出射方向观察样品中不同层数的胶带,出射色光会随 θ 的增大而逐渐变色;且当入射面与胶带的拉伸方向所成角度 φ 不同时,出射光颜色变化的情况一般不同。

两种特殊情形:当胶带的拉伸方向在入射面内($\varphi = 0$) θ 连续改变观察到的颜色变化较为不连续,相邻颜色之间的过渡类似混合共存状态;拉伸方向与入射面垂直($\varphi = \pi/2$) 颜色更倾向于连续变化,种类更多且过渡区色调的改变更快也更明显。这种差别在不同层数的胶带中都有体现,但是也有个别存在,如单层黄色在 $\varphi = \pi/2$ 时出射色光随 θ 变大只是变淡,而变色较微弱。

单轴晶体分为两类:一类为 $v_e > v_o$ 的负晶体,如冰洲石;一类为 $v_e < v_o$ 的正晶体,如石英^[15]。 o 光和 e 光的波面在其中传播的不同规律如图 5 所示。

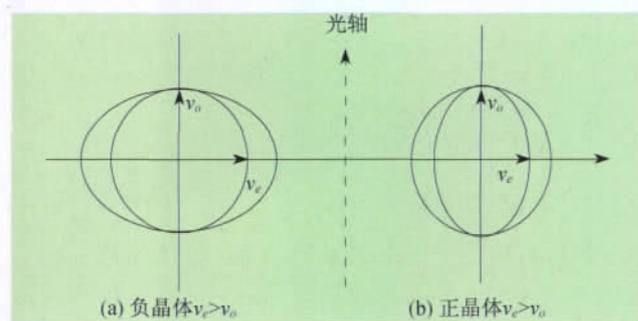


图 5 两种双折射晶体

图 6 中只列出了负晶体的情况,易知正晶体的折射规律是类似的。从由惠更斯作图法得到的光路图上可以看出,改变 θ 和 φ 的综合效应是入射光在胶带中光程差($n_o - n_e$) d 发生改变,因而发生干涉极值的波长改变。对于 e 光和 o 光,它们的折射规律不同,折射角 θ_e 和 θ_o 也不同。

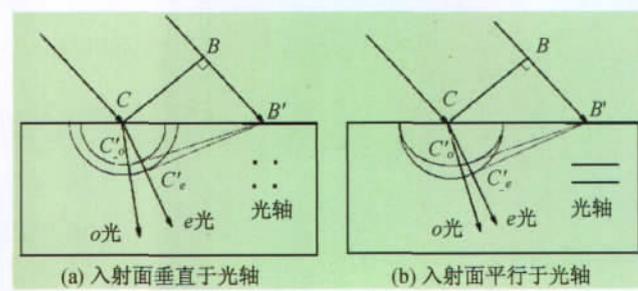


图 6 不同的入射光方向在波晶片内的折射

由于实验中情形满足了晶轴平行于波晶片表面,可以对 o 光和 e 光应用折射定律,对应的折射角 θ_e 、 θ_o 有:

$$\frac{\sin \theta_e}{\sin \theta} = \frac{n}{n_e}, \quad \frac{\sin \theta_o}{\sin \theta} = \frac{n}{n_o}$$

式中 n_e 取决于入射面与光轴的夹角,且一般与 n_o 不等。当入射面与光轴垂直时(见图6(a)) n_e 值为沿 e 轴方向的折射率;其他情况 n_e 值取决于切点 C'_e 的位置。可由计算得出,介于 n_e 沿 e 轴方向的折射率和 n_o 之间。

由几何关系和相位差公式,有

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda}(n_o d_o - n_e d_e) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{n_o}{\cos \theta_o} - \frac{n_e}{\cos \theta_e} \right) d \quad (6)$$

出射的 e 光和 o 光会发生干涉,干涉的 λ 会随对应的 δ_1 改变。至于颜色改变因 φ 而不同,主要是由于 θ_e 和 θ_o 的改变依赖于切点 (C'_e 或 C'_o) 位置随入射角增大而变化(见图6)。然而也存在其他可能的影响因素,如胶带拉伸时的应力影响到拉伸方向的厚度均匀,黏贴的平整度和各层光轴取向的平行程度,实际观察的色调取决于出射混合光的比例等。这些不确定因素还需进一步验证。

4 有关演示实验的应用

色偏振原理在科研实践中有较为广泛的应用,如分析透光器件所受应力、观察生物组织切片等;也可作为日常生活中的广告装饰。在高校教学演示实验中,也是一个趣味性较强的项目。考虑到所使用的器材随手可得,如能设计一个带有不同色块的复杂图样,将会使学生在观赏的同时更有兴趣去理解有关色偏振的理论知识。

基于以上启发,笔者制作了一幅毕加索名画(见图7)。方法为:将不同层数的透明胶带用手术刀片切割成不同色块,在上下两面附上一组正交镜头用偏光



图7 用胶带和偏光片自制的贴画

纸制造黑色背景,这样就做好了一个无需颜料的彩色画;且沿不同角度欣赏还会发现颜色的变化。它不仅可以作为展示色偏振原理的教学用器材,作为一件装饰品也很别致。

如果可以将画中的偏振片做成可旋转的,就会增加学生的动手机会,可以自己研究色偏振中的光学规律。这时需要将 P_1 和 P_2 在圆周上标出角度,并可绕中心旋转。如果室内光线较好,则不需要光源的照明而直接使用自然光;如果室内较暗,就要再外加一个白炽灯加毛玻璃,这些材料也都很容易获得。

4 结 语

色偏振原理应用广泛、现象丰富有趣,因此成为一项十分适合教学演示的物理规律,有助于学生理解相关的光学知识尤其是定量关系;而且实验材料易得、可参与性强,对培养学生的学习兴趣,激发创造欲与增强动手能力是十分有益的。

参考文献(References):

- [1] 赵清诚. 基础物理学[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2010: 264-265.
- [2] 张京,王琪,苏卫峰,等. 透明胶带纸中的色偏振现象[J]. 物理实验, 2009, 29(10): 38-40.
- [3] 陈熙谋. 光学·近代物理[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005: 113-115.
- [4] 陆果,陈凯旋. 基础物理教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 455-457.
- [5] 孙业英. 光学显微分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997: 112.
- [6] 舒天霖,孙毓庆. 偏振光及其在药学上的应用[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1983: 17-18.
- [7] 王铭. 物理学[M]. 5版. 北京: 人民卫生出版社, 2007: 267.
- [8] 范少卿,郭富昌. 物理光学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990: 173.
- [9] 陈鹏万,王家俭. 大学物理学手册[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1985: 392-394.
- [10] 舒辰慧,王铭,王章金,等. 全国高等学校教材·物理学[M]. 4版. 北京: 人民卫生出版, 1985: 244.
- [11] 胡盘,汤毓骏. 普通物理学简明教程[M]. 北京: 高等教育出版, 2004: 273.
- [12] 任隆良,谷晋骐. 物理实验[M]. 天津: 天津大学出版社, 2003: 298-300.
- [13] 贾瑞皋. 大学物理教程上[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2009: 301.
- [14] 赵凯华. 光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 310-314.
- [15] 孙经俨. 色偏振的理论及应用[J]. 光学技术, 1999(4): 9-12.