

反射式偏振光干涉彩色显示屏的制作

铁小匀

(北方工业大学理学院 100144)

众所周知,白光是由多种频率的单色光组成的复色光。因此可以利用棱镜的色散原理获得白光的彩色光谱,也可以利用干涉或衍射装置获得白光的彩色光谱。但是还有一种将白光分光的方法,这就是偏振光干涉。更神奇的是只用一块偏振片及若干张透明薄膜就可以产生彩色的图形。下面就介绍一个由本文作者设计的白光照射下实现反射式偏振光干涉的演示仪。

1. 偏振光干涉原理

偏振性是光波作为横波的特性,它表示电场强度矢量 E 和磁场强度矢量 H 的振动只出现在某一固定的方向上。讨论光的偏振性时,一般主要考虑 E 的振动。如果在光的传播过程中, E 的振动方向保持不变,则称为偏振光。普通光源中的原子辐射的每个波列都是偏振光,但是普通光源(太阳光、电灯等)是大量原子辐射的总和,所以 E 的振动在各个方向存在机会相同,这种光为非偏振光,并被称为自然光。自然光可以通过偏振片或各向异性的晶体变成偏振光。

大家知道,一束光线在两种各向同性介质的分界面上发生折射时,只有一束折射光,且在折射面内。而对于光学性质随方向而异(各向异性)的某些晶体,当光线进入晶体后,一束入射光可以有两束折射光,其中一束遵从折射定律,叫寻常光(o光),另一束不遵从折射定律,其传播速度随入射光的方向变化,叫非常光线(e光),并且一般情况下,这束光不在折射面内,通常o光和e光都是偏振光,振动方向相互垂直。这种现象叫双折射现象。由偏振光和偏振片的性质可知,光束是不可能通过两个偏振化方向正交的偏振片的,但是如果在两个偏振化方向正交的偏振片 P_1 和偏振片 P_2 之间插入一块各向异性的透明晶片 K ,如图1所示,晶体 K 将使入射光线发生双折射,

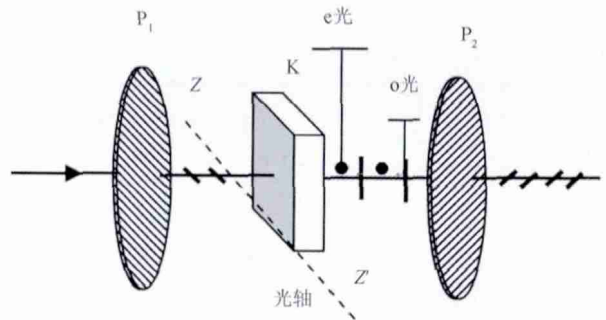


图1

产生两束振动方向相互垂直的o光和e光,所以偏振片 P_2 会有光通过。若晶片是楔形板,可在偏振片 P_2 后出现明暗相间的条纹,这种现象即为偏振光的干涉。

假设 A 表示光线入射到晶片上的光振幅, A_e 和 A_o 为从晶片出射时e光和o光的振幅, A_{2e} 和 A_{2o} 分别为e光和o光通过 P_2 后的振幅, N 和 N' 代表两偏振片的偏振化方向,则

(1) 如图2所示, $N \perp N'$, $A_{2e}=A_e \sin\theta=(A \cos\theta) \sin\theta$, $A_{2o}=A_o \cos\theta=(A \sin\theta) \cos\theta$ 。e光在晶体中的折射率为 n_e ,o光在晶体中的折射率为 n_o ,光源的波长为 λ ,晶片的厚度为 d ,显然,通过 P_2 的两束光频率相同、振幅相等且振动方向相同,而两束光的相位差为:

$$\Delta\phi_{\perp} = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e) d + \pi. \quad (1)$$

由(1)式可以看出,相位差与波长 λ 及晶片的厚度 d 有关,故波长一定的光波通过厚度一定的晶体后,其相位差恒定。所以通过偏振片 P_2 后的两束光为相干光,可以产生相应的干涉图样。

(2) 如图3所示, $N \parallel N'$, $A_{2e}=A_e \cos\theta=A \cos^2\theta$, $A_{2o}=A_o \sin\theta=A \sin^2\theta$,通过 P_2 的两束光频率和振动方向相同,而两束光的相位差为:

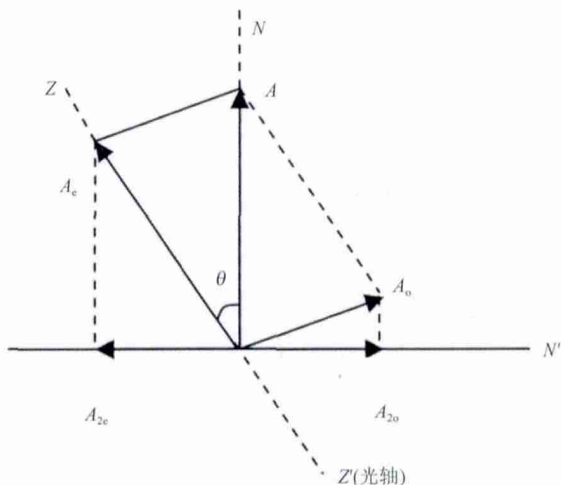


图 2

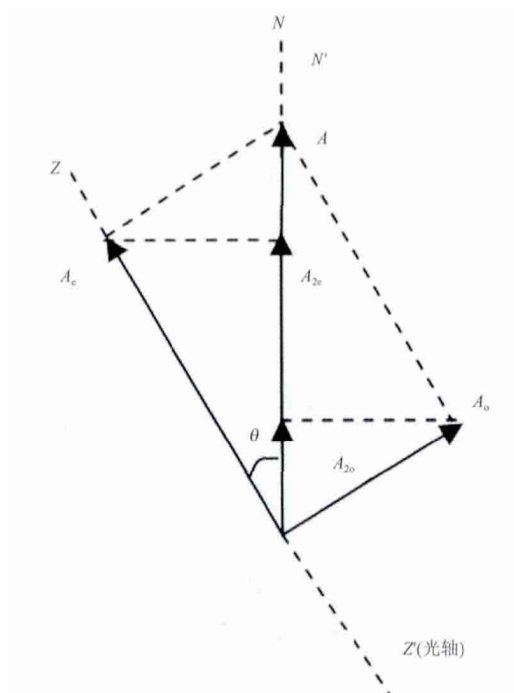


图 3

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

所以一般情况下，两列光的相位差 $\Delta\varphi$ 应包括由两偏振片的透光轴方向引起的相位差和液晶片引起的相位差。

总之，当两偏振片的偏振化方向与晶体厚度固定时，最后出射的两束光的相位差是恒定的。如果用白光照射，不同的波长的光波通过晶体后产生的相位差不同，则干涉的结果将不同，这样即可获得彩色的图样。如果改变两偏振片中某一偏振片的偏振化方向，

两相干光的振幅比例改变，影响干涉可见度，从而改变颜色纯度。

上述的偏振光干涉是透射光干涉，光源和观察者不在同一侧，不仅观看干涉图样不太方便，并且要实现干涉需要两块偏振片。那么，能否实现反射光的干涉？

2. 反射式偏振光干涉

我们用铝箔作为反射镜，用厚度为 d 的透明薄膜作为晶片，将一块偏振片置于铝箔上面，在偏振片与铝箔中间放置透明薄膜。如图 4 所示。自然光通过偏振片成为偏振光，通过透明薄膜后成为 e 光和 o 光，经铝箔反射后再次透过薄膜，经过偏振片后得到两相干光，产生偏振光的干涉现象。

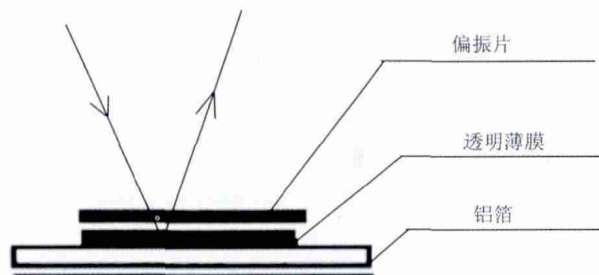


图 4

由于只使用了一块偏振片，相当于前面讨论的两块偏振片的偏振化方向相互平行的情况，所以 $A_{2e}=A\cos^2\theta$ ， $A_{2o}=A\sin^2\theta$ 。且 e 光和 o 光两次通过透明薄膜，最终通过偏振片后的相位差为：

$$\Delta\Phi = 2\Delta\varphi_{//} = \frac{4\pi}{\lambda}(n_o - n_e)d \quad (3)$$

因此，要想使干涉图样呈现出绚丽的颜色，第一，可以通过改变薄膜的厚度 d ，从而使不同波长的光获得干涉加强。第二，从 e 光和 o 光的振幅可知，只有当 e 光和 o 光的振动方向与偏振片的偏振化方向间的夹角 θ 为 45° 时，两光的振幅才相等，某种颜色的干涉可见度最大。当薄膜主光轴与偏振片偏振化方向成 45° 时，某种颜色符合干涉可见度最大条件，此时转动偏振片，干涉可见度逐渐减小，颜色纯度逐渐降低。所以在实际制作中，可以通过改变薄膜的厚度和薄膜与偏振片偏振化方向的夹角来实现颜色的变化。

3. 反射式偏振光干涉彩色显示屏制作过程

材料：一张偏振片（可以从废弃的显示屏中获得

表 1

		不同薄膜厚度下显示的颜色					
厚度 (mm)	0.038	0.040	0.045	0.050	0.051	0.060	0.063
颜色	绿色	黄色	黄紫色	蓝色	紫红色	红色	紫色

或购买), 一张铝箔作为反射面(例如锡箔纸或普通的反射镜), 具有各向异性的透明薄膜若干(例如保鲜膜、透明胶带等)。

(1) 静态显示屏

一张图片的各种颜色就是白光通过不同厚度的薄膜而产生的不同波长的干涉而形成的。表 1 给出了薄膜厚度与颜色的关系。首先根据图形和文字需要表现的颜色, 按照表 1 来选择薄膜的厚度。不同的厚度对应不同的颜色, 然后根据设计好的图样把薄膜裁剪成不同的形状和文字。如何确定从薄膜出射的 o 光、e 光与偏振片偏振化方向的夹角呢? 简单的方法就是将薄膜在偏振片下转动, 当该薄膜对应的颜色最纯时, 则角度为 45° 。把不同形状的薄膜按照设计好的图样分别粘贴在铝箔上的不同区域, 最后放上偏振片, 作品完成。该作品无需特定光源, 在自然光下, 观察者就可以看到彩色的静止画面, 如图 5 所示。



图 5



图 6

(2) 动态显示屏

把粘好图片的铝箔带缠绕在与电机相连的两根轴上, 缠的时候要把作品拉直拉紧, 然后把它们放入一个盒子固定好, 在盒子上盖上偏振片, 接通电源后, 在电机的带动下, 粘好图片的铝箔带开始转动, 如图 6 所示, 偏振片有两块, 其偏振化方向相差 45° , 固定在一个框架上。薄膜图片一部分与右边的偏振片成 45° , 一部分与左边的偏振片成 45° 。当铝箔带转动时, 薄膜图片依次通过两块偏振片, 在左边的偏振片下无色隐藏的图像当移动到右边的偏振片下时以某种颜色显现出来。反过来, 在左边的偏振片下以某种颜色显现的图像移动到右边的偏振片下时无色隐藏了。薄膜图像就这样连续地在偏振片下转动, 交替显示, 从而实现了偏振光干涉的动态演示。

如果完全手工制作的话, 要做颜色很复杂的图, 是很不容易的。如果想要推广应用, 无论是改变薄膜的厚度还是薄膜图案的裁减, 都可以通过机械的方式或者一些先进的仪器, 比如当薄膜经过热处理后, 一块薄膜的不同区域经过不同的热处理和不同的拉伸可以有不同的光轴和厚度, 如果按照一定的图案轮廓来进行热处理和拉伸, 就不用裁减了, 原始图案既没有颜色, 也没有边界, 效果会更完美。

4. 应用

反射式偏振光干涉只用一块偏振片, 使其装置的体积明显减小, 厚度变得薄以后就可以把成品挂起来。该装置无需特定光源, 在自然光漫反射下即可实现干涉彩显。另外由于是反射式使得光源和观察者位于装置的同侧, 所以反射式偏振光干涉比透射式偏振光干涉受到的限制更少, 其应用范围就更广。玩具、工艺品、广告、宣传、魔术、印刷防伪等都可以该实验结果的基础上被开发和应用。

本实验装置在 2009 年北京市大学生物理实验竞赛中获得一等奖。