

晶体电光调制实验中锥光干涉图样的模拟

孔丽晶, 骆万发

(厦门大学物理系, 福建 厦门 361005)

摘要: 根据偏振光干涉原理, 在 Matlab 环境中完成不同情况下单轴晶体锥光干涉图样的光学模型建构和计算机模拟, 其结果图样细致逼真, 使实验所体现的物理过程变得直观形象, 为光学实验教学提供了新的有效的辅助手段。

关键词: 电光调制; 偏振光干涉; 相位差; Matlab

中图分类号: O43

文献标识码: A

文章编号: 1009-7821(2009)02-0040-04

Computer simulation of conoscopic interference patterns in crystal
electro-optical modulation experiment

KONG Li-jing LUO Wan-fa

(Department of Physics, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

Abstract: Conoscopic interference patterns of uniaxial crystal are simulated by using Matlab languages in different conditions based on the theory of polarized light interference. The drawing results are delicate and distinct which make the whole physical process legible and offer a new effective supplementary means for optical experiment teaching.

Key words: electro-optical modulation; the interference of polarized light; Phase difference; Matlab

0 引言

晶体电光强度调制实验是一项基于晶体电光效应的综合性实验. 通过该实验可使学生会掌握会聚偏振光干涉和电光调制通信的基本原理, 培养和锻炼学生的动手能力. 其中, 晶体锥光干涉图样的观察及光强透过率曲线的测量是电光调制实验中两个很重要的实验项目. 实际操作中, 需要利用晶体锥光干涉原理将系统调到最佳工作状态, 因而锥光干涉图样调节的好坏, 将在较大程度上影响后续实验. 然而, 在教学过程中发现, 由于实验所涉及的光学原理比较抽象且对光路调节的技巧性要求较高, 使学生较难调出完整的图像并对实验现象作出正确解释, 容易产生疑虑. 本文基于 Matlab 语言, 模拟出单轴晶体锥光干涉图样, 拓展了实验内容, 加深了学生对偏振光干涉形成原理的理解, 使学生明确图样调节所要达到的要求, 激发了学生的学习兴趣, 使实验教学获得更加满意的效果.

1 晶体锥光干涉图样形成原理

基于铌酸锂晶体 (LN 晶体) 的电光调制实验装置如图 1 所示. LN 晶体是按照其光轴方向进行切割的, 晶面与光轴垂直, x 、 y 光轴的方向已在图上标出. 入射光束通过起偏器 P_1 后成为线偏振光, 此线偏振光进入 LN 晶体后分解为有一定相位差但光振动相互垂直的 o 光和 e 光. 这两束光再通过检偏器 P_2 时, 只有沿 P_2 的偏振化方向的光振动才能通过, 这样就得到两束相干的偏振光. 不同的晶体厚度和入射光倾角, 将使 o 光和 e

收稿日期: 2008-06-04

作者简介: 孔丽晶 (1982-) 女, 福建莆田人, 厦门大学物理系助理工程师.

骆万发 (1951-) 男, 福建厦门人, 厦门大学物理系副教授.

光产生不同的相位差, 从而出现不同的偏振光干涉图样.

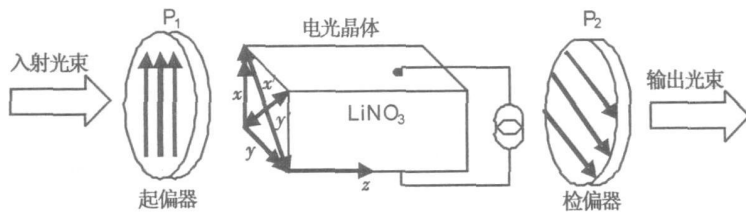


图 1 电光强度调制实验装置示意图

Fig 1 Schematic diagram of crystal electro-optical modulation experiment

2 单轴晶体偏振光干涉图样的模拟

2.1 单色光入射到厚度均匀晶体上的干涉图样

2.1.1 光学模型建构

Matlab是一种具有强大的数值分析、矩阵运算和图象处理能力的计算机编程语言. 基于 Matlab语言对晶体偏振光干涉图样进行模拟, 需要综合实验条件建构模型, 从而对 o光和 e光的相位差以及偏光干涉合成光强作出定量分析.

o光和 e光的相位差由图 2 的二维光学模型求出:

LN晶体不加电场时为单轴晶体, 线偏振光 S在晶体中形成 o光和 e光, 图上分别标为 AB'和 AB'', 它们的折射角分别为标为 θ'_2 和 θ''_2 . 由于 o光和 e光的折射率 n_o 和 n_e 相差很小, 可取 θ'_2 和 θ''_2 的平均数值来表示两光的平均折射角 θ_2 , 用 AB表示两光的平均几何路程, 则有

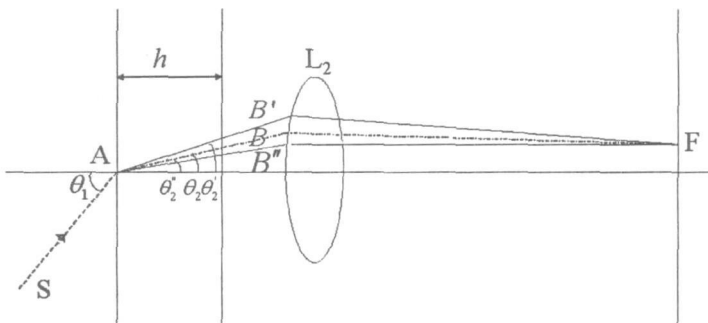


图 2 o光与 e光相位差计算模型

Fig 2 Calculation model of the Phase difference between the o and e ray

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{h}{\cos\theta_2} (n'' - n')$$

其中 λ 为光在真空中的波长, h 为晶体的厚度, n'' 和 n' 分别为振动在晶体两个主振动方向上的光波折射率, δ 与晶体厚度和入射光方向 (θ_2 由入射光方向决定) 有关. 由于 n_o 和 n_e 一般相差不大, 所以有

$$(n'' - n') = \frac{1}{2} n_o^3 \sin^2\theta_2 \left[\frac{1}{n_e} - \frac{1}{n_o} \right]$$

激光的发散角较小, 折射光方向靠近光轴, (1)式中的 $\cos\theta_2 \approx 1$, 则光经过晶体后获得的相位差简化为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{1}{2} n_o^3 \sin^2\theta_2 \left[\frac{1}{n_e} - \frac{1}{n_o} \right] h$$

由 (3) 式知, 当一定频率的光通过厚度均匀的晶体时, 不同倾角的入射光线将落在接收屏上不同半径的圆周上, 从而在屏上 o为常量的轨迹是同心圆^[1]. 由于晶体表面垂直于光轴, 所以在会聚光中央的一条光线与晶体光轴方向一致, 进入晶体后不产生双折射, $\delta = 0$ 对于不平行于光轴的其他光线, 进入晶体都要产生双折射. 当起偏器与检偏器相互垂直时, 由于 o光振动方向应垂直于主截面, e光振动方向应在主截面内, 这样同一圆周上各点的光在通过晶体时, 其振动方向应如图 3 所示.

该图表示垂直光轴的截面, P_1 、 P_2 分别表示起偏器和检偏器的透光方向. 此时干涉合成光强应为

$$I = \frac{I}{2} \sin^2 2\varphi (1 - \cos\delta)$$

式中 $(1 - \cos\delta)$ 因子是 δ 的周期函数, 它说明干涉条纹应该是同心圆; $\sin^2 2\varphi$ 是强度调制因子, 它表明在 $\varphi = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 和 270° 处 $I = 0$ 。 I 反映了接收屏上的明暗分布, 干涉图样由此确定, 即一个清晰的暗十字线, 将整个光场分成均匀的 4 瓣。

2.1.2 计算机模拟锥光干涉图样

模拟参数如下: 激光波长 $\lambda = 550 \text{ nm}$, 该波长下的 LN 晶体折射率 $n_o = 2.29$, $n_e = 2.20^{[2]}$, 晶体规格 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$, 晶体入射面到接收屏的距离 $AF = 0.7 \text{ m}$ 。利用式 (3) 和 (4), 在 Matlab 环境中编程: 首先确定图案在 x, y 方向的范围, 均取 $[-0.03, 0.03]$, 因为干涉花样是在二维平面里对称展开的, 故可在选定的范围内, 在 x, y 两方向上各设 n 个点, 取 $n = 200$ 。然后对于每个点, 由 (3) 式计算 δ , 再由 (4) 式计算合成的光强; 对所有点进行循环计算, 把光强与图像灰度对应起来, 即可绘出单轴晶体锥光干涉图样, 见图 4(a)。通过比照可见, 计算机模拟结果清晰、对称、完整, 与实验干涉图 (图 4(b)) 特征完全一致, 从而强化了学生对锥光干涉的印象。

由于计算机模拟具有参数易调, 不受仪器和实验场所限制的优势, 学生还可以通过自主改变入射光波长、晶体厚度、起偏器和检偏器的夹角等参数, 获得各种情况下不同的干涉图样, 从而选择最优化的组合方案, 避免了反复操作仪器的麻烦。

例如, 在其他实验条件相同的情况下, 改变起偏器和检偏器的夹角, 设置二者相互平行, 仿照上述模拟方法得到仿真图样, 如图 5 所示。这时干涉合成光强为

$$I = I_0 \left[1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\varphi (1 - \cos\delta) \right], \tag{5}$$

且有 $I_{\parallel} + I_{\perp} = I_0$ 。

与图 4 比照看到, $P_1 \parallel P_2$ 时, 干涉光强出现极大值或极小值的条件与 $P_1 \perp P_2$ 时刚好相反, 因而干涉图样呈现互补色, 为被亮十字分割的同心圆环。

2.2 非单色光入射到厚度均匀晶体上的干涉图样

如果入射光是白光, 则 $I_{\text{色}}$ 应是其中每种单色光的干涉强度的非相干叠加。即对每种单色光分别应用 (4)、(5), 然后对所有波长成分求和:^[3]

$$I_{\text{色}} = \sum_i (I_0)_i \sin^2 2\varphi \sin^2 \frac{\delta}{2}$$

$$I_{\text{色}} = \sum_i (I_0)_i - \sum_i (I_0)_i \sin^2 2\varphi \sin^2 \frac{\delta}{2}$$

显然, 不同波长的单色光由于通过晶体后的相位差不同, 所以对射出总光强的贡献不同, $I_{\text{色}}$ 已不包含所有入射光波长, 从而显出不同的色彩。而实际使用的所谓单色光

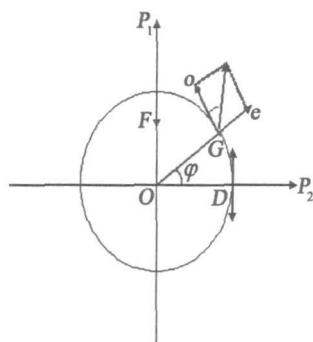
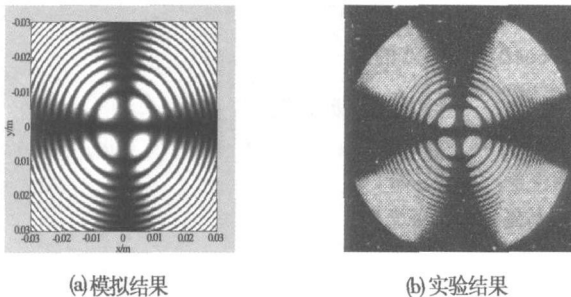


图 3 同一圆周上各点光振动方向示意图 ($P_1 \perp P_2$)
Fig 3 Schematic diagram of direction of vibration for lights on a circle



(a) 模拟结果 (b) 实验结果
图 4 单轴晶体锥光干涉图 ($P_1 \perp P_2$)

Fig 4 Conoscopic interference patterns for a uniaxial crystal ($P_1 \perp P_2$)

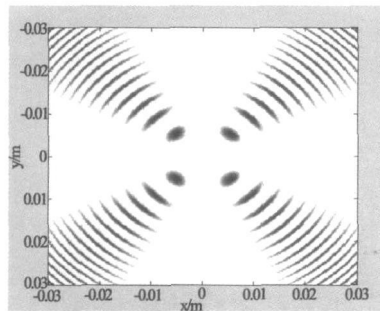


图 5 单轴晶体锥光干涉图 ($P_1 \parallel P_2$)

Fig 5 Conoscopic interference pattern for a uniaxial crystal ($P_1 \parallel P_2$)

源,并不是绝对单色的,它包含有一定的光谱宽度,这种情况也会影响条纹的对比度,因为一定范围内的每种波长的光都生成各自的一组干涉条纹,且各波长光除光轴方向外,相位差都有所不同,条纹间均有位移,所以与光源宽度的影响相似,各组条纹重叠的结果使得条纹对比度下降。^[4]

用 Matlab 模拟非单色光的干涉图样时,选取光谱的相对宽度为 10%,在此范围内,均分 11 根谱线,每根谱线在屏幕上某点的相位差由 (3) 式得出,最后的光强应是这 11 根谱线产生的光强叠加并取平均值,模拟结果见图 6。与图 4、5 比照看到,考虑光源的非单色性后,干涉图样的对比度降低了,干涉条纹出现宽化重合的现象。

2.3 单色光入射到厚度不均晶体上的干涉图样

以上讨论的是晶体厚度均匀的情况,如果换一块厚度不均的晶体,例如模拟波长为 $\lambda = 550 \text{ nm}$ 的单色光正入射到一块劈尖角为 30° 的尖劈形 IN 晶片上,则由于晶片各处厚度 h 不同,相位差 $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (\eta_0 - \eta_1) h$ 也不同,屏上相应点的强度也就不同,于是出现了等厚干涉条纹^[5],见图 7(a)。若增加考虑入射光倾角的因素,则情况更为复杂。由于晶体厚度不均,锥光干涉图样在 x 方向失去了对称性,如图 7(b) 所示。

当然,观察偏振光干涉的方式多种多样,晶体的种类和光轴取向等都可以与这里所述的不同,所得干涉图样也是千变万化的。可引导学生作更深入的思考,进而实现用户界面设计,搭建光学操作平台。

3 结束语

本文用 Matlab 模拟晶体干涉图样,将抽象难懂的光学原理形象直观地多角度展示出来,使学生易于接受,具有良好的教学效果。运用计算机数值计算与仿真技术对物理现象进行模拟,利用仿真结果指导实验,对物理教学现代化有很大帮助。

参考文献:

- [1] 谢建平, 明海, 王沛. 近代光学基础 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005: 221—223
- [2] 廖延彪. 偏振光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 100—108
- [3] 廖延彪. 光学原理与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 264—265
- [4] 毛欲民, 洪家平. 基于 MATLAB 的杨氏双缝干涉实验仿真 [J]. 湖北师范学院学报: 自然科学版, 2007: 27(1): 18
- [5] 赵凯华. 新概念物理教程光学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 314

(责任编辑: 唐诚焜)

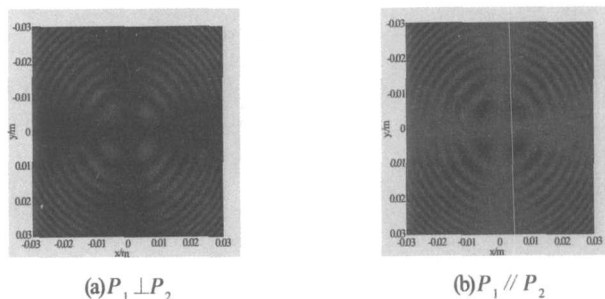


图 6 非单色光干涉图样

Fig 6 Interference patterns of non-monochromatic light

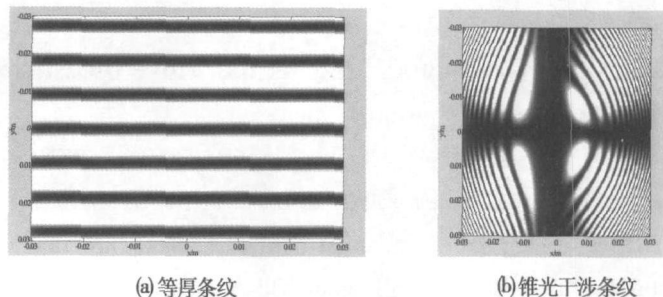


图 7 厚度不均的晶体干涉条纹

Fig 7 Interference patterns of asymmetric thickness for an axial crystal