

贵州大学规划教材
贵州大学教材建设委员会审核批准

现代光学实验教程

Modern Optical Experiment Course

黄伟其 黄忠梅 苗信建 ◇ 编 著
张心正 ◇ 主 审

贵州大学出版社
Guizhou University Press

贵州大学规划教材
贵州大学教材建设委员会审核批准

现代光学实验教程

Modern Optical Experiment Course

黄伟其 黄忠梅 苗信建 ◇ 编 著
张心正 ◇ 主 审

内 容 简 介

本教程注重基础理论的描述、物理图像的构建及其技术脉络的梳理,注意与现代光学的相关课程配合,选取了在现代光学发展的一些重要领域中有代表性和基础性的实验,并吸收了教师们在科学研究中的成果。全书包括光物理效应、激光测量与加工技术、光谱技术、光纤技术、信息光学、非线性光学和应用光学七个单元,共 27 个实验。

本书可作为高等学校相关专业本科生和研究生的现代光学实验等课程教材,也可供从事科学实验的相关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代光学实验教程 / 黄伟其, 黄忠梅, 苗信建编著.

— 贵阳: 贵州大学出版社, 2013.7

· ISBN 978-7-81126-611-5

I. ①现… II. ①黄… ②黄… ③苗… III. ①光学—
实验—高等学校—教材 IV. ①O43-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 176330 号

现代光学实验教程

编 者: 黄伟其 黄忠梅 苗信建

责任编辑: 葛静萍

出版发行: 贵州大学出版社

印 刷: 贵阳佳迅印务有限公司

开 本: 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张: 15.5

字 数: 387 千字

版 次: 2013 年 8 月 第 1 版

印 次: 2013 年 8 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-81126-611-5

定 价: 39.00 元

版权所有 违权必究

本书若出现印装质量问题, 请与本社联系调换

电话: 0851-8292951

序

科学实验是自然科学的根本，是工程技术的基础，大量重要的发现来源于实验和对自然的观察。光学是研究光（电磁波）的行为和性质，以及光和物质相互作用的物理学科。它是物理学中最古老的一门学科，和其他学科一样，也是经过长期的实践，在大量的实验基础上逐步发展和完善的。光学也是当前学科领域中最活跃的前沿阵地之一，具有强大的生命力和不可估量的发展前途。

著名物理学家爱因斯坦于 1916 年发表《关于辐射的量子理论》，提出了受激辐射理论，成为激光理论的核心基础。1960 年，梅曼用红宝石制成第一台可见光的激光器。由于激光具有极好的单色性、高亮度和良好的方向性，因此激光技术及其非线性研究得到了迅速的发展和广泛应用，光学也由此进入了一个新的时期，并成为现代物理学和现代科学技术前沿的重要组成部分。

十七世纪中期，伟大的科学家牛顿进行了著名的色散实验，从此开始了光谱学的发展，并在十九世纪末对推动微观物理学的发展起了极为重要的作用。激光光谱学是自激光技术出现以来，在经典光谱学基础上发展起来的一门新兴的科学技术。该技术使用激光作为光源研究原子和分子的发射光谱、吸收光谱、拉曼光谱学以及非线性效应，已成为深入研究物质微观结构、运动规律及能量转换机制的重要手段。

光学的另一个重要的分支由成像光学、全息术和光学信息处理组成的。将电信理论中使用的傅立叶分析方法移植到光学领域，引入了频谱、空间滤波、载波、线性变换及其相关运算等概念，更新了经典成像光学。再结合全息术和光学传递函数的概念，形成了一个新的学科领域——光学信息处理。光纤通信依据这方面理论的重要成就，已成为现代通信的主要支柱之一，在现代电信网中起着举足轻重的作用。华裔物理学家高锟由于他在光纤领域的特殊贡献被称为“光纤通讯之父”，并荣获 2009 年诺贝尔物理学奖。

为了在教学中进一步加强对学生(包括本科生和研究生)实验技能的培养及其加深对现代光学重要成果的基本了解,贵州大学黄伟其教授等在多年从事实验教学的基础上编著了《现代光学实验教程》。该教程作为专业的光学实验课,包括光物理效应、激光测量与加工技术、光谱技术、光纤技术、信息光学、非线性光学和应用光学七部分。通过独特的教学模式和安排,让学生学会如何去思考物理以及理解现代光学现象与效应。该教程不仅对学习和掌握光学实验的基本知识和方法、培养基本的实验技能和加深对光学理论的理解有重要的意义,而且可广泛激发学生的科研兴趣,提高学生的基本科研素养。

本书可作为高等院校光电子技术及物理等专业研究生和高年级本科生的教材,亦可供有关科技人员参考。

南开大学 张心正

2012年11月

前 言

目前，我们正处于光子信息时代，已经完成以光子为载体的信息传输变革，即实现了光纤通信的全光网过程；正在为实现光子的信息处理与存储等全光化过程而努力；另外，实现科学研究中的检测与制造业上的加工光子化是发展的趋势；若是光子引擎的研究取得突破性进展，则会带来产业和社会经济上的巨大进步。在这个发展过程中，现代光学领域（包括纳米光子物理、激光物理、非线性光学、信息光学和光谱物理等）的研究与进展起着重要的作用。所以，我们应该重视在高等教育中的相关内容与环节。特别是，应该将现代光学理论与光子技术的教学放在重要的地位。

“现代光学实验”是为理工科相关专业本科高年级学生和研究生开设的一门综合性较强的必修实验课程。它配合现代光学中的各门理论课来掌握现代光学主要领域里的新概念和新方法，培养学生严谨的科学作风，使学生学会如何用实验的方法和技能研究科学现象与规律。“现代光学实验”课程在选题的深度和广度上依据科学性与灵活性，注意了以下几点：（1）配合与现代光学密切相关的课程（如光学、电动力学、量子力学、激光、非线性光学、凝聚态光学和信息光学等），安排相关的实验，其中含有深刻的物理思想与新概念，并在现代光学的发展中起到里程碑的作用；（2）在现代光学发展的一些重要领域（如纳米光子物理、激光物理、非线性光学、凝聚态光学、信息光学、光纤光学和光谱物理等），结合学科与专业设置的特点，选取在实验方法与技术上有代表性的实验；（3）考虑吸收一些能反映现代光学发展前沿与应用的实验，注意吸收最近的一些科学研究成果。

“现代光学实验教程”含七个单元共 27 个实验项目，可根据实际的教学需求进行取舍。这些实验项目在光子信息和物理等专业的本科高年级学生、凝聚态物理及光学等专业的研究生中开设过。第一单元光物理效应含五个实验项目，涉及光子与物质相互作用所表现出的几个有名的物理效应，包含了很多深刻的物理思想，在现代光学的发展中起了重要的作

用。第二单元激光测量与加工技术含六个实验项目，其中有激光的基础和应用研究实验，涉及科学研究中的激光检测与制造业上的激光加工实验；特别是 PLA 与 PLD 复合加工技术是前景很好的实验技术。第三单元光谱技术含五个实验项目，将激光技术与光电子技术结合起来应用于物质的成分及结构的检测和分析上；特别是 PL 与 EL 复合检测技术体现了光子检测新的应用方向。第四单元光纤技术含三个实验项目，主要涉及目前光纤通信工程中的波分复用技术和光纤通信参量检测技术；并选取了有很好的发展趋势的光纤传感技术实验。第五单元信息光学含两个实验项目，主要涉及以光子为手段的信息记录和信息处理技术实验，注意到电子全息的发展新方向。第六单元非线性光学含两个实验项目，其中倍频与和频的实验是典型的二阶非线性光学效应实验，广泛地应用于激光波长的拓展；非线性光学 Z 扫描实验是典型的三阶非线性光学效应实验，在各种样品的非线性折射率特性分析中有重要的应用。第七单元应用光学含四个实验项目，涉及在太阳能光伏业、微波光学、光电定向和光栅技术等应用方向上的实验。

本教程在编著过程中得到很多教师的指导与帮助，例如唐延林、童红和陈四国等教授提出不少宝贵的建议，特此表示感谢。

现代光学实验紧随时代的发展，会不断地改进与提高，在面向世界和面向未来的高等教育中将发挥重要的促进作用。

贵州大学 黄伟其

2012 年 12 月

目 录

单元一 光物理效应.....	1
1.1 电光效应实验.....	1
1.2 声光效应实验.....	10
1.3 法拉第磁光效应实验.....	18
1.4 光泵磁共振实验.....	23
1.5 液晶的电光效应及其计算全息应用.....	31
单元二 激光测量与加工技术.....	41
2.1 光拍法测量光速.....	41
2.2 He-Ne 激光器的模式测量与分析.....	48
附实验 He-Ne 激光器的调试.....	57
2.3 椭圆偏振法测量薄膜厚度与折射率.....	60
2.4 Nd:YAG 调 Q 激光器的装调.....	68
2.5 Nd:YAG 调 Q 激光器的参数测量.....	75
2.6 PLA 与 PLD 技术.....	82
单元三 光谱技术.....	93
3.1 激光拉曼光谱.....	93
3.2 氢氘光谱.....	102
附实验 WGD-8/8A 多功能高分辨光栅光谱仪.....	107
3.3 吸收光谱.....	115
3.4 光电转换器特性及其参数测量.....	123
3.5 PL 光谱和 EL 光谱.....	134
单元四 光纤技术.....	142
4.1 模拟光纤通信.....	142
4.2 数字光纤通信.....	148
4.3 光纤传感技术.....	158
单元五 信息光学.....	167
5.1 激光全息技术.....	167
5.2 光学信息处理.....	176

单元六 非线性光学.....	186
6.1 非线性晶体中的倍频与和频.....	186
6.2 非线性光学 Z 扫描测量方法.....	196
单元七 应用光学.....	204
7.1 太阳能电池的特性测量.....	204
7.2 微波光学.....	212
7.3 光电定向实验.....	218
7.4 光栅技术.....	223
附录.....	233
附录 A 国际单位制(SI).....	233
附录 B 基本物理常量.....	235
附录 C 常温下某些物质相对于空气的光折射率.....	236
附录 D 常用光源的谱线波长.....	237
附录 E 典型气体激光器基本实验数据.....	238
附录 F 典型固体激光工作物质参数.....	239
参考文献.....	240

单元一 光物理效应

1.1 电光效应实验

电光效应在工程技术和科学研究中有许多重要应用，如可以制成光相位调制器、光开关、光滤波器和光衰减器等。在激光出现以后，电光效应的研究和应用得到迅速的发展，电光晶体被广泛应用在激光通信、激光测距、激光显示和光学数据处理等方面，特别是利用电光效应对激光通信进行模拟信号和数字信号的电光调制上有很好的应用。现在电光效应的测量已成为研究电光晶体、液晶、功能有机分子和聚合物的一种重要手段。

本实验主要研究 LiNbO_3 晶体的电光效应，分别采用不同方法测量晶体的半波电压值并得出电光系数。通过本实验，可进一步理解物理光学和晶体光学中的相关基础知识，学会用简单的实验装置测量晶体半波电压，掌握测量晶体样品相位差的方法。

一、实验原理

由电场所引起的晶体折射率的变化，称为电光效应。通常可将电场引起的折射率的变化用下式表示：

$$n = n_0 + aE_0 + bE_0^2 + \dots \quad (1.1.1)$$

其中 a 和 b 为常数， n_0 为不加电场时晶体的折射率。由一次项 aE_0 引起折射率变化的效应，称为一次电光效应，也称泡克耳(Pockels)效应；由二次项 bE_0^2 引起折射率变化的效应，称为二次电光效应，也称克尔(Kerr)效应。一次电光效应只存在于不具有对称中心的晶体中。二次电光效应存在于所有的电介质中，数值上远小于一次电光效应。

1. 一次电光效应的一般描述

当光在各向异性晶体中传播时，因光的传播方向不同或者电矢量的振动方向不同，光的折射率也不同。通常采用折射率椭球的方法，描述折射率与光的传播方向和电矢量振动方向的关系。在主轴坐标系中，以晶体的 x 、 y 和 z 三个主轴为坐标，折射率椭球方程为

$$\frac{x^2}{n_1^2} + \frac{y^2}{n_2^2} + \frac{z^2}{n_3^2} = 1 \quad (1.1.2)$$

式中 n_1 、 n_2 和 n_3 为椭球三个主轴方向上的折射率，称为主折射率。折射率椭球如图 1.1.1 所示。

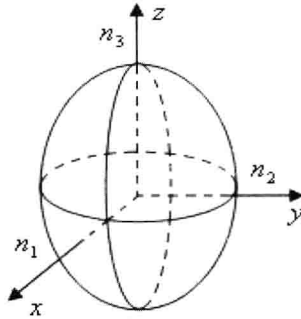


图 1.1.1 折射率椭球

当晶体加上电场后，折射率椭球的形状、大小和方位都发生变化，椭球方程变成

$$\frac{x^2}{n_{11}^2} + \frac{y^2}{n_{22}^2} + \frac{z^2}{n_{33}^2} + \frac{2yz}{n_{23}^2} + \frac{2xz}{n_{13}^2} + \frac{2xy}{n_{12}^2} = 1 \quad (1.1.3)$$

只考虑一次电光效应，晶体的一次电光效应分为纵向电光效应和横向电光效应两种。纵向电光效应是加在晶体上的电场方向与光在晶体里传播的方向平行时产生的电光效应；横向电光效应是加在晶体上的电场方向与光在晶体里传播方向垂直时产生的电光效应。通常 KD^*P 类型的晶体用它的纵向电光效应， $LiNbO_3$ 类型的晶体用它的横向电光效应。本实验主要研究铌酸锂晶体的横向电光效应。

2. $LiNbO_3$ 型晶体的一次电光效应

铌酸锂型晶体属于三角晶系、3M 晶类，如图 1.1.2 所示，主轴 z 方向有一个三次旋转轴，光轴与 z 轴重合，均为单轴晶体。

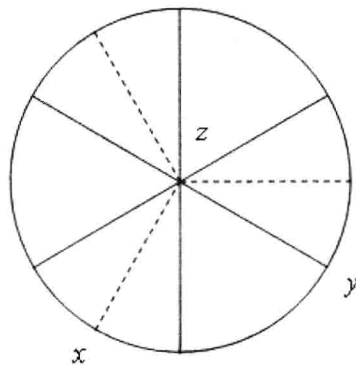


图 1.1.2 3M 晶类对称元素

下面讨论光束平行于晶体 z 轴方向传播和外加电场在晶体 y 轴方向的横向电光效应。折射率椭球方程为

$$\left(\frac{1}{n_0^2} - \gamma_{22}E_y\right)x^2 + \left(\frac{1}{n_0^2} + \gamma_{22}E_y\right)y^2 + \frac{z^2}{n_e^2} + 2\gamma_{51}E_yzy = 1 \quad (1.1.4)$$

由上式看出，在 y 轴方向加电场后，晶体由单轴晶体变成双轴晶体，在 $z = 0$ 处并垂直于 z 轴的椭球截面由圆变为椭圆，这个椭圆的方程为

$$\left(\frac{1}{n_0^2} - \gamma_{22}E_y\right)x^2 + \left(\frac{1}{n_0^2} + \gamma_{22}E_y\right)y^2 = 1 \quad (1.1.5)$$

椭圆的长轴和短轴仍在 x 、 y 方向，即加电场后的感应轴 x' 、 y' 和未加电场时的 x 轴、 y 轴重合，椭圆的长短半轴长度 $n_{x'}$ 和 $n_{y'}$ 分别为

$$\frac{1}{n_{x'}^2} = \frac{1}{n_0^2} - \gamma_{22}E_y, \quad \frac{1}{n_{y'}^2} = \frac{1}{n_0^2} + \gamma_{22}E_y \quad (1.1.6)$$

由于 $n_0^2\gamma_{22}E_y \ll 1$ ，化简后可得

$$n_{x'} = n_0 + \frac{1}{2}n_0^3\gamma_{22}E_y, \quad n_{y'} = n_0 - \frac{1}{2}n_0^3\gamma_{22}E_y \quad (1.1.7)$$

折射率椭球截面的椭圆方程变为

$$\frac{x'^2}{n_{x'}^2} + \frac{y'^2}{n_{y'}^2} = 1 \quad (1.1.8)$$

沿着 z 轴方向传播的光，两个偏振成分的相位差 Φ 为

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_{x'} - n_{y'})l_z = \frac{2\pi n_0^3\gamma_{22}l_z V_y}{\lambda d_y} \quad (1.1.9)$$

上式中 $V_y = E_y d_y$ 为晶体 y 轴方向上所加的直流电压， d_y 为该方向上晶体的厚度， l_z 为光传播方向上晶体的长度。半波电压 V_π 为

$$V_\pi = \frac{\lambda}{2n_0^2\gamma_{22}} \frac{d_y}{l_z} \quad (1.1.10)$$

将式(1.1.10)代入式(1.1.9)，得到

$$\Phi = \frac{\pi V_y}{V_\pi} \quad (1.1.11)$$

而光电系数 γ_{22} 为

$$\gamma_{22} = \frac{\lambda}{2n_0^2 V_\pi} \frac{d_y}{l_z}$$

由式(1.1.10)可知，横向电光效应的半波电压与晶体的尺寸有关，减小电场方向的晶体

厚度或增加光传播方向的晶体长度，可以降低半波电压，这是横向电光效应的优点。

3. 电光调制原理

图 1.1.3 是利用 LiNbO_3 晶体横向电光效应原理的激光振幅调制器，其中起偏器的偏振方向平行于电光晶体的 x 轴，检偏器的偏振方向平行于电光晶体的 y 轴。因此，入射光经起偏器后变为振动方向平行于 x 轴的线偏振光。

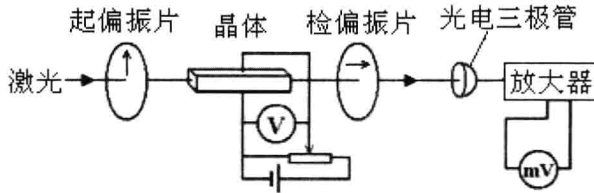


图 1.1.3 晶体横向电光调制器结构示意图

当在晶体 x 方向加上电场时，折射率椭球绕 z 轴旋转了 45° 角，其感应轴为 x' 和 y' 。入射光位于晶体表面 ($z=0$) 的光波用复振幅表示为

$$E_x(0) = A, E_y(0) = 0 \quad (1.1.12)$$

入射光的强度

$$I_i \propto \vec{E} \cdot \vec{E}^* = |E_x(0)|^2 + |E_y(0)|^2 = 2A^2 \quad (1.1.13)$$

当光通过长为 l 的电光晶体后，由于 x' 方向和 y' 方向上的折射率不同，因此 x' 和 y' 两分量之间就产生相位差 δ ，即

$$E_x(l) = A, E_y(l) = Ae^{-i\delta} \quad (1.1.14)$$

通过检偏振片出射的光，是该两分量在 y 轴上的投影之和

$$(E_y)_0 = \frac{A}{\sqrt{2}}(e^{i\delta} - 1)$$

其对应的输出光强 I_t 可写成

$$I_t \propto [(E_y)_0 \cdot (E_y)_0^*] = \frac{A^2}{2} [(e^{-i\delta} - 1)(e^{i\delta} - 1)] = 2A^2 \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (1.1.15)$$

由式(1.1.13)和式(1.1.15)，光强透过率 T 为

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (1.1.16)$$

由式(1.1.7)，得

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{x'} - n_{y'}) l = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{22} U \frac{l}{d} \quad (1.1.17)$$

式中， d 为加电场方向上的晶体厚度； U 为加在晶体 x 方向上的电压； $E = U/d$ 。由此可见， δ 和 U 成正比关系。当电压增加到某一值时， x' 、 y' 方向的偏振光经过晶体后产生 $\lambda/2$ 的光

程差，即相位差 $\delta = \pi$ 时，由式(1.1.16)可知此时光强透过率 $T = 100\%$ ，这时加在晶体上的电压称作半波电压，通常用 U_π 表示。 U_π 是描述晶体电光效应的重要参数。在实验中，这个电压越小越好，如果 U_π 小，需要的调制信号电压也小。根据半波电压值，我们可以估计出电光效应控制透过强度所需电压。由式(1.1.17)可得到

$$U_\pi = \frac{\lambda}{2n_0^3\gamma_{22}} \left(\frac{d}{l} \right) \tag{1.1.18}$$

其中 d 和 l 分别为晶体的厚度和长度。由此可见，横向电光效应的半波电压与晶片的几何尺寸有关。由式(1.1.18)可知，如果使电极之间的距离 d 尽可能地减少，而增加通光方向的长度 l ，则可以使半波电压减小，所以晶体通常加工成细长的扁长方体。由(1.1.17)、(1.1.18)式可得

$$\delta = \pi \frac{U}{U_\pi} \quad \delta = \pi \frac{U}{U_\pi}$$

因此，可将(1.1.16)式改写成

$$T = \sin^2 \frac{\pi}{U_\pi} U = \sin^2 \frac{\pi}{U_\pi} (U_0 + U_m \sin \omega t) \tag{1.1.19}$$

其中 U_0 是加在晶体上的直流电压， $U_m \sin(\omega t)$ 是同时加在晶体上的交流调制信号， U_m 是其振幅， ω 是调制频率。从式(1.1.19)可以看出，改变 U_0 或 U_m ，输出特性将相应地有所变化。对单色光和确定的晶体来说， U_π 为常数，因而 T 将仅随晶体上所加的电压变化。如图 1.1.4 所示， T 与 U 的关系是非线性的。若工作点选择不合适，会使输出信号发生畸变。但在 $U_\pi/2$ 附近有一近似直线部分，称为线性工作区。

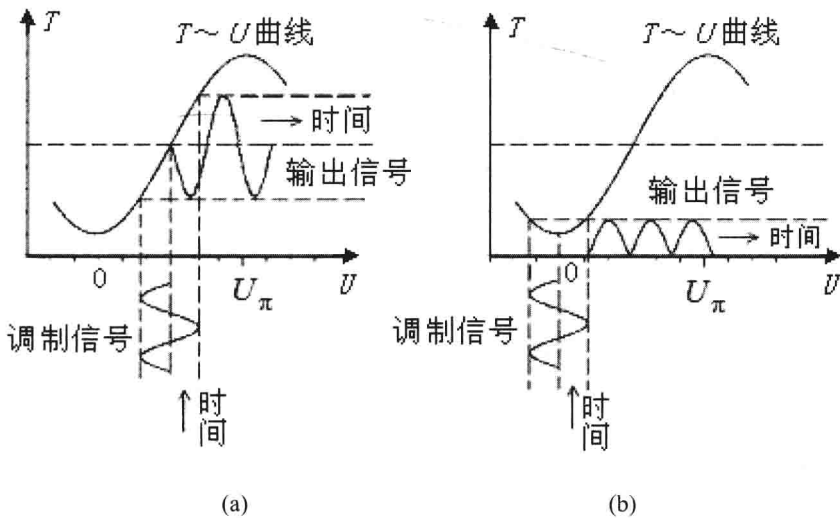


图 1.1.4 调制曲线

二、实验装置

电光调制实验装置，包括：电光调制电源、接收放大器、He-Ne 激光器、双踪示波器和万用表等。电光调制实验装置方框图如图 1.1.5 所示。

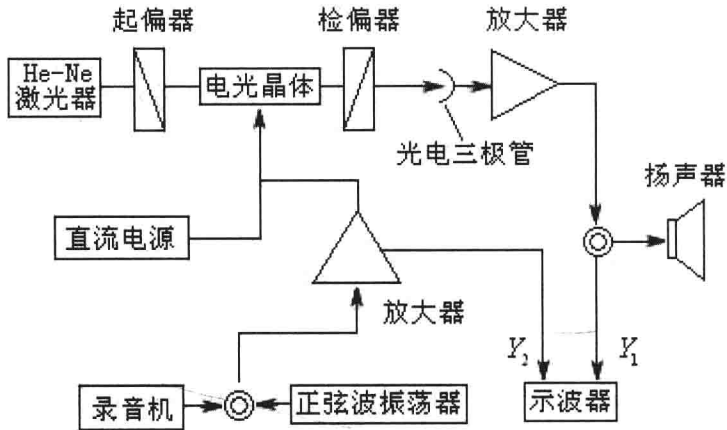


图 1.1.5 电光调制实验装置

(1) 晶体电光调制电源

调制电源由 $-200\text{V} \sim +200\text{V}$ 之间连续可调的直流电源、单一频率振荡器(振荡频率约为 1kHz)、音乐片和放大器组成，电源面板上有数字面板表，可显示直流电压值。晶体上加的直流电压的极性可以通过面板上的“极性”键改变，直流电压的大小用“偏压”旋钮调节。调制信号可由机内振荡器或音乐片提供，此调制信号是用装在面板上的“信号选择”键来选择三个信号中的任意一个信号。所有的调制信号的大小都是通过“幅度”旋钮控制的。通过前面板上的“输出”插孔输出的参考信号，接到双踪示波器的一个通道与被调制后的接收信号比较，观察调制器的输出特性。

(2) 调制器

调制器由三个可旋转的偏振片、一个可旋转的 $1/4$ 波片和一块铌酸锂晶体组成，采用横向调制方式。晶体放在两个正交的偏振片之间，起偏振片和晶体的 x 轴平行。检偏振片和晶体之间可插入 $1/4$ 波片，偏振片和波片均可绕其几何轴旋转。晶体放在四维调节架上，可精细调节，使光束沿晶体光轴方向通过。

(3) 接收放大器

接收放大器由 3DU 光电三极管和功率放大器组成。光电三极管把被调制过的氦氖激光经光电转换，输入到功率放大器上，放大后的信号接到双踪示波器，同参考信号比较，观察调制器的输出特性。交流信号输出的大小通过“交流输出”旋钮调节。放大器内装有扬声器，用来再现声音调制信号。放大器面板上还有“直流输出”插孔，接到万用表的 200mV

直流电压档，用于测量直流输出光强，绘出铌酸锂电光特性曲线。

三、实验内容与步骤

1. 光路调节

调节激光管使激光束与晶体调节台上表面平行，同时使光束通过各光学元件中心。调节起偏振片和检偏振片正交，且分别平行于 x 轴和 y 轴，放上晶体后各器件要细调。精细调节是利用单轴晶体的锥光干涉图样的变化完成的。由于晶体的不均匀性，在检偏振片后面的白屏上可看到一弱光点，然后紧靠晶体前放一张镜头纸，这时在白屏上可观察到单轴晶体的锥光干涉图样，如图 1.1.6 所示。

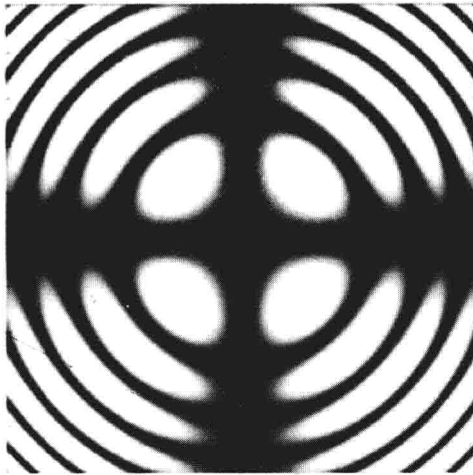


图 1.1.6 单轴晶体的锥光干涉图样

一个暗十字图形贯穿整个图样，四周为明暗相间的同心干涉圆环，十字形中心同时也是圆环的中心，它对应着晶体的光轴方向，十字形方向对应于两个偏振片的偏振轴方向。在观察过程中要反复微调晶体，使干涉图样中心与光点位置重合，同时尽可能使图样对称与完整，确保光束既与晶体光轴平行，并从晶体中心穿过。再调节使干涉图样出现清晰的暗十字，且十字的一条线平行于 x 轴。这一步调节很重要，调节的好坏，直接影响下一步的测量，因此，一定要耐心，仔细调节。

2. 观察晶体的会聚偏振光干涉图形

把输入光强调到最大(这时放大器电源应关掉，光电管不能对准 He-Ne 激光器的光斑，以免烧坏)，从屏上可看到干涉图形。当偏压为零时，呈现单轴晶体的锥光干涉图；当加上偏压时，呈现双轴晶体的锥光干涉图；当两个偏振光正交和平行时，干涉图形是互补的。当改变偏压的正负极性时，干涉图形旋转 90° 。只改变偏压的大小，干涉图形不旋转，只是双曲线分开的距离发生了变化。这一现象说明外加电场只改变感应轴方向的主折射率的

大小，而折射率椭球旋转的角度和电场大小无关。

3. 测定铌酸锂晶体的透过率

测定铌酸锂晶体的透过率曲线(即 $T \sim U$ 曲线)，求出半波电压 U_{π} ，根据式(1.1.18)算出电光系数 γ_{22} ，并和理论值比较(理论值 $\gamma_{22} = 3.4 \times 10^{-12} \text{ m/V}$)。

(1) 用极值法测量铌酸锂晶体的半波电压

晶体上只加直流电压，不加交流信号，把直流电压从小到大逐渐改变，输出的光强将会出现极小值和极大值，相邻极小值和极大值对应的直流电压之差即是半波电压 U_{π} 。

具体做法是：取出白屏，接收器对准激光输出光点，加在晶体上的电压从零开始，每隔 20V 测一次光强，直流偏压值在电源面板上的数字表上读出。放大器直流输出接到万用表上，旋转起偏器前的减光片，使最大输出不超过 200mV。为了曲线画得更好，在透过率曲线的极小值或极大值附近每隔 10V 测一次，列表记录数据，用坐标纸画 $T \sim U$ 关系曲线。改变偏压极性，将电源面板上的电源极性拨到反向，此时面板表上的指示出现“—”时，再测量一组数据，曲线上两个极大值之间对应的电压为两倍半波电压，这样测量可减小测量误差，并计算电光系数 γ_{22} 。

(2) 用调制法测量铌酸锂半波电压

晶体上同时加上直流电压和交流信号，与直流电压调到输出光强出现极小值或极大值对应的电压值时，输出的交流信号出现倍频失真，与出现相邻倍频失真对应的直流电压之差就是半波电压。

具体做法是：按下电源面板上“正弦”键，把电源前面板上的调制信号“输出”接到二踪示波器的 CH_2 上，把放大器的调制信号接到示波器的 CH_1 上，把 CH_1 和 CH_2 上的信号做比较，调节直流电压，当晶体上加的直流电压到某一值 U_1 时，输出信号出现倍频失真，再调节直流电压，当晶体上加的直流电压到另一值 U_2 时，输出信号又出现倍频失真，相继两次出现倍频失真时对应的直流电压之差 $U_2 - U_1$ 就是半波电压 U_{π} 。这种方法比极值法更精确，因为用极值法测半波电压时，很难准确地确定 $T \sim U$ 曲线上的极大值或极小值，因而其误差也较大。

4. 观察调制特性

改变直流偏压，选择不同的工作点，观察正弦波电压的调制特性。电源面板上的信号选择按键开关可以提供三种不同的调制信号，按下“正弦”键，机内单一频率的正弦波振荡器工作，产生正弦信号，此信号经放大后，加到晶体上，同时，通过面板上的“输出”孔，输出此信号，把它接到双踪示波器的 CH_1 上，作为参考信号。改变直流偏压，使调制器工作在不同的状态，把被调制信号经光电转换、放大后接到二踪示波器的 CH_2 上，与 CH_1 上的参考信号比较。选择不同的工作点，观察接收信号的波形并画出图形。

工作点选定在曲线的直线部分，即 $U_0 = U_{\pi}/2$ 附近时是线性调制；工作点选定在曲线的