
光学实验讲义

南京航空航天大学应用物理系

二零一零年二月

目 录

（一）基础光学实验

实验 1 组装望远镜和显微镜	1
实验 2 薄透镜焦距测定	6
实验 3 孔径光阑、视场光阑和景深实验	14
实验 4 透镜像差观测	18
实验 5 光具组基点的测定	29
实验 6 线阵CCD原理与测量实验	34
实验 7 面阵CCD原理与测量实验	44
实验 8 光敏二极管、光敏三极管特性实验	52
实验 9 偏振光学实验	56
实验 10 光纤光栅传感实验	63
实验 11 散斑照相测量技术	73

（二）现代光学实验

实验 12 高斯光束参数测量及透镜变换实验	80
实验 13 氦氖激光器模式分析实验	88
实验 14 Nd^{3+} :YAG脉冲激光器电光调Q与倍频实验	93
实验 15 LED/LD的光学和电学特性测试实验	104
实验 16 单光子计数及生物超微弱光子辐射的测量	111
实验 17 条纹投影三维面形测量实验	116
实验 18 电光、声光与磁光调制系列实验	124
实验 19 调制偏振光相位延迟测量实验	146
实验 20 椭圆偏振法测薄膜厚度	154
实验 21 激光全息干涉振动分析	162
实验 22 全息无损检验实验	167
实验 23 光纤信息及光通信系列实验	174
实验 24 真空镀膜	192

实验 1 自组望远镜和显微镜

引言

人眼无法分辨极远处或近而细微的物体细节，在一般照明情况下，正常人的眼睛在明视距离（25 cm）能分辨相距约 0.05 mm 的两个光点，当两光点间距离小于 0.05 mm 时，即无法分辨，我们把这个极限称为人眼的分辨本领，这时两光点对人眼球中心的张角约为 $1'$ ，这张角称为视角，观察物体要想能分辨细节，最简单的方法是使视角扩大，显微镜和望远镜就是常用的扩大人眼视角的目视光学仪器。故对这两种光学仪器的原理、结构和特点应该有一个基本的了解。本实验是要学生利用光学元件（如透镜等）自行组成最基本结构的望远镜和显微镜。

一、实验目的

- 1、了解透镜成像规律，掌握望远镜、显微镜系统的成像原理。
- 2、根据几何光学原理、透镜成像规律和实验参数要求，设计望远镜、显微镜的光路，提出光学元件选用方案，并通过光路调整，达到显微和望远镜的实验要求，从而掌握显微镜和望远镜技术。
- 3、了解投影仪的工作原理，自行设计投影仪的光路，并实现投影仪的设计。

二、实验原理

1、望远镜的结构和成像原理

望远镜是用来观察远距离目标的目视光学仪器，通常是物镜 L_1 和目镜 L_2 组成，如图 1.1 所示，物镜的作用是将无穷远物体发出的光经会聚后在它的像方焦面上生成一倒立实像，然后经目镜把实像放大，因此实像同时位于目镜的物方焦面内侧，用望远镜观察不同位置的物体时，只须调节物镜和目镜的相对位置，使中间实像落在目镜物方焦面上，这就是望远镜的“调焦”，一般测量望远镜除物镜和目镜可在镜筒中作相对移动外，在目镜物焦方面上还附有叉丝或标尺分划格，如图 1.2 所示。因此在使用望远镜时，首先应调节目镜，直到能清晰地看到叉丝为止，然后调目镜和叉丝整体（即目镜筒）与物镜之间的距

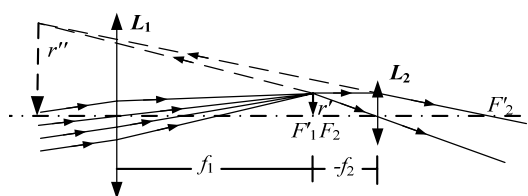


图 1.1 望远镜成像

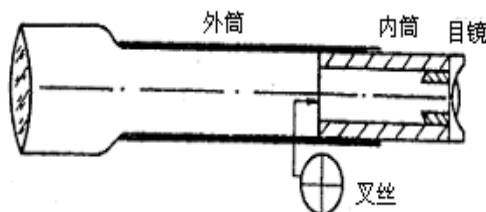


图 1.2 望远镜结构

离即对被观察物调焦。

对于望远镜来说，除了满足以上物像位置的要求外，它的视角放大率必须大于 1。对于目视光学仪器的视角放大率 M ，定义为眼睛通过仪器观察时，物体的像对人眼的张角 ω' 的正切与眼睛直接观察物体时，物体对眼睛的张角 ω 的正切之比。由于物方和像方都位于无穷远处，这个放大率就是系统本身的像方视场角与物方视场角的正切之比：

$$M = \frac{\tan \omega'}{\tan \omega} \quad (1.1)$$

望远镜系统主要有两种情况，一种是具有正光焦度目镜，即目镜 L_2 是会聚透镜的系统，称为开普勒望远镜，如图 1.1 所示；另一种是具有负光焦度目镜，即目镜 L_2 是发散透镜的系统，称为伽利略望远镜。实际应用的几乎都是开普勒望远镜。

对于开普勒望远镜，有

$$M = \frac{\tan \omega'}{\tan \omega} = -\frac{f_1'}{f_2'} \quad (1.2)$$

公式中的负号表示开普勒望远镜成倒像。若要使 M 的绝对值大于 1，应有 $f_1' > f_2'$ 。

对于伽利略望远镜（目镜 L_2 是发散透镜），视角放大率为正值，成正像。

此外，由于光的衍射效应，制造望远镜时，还必须满足：

$$M = \frac{D}{d} \quad (1.3)$$

式中 D 为物镜的孔径， d 为目镜的孔径，否则视角虽放大，但不能分辨物体的细节。

3、显微镜的成像原理

显微镜是用来观察近距离微小目标或目标的微观结构的目视光学仪器，其主光学系统是由物镜和目镜两个共轴光学系统组成，图 1.3 即为显微镜的成像原理图。物体 r 首先经过物镜在目镜的物方焦平面上生成一个倒立的放大实像 r' ，再经过目镜放大成正立像 $1''$ 于无穷远处或明视距离处，供眼睛观察。由于显微镜目镜的成像光束是被物镜限制了，因此眼睛观察时必须有一个固定的位置。

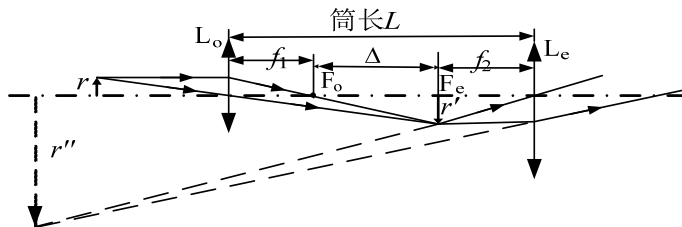


图 1.3 显微镜成像

显微镜的总放大率为物镜线放大率 M_o 和目镜视角放大率 M_e 的乘积。这里

$$M_o = -\frac{\Delta}{f_1'} \quad M_e = \frac{250}{f_2'} \quad (1.4)$$

式中 $\Delta = \overline{F_o F_e}$ 为物镜和目镜之间的光学间隔，亦称为光学筒长； f_1' 为物镜的焦距， f_2' 为目镜的焦距

因此，显微镜的总放大率 M 为：

$$M = -\frac{250}{f_2'} \cdot \frac{\Delta}{f_1'} \quad (1.5)$$

式中各量的单位是毫米。

显然，显微镜的放大率与光学筒长成正比，与物镜和目镜的焦距成反比，且 $M < 0$ ，即对物体成倒像。

显微镜的物镜和目镜各有数只组成一套，通常物镜有四只，倍率分别为 4，10，40 和 100，都装在镜筒下面的物镜旋转器上，可以通过旋转方便地选用。目镜通常有三只，倍率分别为 5，10 和 15，是插入式的。这样，总共可以获得自低倍到高倍的 12 种倍率。物镜和目镜的倍率一般分别标注在物镜和目镜的镜筒上。

显微镜的目镜和物镜的支承面之间的距离 L 称为显微镜的机械筒长。由图 1.3 可知

$$L = f_1' + \Delta + f_2' \quad (1.6)$$

大量生产的生物显微镜的机械筒长都是按标准值设计的，此标准各国不同，一般在 160~190 mm 之间。我国标准为生产 160 mm。筒长固定后，实际上显微镜的调焦是调节被测物与物镜的距离。

为了避免长时间使用显微镜而导致两眼不均衡的疲劳，现代的观察显微镜多半设计为双目镜式。此时须利用反射棱镜将物镜射出的成像光束分为两路，并应保证具有相等的光程。此外，如使物体经过显微镜所成的像位于目镜的物方焦点之外，还可将倍数放大的实像显示在投影屏上，或将其用摄影方法记录下来。这样，可得到实验中测量显微镜的放大率的简单方法：将实像成在明视距离处，并在距目镜 250 mm 处与实像平行放一米尺，利用比较法测出像 Y' 的长度，假设物长为 Y ，则可计算得到显微镜的放大率为 $M=Y'/Y$ 。

三、实验装置

光学平台、带调节架的底座、透镜（焦距不等）、激光光源、白屏、微尺、毫米尺、带底座的米尺等。

四、实验内容

在进行组装望远镜、显微镜实验过程中，有两点操作必须注意：

(1) 光学元件的同轴等高调节

同轴等高是指各元件的光心均位于同一光轴上，且光轴与光学平台平行。透镜成像公式是在近轴条件下成立，利用成像公式进行实验，应满足近轴条件，因此，为获得准确测量，

必须进行同轴等高的调节。

调节的方法是：先粗调，用眼睛判断，上下左右观察，调节各元件光心同轴，物面、像屏面与光学平台垂直，然后，以透镜成像规律为依据，利用共轭原理进行仔细调节。

(2) 用左右逼近法确定清晰像位置

由于人眼观察成像有一分辨极限存在，因此用眼观察物体通过透镜成像时，在一小段范围内像都是清晰的，为了消除系统误差，故采用左右逼近法确定成像位置，即使像屏或透镜从左至右移动，当刚好呈现清晰像时，读出位置 X' ；再将像屏或透镜从右至左移动，同样当再次出现清晰像时，记下位置 X'' ，显然成清晰像位置为

$$X = \frac{x' + x''}{2}$$

1、自组望远镜

- (1) 在坐标纸上按合适的比例画出组装的望远镜成像光路图
- (2) 从两个透镜（焦距分别为 45 mm，225 mm）中选择一个作物镜，另一个作目镜，在光具座上组装望远镜，并进行调焦观察。
- (3) 将装有物镜、目镜的二维架装在三维平移底座上，置于光学平台上，按照光路图组成开普勒望远镜，向约 3 m 远处的标尺调焦，并对准两个红色指标间的“E”字（距离 $d_1=5$ cm）。
- (4) 用另一只眼睛直接注视标尺，经适应性练习，在视觉系统获得被望远镜发大的和直观的标尺的叠加像，再测出放大的红色指标内直观标尺的长度 d_2 。
- (5) 求出望远镜的测量放大率 $M=d_2/d_1$ ，并与理论值比较。
- (6) 对结果进行误差分析。

2、自组显微镜

- (1) 在坐标纸上按合适的比例画出组装的显微镜成像光路图。
- (2) 从两凸透镜（焦距分别为 45 mm，34 mm）中选择一个作物镜，一个作目镜。
两镜相距 250 mm 固定镜筒长。沿米尺移动靠近光源的微尺 M_1 （1/10 分划板），使在目镜中能观察到清晰的放大微尺像。
- (3) 在目镜之后 25 mm 处放置观察屏，微调微尺的位置，消除视差，使在观察屏上能观察到清晰的微尺像。
- (4) 利用游标卡尺固定 30 mm 的长度，读出未放大的 30 mm 长度内所包含的 M_1 的格数 α 。
- (5) 算出显微镜的测量放大率 $M = \frac{30 \times 10}{\alpha}$ ，并与理论值比较。
- (6) 对结果进行误差分析。

3、利用实验室条件，试设计组装投影仪，画出光路图并选择合适的光学元件，实现投影仪的设计。

六、注意事项

1. 激光光源点亮后会发出较强的激光，对人眼能造成一定的伤害，故在使用中，绝对禁止直视光源
2. 光学元件的光学表面是经过精密加工光洁度极高的表面，不能用手触摸；不得用擦镜纸以外的物品去擦拭。
3. 所有光学玻璃元件属于易碎品，实验过程中注意轻拿轻放。
4. 测量完毕，应把各光学元件及其组件还原并整理整齐。

七、思考题

1. 根据透镜成像规律，怎样用最简单方法区别凸透镜和凹透镜？
2. 望远镜和显微镜有哪些相同之处？从用途、结构、视角放大率以及调焦方法等几个方面比较它们的相异之处。
3. 试说明伽利略望远镜成像原理，并画出光路图。
4. 望远镜实验中，将 3m 远的标尺看作无穷远处的物体，从而计算望远镜的实验放大率，这种估算方法引起的误差有多大？如果需要对该放大率进行修正，应如何做？

参考文献：

1. 高文琦等. 光学，南京大学出版社，2000
2. 王之江等. 光学技术手册. 机械工业出版社，1987
3. 李晓彤等. 几何光学·像差·光学设计. 浙江大学出版社，2003

实验 2 薄透镜焦距的测定

引言

透镜是光学仪器中最基本的元件,反映透镜特性的一个主要参量是焦距,它决定了透镜成像的位置和性质(大小、虚实、倒立)。对于薄透镜焦距测量的准确度,主要取决于透镜光心及焦点(像点)定位的准确度。本实验在光具座上采用几种不同方法分别测定凸、凹 2 种薄透镜的焦距,以便了解透镜成像的规律,掌握光路调节技术,比较各种测量方法的优缺点,为今后正确使用光学仪器打下良好的基础。

一、实验目的

1. 学会测量透镜焦距的几种方法。
2. 掌握简单光路的分析和光学元件等高共轴调节的方法。
3. 进一步熟悉数据记录和处理方法。
4. 熟悉光学实验的操作规则。

二、实验原理

1、凸透镜焦距的测定

(1) 粗略估测法:

以太阳光或较远的灯光为光源,用凸透镜将其发出的光线聚成一光点(或像),此时, $s \rightarrow \infty$, $s' \approx f'$, 即该点(或像)可认为是焦点,而光点到透镜中心(光心)的距离,即为凸透镜的焦距,此法测量的误差约在 10% 左右。由于这种方法误差较大,大都用在实验前作粗略估计,如挑选透镜等。

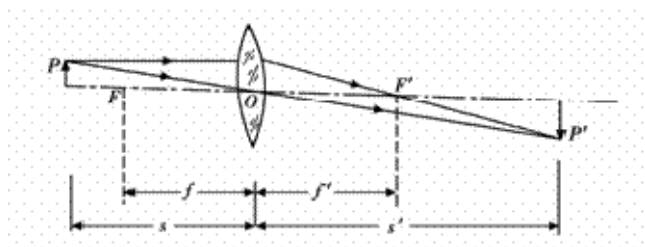


图 2.1 薄透镜成像

(2) 利用物距像距法求焦距:

当透镜的厚度远比其焦距小的多时,这种透镜称为薄透镜。在近轴光线的条件下,薄透镜成像的规律可表示为:

$$\frac{f'}{s'} + \frac{f}{s} = 1 \quad (2.1)$$

当将薄透镜置于空气中时,则焦距

$$f' = -f = \frac{s' s}{s - s'} \quad (2.2)$$

(2.2) 式中, f' 为像方焦距; f 为物方焦距; s' 为像距; s 为物距。

式中的各线距均从透镜中心(光心)量起, 与光线进行方向一致为正, 反之为负, 如图 2.1 所示。若在实验中分别测出物距 s 和像距 s' , 即可用式(2)求出该透镜的焦距 f' 。但应注意:测得量须添加符号, 求得量则根据求得结果中的符号判断其物理意义。

(3) 自准直法:

如图 2.2 所示, 在待测透镜 L 的一侧放置被光源照明的 1 字形物屏 AB, 在另一侧放一

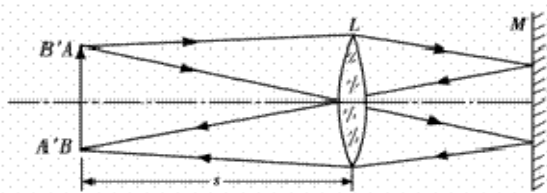


图 2.2 凸透镜自准法成像

平面反射镜 M, 移动透镜(或物屏), 当物屏 AB 正好位于凸透镜之前的焦平面时, 物屏 AB 上任一点发出的光线经透镜折射后, 将变为平行光线, 然后被平面反射镜反射回来。再经透镜折射后, 仍会聚在它的焦平面上, 即原物屏平面上, 形成一个与原物大小相等方向相反的倒立实像 $A' B'$ 。此时物屏到透镜之间的距离, 就是待测透镜的焦距, 即

$$f = s$$

(2.3)

由于这个方法是利用调节实验装置本身使之产生平行光以达到聚焦的目的, 所以称之为自准法, 该法测量误差在 1%~5%之间。

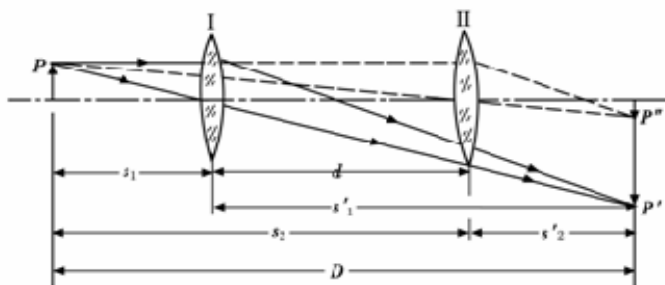


图 2.3 二次成像

(4) 贝塞尔法(又称为共轭法、二次成像法):

物距像距法、粗略估测法、自准法都因透镜的中心位置不易确定而在测量中引进误差, 为避免这一缺点, 可取物屏和像屏之间的距离 D 大于 4 倍焦距 ($4f$), 且保持不变, 沿光轴方向移动透镜, 则必能在像屏上观察到二次成像。如图 2.3 所示, 设物距为 s_1 时, 得放大的倒立实像; 物距为 s_2 时, 得缩小的倒立实像, 透镜两次成像之间的位移为 d , 根据透镜成像公式(2.2), 将

$$\begin{aligned} s_1 &= -s'_2 = -(D-d)/2 \\ s'_1 &= -s_2 = (D+d)/2 \end{aligned}$$

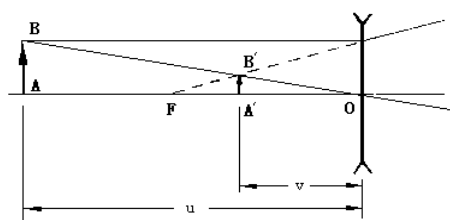


图 2.4 凹透镜成像光路图

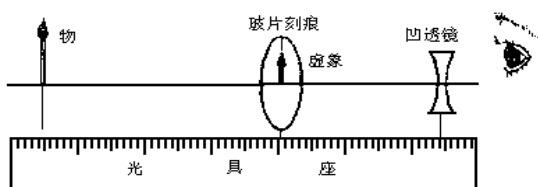


图 2.5 视差法测凹透镜焦距

代入式 (2.2) 即得

$$f' = \frac{D^2 - d^2}{4D} \quad (2.4)$$

可见，只要在光具座上确定物屏、像屏以及透镜二次成像时其滑座边缘所在位置，就可较准确的求出焦距 f' 。这种方法毋须考虑透镜本身的厚度，测量误差可达到 1%。

2、凹透镜焦距的测定

凹透镜是发散透镜，用透镜成像公式测量凹透镜的焦距时，凹透镜成的像为虚像，且虚像的位置在物和凹透镜之间，因而无法直接测量其焦距，常用视差法、辅助透镜成像法和自准法来测量。

(1) 视差法

视差是一种视觉差异现象：设有远近不同的两个物体 A 和 B，若观察者正对着 AB 连线方向看去，A、B 是重合的；若将眼睛摆动着看，A、B 间似乎有相对运动，远处物体的移动方向跟眼睛的移动方向相同，近处的物体移动方向相反。A、B 间距离越大，这种现象越明显（视差越大）；A、B 间距为零（重合），就看不到这种现象（没有视差）。因此，根据视差的情况可以判定 A、B 两物体谁远谁近及是否重合。

视差法测量凹透镜焦距时，在物和凹透镜之间置一有刻痕的透明玻璃片，当透明玻璃片上的刻痕和虚像无视差时，透明玻璃片的位置就是虚像的位置。

图 4 为凹透镜成像光路图。实验中物 AB 是物屏上的箭头，其虚像的位置不能直接用像屏测定。实验时将一有刻痕的透明玻璃片装到滑座上，让它在物屏和透镜之间移动，眼睛在透镜另一侧观察（如图 5 所示）。观察的要点是：从凹透镜里边看物，从凹透镜外边看刻痕，且眼睛左右移动观察。当透镜中物的虚像与镜外玻片刻痕间没有视差时，由光具座标尺测出物屏及刻痕到透镜的距离，即为 s 和 s' (s' 为负值)，将它们代入 (2.2) 式即可求得焦距 f 。

(2) 辅助透镜成像法

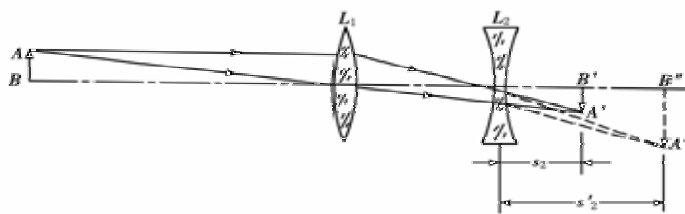


图 2.6 辅助透镜成像法

如图 2.6 所示，先使物 AB 发出的光线经凸透镜 L_1 后形成一大小适中的实像 $A'B'$ ，然后在 L_1 和 $A'B'$ 之间放入待测凹透镜 L_2 ，就能使虚物 $A'B'$ 产生一实像 $A''B''$ 。分别测出 L_2 到 $A'B'$ 和 $A''B''$ 之间距离 s_2 、 s_2' ，根据式 (2.2) 即可求出 L_2 的像方焦距 f_2' 。

(3) 自准法

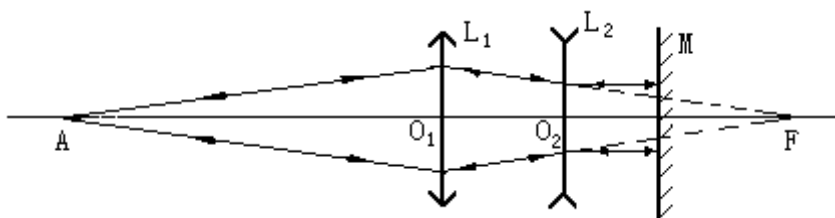


图 2.7 自准法测凹透镜焦距

如图 2.7 所示， L_1 为凸透镜， L_2 为凹透镜， M 为平面反射镜，调节凹透镜的相对位置，直到物屏上出现和物大小相等的倒立实像，记下凹透镜的位置 X_2 。再拿掉凹透镜和平面镜，则物经凸透镜后在某点处成实像（此时物和凸透镜不能动），记下这一点的位置 X_3 ，则凹透镜的焦距 $f = -|X_3 - X_2|$ 。

三、实验仪器

光具座，凸透镜，凹透镜，光源，物屏，平面反射镜，水平尺和滤光片等。

四、实验步骤与内容

1、光具座上各光学元件同轴等高的调节：

薄透镜成像公式仅在近轴光线的条件下才成立。对于几个光学元件构成的光学系统进行共轴调节是光学测量的先决条件，对几个光学元件组成的光路，应使各光学元件的主光轴重合，才能满足近轴光线的要求。习惯上把各光学元件主光轴的重合称为同轴等高。本实验要求光轴与光具座的导轨平行，调节分两步进行：

(1) 粗调

将安装在光具座上的所有光学元件沿导轨靠拢在一起，用眼睛仔细观察，使各元件的中心等高，且与导轨垂直。

(2) 细调

对单个透镜可以利用二次成像法调节。使屏与物之间的距离大于 4 倍焦距，且二者的位置固定。移动透镜，使屏上先后出现清晰的大、小像，调节透镜或物，使透镜在屏上成的的大、小像在同一条直线上，并且其中心重合。

对于多个透镜组成的光学系统，则应先调节好与一个透镜的共轴，不再变动，再逐个加入其余透镜进行调节，直到所有光学元件都共轴为止。

2、测量凸透镜焦距

(1) 物距像距法

先对光学系统进行共轴调节，然后取物距 $s \approx 2f$ ，保持 s 不变，移动像屏，仔细寻找像清晰的位置，测出像距 s' ，重复 3 次，将数据填于表格 1 中，求出 s' 的平均值，代入 (2.2)

求出 \overline{f} 。

(2) 自准法

光路如图 2.2 所示，先对光学系统进行共轴调节，实验中，要求平面镜垂直于导轨。移动凸透镜，直至物屏上得到一个与物大小相等，倒立的实像，则此时物屏与透镜间距就是透镜的焦距。为了判断成像是否清晰，可先让透镜自左向右逼近成像清晰的区间，待像清晰时，记下透镜位置，再让透镜自右向左逼近，在像清晰时又记下透镜的位置，取这两次读数的平均值作为成像清晰时透镜位置的读数。重复测量 3 次，将数据填于表格 2.2 中，求平均值。

(3) 共轭法

取物屏，像屏距离 $D > 4f$ ，固定物屏和像屏，然后对光学系统进行共轴调节。移动凸透镜，当屏上成清晰放大实像时，记录凸透镜位置 X_1 ；移动凸透镜当屏上成清晰缩小实像时，记录凸透镜位置 X_2 ，则两次成像透镜移动的距离为 $d = |X_2 - X_1|$ 。记录物屏和像屏之间距离 D ，

根据 (4) 式求出 f ，重复测量 3 次，将数据填于表格 2.3 中，求出 \overline{f} 。

3、测量凹透镜的焦距

(1) 视差法

按图 2.5 放好物屏、带痕玻片和凹透镜。正对透镜看清凹透镜中物的虚像，调整物屏的位置和高低，使虚像的顶端正好处在凹透镜上沿。移动带痕玻片并左右摆动头，仔细观察凹透镜内虚像的顶端和凹透镜外玻片刻痕间的相对位置有无变化。当相对位置不变时，即无视差，记录下玻片刻痕的位置，重复测量 3 次，将数据填于表格 2.4 中，求出 \overline{f} 。

(2).辅助透镜成像法

将发光物、凸透镜、像屏按图 2.6 的顺序安放在光具座上。移动发光物位置，相应移动像屏，使物 AB 经凸透镜 L_1 后在屏上出现清晰的缩小的实像 $A'B'$ ，记录 $A'B'$ 的位置 x_q ；保持物 AB 和凸透镜 L_1 的位置不变，在 L_1 与 $A'B'$ 之间放上待测的凹透镜 L_2 ，移动 L_2 并同时移动像屏，直至虚物 $A'B'$ （对 L_2 而言）在像屏上清晰地生成放大的实像 $A''B''$ ，重复 3 次，将数据填于表格 2.5 中，记录此时凹透镜的位置 x_l' 和 $A''B''$ 的位置 x_p 。

(3) 自准法

先对光学系统进行共轴调节，然后把凸透镜放在稍大于两倍焦距处。移动凹透镜和平面反射镜，当物屏上出现与原物大小相同的实像时，记下凹透镜的位置读数。然后去掉凹透镜和平面反射镜，放上像屏，用左右逼近法找到 F 点的位置，重复测量 3 次，将数据填于表格 2.6 中，求出 \overline{f} 。

五、注意事项

- 1、 光学元件应轻拿轻放，要避免震动和磕碰，以防破损。
- 2、 为了区别凸透镜和凹透镜，可以持镜看书，将字放大者为凸透镜，缩小者为凹透镜。决不准用手触摸光学元件的光学面(如透镜的镜面)，只能接触非光学面(如毛玻璃面)。也不准对着光学元件说话、咳嗽、打喷嚏，以防污损。
- 3、 光学表面附有灰尘、污物时，不要自行处理（不能用手或布甚至用纸去擦）。应向教师说明，在教师的指导下进行处理。

六、数据处理

1、测量凸透镜焦距

表 2.1 物距像距法 物屏位置 X_0 =_____cm 透镜位置 X_1 =_____cm

次数 n	像屏位置 X_2	$V_n= X_2-X_1 $	f	Δf
1				
2				
3				
平均值				

f =_____±_____cm E_f =_____%

表 2.2 自准法 物屏位置 X_0 =_____cm 单位：cm

次数 n	凸透镜位置 X (左→右)	凸透镜位置 X (右→左)	X 的平均值	$f_n= X-X_0 $	Δf
1					
2					
3					
平均值					

f =_____±_____cm E_f =_____%

表 2.3 共轭法 物屏位置 $X_0 = \underline{\hspace{1cm}}$ cm 像屏位置 $X_3 = \underline{\hspace{1cm}}$ cm $D = |X_3 - X_0| = \underline{\hspace{1cm}}$ cm

次数 n	透镜位置 X_1	透镜位置 X_2	$d = X_2 - X_1 $	$f = (D^2 - d^2) / 4D$	Δf
1					
2					
3					
平均值					

$$f = \underline{\hspace{1cm}} \pm \underline{\hspace{1cm}} \text{ cm} \quad E_f = \underline{\hspace{1cm}} \%$$

2、测量凹透镜焦距

表格 2.4 视差法

单位: cm

次数 n	物距 u	像距 v	焦距 f	Δf
1				
2				
3				
平均值				

$$f = \underline{\hspace{1cm}} \pm \underline{\hspace{1cm}} \text{ cm} \quad E_f = \underline{\hspace{1cm}} \%$$

表 5 辅助透镜成像法 $A'B'$ 位置 $X_0 = \underline{\hspace{1cm}}$ cm

次数 n	凹透镜位置 X_2	$A''B''$ 位置	f	Δf
1				
2				
3				
平均值				

$$f = \underline{\hspace{1cm}} \pm \underline{\hspace{1cm}} \text{ cm} \quad E_f = \underline{\hspace{1cm}} \%$$

表 2.6 自准法

单位: cm

次数 n	凹透镜位置 左→右	凹透镜位置 右→左	平均	F 点位置 左→右	F 点位置 右→左	平均	f_n	Δf
1								
2								
3								
平均								

$$f = \underline{\hspace{1cm}} \pm \underline{\hspace{1cm}} \text{ cm} \quad E_f = \underline{\hspace{1cm}} \%$$

七、复习思考题：

- 1、如会聚透镜的焦距大于光具座的长度，试设计一个实验，在光具座上能测定它的焦距。
- 2、用共轭法测凸透镜焦距时，为什么必须使 $D > 4f$ ？试证明之。

实验 3 孔径光阑、视场光阑和景深实验

引言

孔径光阑、视场光阑和景深是几何光学中很重要的概念，也是光学设计，光学装调必须考虑的问题，它们关系到光学系统像面的照度，成像范围，系统的像差，分辨率和成像质量等。同时，这些概念又是几何光学学习的难点。因此，安排此实验是很有必要的。

一、实验目的

- 1、深入理解孔径光阑（入、出瞳），视场光阑（入、出窗）及景深的概念
- 2、学会确定孔径光阑，视场光阑及测量景深的方法

二、实验原理

理想光学系统可以对任意大的物体范围以任意宽的光束进行完善成像，实际光学系统不可能为无限大，进入系统的光线将受到光学元件有限的通光口径的限制。任何一个光学系统对光束都包含两个基本限制：对入射的光束大小的限制和对成像范围的限制。如照相系统中常采用的光圈（F）这一术语，指的就是对光束的一种限制，改变光圈的大小可以控制进入系统的光能，配合速度来满足接收器所需的曝光量。又如，照相机中的接收器的边界框（如 135 胶片，1/3" CCD 等）也是对光束的一种限制，聚焦在胶片框或 CCD 靶面外的像点将不能获得图像。光束的限制不仅决定了光学系统的光束宽度和像的大小，而且还决定了光学系统对物体细节的分辨力和系统的景深，同时对系统的像差也有很大影响。

1、光阑的分类

在光学系统中，对光束起限制作用的光学元件称为光阑。它们可能出自某一透镜的边框，也可能是专门设计的任一形状的光孔器件。根据各种光阑限制光束的目的，它们大体分为几种：

（1）孔径光阑

光学系统中用于限制轴上点成像光束大小的光阑称为孔径光阑，如照相机中的可调光圈就是该系统的孔径光阑。孔径光阑的大小决定成像面上的照度。在光学系统中，描述成像光束大小的参量称为孔径，系统对近距离物体成像时，其孔径大小用孔径角 U 表示，对无限远物体成像时，孔径大小用孔径高度 h 表示。

（2）视场光阑

光学系统中用于限制成像范围大小的光阑称为视场光阑，如照相机中的底片框就是系统的视场光阑。光学系统中描述成像范围大小的参量称为视场，系统对近距离物体成像时，视场的大小一般用物体的高度 y 表示，对远距离物体成像时，视场大小用视场角表示。

（3）渐晕光阑

为了改善轴外点的成像质量或减小部分光学元件的横向尺寸，对轴外点的成像光束刻意产生部分限制作用的光阑叫渐晕光阑。

(4) 消杂光光阑

消杂光光阑用来限制一些非成像光线，如镜头表面、金属表面以及镜筒内壁反射或散射所产生的杂散光，它们通过系统后将在像面上产生杂光背景，破坏像的对比度和清晰度。

尽管有上述多种目的的光束限制，但孔径光阑和视场光阑是必不可少的。

2、孔径光阑的确定方法、入瞳和出瞳

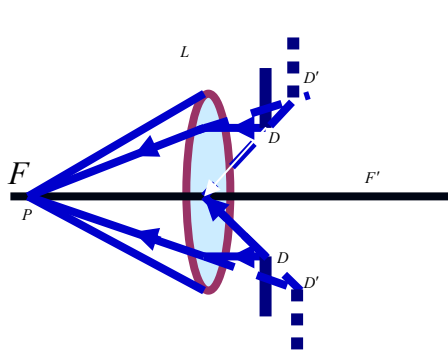


图 3.1 孔径光阑的确定方法

孔径光阑的确定原则为:将系统中各光阑分别经其前面的光学元件成像于系统的物空间,其中对轴上点张角最小的那个像所对应的光阑即为孔径光阑。要说明的两点:(1)光学系统孔径光阑与系统和物平面位置有关。(2)当物(像)位于无穷远时,在物(像)空间比较张角变为比较光阑的像的大小。

孔径光阑通过其前面光学系统所成的像称为入瞳,它决定进入系统光束的大小,入瞳是物面上所有各点发出的光束的共同入口;

孔径光阑通过它后面光学系统所成的像称为出瞳,决定从系统出射光束的大小,出瞳是物面上各点发出光束经整个光学系统以后从最后一个光孔出射的共同出口。

注意:入瞳、孔径光阑、出瞳三者相互共轭

3、视场光阑、入窗和出窗

视场光阑一般位于像面或物面上,有时也设置在系统成像过程中的某个中间实像面上,这样物或像的大小直接受视场光阑口径的限制,口径以外的部分将被阻挡而不能成像,系统成像的范围有着非常清晰的边界。如:显微系统中的分划板就是视场光阑,照相系统中的底片也是视场光阑。

视场光阑经前面的光组在物空间所成的像称为入射窗;视场光阑经后面的光组在像空间

所成的像称为出射窗；入射窗与物面重合，出射窗与像面重合。出射窗是入射窗经整个系统所成的像。

当视场光阑与物面或像面都不重合时，造成轴上点和轴外点成像光束大小不同的现象称为渐晕，因此使得轴外物点的成像光线因逐渐减弱而显现出没有清晰的视场边界。

4、光学系统的景深

理论上，只有共轭的物平面才能在像平面上成清晰像，其他物点所成的像均为弥散斑。但当此斑对眼睛的张角小于眼睛的最小分辨角 $1'$ 时，人眼看起来仍为一点。此时，该弥散斑可认为是空间点在平面上的像。

远景指在景象平面上能够成“清晰”像的最远的平面；近景指在景象平面上能够成“清晰”像的最近的平面。远景深度为远景到对准面的距离；近景深度为近景到对准面的距离。景深为远景和近景之间的距离。

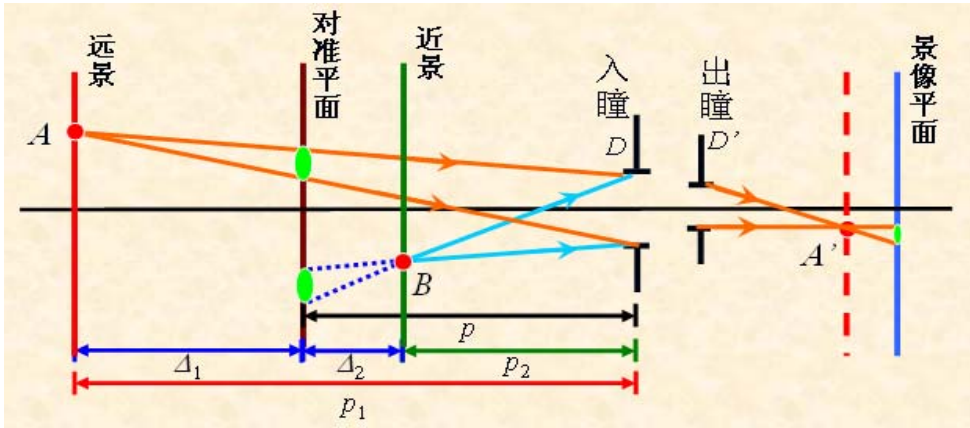


图 3.2 光学系统的景深

$$\Delta_1 = p_1 - p = \frac{p^2 Z'}{2af' - pZ'}$$

$$\Delta_2 = p - p_2 = \frac{p^2 Z'}{2af' + pZ'}$$

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = \frac{4af' p^2 Z'}{4a^2 f'^2 - p^2 Z'^2}$$

式中， a 为入瞳半径， f' 为系统焦距。

当景象平面上的弥散斑大小 Z' 规定后，景深与系统的入瞳直径，焦距和对准平面的距离有关。焦距越小，入瞳直径越小，景深越大；拍摄距离越远，景深越大。远景深度大于近景深度，它们并非对称于对准平面。

三、实验内容

- 1、对各种光学元器件进行等高同轴调节。
- 2、设计光路确定孔径光阑位置。
- 3、确定视场光阑位置。
- 4、改变视场光阑大小，观测成像范围的变化。
- 5、改变孔径光阑大小，观测成像面上的照度变化。
- 6、测量景深。

四、实验提示

- 1、孔径光阑只对一定物体的位置而言，如果改变物体的位置，系统孔径光阑的位置也会变化。此外，孔径光阑只对轴上点而言，对轴外点将形成渐晕现象即光线将被其它光学元件部分地阻挡。
- 2、景深的大小与对准物平面的位置，入瞳大小及物镜焦距等参数有关。

五、注意事项

- 1、绝对不能用眼睛直视未经扩束的激光束，以免造成视网膜永久性损伤。
- 2、激光器激励电源电压达数千伏，实验是时千万别触摸与其输出线相连通的或与输出电压耦合的任何金属部分，以免触电。

六、预习要求

根据实验内容，查阅以下资料：郁道银等主编《工程光学》，北京：机械工业出版社，2000；李晓彤，岑兆丰编《几何光学 像差 光学设计》，浙江大学出版社出版，2003 等文献资料。熟悉孔径光阑，视场光阑及景深的概念，理解孔径光阑，视场光阑及景深的测量方法。

七、思考题

- 1、孔径光阑设在什么位置上时，可使物镜尺寸最小？
- 2、当采用较大透明图片作物时，系统可能出现渐晕现象，试问怎样才能使渐晕现象减到最小？
- 3、如何观测光阑的虚像位置和大小？
- 4、如何减小景深测量的误差？

实验 4 透镜像差的观测

引言

成像系统中的单会聚透镜、单发散透镜以及球面镜，在理想加工情况下当实验条件不能满足近轴条件时，总是存在像差。比如当成像光束孔径角增大或成像范围增大时就会产生球差、彗差、像散、像面弯曲和畸变单色像差；又如当光学系统采用白光或复色光成像时还会产生位置色差和倍率色差。像差使像变模糊、失真，在光学测量中还会影响测量准确度。此外，像差知识也是几何光学学习的重点和难点。

一、实验目的

通过实验观察球面像差、色像差、彗星、像散、畸变等像差的形成。每种像差，使用不同的仪器或自制的投影片来使其成像，最后再测量成像的位置，并使用数字相机将成像的图像拍摄下来。

二、实验原理

实际的光学系统，只有在近轴区域以很小的孔径角成像时才是完善的。如果一个光学系统的成像仅限于近轴区域是没有什么实际意义的，因为进入的光能量太少，分辨率很低。因此，任何光学系统都具有一定的孔径和视场，而且成像光束多是复色光，在这些情况下用近轴光学理论来研究光学系统成像就不合适了，必须采用精确的三角光线追迹公式进行光线计算。用近轴光线追迹公式进行光线计算得出的像点（理想像点）与在不同孔径下用精确的三角追迹公式进行光线计算得出的像点之间往往并不重合，这个差别称为像差。像差的大小反映了光学系统质量的优劣。

像差分单色光像差和复色光像差两大类。单色像差又有轴上点像差和轴外点像差之分，轴上点单色像差只有球差一种，轴外点单色像差有球差、慧差、像散、像面弯曲、畸变。复色光像差有轴向色差和垂轴色差两种。

1、球差

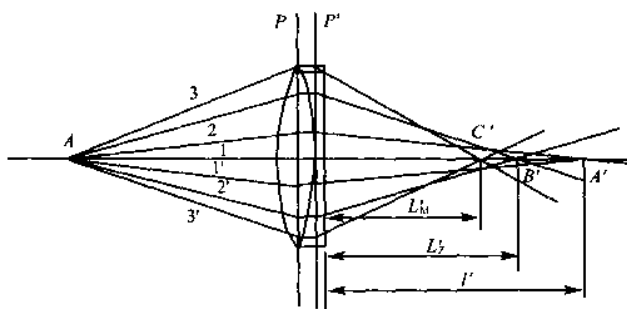


图 4.1 具有球差的透镜

球差是由光学系统的口径面引起的，也就是说，球差是光学系统口径的函数。如图 4.1 所示，由轴上物点 A 发出近轴光线 1 和 1'，经光学系统后交轴上 A'；由 A 点发出的上、下边缘光线 3 和 3' 经过光学系统后交轴上于 C' 点；由 A 点发出的上、下带光线 2 和 2'

经过光学系统后交光轴于 B' 点。即不同高度的光线交于不同的点，得到的不是一个完善的像点，而是一个边缘模糊而对称的圆斑-弥散圆。球差是轴上点唯一的单色像差，可在沿轴方向和垂轴方向度量，分别称为轴向球差和垂轴球差。如果某一光线的像方后截距用 L' 表示，像方孔径角用 U' 表示，近轴光线的像方截距用 l' 表示。则轴向球差为：

$$\delta L' = L' - l' \quad (4.1)$$

垂轴球差就是由轴向球差引起的弥散圆的半径，

$$\Delta y' = \delta L' \cdot \tan U' \quad (4.2) \text{ 球}$$

差的存在使图像变模糊，对比度降低，从而降低了系统的分辨率。因此，光学系统的球差通常是要校正的。单透镜自身不能校正球差，在正常情况下，正透镜产生负球差，而负透镜产生正球差，因此将正负透镜组合起来就能使球差得到校正。

2、彗差

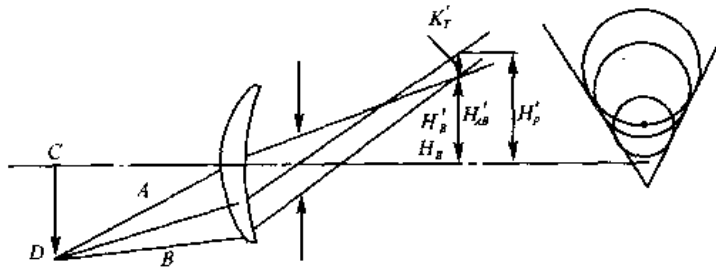


图 4.2 彗差

慧差是轴外物点发出宽光束通过光学系统后，不会聚在一点，而呈彗星状图形的一种相对主光线失对称的像差，如图 4.2。具体地说，在轴外物点发出的光束中，对称于主光线的一对光线经光学系统后，失去对主光线的对称性，使交点不再位于主光线上，对整个光束而言，与理想像面相截形成一彗星状光斑的一种非轴对称性像差。慧差通常用于子午面上和弧矢面上对称于主光线的各对光线，经系统后的交点相对于主光线的偏离来度量，分别称为子午彗差和弧矢彗差。慧差既是孔径的函数，又是视场的函数。当系统存在彗差时，物方一点的像成为彗星状弥散斑，损害了像的清晰度，使成像质量降低。

3、像散和像面弯曲

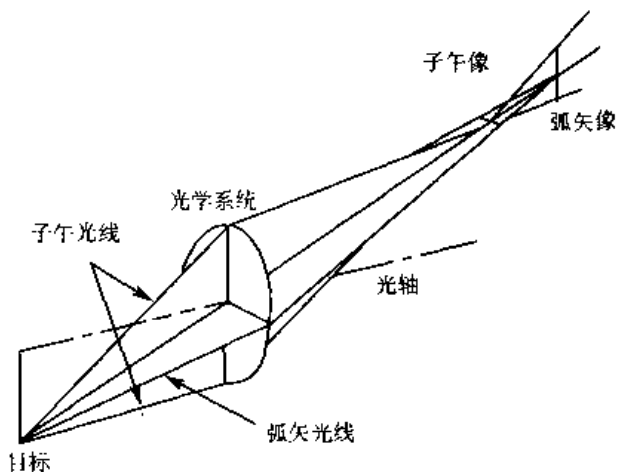


图 4.3 像散的概念

像散使轴外物点用细光束成像时形成两条相互垂直且间隔一定距离的短线像的一种非对称像差。如图 4.3 所示，轴外物点发出细光束，经光学系统后其像点不再是一个点。在子午焦点处所成的像是一条垂直子午面的短线 t ，称为子午焦线。在弧矢焦点处所成的像是一条垂直弧矢面的短线 s ，称为弧矢焦线。这两条短线不相交而且互相垂直且间隔一定距离。两条短线间的沿光轴方向的距离表示像散的大小。像散是物点远离光轴时的像差，且随视场的增大而迅速增大。

场曲是像面弯曲的简称。场曲是物平面形成曲面像的一种像差。子午面内主光线 BP 周

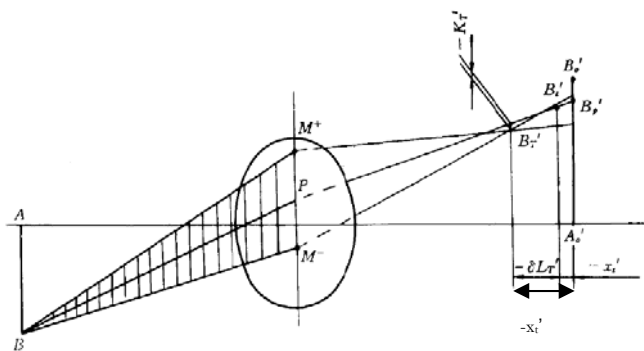


图 4.4 子午场曲

围的细光束的聚交点 B_t' 到理想像平面的轴向距离称为细光束的子午场曲 x_t' ，主光线两侧的一个子午光线对（具有相同孔径高的两条光线）的聚交点 B_T' ， B_T' 到理想像平面的轴向距离称为宽光束的子午场曲 x_T' ；弧矢面内主光线 BP 周围的细光束的聚交点 B_s' 到理想像平面

的轴向距离为细光束的弧矢场曲 x_s' ，主光线两侧的一个弧矢光线对（具有相同孔径高的两条光线）的聚交点 B_s' ， B_s' 到理想像平面的轴向距离称为宽光束的弧矢场曲 x_T' 。光学系统存在场曲时不能使一个较大的平面上的各点同时在同一像面上成清晰的像。中心清晰则边缘模糊，边缘清晰则中心模糊。如图 4.4。

4、畸变

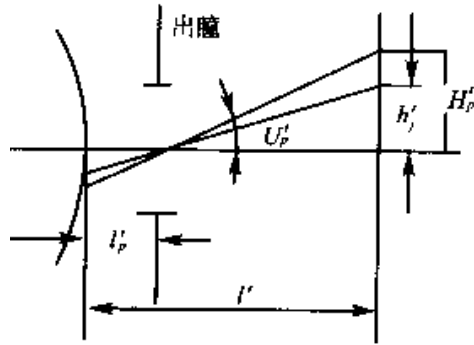


图 4.5 畸变的物理意义

畸变也是一种轴外像差，而且是轴外细光束的像差。它是轴外点主光线在像面上交点的高度同近轴（理想）像高之差。由轴外点追迹一条主光线，求出在近轴像面上的截点高度 H'_p ，再求出同一物点在同一视场下的近轴像高 h'_j ，二者之差就是光学系统在该视场下的畸变值，图 4.5 表示出畸变的物理意义。畸变与孔径没有关系，它只是视场的函数。畸变随视场的增加而增加。一个正方形通过光学系统成像就不是一个规则的正方形。图 4.6(a) 是个待成像的正方形，通过光学系统成像后，由于光学系统的畸变，而且畸变随视场而变化，因此所成的像就不再是正方形了，可能会出现两种情况，其中一种如图 4.6(b) 所示，视场边缘的像高小于理想像高，这样的畸变为负值，称为桶形畸变。只一种情况是视场边缘的像高大于理想像高，畸变为正值，称为枕形畸变，如图 4.6(c) 所示。

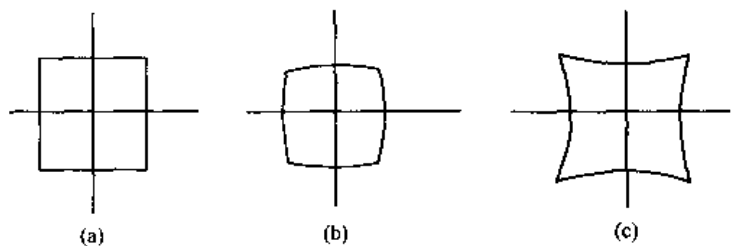


图 4.6 桶形畸变和枕形畸变

畸变和其他像差不一样，一般像差造成点像的弥散圆扩散，使图像模糊，对比度降低，导致分辨率降低。而畸变则不同，它既不影响图像的清晰度，也不降低系统的分辨率，它只

是使图像的大小和形状发生某些变化。因此对于不作测量用的光学系统、对畸变的要求并不很高，如照相物镜，电影和电视物镜。只要畸变控制在使人眼不易觉察的程度就可以了，通常在 3%~5%以内。对于望远系统，由于视场角不大，畸变并不严重，不必特意校正它。对畸变要求最严格的是测量仪器和航摄设备，如用作测绘用的航天或航空摄影物镜，各种测量显微镜、检测仪器、大地测量经纬仪等均要求校正畸变，通常需要控制在 0.5%以内。

5、色差

光学系统大多是白光成像。白光是由各种不同波长的单色光组成的。光学材料对不同波长的折射率不同，白光经光学系统第一表面折射后各种色光被分开，在光学系统内以各自的光路传播，造成各色光之间成像位置和大小差异，在像面上形成弥散圆。复色光成像时，由于不同色光而引起的像差称为色差。色差又分为轴向色差和垂轴色差。

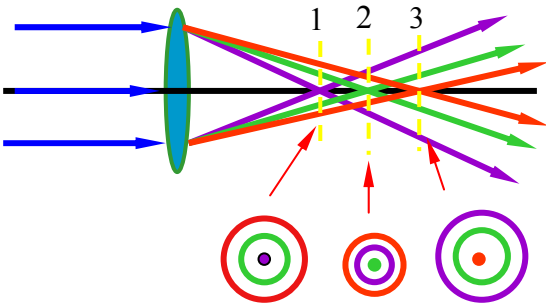


图 4.7 轴向色差

不同波长的光焦距不同，像的位置不同。在 1,2,3 三截面上形成的光环半径不同。

由于光学系统中介质对不同波长光线折射率不同，造成理想像点的位置亦不同。按色光的波长由短到长，它们的像点离开透镜由近及远地排列在光轴上，这种现象称为轴向色差。表示 F 光和 C 光两种波长的近轴像距。F 光和 C 光的近轴位置色差（近轴轴向色差）可表示为：

$$\Delta l'_{FC} = l'_F - l'_C \tag{4.3}$$

对于白光成像系统，轴向色差是要校正的。校正的波长范围根据使用情况而定，对目视和一般照相系统，对 F 光和 C 光消色差。

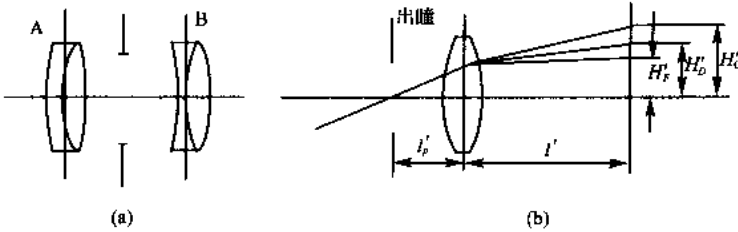


图 4.8 倍率色差

由于光学材料对不同色光的折射率不同，因而使得光学系统对不同色光有不同的焦距，

因而放大率也不等，因此不同色光有不同的像高，这就是倍率色差。

倍率色差的计算方法是通过入瞳中心追迹长波长光和短波长光的轴外物点的主光线(对目视系统为 F 和 C 线)，求出最后在近轴像面的截点高度 H'_F, H'_C ，如图 8 所示。其垂轴色差的表达式为：

$$\Delta y'_{FC} = y'_F - y'_C \tag{4.4}$$

倍率色差将使轴外点的像扩散为一个彩虹，其结果是降低对比度和分辨率，通常是不允许存在的。由于倍率色差是放大率随折射率的变化，不同的视场其放大率也不同，因此它既是折射率的函数，又是视场的函数。

三、实验步骤与实验结果、分析讨论

1、球面像差之观察

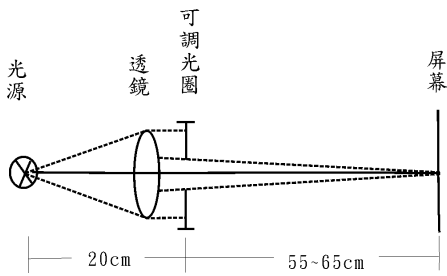


图 4.9 观察球差的实验装置

(1) 利用光具座，架设实验装置如图 4.9：

将可调圆孔光阑置于成像透镜后，使中间部分光线通过，成像于屏幕上，记录成像位置。并比较不加可调圆孔光阑时成像位置的差异。

结果： 物距_____cm 理论像距_____cm

	加可调光圈	不加可调光圈
成像位置	cm	cm

(2) 将可调光圈分别换成图 4.10 投影片 a、b，使仅剩透镜中心或周围部分光线透过，分别成像于屏幕上，记录成像位置，并利用数码相机拍摄成像结果。比较以上两者成像位置之差距，并讨论之：

试试看投影片 c，观察成像结果有何不同。

a

b

c

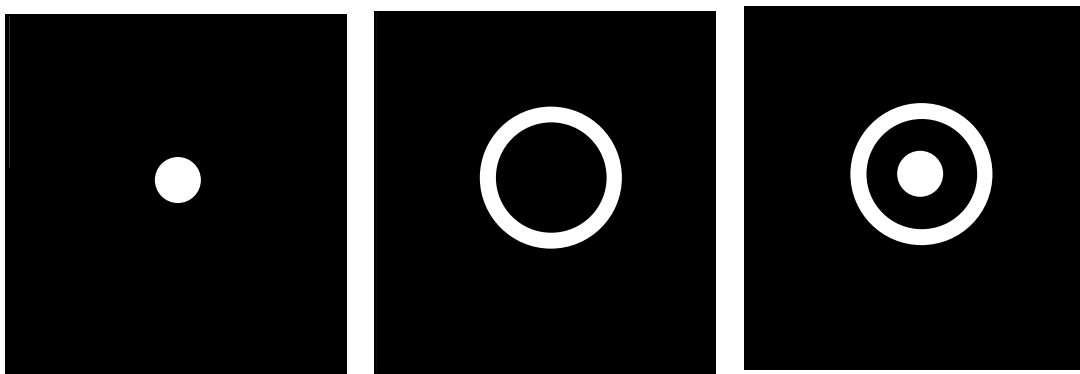


图 4.10 投影片 a、b、c

	投影片 a	投影片 b	投影片 c
成像位置	cm	cm	cm
成像结果			

2、色差观察

(1) 实验装置如图 4.11。

(2) 在成像透镜前放置各种颜色之滤光片(红、黄、绿)， 观察并测量成像位置，并利用数码相机拍摄成像结果。

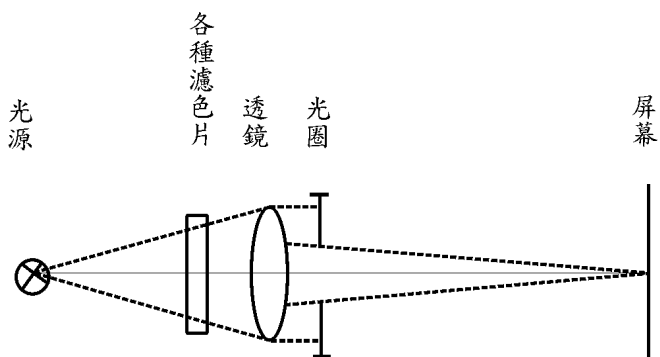


图 4.11 观察色差的实验装置

结果： 物距_____cm 理论像距_____cm

滤片	成像位置	成像结果
----	------	------

无	cm	
红色	cm	
黄色	cm	
绿色	cm	

3、彗差的观察

- (1) 安排实验装置如图 4.12：在光源前加一聚光透镜，使其形成近似平行光束。
- (2) 将平行光入射到一透镜，并将此透镜旋转 $10^{\circ} \sim 40^{\circ}$ ，在其焦平面观察成像图，并利用数字相机拍摄成像结果。

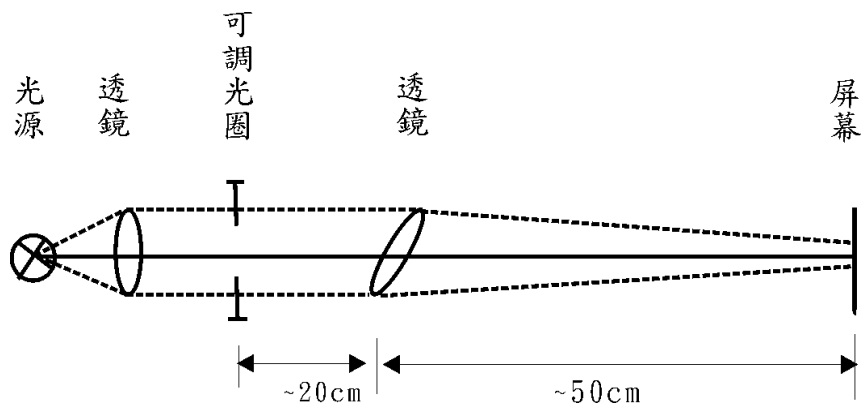


图 4.12 观察彗差的实验装置

观察成像结果

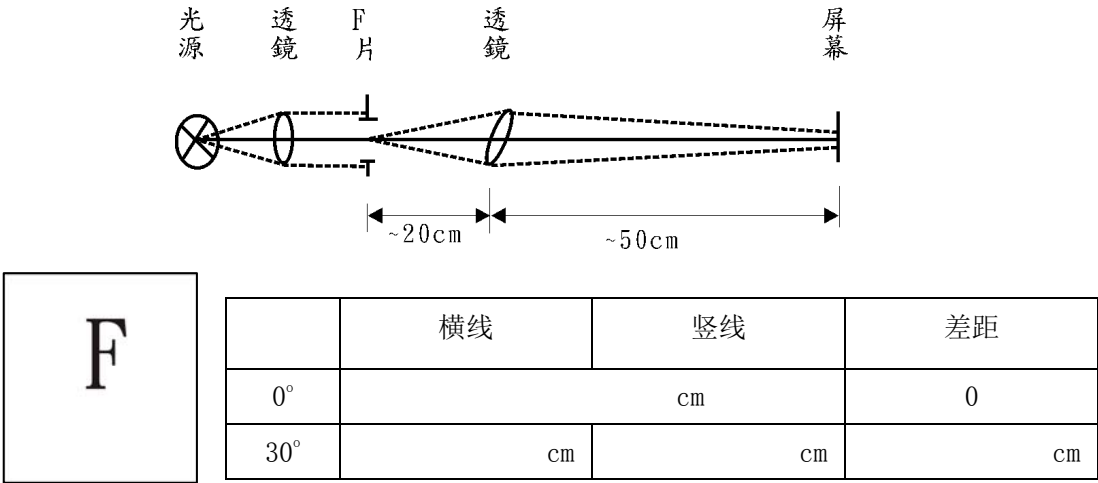
0°	10°	20°
30°	40°	

4、像散的观察

- (1) 安排实验装置如图 4.13：旋转透镜约 30° ，移动屏障位置，观察并记录” F ” 字中横

向线条和纵向线条之清晰位置是否相同？试解释之。

图 4.13 观察像散的实验装置



(2) 将透镜恢复 0° 位置，将 F 片换成车轮状片，如图 4.14 所示，移动屏幕位置，观察圆环像和辐射轮像位置是否相同，并利用数字相机摄影。

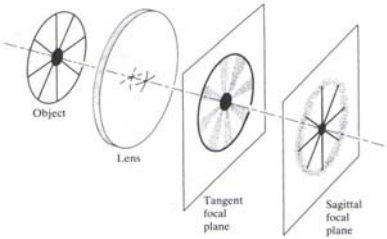


图 4.14 车轮状片的像散



5、畸变的观察

- (1) 安排实验装置如图 4.15，置一网状片于平行聚光透镜之后。
- (2) 在成像透镜之前与之后分别置放可调光圈，观察成像图，并利用数字相机摄影记录。

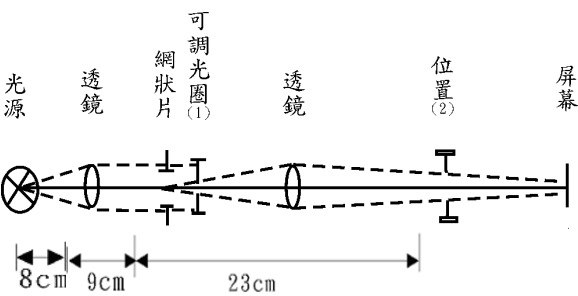
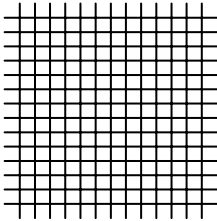


图 4.15 畸变的观察



光圈置放	成像透镜之前	成像透镜之后
光圈位置	cm	cm
畸变种类		
成像结果		

注：所有附图中实验仪器之间的距离可自行斟酌，数据仅供参考。

四、预习要求

根据实验内容，查阅郁道银等主编《工程光学》，北京：机械工业出版社，2000；李晓彤，岑兆丰编《几何光学 像差 光学设计》，浙江大学出版社出版，2003 等文献资料，熟悉透镜像差相成的原因，学习怎样消除这些像差。

五、问题与讨论

请选择其中一种像差的实验，分析其像差产生的原因，并讨论如何消除你所观察到的像差。请搜寻整理出较完整的数据内容，必须含有图标说明，并注明参考数据来源。

实验 5 光具组基点的测定

引言

一对主点和主平面，一对焦点和焦平面，一对节点和节平面，通常称为共轴理想光学系统的基点和基面。它们构成了一个光学系统的基本模型，是可以与具体的光学系统相对应的。不同的光学系统，只表现为这些基点和基面的相对位置不同，焦距不等而已。根据这些基点和基面的性质，可以求得物空间任意物体的像点位置和大小。因此，总是利用共轴光学系统的基点和基面的位置来代表一个光学系统。

一、实验目的

- 1、了解测节器的构造及工作原理。
- 2、加深对光具组基点的理解和认识。
- 3、学会利用测节器及平行光测定光具组的基点及焦距。

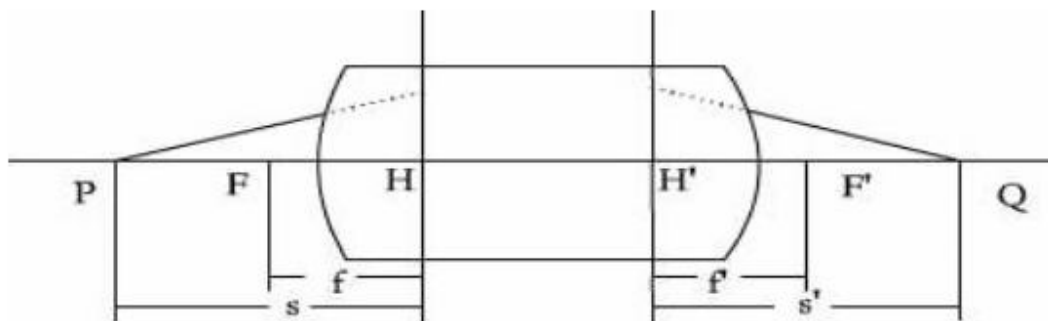


图 5.1 理想光学系统的物象关系

二、实验原理

光学仪器中常用的光学系统，一般都是由单透镜或胶合透镜等球面系统共轴构成的。对于由薄透镜组合成的共轴球面系统，其物和像的位置可由高斯公式：

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{s'} - \frac{1}{s} \quad (5.1)$$

确定。如图 5.1 所示，式中 f' 为系统的像方焦距， s' 为像距， s 为物距。物距是从第一主面到物的距离，像距是从第二主面到像的距离，系统的像方焦距是从第二主面到像方焦点的距离。各量的符号从各相应主面，沿光线进行方向测量为正，反向为负。共轴球面系统的物和像的位置，还可由牛顿公式表示：

$$xx' = ff' \quad (f = -f') \quad (5.2)$$

即式中 x 为从物方焦点量起的物方焦点到物的距离， x' 为从像方焦点量起的像方焦点

到像的距离. 物方焦距 f 和像方焦距 f' 分别是第一、第二主面量到物方焦点和像方焦点的距离. 符号规定同上. 共轴球面系统的基点、基面具有如下的特性:

1、主点和主面

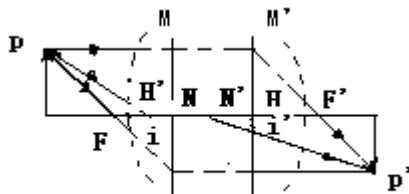


图 5.2 理想光学系统的基点和基面

如图 5.2 所示, 若将物体垂直于系统的光轴放置在第一主点 H 处, 则必成一个与物体同样大小的正立像于第二主点 H' 处, 即主点是横向放大率 $\beta = +1$ 的一对共轭点。过主点垂直于光轴的平面, 分别称为第一、第二主面。

2、节点和节面

如图 5.2 所示, 节点是角放大率 $\gamma = +1$ 的一共轭点。入射光线 (或其延长线) 通过第一节点 N 时, 出射光线 (或其延长线) 必通过第二节点 N' , 并与 N 的入射光线平行。过节点垂直于光轴的平面分别称为第一、第二节面。

当共轴球面系统处于同一媒质时, 两主点分别与两节点重合。

3、焦点和焦面

平行光束经光学系统后的光线(或其延长线)与主光轴的交点称为焦点, 过焦点垂直于主光轴的平面称焦平面。物方空间的平行光束, 经系统折射后在系统像方空间所对应的光线(或其延长线)与主光轴的交点 F' 称像方焦点, 主点 H' 至像方焦点 F' 的距离称像方焦距 f' 。像方空间的平行光束, 经系统折射后在系统物方空间所对应的光线(或其延长线)与主光轴的交点 F 称物方焦点, 主点 H 至物方焦点 F 的距离称为物方焦距 f 。

显然, 薄透镜的两主点与透镜的光心重合, 而共轴球面系统两主点的位置, 将随各组合透镜或折射面的焦距和系统的空间特性而异。下面以两个薄透镜的组合为例进行讨论. 设两薄透镜的像方焦距分别为 f'_1 和 f'_2 , 两透镜之间距离为 d , 则透镜组的像方焦距 f' 可由下式求出:

$$f' = \frac{f'_1 f'_2}{(f'_1 + f'_2) - d}, f = -f' \quad (5.3)$$

其前后主点的位置 (从前后薄透镜的镜心算起) 的计算公式为:

$$l' = \frac{-f'_2 d}{(f'_1 + f'_2) - d}, \quad l = \frac{f'_1 d}{(f'_1 + f'_2) - d} \quad (5.4)$$

计算时注意 L' 是从第二透镜光心量起, L 是从第一透镜光心量起.

4、用测节器测定光具组的基点

设有一束平行光入射于由两片薄透镜组成的光具组, 光具组与平行光束共轴, 光线通过

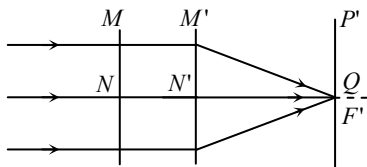


图 5.3 平行于光轴的光线入射时成像在像方焦点

光具组后, 会聚于白屏上的 Q 点, 如图 5.3 所示, 此 Q 点为光具组的像方焦点 F' 。若以垂直于平行光的某一方向为轴, 将光具组转动一小角度, 可有如下两种情况

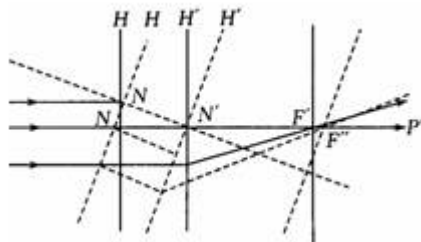


图 5.4 透镜组绕像方节点转动时, 像点位置不动

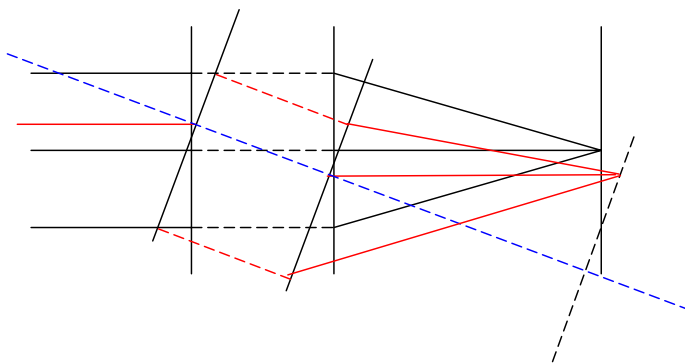


图 5.5 透镜组绕任一转轴转动时, 像点位置移动

(1) 回转轴恰好通过光具组的第二节点 N'

因为入射第一节点 N 的光线必从第二节点 N' 射出, 而且出射光平行于入射光。现在 N' 未动, 入射角光束方向未变, 所以通过光具组的光束, 仍然会聚于焦平面上的 Q 点, 如图 5.4 所示。但是, 这时光具组的像方焦点 F' 已离开 Q 点, 严格地讲, 回转后像的清晰度稍差。

(2) 回转轴未通过光具组的第二节点 N'

由于第二节点 N' 未在回转轴上, 所以光具组转动后, N' 出现移动, 但由 N' 的出射光

仍然平行于入射光,所以由 N' 出射的光线和前一情况相比将出现平移,光束的会聚点将从 Q 移到 Q' , 如图 5.5 所示。

测节器是一个可绕铅直轴 OO' 转动的水平滑槽 R , 待测基点的光具组 L_s (由薄透镜组成的共轴系统) 放置在滑槽上, 位置可调, 并由槽上的刻度尺指示 L_s 的位置如图 5.6 所示。测量时轻轻地转动一点滑槽, 观察白屏 P' 上的像是否移动, 参照上述分析判断 N' 是否位于 OO' 轴上, 如果 N' 未在 OO' 轴上, 就调整 L_s 在槽中位置, 直至 N' 在 OO' 轴上, 则从轴的位置可求出 N' 对 L_s 的位置。

三、实验仪器

光具座, 光源, 测节器, 薄透镜 (若干), 物屏 (毫米尺), 白屏, 准直透镜, 平面反射镜

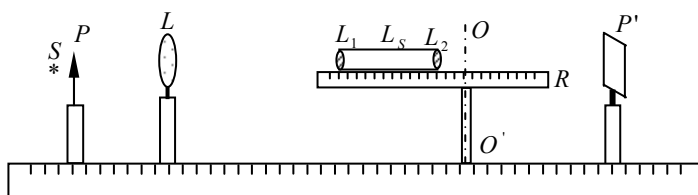


图 5.6 实验装置

四、实验步骤与内容

- 1、用自准成像法调光。借助平面镜调整毫米尺 (物屏) 与准直物镜的距离, 使出射光束为平行光。
- 2、调整测节器及光路。把两个凸透镜装在测节器上的小透镜夹内。调整测节器的高度, 使平行光束正好穿过二透镜中心。
- 3、移动白屏, 找到毫米尺清晰像。绕转轴摆动测节器, 看到屏上的像也随着摆动。再改变测节器与转轴的相对位置 (注意: 光具组与屏的距离不能变, 即沿节点架导轨前后移动透镜组, 同时相应地前后移动白屏), 同时摆动测节器并仔细观察像的位置如何变化。最后总能找到一点, 当测节器绕这点摆动时像的位置固定不动。这时转轴在测节器上的位置就是后节点的位置, 亦即后主点的位置。在测节器上量出转轴到屏的距离, 即光具组的后焦距。分别记下屏和节点架在米尺导轨上的位置 a 和 b , 并从节点架导轨上记下透镜组中间位置 (有标线) 到节点架转轴中心的偏移量 L 。
- 4、将测节器转动 180° , 重复步骤 3, 测得另一组数据 a' , b' , L' 。
- 5、改变二透镜的距离, 使 (a) $d=0$, (b) $f_1' < d < f_2'$, (c) $f_2' < d < f_1' + f_2'$, (d) $d > f_1' + f_2'$ 。依据以上方法分别测定所列各种情况下的焦距, 各测一次。记录焦点虚实与焦距的正负
- 6、当在 L_2 的后面得不到实焦点时, 可再利用一凸透镜, 使光具组的虚焦点在该凸透镜的后面成实像, 再用牛顿公式或高斯公式确定虚焦点的位置, 并利用测节的方法测出节点的位置 (即转动尺杆, 观察虚焦点不动), 从而确定其焦距。

五、数据处理

- 1、记录各种情况下的数据于表 5.1 中：像方节点偏离透镜组中心的距离为 L
 透镜组的像方焦距 $f''=a-b$
 物方节点偏离透镜中心的距离为 L'
 透镜组的物方焦距 $f=a'-b'$ 。
 比较各种情况下的实验测量数据和理论计算数据。
 试用作图法大致确定透镜组基点位置。
- 2、画出透镜组的焦距随透镜间距的变化曲线

表 5.1

透镜 1 焦距 $f_1' =$ _____ cm 透镜 2 焦距 $f_2' =$ _____ cm 透镜间距 $d =$ _____ cm

像屏位置 a		像屏位置 a'	
节点架位置 b		节点架位置 b'	
像方节点偏离透镜组中心的距离为 L		物方节点偏离透镜组中心的距离为 L'	
透镜组的像方焦距 $f''=a-b$		透镜组的像方焦距 $f=a'-b'$	
用合适的比例画出被测透镜组及其各种基点的相对位置			

1) . 透镜间距 $d =$ _____ cm

像屏位置 a		像屏位置 a'	
节点架位置 b		节点架位置 b'	
像方节点偏离透镜组中心的距离为 L		物方节点偏离透镜组中心的距离为 L'	
透镜组的像方焦距 $f''=a-b$		透镜组的像方焦距 $f=a'-b'$	
用合适的比例画出被测透镜组及其各种基点的相对位置			

2) 透镜间距 $d = \underline{\hspace{2cm}}$ cm

像屏位置 a		像屏位置 a'	
节点架位置 b		节点架位置 b'	
像方节点偏离透镜组中心的距离为 L		物方节点偏离透镜组中心的距离为 L'	
透镜组的像方焦距 $f' = a - b$		透镜组的像方焦距 $f = a' - b'$	
用合适的比例画出被测透镜组及其各种基点的相对位置			

3) 透镜间距 $d = \underline{\hspace{2cm}}$ cm

像屏位置 a		像屏位置 a'	
节点架位置 b		节点架位置 b'	
像方节点偏离透镜组中心的距离为 L		物方节点偏离透镜组中心的距离为 L'	
透镜组的像方焦距 $f' = a - b$		透镜组的像方焦距 $f = a' - b'$	
用合适的比例画出被测透镜组及其各种基点的相对位置			

六、复习思考题

- 1、第一主面靠近第一个透镜，第二主面靠近第二个透镜，在什么条件下才是对的？（光具组由二薄凸透镜组成）
- 2、由一凸透镜和一凹透镜组成的光具组，如何测量其基点（距离 d 可自己设定）

实验 6 线阵 CCD 原理、驱动及特性测量

引言

CCD（电荷耦合器件，Charge Coupled Device），是 70 年代初发展起来的新型半导体光电成像器件。美国贝尔实验室的 W.S.Boyle 和 G.E.Smith 于 1970 年提出了 CCD 的概念，随后建立了以一维势阱模型为基础的非稳态 CCD 的基本理论。30 多年来，随着新型半导体材料的不断涌现和器件微细化技术的日趋完备，CCD 技术得到了较快的发展。目前，CCD 技术已广泛应用于信号处理、数字存贮及影像传感等领域。其中，CCD 技术在影像传感中的应用最为广泛，已成为现代光电子学和测试技术中最活跃、最富有成果的领域之一。

一、实验目的

- 1、掌握用双踪迹示波器观测二相线阵 CCD 驱动脉冲的频率、幅度、周期和相位关系的测量方法。
- 2、通过测量线阵 CCD 驱动脉冲的时序和相位关系，掌握二相线阵 CCD 的基本工作原理。
- 3、通过测量典型线阵 CCD 的输出信号和驱动脉冲的相位关系，掌握线阵 CCD 基本特征。
- 4、通过对典型线阵 CCD 在不同驱动频率和不同积分时间下的输出信号测量，进一步掌握线阵 CCD 的有关特性，掌握积分时间的意义，以及驱动频率和积分时间对 CCD 输出信号的影响。理解线阵 CCD 器件的“溢出”效应。
- 5、掌握实验仪 YHCCD—IV 的基本操作和功能。

二、实验原理

1、线阵 CCD 的基本工作原理

一个完整的 CCD 器件由光敏单元、转移栅、移位寄存器及一些辅助输入、输出电路组成。CCD 工作时，在设定的积分时间内由光敏单元对光信号进行取样，将光的强弱转换为各光敏单元的电荷多少。取样结束后各光敏元电荷由转移栅转移到移位寄存器的相应单元中。移位寄存器在驱动时钟的作用下，将信号电荷顺次转移到输出端。将输出信号接到示波器、图象显示器或其它信号存储、处理设备中，就可对信号再现或进行存储处理。由于 CCD 光敏元可做得很小（约 10 μ m），所以它的图象分辨率很高。

（1）CCD 的 MOS 结构及存贮电荷原理

CCD 的基本单元是 MOS 电容器，这种电容器能存贮电荷，其结构如图 6.1 所示。以 P 型硅为例，在 P 型硅衬底上通过氧化在表面形成 SiO₂ 层，然后在 SiO₂ 上淀积一层金属为栅极，P 型硅里的多数载流子是带正电荷的空穴，少数载流子是带负电荷的电子，当金属电极上施加正电压时，其电场能够透过 SiO₂ 绝缘层对这些载流子进行排斥或吸引。于是带正电的空穴被排斥到远离电极处，剩下的带负电的少数载流子在紧靠 SiO₂ 层形成负电荷层（耗尽层），电子一旦进入由于电场作用就不能复出，故又称为电子势阱。

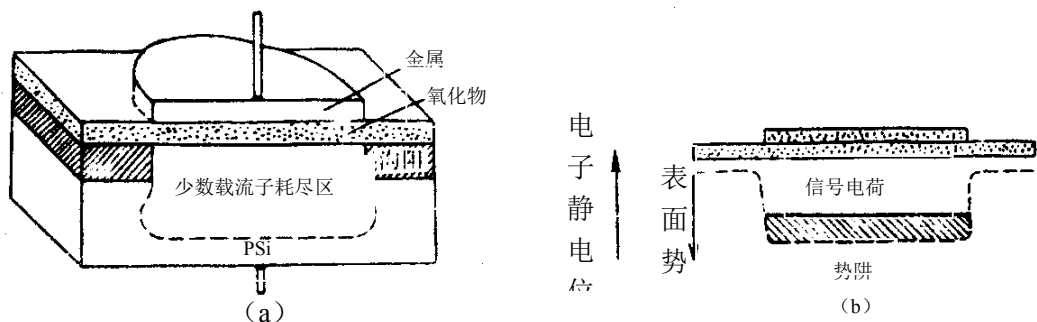


图 6.1 CCD 结构和工作原理图

(a)用作少数载流子贮存单元的 MOS 电容器剖面图 (b)有信号电荷的势阱，图上用阱底的液体代表

当器件受到光照时（光可从各电极的缝隙间经过 SiO_2 层射入，或经衬底的薄 P 型硅射入），光子的能量被半导体吸收，产生电子-空穴对，这时出现的电子被吸引存贮在势阱中，这些电子是可以传导的。光越强，势阱中收集的电子越多，光弱则反之，这样就把光的强弱变成电荷的数量，实现了光与电的转换，而势阱中收集的电子处于存贮状态即使停止光照一定时间内也不会损失，这就实现了对光照的记忆。

总之，上述结构实质上是个微小的 MOS 电容，用它构成像素，既可“感光”又可留下“潜影”，感光作用是靠光强产生的电子电荷积累，潜影是各个像素留在各个电容里的电荷不等而形成的，若能设法把各个电容里的电荷依次传送到输出端，再组成行和帧并经过“显影”就实现了图象的传递。

（2）电荷的转移与传输

CCD 的移位寄存器是一列排列紧密的 MOS 电容器，它的表面由不透光的铝层覆盖，以实现光屏蔽。由上面讨论可知，MOS 电容器上的电压愈高，产生的势阱愈深，当外加电压一定，势阱深度随阱中的电荷量增加而线性减小。利用这一特性，通过控制相邻 MOS 电容器栅极电压高低来调节势阱深浅。制造时将 MOS 电容紧密排列，使相邻的 MOS 电容势阱相互“沟通”。认为相邻 MOS 电容两电极之间的间隙足够小（目前工艺可做到 $0.2 \mu\text{m}$ ），在信号电荷自感生电场的库仑力推动下，就可使信号电荷由浅处流向深处，实现信号电荷转移。

为了保证信号电荷按确定路线转移，通常 MOS 电容阵列栅极上所加电压脉冲为严格满足相位要求的二相、三相或四相系统的时钟脉冲。下面我们介绍三相 CCD 结构及工作原理。

简单的三相 CCD 结构如图 6.2 所示。每一级也叫一个像元，有三个相邻电极，每隔两个电极的所有电极（如 1、4、7……，2、5、8……，3、6、9……）都接在一起，由 3 个相位相差 120° 的时钟脉冲 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 来驱动，故称三相 CCD，图 6.2 (a) 为断面图；图 6.2 (b) 为俯视图；图 6.2 (d) 给出了三相时钟之间的变化。在时刻 t_1 ，第一相时钟 ϕ_1 处于高电压， ϕ_2 、 ϕ_3 处于低压。这时第一组电极 1、4、7……下面形成深势阱，在这些势阱中可以贮存信号电荷形成“电荷包”，如图 6.2 (c) 所示。在 t_2 时刻 ϕ_1 电压线性减少， ϕ_2 为高电压，在第一组电极下的势阱变浅，而第二组（2、5、8……）电极下形成深势阱，信息

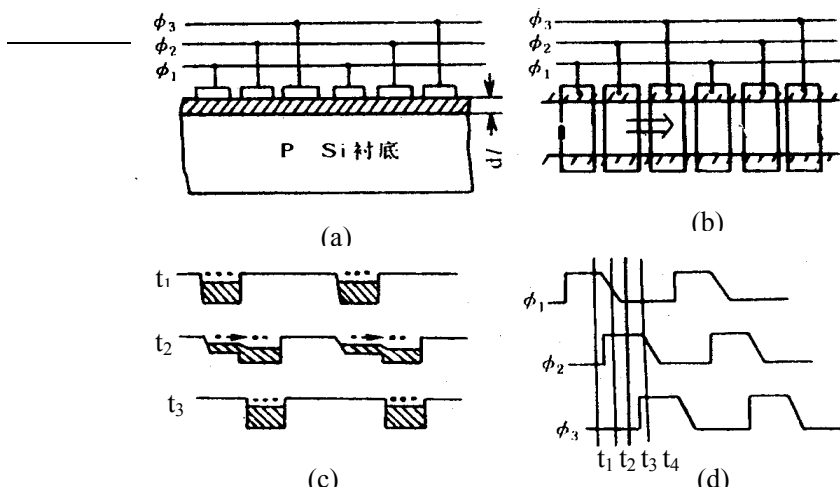


图 6.2 三相 CCD 传输原理图

电荷从第一组电极下面向第二组转移，直到 t_3 时刻， ϕ_2 为高压， ϕ_1 、 ϕ_3 为低压，信息电荷全部转移到第二组电极下面。重复上述类似过程，信息电荷可从 ϕ_2 转移到 ϕ_3 ，然后从 ϕ_3 转移到 ϕ_1 电极下的势阱中，当三相时钟电压循环一个时钟周期时，电荷包向右转移一级（一个像元），依次类推，信号电荷一直由电极 1、2、3……N 向右移，直到输出。

(3) 电荷读出方法

CCD 的信号电荷读出方法有两种：输出二极管电流法和浮置栅 MOS 放大器电压法。

图 6.3 (a) 是在线列阵末端衬底上扩散形成输出二极管，当二极管加反向偏置时，在 PN 结区产生耗尽层。当信号电荷通过输出栅 OG 转移到二极管耗尽区时，将作为二极管的少数载流子而形成反向电流输出。输出电流的大小与信息电荷大小成正比，并通过负载电阻 R_L 变为信号电压 U_0 输出。

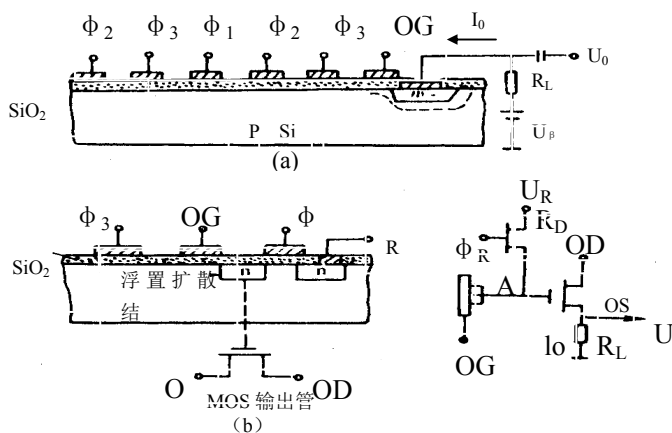


图 6.3 电荷读出方法

(a)输出二极管电流法 (b)浮置栅 MOS 放大器电压法 (c)输出级原理

图 6.3 (b) 是一种浮置栅 MOS 放大器读取信息电荷的方法。MOS 放大器实际是一个源极跟随器，其栅极由浮置扩散结收集到的信号电荷控制，所以源极输出随信号电荷变化。为了接收下一个“电荷包”的到来，必须将浮置栅的电压恢复到初始状态，故在 MOS 输出管

栅极上加一个 MOS 复位管。在复位管栅极上加复位脉冲 ϕ_R 使复位管开启，将信号电荷抽走，使浮置扩散结复位。

图 6.3 (c) 为输出级原理电路，由于采用硅栅工艺制作浮置栅输出管，可使栅极等效电容 C 很小。如果电荷包的电荷为 Q ，A 点等效电容为 C ，输出电压为 U_0 ，A 点的电位变化 $\Delta U = -\frac{Q}{C}$ ，因而可以得到比较大的输出信号，起到放大器的作用，称为浮置栅 MOS 放大器电压法。

2、TCD2252D 线阵 CCD 基本工作原理

CCD 多功能实验仪面板示意图如图 6.4 所示。
TCD2252D 是一种高灵敏度、低暗电流、2700 像元的内置采样保持电路的彩色线阵 CCD 图像传感器。该传感器可用于彩色传真、彩色图像扫描和 OCR。它内部包含 3 列 2700 像元的光敏二极管。该器件工作在 5V 驱动（脉冲）、12V 电源条件下。

TCD2252D 的外形和管脚分布如图 6.5 所示，管



图 6.4 CCD 多功能实验仪面板示意图

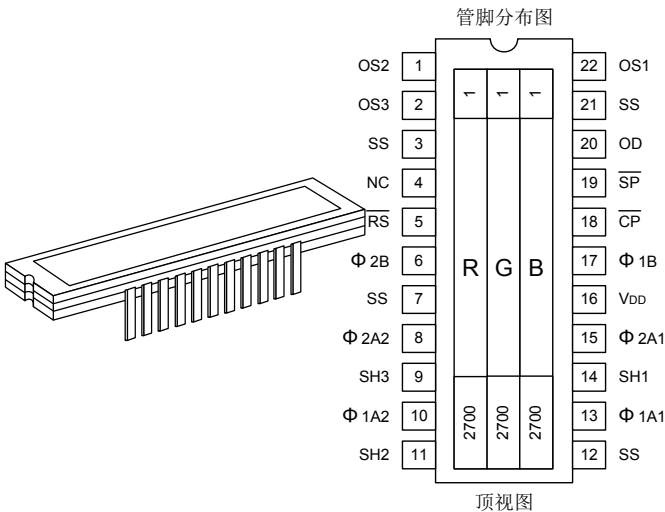


图 6.5 TCD2252D 的外形和管脚分布

脚定义如表 6.1 所示。

表 6.1 TCD2252D 的管脚定义：

管脚号	符号	功能描述	管脚号	符号	功能描述
1	OS2	信号输出（蓝）	12	SS	地
2	OS3	信号输出（红）	13	Ø1A1	时钟 1（第一相）
3	SS	地	14	SH1	转移栅 1
4	NC	未连接	15	Ø2A1	时钟 1（第二相）

5	\overline{RS}	复位栅	16	V_{DD}	电源（数字）
6	$\phi 2B$	末级时钟（第二相）	17	$\phi 1B$	末级时钟（第一相）
7	SS	地	18	\overline{CP}	钳位栅
8	$\phi 2A2$	时钟 2（第二相）	19	\overline{SP}	采样保持栅
9	SH3	转移栅 3	20	OD	电源（模拟）
10	$\phi 1A2$	时钟 2（第一相）	21	SS	地
11	SH2	转移栅 2	22	OS1	信号输出（绿）

TCD2252D 的基本工作原理如图 6.6 所示，工作时序图如图 6.7 所示。

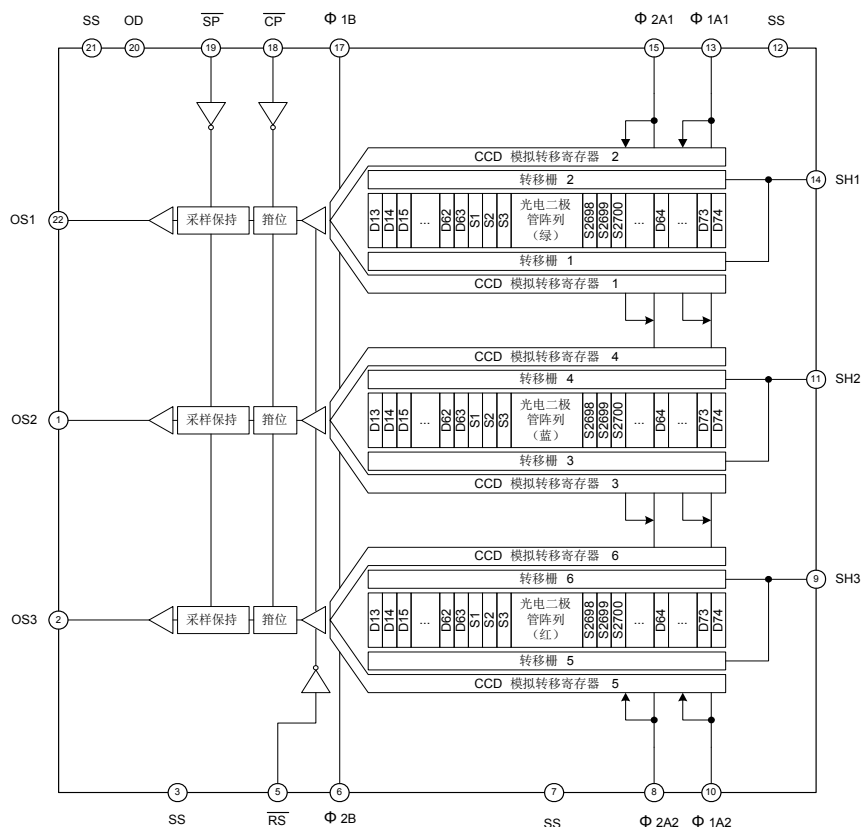


图 6.6 TCD2252D 的电路原理图

时序图

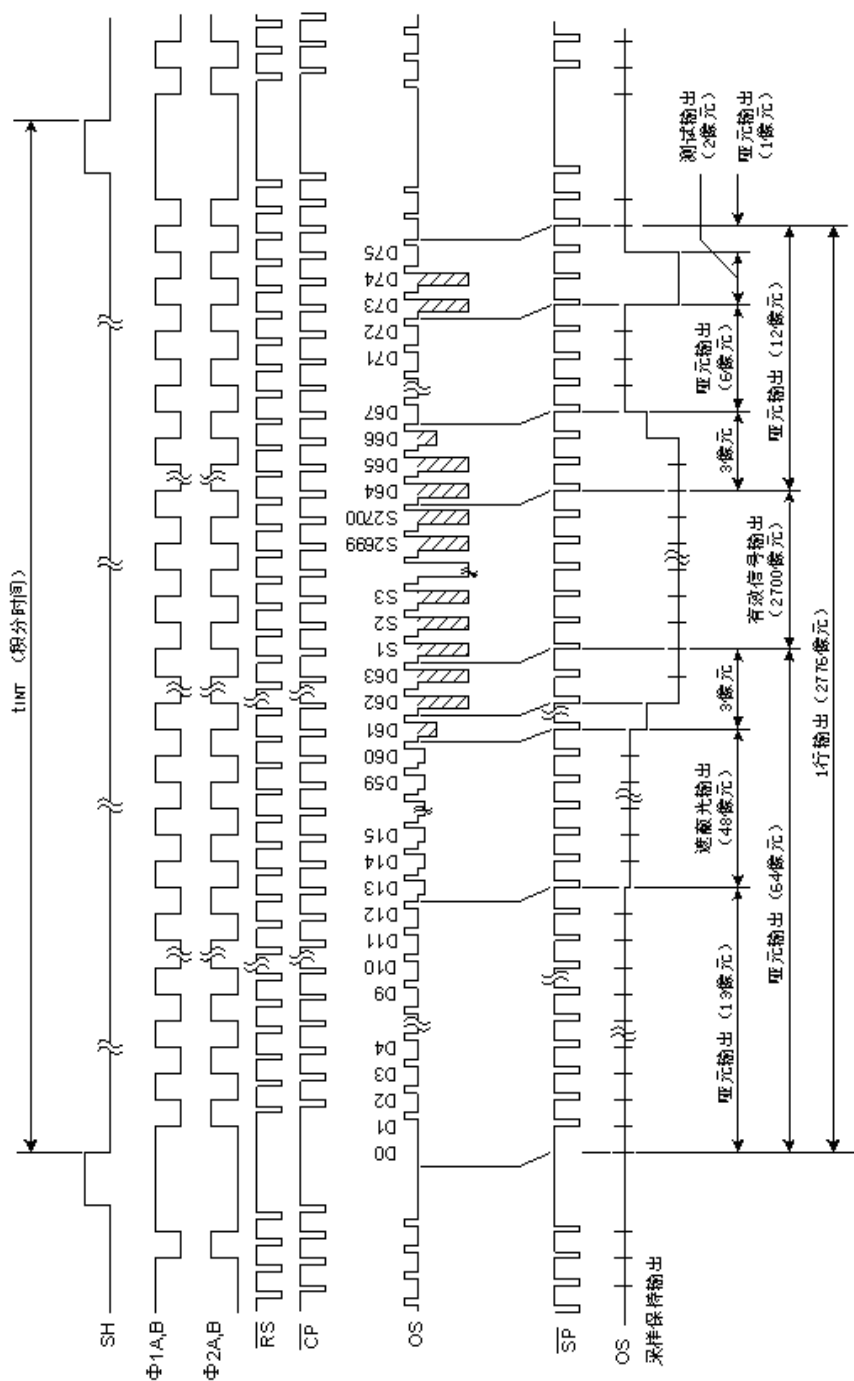


图 6.7 TCD2252D 的工作时序图

三、实验装置

- 1、双踪迹同步示波器（带宽 20MHz 以上）一台。
- 2、线阵 CCD 多功能实验仪 YHCCD—IV（基本型）一台。

四、实验内容和操作方法

1、实验预备

- （1）首先将示波器地线与实验仪上的地线连接良好，并确认示波器的电源和实验仪的电源插头均插入交流 220V 插座上。
- （2）打开示波器电源和 YHCCD—IV 的主电源开关，观察仪器面板显示窗口，数字闪烁表示仪器初始化，闪烁结束后显示为“00 0”字样，前两位表示积分时间值，共分为 32 档，显示数值范围由“00” — “31”，数值越大表示积分时间越长。末位表示 CCD 的驱动频率，分四档，显示数值范围“0” — “3”。
- （3）将示波器同步设置为 CH1，灵敏度设置为 2V/格，扫描速度应设置在 50 μ S/格~2.5 μ S/格之间，以看清楚至少 2 个信号周期为准。测量 FC 信号时，看清 2 个工作周期则扫描速度最低应设置为 2.5mS/格。

2、驱动时序和相位的测量

- （1）将示波器 CH1 和 CH2 扫描线调整至适当位置，同步设置为 CH1。
- （2）用 CH1 探头测量转移脉冲 SH，仔细调节使之同步稳定，使 SH 脉冲宽度适当以便于观察。用 CH2 探头分别测量 F1、F2 脉冲，注意各波形的电压幅度和相位关系，以下同。
- （3）保持上述设置，用 CH2 探头分别测量 RS、SP、CP 脉冲，并对照波形关系。
- （4）用 CH1 测量 F1 信号，调整示波器使同步和波形宽度适当。用 CH2 探头分别测量 F2、RS、CP、SP 信号，观察各波形之间的相位对应关系。
- （5）结合上述测量结果，对照波形描述并理解 TCD2252D 器件的工作基本原理。

3、驱动频率和积分时间测量

- （1）驱动频率测量：用示波器分别测量 F1、F2 和 RS 的周期、频率、幅度，填入下表中。按下实验仪器的频率设置按钮，分别测量 4 档频率下的数据并填入下表中。

驱动频率	项目	F1	F2	RS
0 档	周期 (μ s)			
	频率 (KHz)			
	幅度 (V)			
1 档	周期 (μ s)			
	频率 (KHz)			
	幅度 (V)			

2 档	周期 (μs)			
	频率 (KHz)			
	幅度 (V)			
3 档	周期 (μs)			
	频率 (KHz)			
	幅度 (V)			

- (2) 积分时间的测量：将实验仪的频率设置恢复为“0”档，同时确认积分时间设置为“00”档。用 CH1 同步观测 SH 信号，CH2 测量 FC 信号，观察两者的周期是否相同。用 CH1 探测 FC 信号周期，更改积分时间设置并结合驱动频率设置，将不同驱动频率和积分时间设置下的积分时间测量结果填入下表中。

驱动频率 0 档		驱动频率 1 档		驱动频率 2 档		驱动频率 3 档	
积分时间(档)	FC 周期(ms)	积分时间(档)	FC 周期(ms)	积分时间(档)	FC 周期(ms)	积分时间(档)	FC 周期(ms)
00		00		00		00	
02		02		02		02	
04		04		04		04	
06		06		06		06	
07		07		07		07	
09		09		09		09	
11		11		11		11	
13		13		13		13	
15		15		15		15	

4、CCD 输出信号的测量

- (1) 将实验仪积分时间设置恢复为“00”档，驱动频率设置在“0”档，打开实验仪顶部盖板，调节镜头光圈至最大。
- (2) 用示波器 CH1 探头测量 SH 信号，调节示波器显示至少 2 个 SH 周期；CH2 探头测量实验仪的 UG 输出端子，观测 UG 输出是否有变化，如没有任何变化，请通知实验指导教师调整。
- (3) 打开仪器顶部盖板，注意室内要避免强光进入仪器内部。缩小镜头光圈，观测 UG 的波形变化，当 UG 的输出在 0V—4V 之间时停止调整镜头光圈，盖上仪器盖板。
- (4) 保持 CH1 探头不变，增加积分时间，用 CH2 探头分别测量 UG、UR 和 UB 信号，观测其三者之间的幅度差异。
- (5) 调节示波器扫描速度，展开 SH 信号，观测 SH 波形和 CCD 输出波形之间的相位关系。
- (6) 保持示波器的设置不变，观测 FC 信号和 CCD 输出波形之间的关系。
- (7) 打开实验仪盖板，将实验仪测量片 A 插入测量片夹，适当开大镜头光圈，通过示波器

观测 CCD 输出波形的变化。

5、驱动频率和 CCD 输出测量

- (1) 将示波器 CH1 和 CH2 扫描线调整至适当位置，同步设置为 CH1。
- (2) 将实验仪驱动频率设置为“0”档。打开实验仪顶部盖板，调节镜头光圈至适中。
- (3) 用 CH1 探头测量 FC 脉冲，仔细调节使之同步稳定，调节示波器使示波器显示至少 2 个 FC 周期。
- (4) 保持 CH1 探头不动，用 CH2 探头测量 UG 信号。
- (5) 调节镜头光圈，使之逐渐缩小，观测输出 UG 的变化，将光圈调整至 UG 信号刚好接近 0V 位置处停止调整光圈，插入实验用测量片 A，盖上盖板。
- (6) 保持示波器探头不动，按下驱动频率设置按钮，设置为“1”档，调节示波器使 FC 脉冲始终保持显示至少 2 个周期，观测输出信号的变化。
- (7) 继续调节驱动频率至“2”档和“3”档，观测输出信号 UG 的变化。并做相应记录。

6、积分时间与输出信号测量

- (1) 将实验仪驱动频率设置恢复为“0”档，并确认积分时间设置处于“00”档。
- (2) 仿照实验内容 5 (驱动频率和 CCD 输出测量) 中的 (6)、(7) 步骤测量积分时间从“00”——“31”之间输出信号的变化情况，注意观察输出信号的低电平部分的信号宽度有无变化。
- (3) 降低驱动频率，重复上述实验，观测波形变化情况并做相应记录。

7、关机结束

8、写出实验报告

注意说明 TCD2252D 的基本工作原理，RS 脉冲、SP 脉冲和 CP 脉冲的作用，输出信号与 F1、F2 周期的关系，以及积分时间的含意；解释为何在同样的光源亮度下会出现 UR、UG、UB 信号的幅度差异，解释驱动频率对积分时间的影响关系，解释积分时间增加后，输出信号的低电平部分宽度变化情况。

五、注意事项

- 1、实验之前必须将示波器的地线与实验仪 YHCCD—IV 的地线连接良好。
- 2、实验过程中若发现信号波形消失或者不正常，应立即切断实验仪电源，并如实向指导教师汇报情况，排除故障后方可继续进行实验。

六、预习要求

根据实验内容，查阅王庆有主编，《图像传感器应用技术》，电子工业出版社 2003；《CCD 应用技术》等文献资料，熟悉线阵 CCD 的基本特性，驱动方式；掌握线阵 CCD 的特性参数和应用特点。

七、思考题

- 1、解释为什么驱动频率对积分时间会有影响？
- 2、解释为什么在入射光不变的情况下积分时间的变化会对输出信号有影响？这对 CCD 的应用有何指导意义？

实验 7 面阵 CCD 实验

引言

面阵 CCD 是当前应用最广泛的 CCD 器件，它常被用于监控系统、保安、防范、交通指挥、摄录像和数码照相等领域。本实验将以应用最为广泛的隔列转移型面阵 CCD 为例来研究面阵 CCD 的基本工作原理，面阵 CCD 的视频输出信号等。

一、实验目的

- 1、理解和掌握隔列转移型面阵 CCD 的基本工作原理。
- 2、掌握面阵 CCD 的各路驱动脉冲波形和各路驱动脉冲的功能。
- 3、掌握面阵 CCD 输出的视频信号与 PAL 电视制式。
- 4、理解如何利用面阵 CCD 的图像数据采集卡采集复合视频信号进入计算机，并对视频信号进行适当的数据处理，达到会运用典型图像卡采集和处理图像的目的。

二、实验原理

1、面阵 CCD 原理

面阵 CCD 是二维的图象传感器，它可以直接将二维图象转变为视频信号输出。按照一定的方式将一维线型 CCD 的光敏单元和移位寄存器排列成二维阵列，即可以构成面阵 CCD。由于排列方式不同，面阵 CCD 常有四种基本类型：帧转移型、隔列转移型、线转移型和全帧转移型等。

隔列转移型面阵 CCD 的结构如图 7.1 所示。它的象敏单元（图中虚线方块）呈二维排列，每列象敏单元被遮光的读出寄存器及沟阻隔开，象敏单元与读出寄存器之间又有转移控

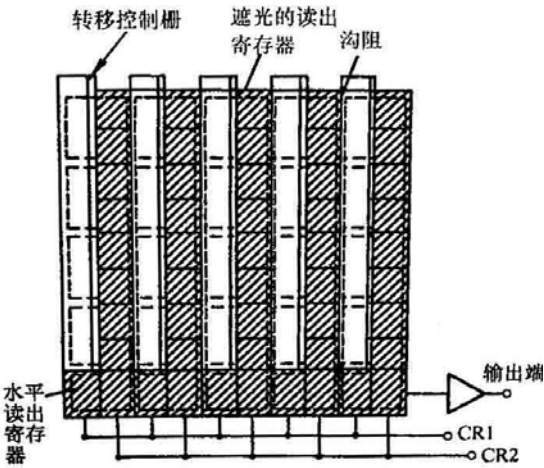


图 7.1 隔列转移型 CCD 的结构

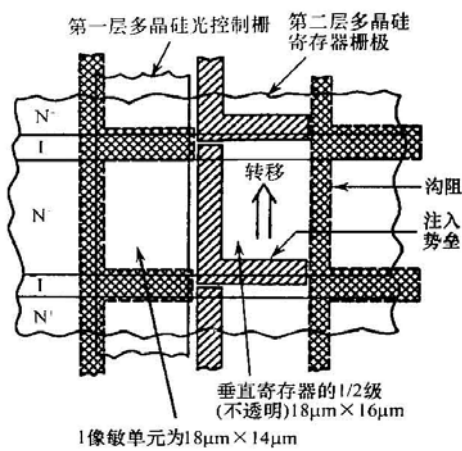


图 7.2 象敏单元与寄存器单元的结构

制栅。由图可见，每一象敏单元对应于两个遮光的读出寄存器单元（图中斜线表示被遮蔽，

斜线部位的方块为读出寄存器单元)。读出寄存器与象敏单元的另一侧被沟阻隔开。由于每列象敏单元均被读出寄存器所隔,所以,这种面阵 CCD 称为隔列转移型 CCD。图中最下面的部分是二相时钟脉冲 CR1、CR2 驱动的水平读出寄存器和输出放大器。

隔列转移型面阵 CCD 工作在 PAL 电视制式下,按电视制式的时序工作。在场正程期间象敏区进行光积分,这个期间转移栅为低电位,转移栅下的势垒将象敏单元的势阱与读出寄存器的变化势阱隔开。象敏区在进行光积分的同时,移位寄存器在垂直驱动脉冲的驱动下一行行地将每一列的信号电荷向水平移位寄存器转移。场正程结束(光积分时间结束),进入场逆程。场逆程期间转移栅上产生一个正脉冲,在转移控制脉冲的作用下将象敏区的信号电荷并行地转移到垂直寄存器中。转移过程结束后,光敏单元与读出寄存器又被隔开,转移到读出寄存器的光生电荷在读出脉冲的作用下一行行地向水平读出寄存器中转移,水平读出寄存器快速地将经输出放大器输出。在输出端得到与光学图象对应的一行行的视频信号。

图 7.2 是隔列转移型面阵 CCD 的二相注入势垒器件的象敏单元和寄存器单元的结构图。该结构为二层多晶硅结构,第一层提供象敏单元上的 MOS 电容器电极,又称多晶硅光控制电极;第二层基本上是连续的多晶硅,它经过选择掺杂构成二相转移电极系统,称为多晶硅寄存器栅极系统。转移方向用离子注入势垒方法完成,使电荷只能按规定的方向转移,沟阻常用来阻止电荷向外扩散。

2、K-C30 图像采集卡

2.1 OK-C30 图像卡的基本结构

OK-C30 图像卡的节本结构如图 7.3 所示,它由多路选择数字解码器将输入的视频图像信号送到 A/D 转换器进行模数转换,转换成的数字图像信号通过 PCI 总线送入计算机内存。这些逻辑功能均在同步控制器的控制下完成。

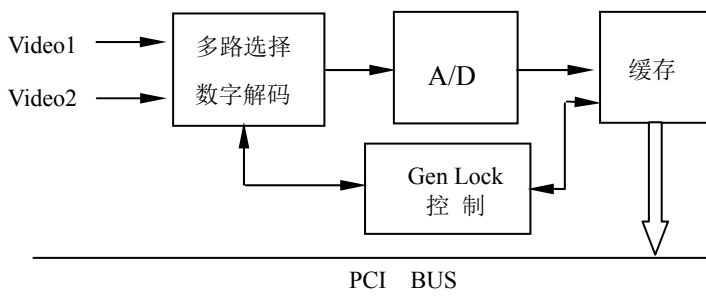


图 7.3 OK-C30 结构图

2.2 图像卡特性

OK-C30 图像卡是基于 PCI 总线,能采集彩色又能采集黑白图像的图像采集卡,用数字解码器对模拟视频信号进行 8 位 A/D 转换,再解码成红(R)、绿(G)、兰(B) 24 位数字信号后,通过 PCI 总线传送到 PC 机系统内存。OK-C30 图像卡不但具有图像的比例缩小而且具有放大功能,具有用于电视会议的镜像显示。OK-C30 硬件支持线性虚地址映射,方便 Win9x 及 WinNT 下的软件开发。图像传送速度高达 132MB/S,可实现摄像机图像到计算机内存的可靠实时传送,相续相邻帧的图像精确到场。因此适用于图像处理、工业监控和多媒体的压缩、处理等研究开发领域和检测工程应用领域。

图像数据以 RGB 或 YUV 格式用打包的方式或分散的方式存放于内存,在采集黑白图像时以紧凑方式将图像数据存放于内存。

采集的图像大小和位置可选，从 16×16 到 768×576 ，X、Y 方向分别有软件以 4 为步长选择，实现 AOI（Area of Interesting）的采集和显示。

具有方形窗口显示或任意形状图形屏蔽显示。

由于 OK-C30 将图像直接传送到主机的内存，视主机内存的大小和所采集图像的大小可连续存储相邻的多帧图像，由此带来了两个好处：

- （1）用户可从连续图像中获得更多的信息。
- （2）图像处理算法在主机内存执行，有利于提高处理速度，充分的发挥越来越高的 CPU 潜力，同时便于用户编程。

图像和菜单同屏显示，兼容大多数 PCI、AGP 显示卡。

2.3 技术指标

- （1）彩色和黑白图像采集。
- （2）视频输入为标准 PAL、NTSC 或 SECAM 制信号。
- （3）六路复合视频输入选择或三路 Y/C 输入选择。
- （4）亮度、色度、对比度、饱和度软件可调。
- （5）图像采集显示分辨率最大 768×576 。
- （6）具有开窗处理功能，窗口可为方形，也可利用点屏蔽做任意形状窗口的处理。
- （7）硬件完成输入图像比例缩小和放大，从 $\times 1/16$ 到 $\times 8$ 倍。
- （8）具有硬件作镜像反转功能。
- （9）具有硬件线性虚地址映射能力。
- （10）支持 RGB32、RGB24、RGB16、RGB15、RGB8、YUV16、YUV12、YUV9、黑白图像 Y8 等图像格式。
- （11）视频 A/D 为 8 位。
- （12）可采集单场、单帧、间隔几帧，连续相邻帧的图像，精确到场。
- （13）具有外触发接口。
- （14）外形尺寸 135×105 （mm）。
- （15）提供 Win9x 及 WinNT 环境下的开发库及 Video for Windows 驱动。

2.4 OK 系列图像卡的软件安装于使用

（1）设备登记与设备驱动安装

在 Win9x 操作系统中，首次安装图像卡时，系统会提示：“发现新的硬件设备（Multimedia Device），请把安装（SETUP）盘插入 A:”，按系统提示即可进行系统的新设备信息登记和驱动程序安装。驱动程序安装完毕后会提示重启系统，可以选择不，而等到完成了下面的第 2 项——开发库与演示程序——安装以后，并设置好所需图像帧缓存的大小，再启动系统。当然也可以选择立即重启。

驱动程序缺省设置序列图像帧缓存大小为 4096K（4M）字节。以后如需改变，可以按下面所述方法设置所需序列图像帧缓存的大小，重启系统后，方可使新设置生效。

如果由于某种原因，没有找到相应卡的安装信息，或已经由其他安装软件安装过，在这种情况下，可以直接执行安装程序（SETUP），方法见下。安装完毕，再按《5.OK 设备管理器的使用》中《b, OK 系列图像卡管理》中的方法，进行一下“更新注册”，就可实现当前

已安装 OK 系列图像卡的正确信息登记。

(2) 开发库与演示程序安装

进入 **OK_C30 演示软件** 目录，然后运行标准安装程序 **Setup**，按程序提示即可容易地安装好开发库和驱动程序及演示程序。安装完毕后，安装程序会在系统桌面以及开始“程序”中自动生成一“OK Image Products”文件夹，文件夹里有“OK Demo”演示程序，用户可以通过该演示程序进行图像卡的一些常规操作，以测试图像卡工作是否正常。文件夹里还有“UnInstall OK Devices”，用来撤除图像卡驱动系统；以及“OK User Guider”用户指南，和“OK Device Manager”OK 系列图像设备管理器。

如需改变设备驱动程序所预申请的序列图像帧缓存的大小，可以直接双击“Ok Device Manager”图标，也可通过进入“设置/控制面板”中找到“Ok Device Manager”或“OK 系列图像设备管理器”，双击该图标会弹出对话框，然后双击“缓存分配”，再在“新设置”中输入需要预分配的序列图像帧缓存大小（以 K 字节为单位），一般至少需要 2M 字节。最多一般不要超过系统总内存 32M 字节，如需要尽可能大，可以键入一接近系统现有内存的值，如：系统内存配置为 64M，可以键入 51200（50M），然后重启系统。在系统启动时，设备驱动程序会预分配尽可能达到所要求大小的内存作为序列图像帧缓存。

通过安装程序在完全缺省方式下安装以后，就在“Program Files”目录下生成一文件夹“OkDemo”，在该文件夹里有如下文件和目录：

okdemo.exe	OK 系列图像卡演示程序
uinst.isu	撤除安装文件
UserAPI	用户开发库文件目录
Exemple	示例源程序文件目录

在用户开发库文件目录 UserAPI 有如下文件：

okapi32.h	库函数的 C 头文件
okapi32.lib	接口驱动 okapi32.dll 的 VC 用静态输入库
dllentry.c	接口驱动 okapi32.dll 的动态调用 C 源程序
okapi32.bas	VB 用声明文件
okuser.doc	用户使用说明（文本文件）

在文件目录 Example 中有示例程序的源程序、头文件、资源文件及 VC 编译环境文件，用户通过 VC 装入其工作环境后即可进行编译连接，所生成的执行程序即为我们提供的演示程序 okdemo.exe。

所有的 OK 系列卡的驱动程序（均以 ok 打头）都安装在 WINDOWS 系列目录 SYSTEM 中，这些驱动程序包括 VXD 系统虚拟设备驱动 okadv.vxd，OK 设备管理器 okaman.cpl 和 okdevman.exe，图像卡接口驱动 okapi32.dll 及图像卡设备驱动 okacap.dll，okm20.dll，okm80k.dll，okc20.dll，okc30.dll，okc50.dll，okc70.dll，okc80.dll 等，对 WIN95 早期版本，还有 32 位公用系统动态库 msvcrt.dll。如果用户利用 OK 系列卡开发出自己的应用系统，并希望把 OK 系列卡所需的驱动程序打包到自己的安装程序中，就要把所有上述驱动程序文件打包进去。

（3）撤除图像卡的安装

如要撤除某卡，须在退出系统之前，首先进入“设置/控制面板/系统/设备管理”，找到“Ok Image Device”或“OK 系列图像设备”，再找到要删除的某种型号的图像卡，按“删除”钮，即完成撤除该卡的系统登记。如已安装了多个卡，并要全部删除，则可按上述方法逐项删除已安装的各型号的图像卡。然后再退出系统，关机，拔出该卡。

即使仅仅是有噶某卡换一下插槽，最好也按上述步骤进行。

（4）撤除驱动与演示程序

进入“设置/控制面板/添加或删除程序”，找到“Ok Image 2.0”并双击该项即可完成撤除 OK 系列图像卡开发库和驱动程序及演示程序的任务。不过此方法，无法撤除“Ok Device Manager”。可以通过直接双击“Ok Image Products”文件夹中的“UnInstall OK Devices”图标来完成完全撤除 OK 系列图像卡开发库和驱动程序及演示程序的工作。

（5）OK 设备管理器的使用

设备管理器有两个基本用途，一是设置预保留缓存，二是 OK 系列图像卡的管理。点击 OK 系列图像设备管理器，有三组标签，分别为“版本信息”、“缓存分配”和“图像卡设置”。其中“缓存分配”是用来设置申请保留缓存；“图像卡设置”是用来进行图像卡管理。

a、序列图像采集申请缓存

通过“缓存分配”中的设置，由我们提供的虚拟设备驱动 OKADRV.VXD 在系统启动时完成，所申请的缓存是物理的且连续的，硬件采集可以直接使用的。如果用户设置的缓存大小比较大，在系统启动时，申请不到所需求的大小，则驱动程序会按目前所能申请到的最大尺寸来申请。在正常的情况下，虚拟设备驱动 OKADRV.VXD 是动态安装的，也就是只有在安装了任何一块 OK 系列图像卡，并且系统中已经正常登记了 OK 系列图像卡信息，系统启动时才会加载虚拟设备驱动 OKADRV.VXD。如果没有安装任何一块 OK 系列图像卡，或者安装了 OK 系列图像卡，但系统中没有正确登记，例如，系统提示安装新设备时，没有插入我们提供的系统安装盘，而是当作一普通多媒体设备（Multi-Media Device）登记的，或者当作其他设备登记的，系统启动时将不会加载虚拟设备驱动 OKADRV.VXD，也就不会申请到所需的缓存。

在这种不能加载虚拟设备驱动 OKADRV.VXD 的情况下，如果是安装了卡而只是没有正确进行系统信息登记，通过第一种方法更新注册法就可实现加载虚拟设备驱动 OKADRV.VXD。通过更新注册（方法见下一节）将使未正确进行系统信息登记的 OK 系列图像卡更正为正确的系统信息登记，重新启动系统后就会加载虚拟设备驱动 OKADRV.VXD。如果没有安装卡，但仍希望申请到所需的缓存，则只能通过第二种方法切换为静态安装（即强制安装）法来实现。点击 OK 系列图像设备管理器中的“缓存分配”后，在“当前状态”的右侧有一显示“I”的按钮，只要点击一下，然后重新启动系统就可实现静态安装，即无论有无安装和正确登记 OK 系列图像卡信息，系统启动时都会加载 OKADRV.VXD。注意，如果用这种方法，在卸载软件时，首先要点击在“缓存分配”中的“当前状态”右侧的显示“U”的按钮，以解除静态安装，然后在卸载软件，才能完全卸载干净。用这种方法，再按下述方法进行虚拟设备设置，就可实现虚拟设备的操作演示。

b、OK 系列图像卡管理

通过“图象卡设置”中的设置，可以实现更新注册，缺省选用卡设置及虚拟卡设置。

当由于某种原因，如系统提示安装新设备时，没有使用我们提供的系统安装盘来安装，或某些卡系统登记时不能区分（由于 WIN95 所使用的系统登记信息少，会有更多一些不能区分情况），而造成系统的登记信息不准确时，可以通过点击“图象卡设置”中的“更新注册”按钮，就可实现当前以安装 OK 系列图象卡的正确信息登记。

如果用户程序调用打开图象卡 `okOpenBoard (&lIndex)` 时，`lIndex=-1`（我们提供的演示程序就是这样设置的，这也是我们推荐的方法），则用户程序不需任何改动，就可通过“图象卡设置”中的设置来实现指定某种卡号或卡型作为当前缺省操作的卡。（1）可以通过输入“缺省选用卡号”的顺序号“零为起始号”来选择缺省要操作的是第几块卡。注意，这里的顺序号是由主机板中 PCI 插槽的分配顺序来决定的，有从左至右或从右至左顺序编号的，也有不规则编号的。（2）也可通过直接输入“缺省选用卡号”的类型码及同型序号来选择缺省要操作的卡型。（3）通过输入负类型码（如 OK_M40 卡，即为-1040），就可以实现指定类型卡的虚拟卡设置，来实现用户程序操作并未安装的某类型卡。

（6）图象卡设置

主机板的 PCI 插槽中不一定全是 Master 的，（可能也有 Slave 的），而图象卡必须插到 Master 的 PCI 插槽中，否则就不能正常采集。图象卡（如：M20H, M40, M60, M30, M70, RGB20）还有中断需求，其资源是由操作系统自动分配的，对于主机中插有老的声卡、网卡等外设及 USB 支持的，应使这些外设的中断设置避开操作系统自动分配给图象卡的中断。

对于 VGA 的模式设置，一般来说，如是采集彩色信号，最好设置成 24 位色模式，如是采集黑白信号，则最好设置成位模式，或 24 位模式。

软件安装成功后，首先可通过双击文件夹“OK Image Products”中的“OK Demo”演示程序，来测试图象卡及驱动程序是否可以正常工作。一般主要测试“实时采”和“连续采（经缓存）”这两项，如果工作正常，一般就无问题了。演示程序启动后，先通过演示程序“选项”中的“选用图象板”选择要操作的图象卡，然后点击“实时采”，看是否可连续采集图象。如果发生死机等问题，可能有与 VGA 的冲突问题。再通过程序“选项”中的“连续采到屏幕”测试是否可逐帧连续采集到缓存，并显示到屏幕（VGA），如果会发生死机，则可能有主板冲突问题或与其他外设（如声卡、网卡、USB 等）有中断冲突。这时候可以通过改换一下插槽看是否可以避开，或改变系统 CMOS 的设置，PCI 插槽为不与其他设备相同的中断。目前已知有 USB 支持的主板在 WIN95 2.0 或 WIN98 下，其系统经常会将 USB 与图象卡分配同一中断资源，这对需要中断的图象卡就会引起冲突，在这种情况下，除改换插槽外和设置 PC 系统 CMOS 外，也可以通过 95 或 98 系统的设置禁用 USB 来解决。

三、实验装置

- 1、面阵 CCD 实验仪一台。
- 2、双踪迹（或四踪迹）同步示波器一台。
- 3、OK-C30 彩色、黑白两用图像采集卡一块。
- 4、586 以上机型计算机一台。要求计算机具用支持新的 PCI 规范的 PCI 插槽；内存大于 16MB；显示卡具有 PCI 总线卡的速度相应和实时显示的性能，建议选用 S3 系列的 VGA 卡，例

如：S₃64V+、MS-4415 系列显示卡；显示卡的帧存应不小于 2MB。

四、实验内容和操作步骤

1、驱动脉冲波形的测量

- (1) 将四踪迹（或双踪迹）同步示波器的四个输入线调整好，幅度调整到 2V/格上，并将 4 个输入线分别接到面阵 CCD 实验仪的 $\phi V1$ 、 $\phi V2$ 、 $\phi V3$ 和 $\phi V4$ 输出端（双踪迹示波器两两比较实验仪 $\phi V1$ 、 $\phi V2$ 、 $\phi V3$ 和 $\phi V4$ 的输出端），比较其相位关系，并将其驱动脉冲的幅度、频率与周期记录下来，有条件的将各路驱动脉冲波形图画下来。
- (2) 再用示波器的探头测量 $\phi H1$ 和 $\phi H2$ 的波形，比较 $\phi H1$ 和 $\phi H2$ 的位相关系，测量 ϕV 与 ϕH 的频率及周期，包括大周期和小周期。
- (3) 用示波器的探头测量 SH 的幅度、频率和周期。

2、视频输出信号的测量

面阵 CCD 输出的视频信号为全电视视频信号，它包括行、场同步脉冲和视频图像灰度信号。测量时先测场周期、场频，再测行周期、行频。在行同步的情况下再观测视频信号。实验时要求测出场正程时间，场逆程时间，行正程时间，行逆程时间。观察在行正程期间和行逆程期间内，图像灰度的变化情况和 $\phi V1$ 、 $\phi V2$ 、 $\phi V3$ 和 $\phi V4$ 的脉冲变化。

3、图象的数据采集（选做）

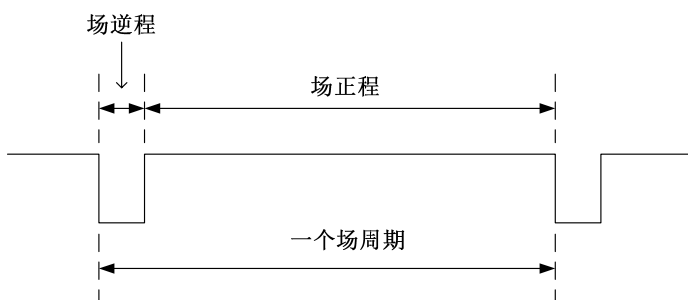
- (1) 在计算机关闭的情况下，将 OK-C30 图象卡插入计算机的 PCI 插槽。
- (2) 将与 OK-C30 卡的 DB9 接口线连接好，并将其两颗视频线中的无标记的 Q9 头插到面阵 CCD 实验仪的视频输出的 Q9 插座上。而另一条有标记的 Q9 头的视频线为视频输出，可接黑白或彩色监视器上以便实时监视摄像头所摄得的图象。
- (3) 将面阵 CCD 实验仪的电源线插入到交流 220V 的电源插座上。
- (4) 打开计算机及面阵 CCD 实验仪的电源开关。
- (5) 找到图象卡的采集程序，并按提示操作便可以得到所采集到的图象于计算机显示屏，按视窗提供的操作，改变对比度、灰度（亮度）等参数，观察图象的变化。
- (6) 执行连续采集，单帧采集等操作观察图象的变化。

附录：面阵 CCD 实验仪信号说明

信号波形如下图所示：

注：测量方法是先将示波器的地线与实验仪接好，再把探头接到实验仪的视频信号输出。

1、场信号：

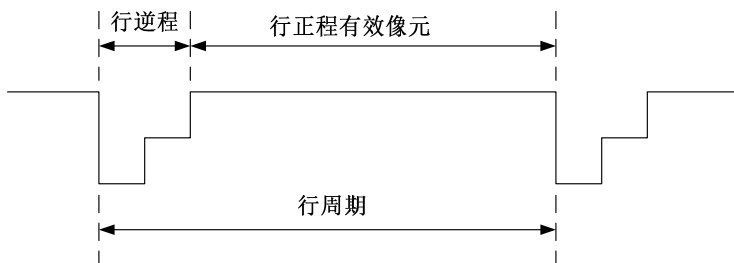


场周期: 20ms

场逆程: 1.6ms

场正程: 18.4ms

2、行信号:



行周期: 64μs

行正程: 52μs

五、注意事项

- 3、实验之前必须将示波器的地线与实验仪 YHCCD—IV 的地线连接良好。
- 4、实验过程中若发现信号波形消失或者不正常，应立即切断实验仪电源，并如实向指导教师汇报情况，排除故障后方可继续进行实验。

六、预习要求

根据实验内容，查阅王庆有主编，《图像传感器应用技术》，电子工业出版社 2003；王庆有编著《CCD 应用技术》等文献资料，了解图象显示器及其相关电视制式，熟悉面阵 CCD 的基本特性，驱动方式；掌握面阵 CCD 的特性参数和应用特点。

七、思考题

- 1、用自己的语言结合所观测的驱动脉冲波形图说明隔列转移面阵 CCD 的基本工作原理。

实验 8 光敏二极管、光敏三极管特性测量

引言

光敏二极管和光敏三极管是光电转换半导体器件，是光电元件中的核心元件，是光电系统的重要组成部分，与光敏电阻相比具有灵敏度高、高频性能好、可靠性好、体积小以及使用方便等优点，在工农业生产中、科学研究中和军事上的应用十分广泛。光敏二极管和光敏三极管的研究对科学发展、国民经济的繁荣、国家安全均具有极其重大的现实意义。

一、实验目的

- 1、了解光敏二极管、光敏三极管的工作原理特性。
- 2、了解光敏二极管、光敏三极管的测试电路。
- 3、学习光敏二极管、光敏三极管的特性测试方法。
- 4、学习光敏二极管、光敏三极管的极性识别方法。

二、实验原理

1、光敏二极管

光敏二极管与半导体二极管在结构上是类似的，其管芯是一个具有光敏特征的 PN 结，具有单向导电性，因此工作时需加上反向电压。无光照时，有很小的饱和反向漏电流，即暗电流，此时光敏二极管截止。当受到光照时，饱和反向漏电流大大增加，形成光电流，它随入射光强度的变化而变化。图 8.1 是光敏二极管结构示意图，当 PN 结处于反向偏置时，在无光照时具有高阻特性，反向暗电流很小；当光照时，结区产生电子-空穴对，在结电场作用下，电子向 N 区运动，空穴向 P 区运动形成光电流，方向与反向电流一致，光的照度愈大，光电流愈大。由于无光照时的反向暗电流很小，因此光照时的反向电流基本上与光强成正比。

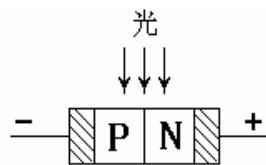


图 8.1 光敏二极管结构示意图

2、光敏三极管

光敏三极管是具有 NPN 或 PNP 结构的半导体管，结构与普通三极管类似，但它的引出电极通常只有两个。光敏三极管的结构与工作电路如图 8.2 所示，集电极接正电压，发射极接负电压，它可以看成是一个 bc 结为光敏二极管的三极管，不同之处是光敏三极管必须有一个对光敏感的 PN 结作为感光面，一般用集电极作为感光面，入射光主要被面积做得较大的基区所吸收。当入射光子在基区及集电区被吸收而产生电子-空穴对时，便形成光生电压，由此产生的光生电流由基极进入发射极，从而在集电极回路中得到一个放大的信号电流。它比光敏二极管具有更高的灵敏度。光敏二极管和光敏三极管均用硅或锗制成，由于硅器件暗电流小、温度系数小，又便于用平面工艺大量生产，尺寸易于精确控制，因此硅光敏器件比锗光敏器件更为普通。

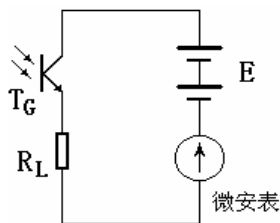


图 8.2 光敏三极管测试电路

三、实验仪器

CSY10G 型光电传感器系统实验仪，我们仅选择如下部件：光敏二极管、光敏三极管、直流稳压电源、负载电阻、光源（高亮度卤钨灯、激光器和各种发光二极管）、遮光罩、试件插座、电路面板、连接导线、电吹风、秒表和万用表等。本实验使用的 CSY10G 型光电传感器系统实验仪，其特点是将各种光电传感器、被测体、信号源、仪表显示、信号采集、处理电路及实验所需的温度、位移、光源、旋转装置集中于一体，可以方便地对多种光电传感器进行光谱特性、光电特性以及温度特性等的测试。并可根据实验原理自主开发出更多的实验内容。实验仪主要由实验工作台、信号控制及仪表显示、图象和数据采集、光电转换/处理电路组成。CSY10G 型光电传感器系统实验仪的详细介绍见附录。

四、实验内容和操作方法

- 1、判断光敏二极管极性，方法是用万用表欧姆 20M 测试档，测得管阻小的时候红表笔端触脚为正极，黑表笔端触脚为负极。
- 2、按图 8.3 所示电路图接线，注意光敏二极管是工作在反向工作电压区的，可用稳压电源上的 $\pm 10V$ 或 $\pm 12V$ 电源。
- 3、光敏二极管暗电流测试，用遮光罩罩住光电器件模板，电路中反向工作电压接 $\pm 12V$ ，打开电源，微安表显示的电流值即为暗电流，或用万用表 200mV 档测得负载电阻 R_L 上的压降 $V_{\text{暗}}$ ，则暗电流 $I_{\text{暗}}=V_{\text{暗}}/R_L$ 。在试件插座上更换其它光敏二极管（五个以上）进行暗电流测试比较（列表格记录实验数据）。
- 4、光敏二极管光电流测试，取走遮光罩，读出微安表上的电流值，或是用万用表 200 mV 档测得 R_L 上的电压降 $V_{\text{光}}$ ，光电流 $I_{\text{光}}=V_{\text{光}}/R_L$ 。
- 5、伏安特性测试，光敏二极管在给定的光照强度与工作电压下，记录下所测得的工作电压 V_{ce} 与工作电流（仅对一个光敏二极管研究即可，列表格记录实验数据），工作电压可从 $\pm 4V \sim \pm 12V$ 变换，并作出一组 V/I 曲线。
- 6、光敏二极管光谱特性测试，不同材料制成的光敏二极管对不同波长的入射光反应灵敏度是不同的。用备用的各色发光二极管、卤钨灯、激光照射光敏二极管（至少选择五种光源），分别测得光电流并加以比较（列表格记录实验数据）。同时，要尽量保证在相同的条件下（比如光源到光敏二极管有相同的距离，相同的光照强度等）进行实验。
- 7、判断光敏三极管 C、E 极性，方法是用万用表欧姆 20M 测试档，测得管阻小的时候红表笔端触脚为 C 极，黑表笔端触脚为 E 极。
- 7、光敏三极管暗电流测试，按图 8.2 所示电路图接线，稳压电源用 $\pm 12V$ ，调整负载电阻 R_L 阻值，使光敏器件模板被遮光罩罩住时微安表显示有电流，这即是光敏三极管的暗电流，或是测得负载电阻 R_L 上的压降 $V_{\text{暗}}$ ，暗电流 $I_{\text{暗}}=V_{\text{暗}}/R_L$ 。在试件插座上更换其它光敏三极管（五个以上）进行暗电流测试比较（列表格记录实验数据）。
- 8、光敏三极管光电流测试，取走遮光罩，即可测得光电流 $I_{\text{光}}$ 。通过实验比较可以看出，光敏三极管与光敏二极管相比能把光电流放大更大的倍数，具有更高的灵敏度（列表格进行比较）。
- 10、光敏三极管伏安特性测试，光敏三极管在给定的光照强度与工作电压下，将所测得的工作电压 V_{ce} 与工作电流记录下来（列表格记录实验数据），工作电压可从 $\pm 4V \sim \pm 12V$ 变换，并作出一组 V/I 曲线。
- 11、光敏三极管光谱特性测试，对于一定材料和工艺制成的光敏管，必须对一定波长的入射

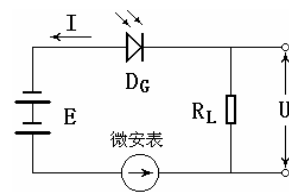


图 8.3 光敏二极管测试电路

光才有响应。按图 8.2 接好光敏三极管测试电路,参照光敏二极管的光谱特性测试方法,分别用各种光源照射光敏三极管(至少选择五种光源),测得光电流(列表格记录实验数据),并做出定性的结论。

- 12、光敏三极管光电特性测试,在外加工作电压恒定的情况下,照射光通量与光电流的关系见图 8.4,用各种光源(光源由试验者自己选择,至少选五种光源)改变光强来照射光敏三极管,记录光电流的变化的趋势(列表格记录实验数据)。

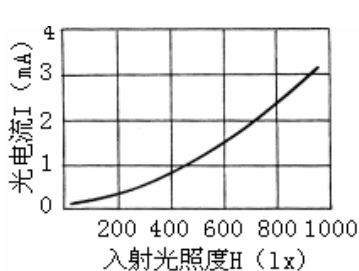


图 8.4 光敏三极管的特性曲线

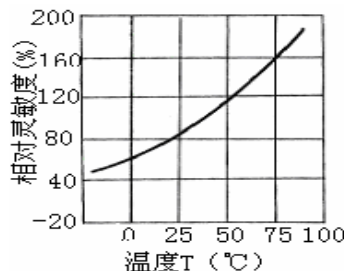


图 8.5 光敏三极管的温度特性曲线

- 13、光敏三极管温度特性测试,光敏三极管的温度特性曲线如图 8.5 所示。试在图 8.2 的电路中,加热光敏三极管(电吹风作为加热源,控制喷嘴到光敏三极管的距离,通过增加加热时间来逐渐升高光敏三极管的温度),观察并记录光电流随温度升高的变化情况,得出定性结论。
- 14、仪器使用完毕,关掉电源,应及时整理好仪器及相关器材,并把实验记录做完整。

五、注意事项

- 1、仪器使用前应对各项传感器、公共电路进行检查,实验连接线是否完好,实验中应避免电源之间相互短路。
- 2、按照电路图连接电路,确认无误后再开启电源。
- 3、请特别注意:发光二极管限流电阻一定不能太小,否则将损坏发光源。
- 4、请特别注意:电吹风作为加热源时,由于吹出的热风温度很高,不能近距离、长时间加热电路以免烧坏电路元件,实验时加热十分钟即可看到温度对光敏三极管的影响。
- 5、请特别注意:固体激光器插头不要插入 CCD 电源插孔,否则会烧坏激光器。
- 6、调节旋钮时不宜用力过猛,尤其在旋钮的极端位置时更应注意,否则易使旋钮错位或损坏。发现仪器工作不正常,或出现故障,不得随意拆卸修理,应请指导老师来处理。
- 7、光电实验仪器在实验时应注意背景光的影响,必要时有些实验应在暗光下进行。请注意当高亮度光源打开时对仪器有一定的干扰,特别是在小信号数据采集时应避免开灯。

六、预习要求

根据实验内容,查阅《半导体光电子技术》,《传感器原理及应用》等文献资料,了解光敏二极管光敏三极管的结构特点;熟悉光敏二极管光敏三极管的基本特性,工作原理等内容;掌握光电探测的应用。

七、思考题

- 1、说明用万用表识别光敏二极管、光敏三极管极性的工作原理是什么?

-
- 2、光敏二极管的反向饱和电流与外加反向电压有关吗？为什么？
 - 3、光敏三极管的输出特性曲线为什么不是水平的？
 - 4、光敏三极管工作的原理与半导体三极管相似，为什么光敏三极管有两根引出电极就可以正常工作？
 - 5、请列举二到三个发光二极管、发光三极管应用的具体装置（可查阅科技文献、参考书籍，浏览网页或实际遇到的装置等），并简要介绍所列举的装置的工作原理。

实验 9 偏振光学实验

引言

光是一种电磁波，其电矢量的振动方向垂直于传播方向，是横波。由于一般光源发光机制的无序性，其光波的电矢量的分布（方向和大小）对传播方向来说是对称的，称为自然光。当由于某种原因，使光线的电矢量分布对其传播方向不再对称时，我们称这种光线为偏振光。对于偏振现象的研究在光学发展中有很重要的地位，光的偏振使人们对光的传播（反射、折射、吸收和散射）规律有了新的认识，并在光学计量、晶体性质研究和实验应力分析等技术部门有广泛的应用。

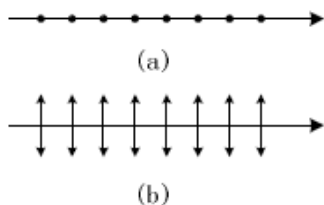
一、实验目的

- 1、观察光的偏振现象，验证马吕斯定律。
- 2、了解 $1/2$ 波片、 $1/4$ 波片的作用。
- 3、掌握偏振光的产生与检测。

二、实验原理

1、光的偏振性

光是一种电磁波，由于电磁波对物质的作用主要是电场，故在光学中把电场强度 E 称为光矢量。在垂直于光波传播方向的平面内，光矢量可能有不同的振动方向，通常把光矢量保持一定振动方向上的状态称为偏振态。如果光在传播过程中，若光矢量保持在固定平面上振动，这种振动状态称为平面振动态，此平面就称为振动面（见图 9.1）。此时光矢量在垂直与传播方向平面上的投影为一条直线，故又称为线偏振态。若光矢量绕着传播方向旋转，其端点描绘的轨道为一个圆，这种偏振态称为圆偏振态。如光矢量端点旋转的轨迹为一椭圆，就成为椭圆偏振态（见图 9.2）。



(a) 电矢量垂直于纸面的平面偏振光
(b) 电矢量平行于纸面的平面偏振光

图 9.1 平面偏振光

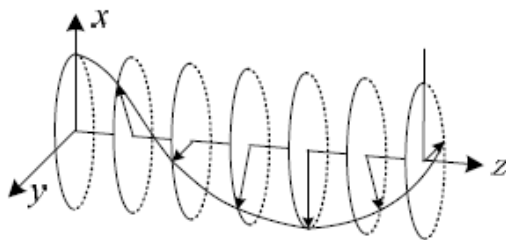


图 9.2 椭圆偏振光

普通光源发出的光一般是自然光，自然光不能直接显示出偏振现象。但自然光可以看

成是两个振幅相同，振动相互垂直的非相干平面偏振光的叠加。在自然光与平面偏振光之间有一种部分偏振光，可以看作是一个平面偏振光与一个自然光混合而成的。其中的平面偏振光的振动方向就是这个部分偏振光的振幅最大方向。

2、偏振片

虽然普通光源发出自然光，但在自然界中存在着各种偏振光，目前广泛使用的偏振光的器件是人造偏振片，它利用二向色性获得偏振光（有些各向同性介质，在某种作用下会呈现各项异性，能强烈吸收入射光矢量在某方向上的分量，而通过其垂直分量，从而使入射的自然光变为偏振光，介质的这种性质称为二向色性）。

偏振器件即可以用来使自然光变为平面偏振光---起偏，也可以用来鉴别线偏振光、自然光和部分偏振光---检偏。用作起偏的偏振片叫做起偏器，用作检偏的偏振器件叫做检偏器和检偏器是通用的。如图 9.3.

3、马吕斯定律

设两偏振片的透振方向之间的夹角为 α ，透过起偏器的线偏振光振幅为 A_0 ，则透过检偏器的线偏振光的振幅为 A

$$A = A_0 \cos \alpha$$

强度为 I

$$I = A_0^2 \cos^2 \alpha = I_0 \cos^2 \alpha \quad (9.1)$$

式中 I_0 为进入检偏器前（偏振片无吸收时）线偏振光的强度，式（9.1）即马吕斯定律。显然，以光线传播方向为轴，转动检偏器时，透射光强度 I 将发生周期变化。若入射光是部分偏振光或椭圆偏振光，则极小值不为 0。

若光强完全不变化，则入射光是自然光或圆偏振光。这样，根据透射光强度变化的情况，可将线偏振光和自然光和部分偏振光区别开来。

4、椭圆偏振光、圆偏振光的产生；1/2 波片和 1/4 波片的作用

当线偏振光垂直射入一块表面平行于光轴的晶片时，若其振动面与晶片的光成 α 角，该线偏振光将分为 e 光、 o 光两部分，它们的传播方向一致，但振动方向平行于光轴的 e 光与振动方向垂直于光轴的 o 光在晶体中传播速度不同，因而产生的光程差为

$\Delta = d(n_e - n_o)$ ，位相差为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d(n_e - n_o) \quad (9.2)$$

式中 n_e 为 e 光的主折射率， n_o 为 o 光的主折射率（正晶体中， $\delta > 0$ ，在负晶体中 $\delta < 0$ ）。

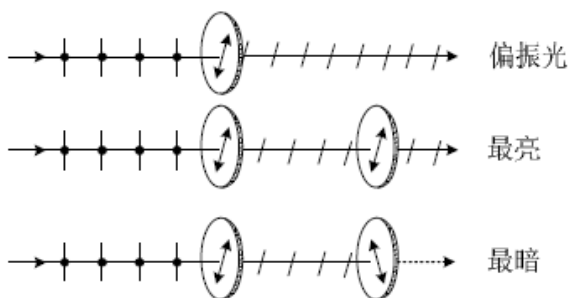


图 9.3 偏振光产生及检验

d 为晶体的厚度, 如图 9.4 所示。当光刚刚穿过晶体时, 此两光的振动可分别表示如下:

$$E_x = A_o \cos(\omega t) \quad (9.3.1)$$

$$E_y = A_e \cos(\omega t + \delta) \quad (9.3.2)$$

式中 $A_e = A \cos \alpha$, $A_o = A \sin \alpha$, 由 (9.3) 中的两式消去 t , 得轨迹方程

$$\frac{E_x^2}{A_o^2} + \frac{E_y^2}{A_e^2} - 2 \frac{E_x E_y}{A_o A_e} \cos \delta = \sin^2 \delta \quad (9.4)$$

这是个一般的椭圆方程。

当改变厚度 d 时, 光程差 Δ 亦改变。

(1) 当 $\Delta = k\lambda$ ($k=0, 1, 2, \dots$), 即 $\delta = 0$ 时, 由

(9.4) 式可得

$$E_y = \frac{A_e}{A_o} E_x \quad (9.5)$$

这是直线方程, 故出射光为平面偏振光, 与原入射光振动方向相同, 满足此条件之晶片叫全波片。光通过全波片不发生振动状态的变化

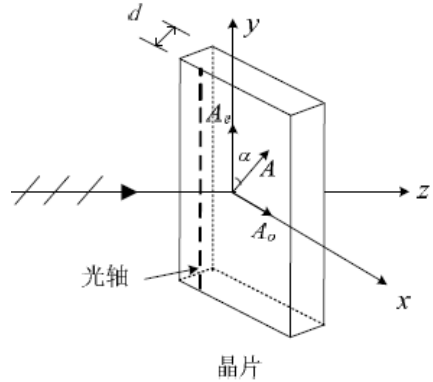


图 9.4 平面偏振光通过晶片的情形

(2) 当 $\Delta = (2k+1)\lambda/2$ ($k=0, 1, 2, 3, \dots$), 即 $\delta = \pi$ 时, 由 (9.4) 式可得

$$E_y = -\frac{A_e}{A_o} E_x \quad (9.6)$$

出射光也是平面偏振光, 但与原入射光夹角为 2α , 满足此条件的晶片叫 1/2 波片, 或半波片, 平面偏振光通过半波片后, 振动面转过 2α 角, 若 $\alpha = 45^\circ$ 则出射光的振动面与入射光的振动面垂直。

(3) 当 $\Delta = (2k+1)\lambda/4$ ($k=0, 1, 2, 3, \dots$), 即 $\delta = \pm\pi/2$ 时, 由 (9.4) 式可得

$$\frac{E_x^2}{A_o^2} + \frac{E_y^2}{A_e^2} = 1 \quad (9.7)$$

出射光为椭圆偏振光, 椭圆的两轴分别与晶体的主截面平行及垂直, 满足此条件的晶片叫 1/4 波片。1/4 波片是作偏振光实验重要的常用元件。

若 $A_e = A_o$, 于是 $x^2 + y^2 = A^2$, 出射光为圆偏振光。

由于 o 光和 e 光的振幅是 α 的函数, 所以通过 1/4 波片后的合成偏振状态也将随角

度 α 变化而不同。

当 $\alpha = 0^\circ$ 时，出射光为振动方向平行 $1/4$ 波片光轴的平面偏振光。

当 $\alpha = \pi/2$ 时，出射光为振动方向垂直于光轴的平面偏振光。

当 $\alpha = \pi/4$ 时，出射光为圆偏振光。

当 α 为其它值时，出射光为椭圆偏振光。

三、实验仪器

半导体激光器、碘钨灯、硅光电池、UT51 数字万用表、偏振片（2 片）、 $1/2$ 波片、 $1/4$ 波片、反射镜、玻璃堆、平台和光具座等

四、实验内容和操作方法

1、验证马吕斯定律

实验装置如图 9.5 所示，光束经过起偏器产生线偏振光，再透过检偏器射到硅光电池上，转动检偏器（ 360° ）观察光强的变化，找到最大电流值（对于硅光电池，其短路电流与光源的光强呈很好的线性关系），确定该位置为相对 0° 。实验时，测量精度： 5° ，测量范围： $-90^\circ \sim +90^\circ$ 。作 $I \sim \cos^2 \alpha$ 的关系曲线，验证马吕斯定律。

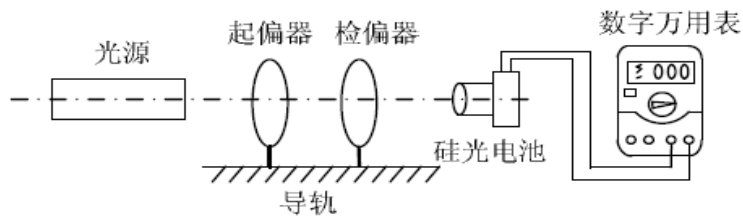


图 9.5 测定马吕斯定律的装置图

2、线偏振光通过 $1/2$ 波片时的现象和 $1/2$ 波片的作用

在光具座上按图 9.6 放置各元件，其中 P 为起偏器，在未放入 $1/2$ 波片时，使 A 与 P 正交，光屏上呈现消光现象。插入 $1/2$ 波片后，转动 $1/2$ 波片观察光屏。调节波片至呈现消光现象，此时为初始角度。再将 $1/2$ 波片从初始位置转 10° ，破坏消光，然后转动 A 至消光位置。记下 A 所转过的角度。依次类推，每将转动 $1/2$ 波片 10° ，记下达至消光时 A 转过的角度。

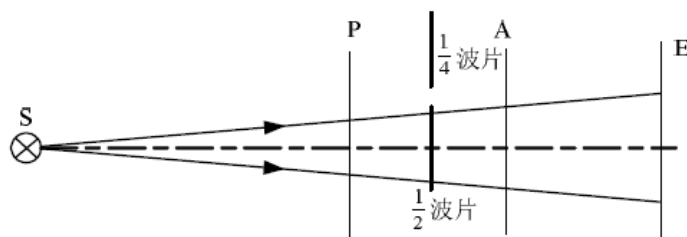


图 6 观察波片作用的装置

1/2波片转过的角度	初始	10°	20°	80°	90°
检偏器A转过的角度							

若检偏片 A 固定，将 $1/2$ 波片转过 360° ，能观察到几次消光？若 $1/2$ 波片固定，将 A 转过 360° ，能观察几次消光？由此分析线偏振光通过 $1/2$ 波片后，光的偏振状态是怎样的？

3、用 $1/4$ 波片产生圆偏振光和椭圆偏振光。

按图9. 6 装置，使 P 与 A 正交消光，用 $1/4$ 波片代替 $1/2$ 波片，转动 $1/4$ 波片使光屏上呈现消光。再将 $1/4$ 波片转动 15° 后转动 A 一周（即 360° ），观察光屏上光强的变化情况。依次转过 $1/4$ 波片分别为 15° ， 90° 则每次对应转动检偏器 A 一周，记录观察到的现象（如消光，光强不变等）

现象记录如下：

1/4 波片转角度	A 的位置(转一周)	观察到现象	判断由 A 出射光的偏振性质
15°			
30°			
...			
90°			

4、测量出射光强与 $1/4$ 波片和检偏器光轴之间的关系

(1) 保持起偏器光轴与 $1/4$ 波片之间夹角不变，调节检偏器，观察光屏上光强的变化。

测量精度： 5° ，测量范围：消光状态 — 消光状态。

(2) 选做：将调节起偏器角度变化 40° ， $1/4$ 波片状态不变，重复以上测量。

5、观察光的偏振现象

(1) 反射引起的偏振

图 9.7 中 S 为照明灯, C 为聚光镜, M 为黑色反光镜, A 为检偏器, E 为投影屏, i_B 为入射角。转动检偏器 A 可观察到屏上光强在最强和最小之间的变化, 这表明反射光是部分偏振光。(选做: 仔细调节入射角 i , 找到最小光强为零, 此时 $i = i_B$ 为布儒斯

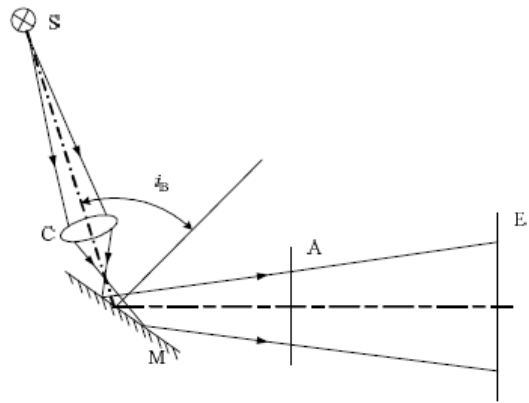


图 9.7 反射起偏装置

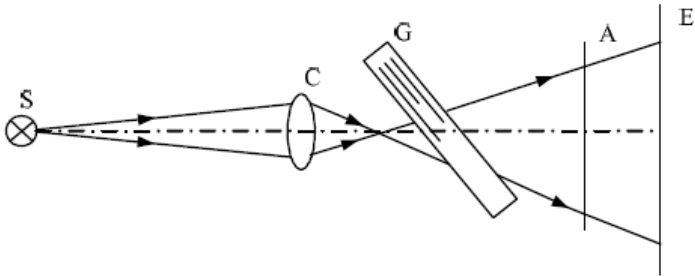


图 9.8 反射起偏装置

特角, 反射光是全偏振光。

(2) 折射引起的偏振

如图 9.8, 用反射起偏一样的光源, 发射的自然光以布儒斯特角入射玻璃堆上 (有 8 块玻璃叠成), 其透射光经过检偏器且转动, 观察光屏上光强的变化, 它也是偏振光。

五、预习题

- 1、什么叫线偏振光? 产生线偏振光的方法?
- 2、什么叫1/2波片? 它的作用如何?
- 3、什么叫1/4波片? 如何用1/4波片产生和检验圆偏振光和椭圆偏振光?

六、思考题

-
- 1、求下列情况下理想起偏器和理想检偏器两个光轴之间的夹角为多少？
 - (1) 透射光是入射自然光强的 $1/3$ 。
 - (2) 透射光是最大透射光强度的 $1/3$ 。
 - 2、如果在互相正交的偏振片 P_1 和 P_2 中间插进一块 $1/4$ 波片，使其光轴跟起偏器 P_1 的光轴平行，那么透过检偏器 P_2 的光斑是亮的？还是暗的？为什么？将 P_2 转动 90° ，光斑的亮暗是否变化？为什么？
 - 3、在第 2 题中用 $1/2$ 波片代替 $1/4$ 波片，情况如何？

实验 10 光纤光栅传感实验

引言

光纤光栅是近年来问世的一种特殊形式的光纤芯内波导型光栅，它具有极为丰富的频谱特性，在光纤传感、光纤通信等高新技术领域已经展示出极为重要的应用。特别是在用于光纤传感时，由于其传感机构（光栅）在光纤内部，且它属于波长编码类型，不同于普通光纤传感的强度型，因而具有其他技术无法与之相比的一系列优异特性，如防爆、抗电干扰、抗辐射、抗腐蚀、耐高温、寿命长、可防光强变化对测量结果的影响、体积小、重量轻、灵活方便，特别能在恶劣环境下使用。光纤光栅传感器可集信息的传感与信息的传输于一体，它极易促成光纤系统的全光纤化、微型化、集成化以及网络化等等，因此光纤光栅传感技术一经提出，便很快受到青睐，并作为一门新兴传感技术迅猛崛起。

光纤光栅及其传感应用技术中涵概了众多光学基础理论和光通信及光传感理论，也涉及到众多先进的传感技术，无疑这一领域将成为大学教育中培养学生掌握现代科学技术的重要内容。

一、实验目的

通过实验使学生了解和掌握光纤光栅的基本特性、光纤光栅传感器的基本结构、光纤光栅传感的基本原理、光纤光栅传感测量的基本方法和原理，同时使学生了解光纤光栅和光纤传感的局限性。

二、实验原理

1、光纤光栅及其基本特性

光纤光栅的基本结构如图 10.1 所示。它是利用光纤材料的光折变效应，用紫外激光向光纤纤芯内由侧面写入，形成折射率周期变化的光栅结构，这种光栅称之为布喇格（Bragg）光纤光栅。

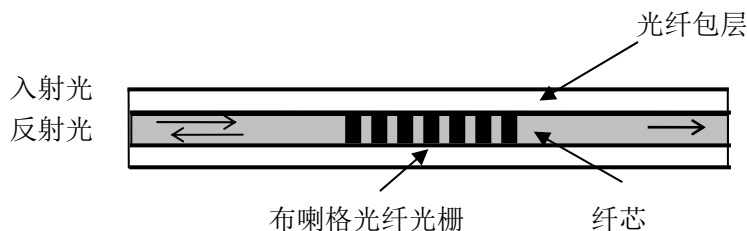


图 10.1 光纤光栅示意图

这种折射率周期变化的 Bragg 光纤光栅满足下面相位匹配条件时，入射光将被反射：

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (10.1)$$

式中 λ_B 为 Bragg 波长（即光栅的反射波长）， Λ 为光栅周期， n_{eff} 为光纤材料的有效折射率。如果光纤光栅的长度为 L ，由耦合模方程可以计算出反射率 R 为：

$$R = \left| \frac{A_r(0)}{A_i(0)} \right|^2 = \frac{\kappa^* \kappa \sinh^2 sL}{s^2 \cosh^2 sL + (\Delta\beta/2)^2 \sinh^2 sL} \quad (10.2)$$

图 10.2 显示了两条不同反射率的布喇格光纤光栅反射谱，图 10.3 为实际的一个布喇格光纤光栅反射谱和透射谱。

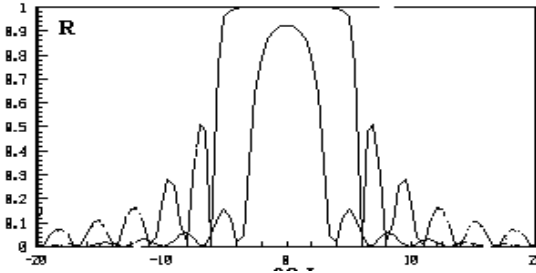


图 10.2 曲线 $\kappa L=2$ 和 $\kappa L=5$ 的反射谱

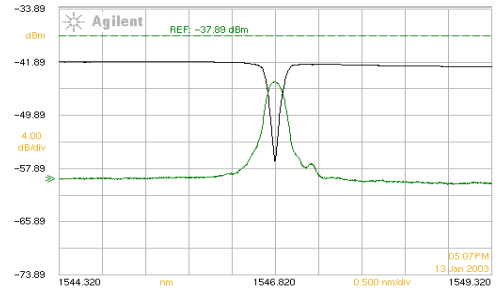


图 10.3 布喇格光纤光栅透射谱和反射谱

其峰值反射率 R_m 为：

$$R_m = \tanh^2 \left[\frac{\pi \Delta n L}{2 n_{eff} \Lambda} \right] \quad (10.3)$$

反射的半值全宽度（FWHM），即反射谱的线宽值为：

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \sqrt{\left(\frac{\Lambda}{L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta n}{n_{eff}} \right)^2} \quad (10.4)$$

（10.1）式中， n_{eff} 、 Λ 是温度 T 和轴向应变 ε 的函数，因此布喇格波长的相对变化量可以写成：

$$\Delta\lambda/\lambda_B = (\alpha + \xi) \Delta T + (1 - Pe) \varepsilon \quad (10.5)$$

其中 α 、 ξ 分别是光纤的热膨胀系数和热光系数，其值 $\alpha = 0.55 \times 10^{-6}$ ， $\xi = 8.3 \times 10^{-6}$ ，即温度灵敏度大约是 $0.0136 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ，（ λ 为 1550 nm ）； Pe 是有效光弹系数，大约为 0.22 ，即应变灵敏度为 $0.001209 \text{ nm}/\mu\varepsilon$ 。应变 ε 可以是很多物理量（如，压力、形变、位移、电流、电压、振动、速度、加速度、流量等等）的函数，应用光纤光栅可以制造出不同用途的传感

头，测量光栅波长的变化就可以计算出待测物理量的变化，所以（10.5）式是光栅传感的基本方程。

2、光纤光栅传感和传感测量的基本原理

2.1 光纤光栅温度传感器

为了提高光纤光栅温度灵敏度，在光纤光栅温度传感器中，是将光纤光栅封装在温度增敏材料基座上，外部有不锈钢管保护，外面有加热装置，如图 10.4。波长变化量及温度灵敏度分别为：

$$\Delta \lambda / \Delta T = [(\alpha + \xi) + (1 - P)(\alpha_j - \alpha)] \lambda \quad (10.6)$$

$$\Delta \lambda / \Delta T = \alpha t$$

αt 定义为该温度传感器的温度灵敏度，可由实验获得，大约是 $\alpha t = 0.035 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。由测量到的波长的变化量可计算出温度的变化 $t - t_0$ ：

$$t = t_0 + \frac{\Delta \lambda t}{\alpha_T}$$

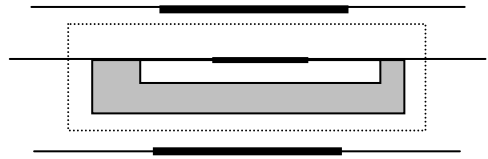


图 10.4

在上面的公式中，

α ：石英材料（光纤光栅）光纤热膨胀系数 $0.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$

ξ ：石英材料（光纤光栅）光纤热光系数 $8.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$

Pe ：石英材料（光纤光栅）光纤有效光弹系数，为 0.22， $\eta = 1 - Pe$

α_j ：基座热膨胀系数

2.2 光纤光栅应变传感器

本实验仪的光纤光栅应变传感器是一种悬臂梁应变调谐机构。应用材料力学原理可以严格计算出光纤光栅的应变，用于模拟环境物理量使光纤光栅产生的应变。由光纤光栅的应变又可计算出传感光栅的波长变化。光纤光栅应变传感器原理图如图 10.5。

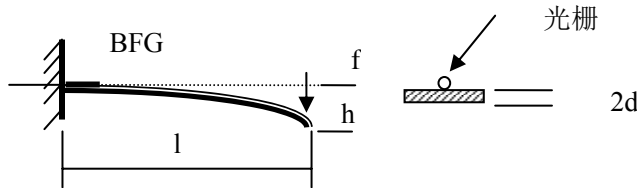


图 10.5 光纤光栅应变传感器原理图

光纤光栅粘接在悬臂梁距固定端根部 x 位置，螺旋测微器调节挠度，由材料力学可知，光纤光栅的应变为：

$$\varepsilon = \frac{3(l - x)dh}{l^3} \quad (10.7)$$

其中 l 、 h 、 d 分别表示梁的长度、挠度和中性面至表面的距离， $\eta = 1 - Pe$ ， Pe 是光纤有效光弹系数。挠度变化 Δh 时，应变的变化量 $\Delta \varepsilon$ 及峰值波长的变化量为：

$$\Delta \varepsilon = \frac{3(l-x)d}{l^3} \Delta h \quad (10.8)$$

$$\Delta \lambda = (1 - Pe) \lambda_{\varepsilon} \Delta \varepsilon \quad (10.9)$$

$$\frac{\Delta \lambda}{\Delta h} = \beta_{\varepsilon} = \frac{(1 - Pe) \Delta \varepsilon \lambda_{\varepsilon}}{\Delta h} \quad (10.10)$$

β_{ε} 为光纤光栅悬臂梁波长调谐灵敏度（单位是 nm/mm），可理论计算，但主要是通过实验获得。作为光纤光栅应变传感器使用时，应变调谐灵敏度为：

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta h} = \frac{\beta_{\varepsilon}}{(1 - Pe) \lambda_{\varepsilon}} \quad (10.11)$$

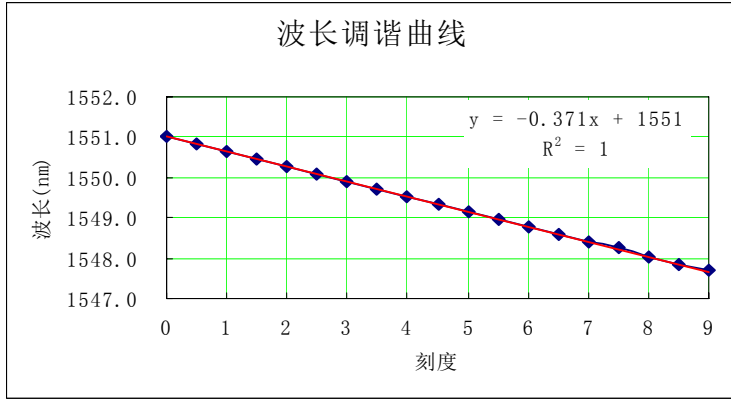


图 10.6 光纤光栅波长悬臂梁调谐曲线

光纤光栅波长悬臂梁调谐器中悬臂梁是 $79 \times 5 \times 1.4 \text{ mm}$ 钢带，螺旋测微器最大行程为 8mm，光纤光栅粘接在根部的 5mm 处，光纤光栅波长调谐灵敏度为 0.38nm/mm（实际测量为 0.3875，对应的应变调谐灵敏度为 $320 \mu \varepsilon / \text{mm}$ ），最大调谐量 3.8nm；图 10.6 是光纤光栅波长悬臂梁调谐曲线。

2.3 光纤光栅传感的测量方法

光纤光栅传感测量系统如图 10.7。光纤光栅传感属于波长编码类型，不同于普通光纤传感的强度型，光纤光栅传感测量系统核心部分是波长分析器。

光纤光栅传感测量系统工作过程及原理是：具有宽带特性的探测光源经光纤耦合器一个输出端、信号传输光纤到光纤光栅传感头，再由传感光栅反射，形成传感光栅的窄带反射光谱，再由传输光纤传输到波长分析器；波长分析器的功能类似光谱仪的分光功能，探测传感光栅光谱分布及其光谱变化，光电检测是将光栅光谱分布及其光谱变化转变成电信号的变化和数据处理，显示为传感结果输出，数据处理和显示可以由计算机完成。

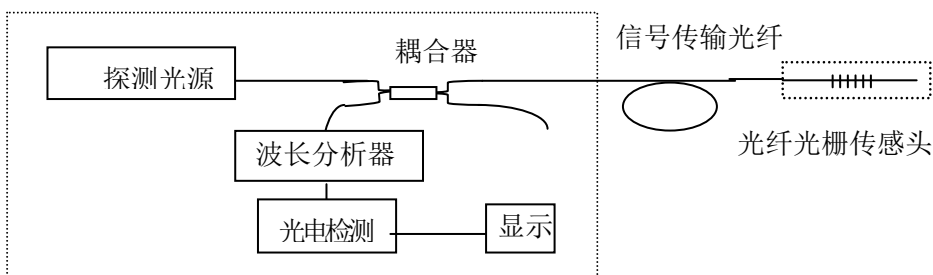


图 10.7 光纤光栅传感测量系统

光纤光栅传感的测量有多种方法，图 10.8 是可调 F-P 滤波器法的传感测量系统。

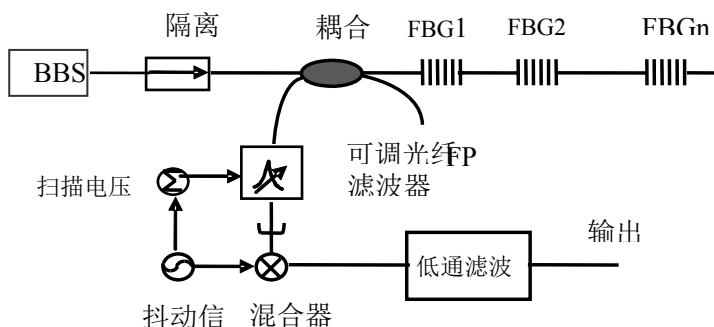


图 10.8 可调 F-P 滤波器法的传感测量系统

在图 10.8 中，波长分析器是一种电驱动的可调光纤 F-P 滤波器。

本光纤光栅传感实验仪测量系统原理框图如图 10.9 。

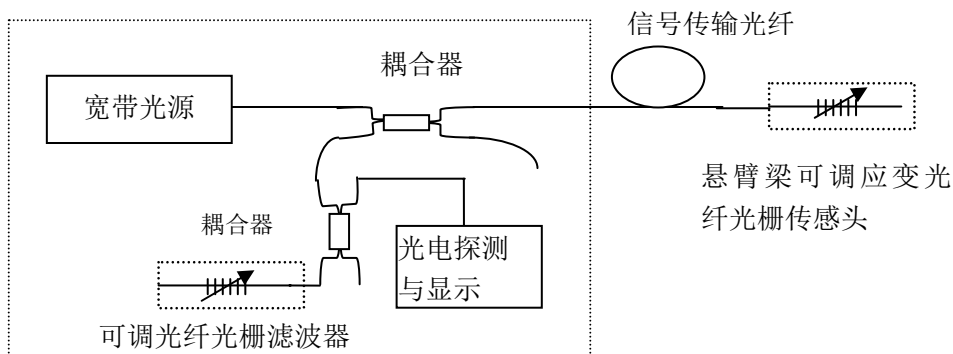
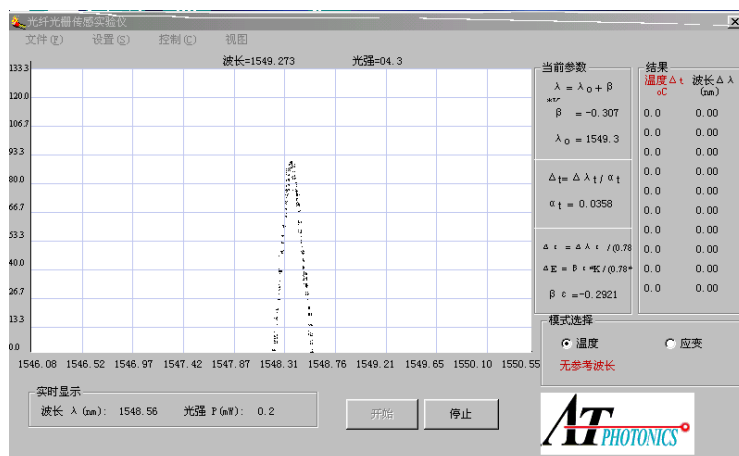


图 10.9 本光纤光栅传感实验仪测量系统原理框图

在本测量系统中，波长分析器是一种悬臂梁可调光纤光栅滤波器，其原理图与图 10.5 光纤光栅应变传感器相同，由螺旋测微器改变悬臂梁形变的挠度，改变滤波器光纤光栅的光谱分布位移。光电探测是一种宽带接收系统，光电探测到的光强值是传感光纤光栅光强分布曲线与滤波器光纤光栅光强分布曲线的卷积。其滤波器光纤光栅波长峰值与传感光纤光栅波长峰值相同时，光电信号达到极大值，极大值的波

长位置即是传感光纤光栅波长位置。下图是在计算机光谱谱图界面上显示出的光纤光栅谱图。



光纤光栅峰值位置的确定方法有多种，比如，最大值法，极值微分法，适用于数据稳定情况；曲线形心法，即曲线切线交点定为峰值位置，切线是数据拟合结果，误差较小，本实验拟采用此方法。

光栅波长分辨率：

$$\delta\lambda = \frac{\delta V}{\frac{\Delta V}{\Delta\lambda}}$$

$\frac{\Delta V}{\Delta\lambda}$ 是曲线斜率， δV 是信号电压最小可测量稳定值。从上面图示显示出，实际谱图曲线斜率为 1.176V/nm，信号电压最小可测量稳定值 δV 有 4mV，所以波长分辨率是 4.7pm，即温度测量分辨能力是 0.13℃，应变测量分辨能力是 3.9 $\mu\epsilon$ 。

三、实验装置和操作方法

1、光纤光栅传感实验仪基本结构

光纤光栅传感实验仪，它包括光纤光栅传感测试单元和光纤光栅传感单元，其基本结构如图 10.10 和图 10.11。

光纤光栅传感测试单元，它主要包括宽带光源 1 [掺铒 (Er⁺) 光纤 ASE 宽带光源]，手动光纤光栅波长悬臂梁调谐器 6、7，光强信号接收放大电子线路 8，A/D 转换及数据处理电子线路 10，光纤光栅波长传感器信号接收放大电子线路 9，宽带光源输出 3 用光纤 FC 接头跳线连接到机箱面板上，传感测试用宽带光源输入端 4 也连接到机箱面板上。此测试单元还有 RS232 数据计算机接口，有图形显示和数据处理软件，手动波长扫描，手工或计算机自动两种数据记录、描绘图形、数据处理方法。由光纤 FC 接头跳线将光纤光栅传感测试单元接口 12 与光纤光栅传感单元接口 15 或 21 连接，可进行光纤光栅温度传感和光纤光栅应变传感或波分复用传感实验；宽带光源 1 有宽带输出接口 3，可独立以宽带光源使用。

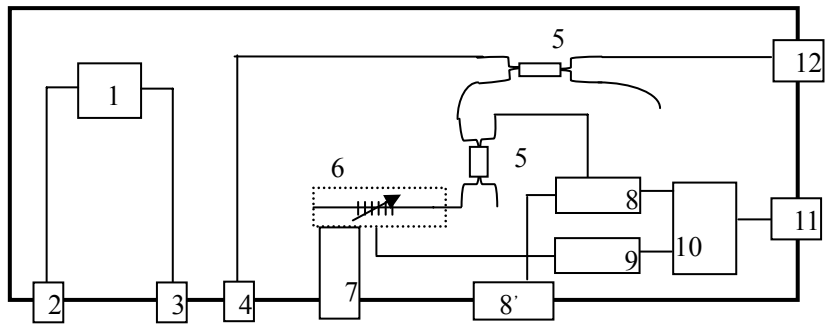


图 10.10 光纤光栅传感测试单元结构

- 1—ASE 宽带光源 2—1550nm 信号光源输入接口 3—宽带光源输出接口 4—宽带光源输入接口
5-光纤耦合器 6-波长悬臂梁调谐器 7-螺旋测微器 8'-光强信号数字电压表
8—光强信号接收放大电子线路 9—波长传感器信号接收放大电子线路
10—A/D 转换及数据处理电子线路 11—RS232 数据输出接口 12—传感信号输入接口

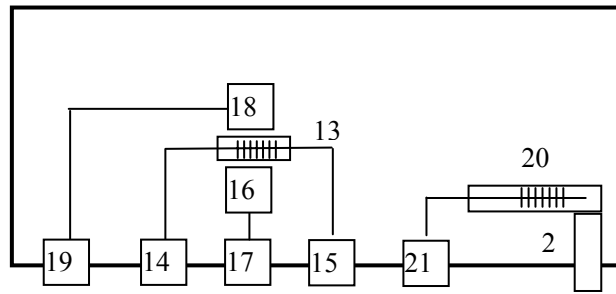


图 10.11 光纤光栅传感单元基本结构

- 13- 光纤光栅温度传感器 14、15—温度传感信号输出接口 1、2
16—加热装置 17—加热调节器 18- 温度检测装置 19—温度数字显示器
20—光纤光栅应变传感器 21—应变传感信号输出端 22—螺旋测微器

光纤光栅传感单元主要由光纤光栅温度传感器 13 和光纤光栅应变传感器 20 组成，光纤光栅温度传感器还有附属的加热及加热调节 16、17 和温度检测装置、温度数字显示器 18、19，显示其实际温度；光纤光栅应变传感器 20 中光纤光栅粘接到悬臂梁上，光纤光栅应变由悬臂梁弯曲形变产生，连接到悬臂梁上的螺旋测微器 22 的进动量给出悬臂梁形变的挠度，进而计算出光纤光栅应变。

2、主要性能和技术指标

2.1 宽带光源

宽带光源为美国进口器件组装，掺 Er 光纤 ASE 荧光谱，宽带光源可独立使用。

波长范围： 1528—1563 nm（C 波段）

功 率: >1.5 mW

2.2 光纤光栅传感测试单元

2.2.1 规格与主要技术指标

波长扫描方式: 手动
波长扫描范围: >3 nm
螺旋测微器调节范围: 0 - 8.00 mm
记录方式: 手动、自动
应变传感分辨率: <10 $\mu\epsilon$
温度传感分辨率: <1 $^{\circ}\text{C}$

2.2.2 记录方式

记录方式分为手动和自动两种, 手动是指手工测量绘制; 自动是指数据由 RS232 计算机接口输出逐点自动绘制。

2.3 光纤光栅传感单元

温度传感器: 温度数字显示, 温度连续可调, 温度显示分辨率 0.1 $^{\circ}\text{C}$, 温度改变量 >15 $^{\circ}\text{C}$ (波长变化范围 >0.5nm), 两个传感信号输出接口, 可任接一个单独使用, 可与应变传感信号输出端串接, 同时观测温度传感信号和应变传感信号。

应变传感器: 螺旋测微调节范围 0 ~ 8.00mm, 应变调节范围 >0 ~ 2500 $\mu\epsilon$, 应变分辨率 3 $\mu\epsilon$ 。

2.4 电源

交流 220V, 功率 <5W。

四、实验内容和要求

1、光纤光栅温度传感实验

实验前将测试单元图 10.10 中宽带光源 1 的输出接口 3 与宽带光源输入端 4 用跳线连接, 将 RS232 接口与计算机连接, 将光纤光栅传感单元中的光纤光栅温度传感信号输出端 14 或 15 (用于与应变传感输出串接, 作波分复用实验) 与图 10.10 光纤光栅传感信号输入接口 12 连接, 温度调节钮旋至最小, 开启电源, 温度显示为室温温度, 启动计算机传感测试软件, 熟悉软件计算机界面操作, 熟悉测试单元中光纤光栅波长调谐特性曲线方程和光纤光栅温度传感器传感特性方程 (计算机操作界面中有其参数), 即可进行光纤光栅温度传感实验。

手工记录数据温度测量实验: 先粗调确定出有光强信号输出的起始位置, 再以一定的小进给量, 缓慢转动波长调谐螺旋测微器 7 到需要的刻度位置即挠度 (单方向转动, 以消除螺距差, 下同), 记录刻度值和光强信号电压表 8' 显示电压值, 直至螺旋测微器到光栅谱线全部显示出, 这为一组室温下光纤光栅光谱分布曲线数据; 转动传感单元上温度调节电位器, 开始加热, 5—6 分钟后温度显示数字稳定, 重复上述步骤开始这一温度下的光纤光栅光谱分布曲线数据测试; 直至完成温度最高时的数据测试。

数据处理: 建议在计算机上应用 Excel 绘图软件, 绘出每一个温度下光强—挠度曲线, 利用给出的挠度—光纤光栅波长调谐曲线拟合直线方程参数 (斜率及 λ_0) 进一步绘出波长

—光强温度传感光纤光栅光谱分布曲线，将曲线拟合成平滑的曲线，找出每个曲线的极大值波长，计算出每个温度下极大值波长与室温极大值波长之差 $\Delta \lambda_t$ ，利用给出的光纤光栅温度传感器波长—温度关系式中波长—温度灵敏度 α_T 计算出测量的温度：

$$t = t_0 + \frac{\Delta \lambda_t}{\alpha_T}$$

绘制测量温度值 t 与传感器处的实际温度值 T 关系曲线。理想情况下，应是成 45 度夹角的直线，但由于种种误差原因，并非如此。计算出 t 的测量误差，并分析原因。

应用计算机界面自动进行温度测量实验：

手工记录数据进行温度测量实验的同时，计算机会自动记录显示传感光栅光谱分布曲线，手工确定参考波长位置和另一温度下光栅波长位置，自动显示波长差和温度差。

2、光纤光栅应变传感实验（选做）

实验前将光纤光栅传感单元中的光纤光栅应变传感信号输出端与附图 10.10 光纤光栅传感信号输入接口 12 连接，不开启传感单元电源。启动计算机传感测试软件，熟悉软件计算机界面操作，熟悉测试单元中光纤光栅波长调谐特性曲线方程和光纤光栅应变传感器传感特性方程（计算机操作界面中有其参数），即可进行光纤光栅应变传感实验。

手工数据记录应变测量实验：基本与温度传感实验步骤相同，以一定的小进给量，缓慢转动波长调谐螺旋测微器 7 到需要的刻度位置即挠度，记录刻度值和光强信号电压表 8' 显示电压值，直至螺旋测微器到光谱曲线全部显示出，这为一组“零刻度传感应变”光纤光栅光谱分布曲线数据；转动传感调谐螺旋测微器一圈 0.5mm，重复上述步骤开始这一应变值下的光纤光栅光谱分布曲线数据测试；再转动传感调谐螺旋测微器一圈 0.5mm，开始下一应变值的数据测试，直至完成应变刻度最高 8mm 的数据测试。

数据处理：应用 Excel 绘图软件，绘出每一个传感应变下光强—挠度曲线，利用给出的挠度—光纤光栅波长调谐曲线拟合直线方程参数（斜率及 λ_0 ）进一步绘出波长—光强应变传感光纤光栅光谱分布曲线，将曲线拟合成平滑的曲线，找出每个曲线的极大值波长，计算出每个传感应变下极大值波长与“零刻度传感应变”极大值波长之差 $\Delta \lambda_\varepsilon$ 。

各挠度下的测量应变是：

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{\Delta \lambda_\varepsilon}{(1 - Pe)\lambda_\varepsilon}$$

利用给出的光纤光栅应变传感器波长—挠度灵敏度系数 β_ε 可计算出应变传感器的各点实际应变：

$$E = E_0 + \frac{\beta_\varepsilon}{(1 - Pe)\lambda_\varepsilon} \Delta h$$

绘制测量应变 ε 与传感器处的实际应变值 E 关系曲线。理想情况下，应是成 45 度夹角的直线，但由于 ε 和 E 都可能存在测量误差等种种误差原因，并非成 45 度夹角的直线，并分析原因。

应用计算机界面自动进行应变测量实验：步骤与温度测量类似。

五、注意事项

- 1、光纤跳线不要强拉硬拽，不要使弯曲半径过小。
- 2、光纤跳线接头安装时，要对准插入，轻轻旋紧，仅防磨损光学表面，表面不洁时，用透视镜纸粘取少量无水乙醇轻轻擦拭表面。
- 3、光纤跳线尽量保持在插入原位，不要频繁拔下插入。
- 4、仪器需要 10 多分钟的预热时间。实验前要充分准备，熟悉实验步骤，数据测试要熟练紧凑，以免温度变化造成误差。
- 5、实验结束后，螺旋测微器尽量保持在旋出位置，使悬臂梁处于无应力状态。
- 6、测不到信号时，先检查跳线接头是否处于对准插入状态，检查接头表面是否过脏，检查传感波长位置是否处于可测量范围之内。

六、预习要求

根据实验内容，查阅《光纤实验技术》、《光纤传感技术与应用》等文献资料，了解光纤光栅传感器的结构、特点、工作原理；了解采用光纤光栅作为基本传感元件的光纤光栅温度、应变测量方法；掌握光纤光栅的一般原理和光纤光栅作为基本传感元件的波长调制和解调技术。

七、思考题

本实验仪是一种高分辨力的光谱分析仪（波长分辨率可达 0.005nm），是一个光纤和光纤光栅实验平台，除上述的实验外，请设计其它有关实验。如：光纤弯曲损耗与光纤弯曲半径之间的关系实验，光纤光栅透射谱测量实验等。

附本实验仪相关参数

波长调谐器曲线： $\lambda = \lambda_0 + \beta K$, $\lambda_0 = 1551.6nm$, $\beta = -0.3397nm/mm$

电压-刻度曲线： $V = V_0 + \alpha K$, $V_0 = 1983.7mV$, $\alpha = -247.31mV/mm$

应变传感器曲线： $\Delta E = \beta_\varepsilon K / (0.78\lambda_\varepsilon)$, $\beta_\varepsilon = -0.3227nm/mm$

温度传感器曲线： $\Delta t = \Delta\lambda_t / \alpha_t$, $\alpha_t = 0.0446nm/^\circ C$

实验 11 散斑照相测量技术

引言

激光照明物体后，由于物体表面的漫反射，物面散射的光在离物体表面的空间中相互干涉，形成了无数随机分布的亮斑和暗斑，称为散斑。

关于散斑的形成，有两种解释：一是 Archbold 和 Ennos 的解释，认为，物体的散射表面可看作由大量随机分布的光栅组成，所有光栅的方位和栅距各不相同，其反射的衍射光相互干涉，形成散斑图。散斑的光强分布取决于衍射光的相对相位。另一种是 Gregory 的解释，他认为散射表面是由大量方位随机分布的“平面子镜”所组成的，对大多数散射表面来说，各子镜都有特殊的方位，因此有特有的反射光，这些反射光相干形成散斑。散斑的光强分布，由子镜的反射光的光强和相位决定。

理论与实验证明，被激光束照明的散射表面的任一小区域，总是与散斑照片上某一小区域相对应。

一、实验目的

- 1、了解散斑照相测量技术的基本原理。
- 2、会用逐点法分析物体的面内位移。

二、实验原理

散斑照相的光路如图 11.1 所示。当物体被加载后，其表面受载变形，散斑图像将随着物体作相应运动。如果用同一干版对物体变形前后的两种状态作两次曝光记录，则在底片上就得到了由变形前后两幅散斑图的迭加干涉形成的双曝光散斑图，或称双曝光散斑照片。将其放在如图 11.2 所示的光路中，就能在观察屏上观察到衍射晕，在衍射晕内，可以看到明暗相间的平行条纹，这种条纹称为杨氏条纹。

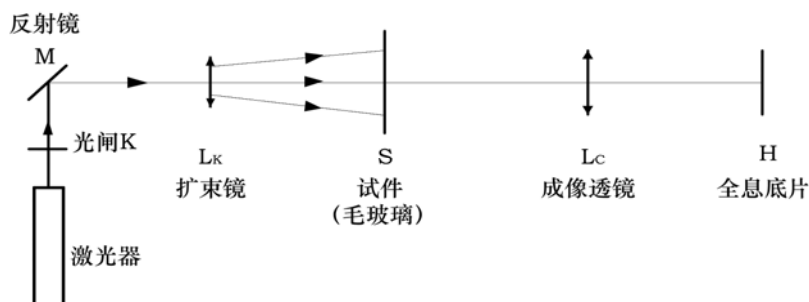


图 11.1 散斑照相光路系统

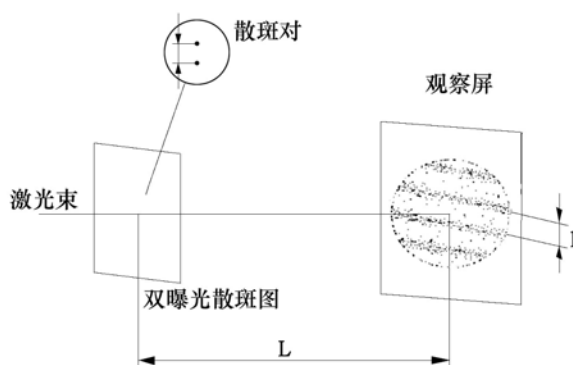


图 11.2 逐点分析法

设入射激光束的波长为 λ ，散斑照片到观察屏的距离为 L ，双孔间距为 d ，相邻条纹的间距为 l ，由杨氏双孔实验可知

$$l = \frac{\lambda}{d} L \quad d = \frac{\lambda}{l} L \quad (11.1)$$

若拍摄散斑照片时，照片的放大倍数为 M ，物体的位移量为 X ，则 X 为：

$$X = \frac{d}{M} = \frac{\lambda}{lM} L \quad (11.2)$$

位移方向与所观察到的条纹向垂直。

在一般情况下，物体受载后的表面变形是十分复杂的，但若考虑一个微小区域，则可认为该区域内各点的位移是相同的，两次曝光所得到的散斑照片上，该区的双孔排列的方位和间距也是相同的。在不同区域，由于表面位移的大小和方向不同，双孔的间距和走向也不同。用未经扩束的细激光束分别照射各点，就可逐一测出各点相应的杨氏条纹的间距和方位，从而按式 (11.2) 算出位移量，这种处理方法称为逐点分析法。

三、实验装置

He-Ne 激光器, 光学平台, 光学组件, 全息干版, 冲印设备。

四、实验内容和操作方法

- 1、试件毛玻璃片装在可作微转动的夹持器上，夹持器装在小虎钳上（S 处）。在 H 处置一毛玻璃观察屏。
- 2、开启光闸，让激光照明毛玻璃 S，则可在观察屏 H 上看到透过毛玻璃 S 的出射光相干形成的随机分布的散斑。
- 3、将成像透镜 L_C 对准试件 S，并使透镜主轴与被测表面垂直，调节透镜的位置，使毛玻璃屏 H 上获得一清晰的像，并测出物体和像的大小，算出放大倍数 M 。
- 4、用曝光定时器关闭光闸 K，将全息干版装在底片架（H 处）上，使药面对着物体。
- 5、开启光闸 K，激光对干版进行第一次曝光，时间约半分钟。

- 6、关闭曝光定时器，遮断光路，将试件转动一微小角度。
- 7、再次开启光闸，对干版进行第二次曝光，曝光时间与第一次相同。
- 8、取下曝光的干版，进行显影，定影，水洗和晾干。
- 9、将制作好的两次曝光散斑照片装到底片夹上，置于未经扩束的细激光束中，在照片后面约 50 厘米以上的地方放置毛玻璃观察屏，则在屏幕上可看到杨氏条纹。
- 10、被测物体中心为原点，分别测出 $r=2, 4, 6, 8, 10\text{ mm}$ 等各点的位移值，并以 $1/l$ 为横轴， r 为纵轴。作 $1/l-r$ 图，求出其斜率 m ，并由 m 算出物体转过的角度。

实验记录：

测物距 a

像距 a'

像的放大倍数 $M = a' / a$

散斑照片到观察屏的距离 L

测量次数 物理量	1	2	3	4	5	6
被测点半径 r						
杨氏条纹间距 l						
$1/l$						
位移量						

五、注意事项

- 1、实验中切勿直视激光，以免对眼睛造成伤害。即使在激光器关闭下，也不能用眼睛窥视激光器窗口。
- 2、曝光过程中要保证环境的安静，在安装干版后，实验者应该离开实验台，使之稳定 1min 左右。
- 3、转动试件毛玻璃时转角切勿过大！否则，散斑照片上将不会出现调制的杨氏干涉条纹。
- 4、干版的显影时间应控制在干版特性曲线的线性部分。

六、预习要求

根据实验内容，查阅《信息光学实验基础》、《现代光学实验教程》、《光信息科学与技术

专业实验》等文献资料，熟悉和掌握激光散斑计量术的相关知识，查阅逐点分析法和全场分析法的相关知识，并设计全场分析法的实验光路，将全场分析法的原理和光路写在预习报告中。

七、思考题

- 1、散斑图的分析方法分为逐点分析法和全场分析法两种。了解全场分析法原理，分析为什么能用杨氏干涉原理分析实验条纹。
- 2、为什么转动试件毛玻璃时转角过大，将不会出现调制的杨氏干涉条纹？
- 3、在图 11.3 中，(a)为记录光路。在毛玻璃 G 移动前后分别在全息干版片上各曝光一次；
(b)为观察杨氏条纹的光路，经处理的 H 也用激光细光束照明，观察屏 P 与 H 的距离为 Z ，屏上条纹间距为 e 。试证明：位移量 $x_0 = \lambda z / e$ 。

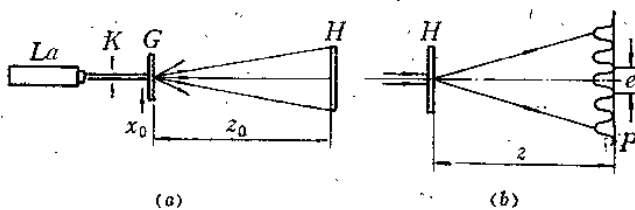


图 11.3

附录

全息记录介质及其处理

全息记录介质主要用于记录全息图，也可用于制作光学信息处理中的目标和空间滤波器。日前所用的全息记录介质除卤化银乳胶外，还有重铬酸盐明胶、光致抗蚀剂、光致聚合物光致变色材料、液晶等。最常用的盐卤化银乳胶全息干板(或胶片)，其结构与普通照相胶片(或干板)相似。国产的全息干板有天津 I 型和 II 型全息干板；国外的有 Kodak 649F、649GH 和 Agfa 8E75、10E56、10E75、14C 70、14C 75、8E 75HDt、8E56HD 等。

现着重介绍卤化银乳胶干板的基本性质。

一、卤化银乳胶的基本性质

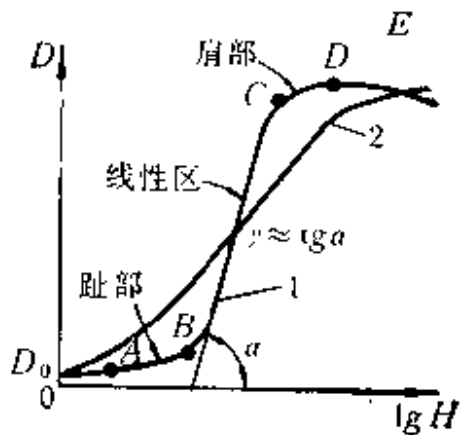
1、H—D 曲线

H—D 曲线用来描述照相胶片(成干板)的感光特性。它表示底片密度 D 与曝光量 H 的对数 $\lg H$ 之间的关系，这个关系是 F.Hurter 和 V.G.Driffeld 首先提出的，因而称作 H—D 曲线。

右图示出了两种不同反差的胶片的 H—D 曲线。整条曲线可分为四部分：

①AB 段称为趾部，是曝光不足部分。在趾部中，底片密度 D 与曝光量 H 几乎无关， D 接近于底片的灰雾度 D_0 。②BC 为直线部分，称为线性区。在线性区中，底片密度 D 与曝光量的对数成正比。直线 BC 的斜率称为反差系数 γ ，通常又称为 γ 值。设直线部分延长线与横坐标的夹角为 α ，则 $\gamma = \tan \alpha$ 。③

CD 段称为肩部，是曝光过度部分。在肩部中，曲线呈饱和状态，密度随着曝光量的增加变化很少。④DE 段称为反转部分。当曝光量继续增加时，黑度不但不再增加，反而有所减小。



普通照相都是利用 H—D 曲线的线性区。为获得不同反差的底片，可选用反差性能不同的胶片。一般说来，感光度高的胶片其反差系数也大。例如，GB24⁰ 全色片比 GB21⁰ 全色片反差大。

在全息照相中，通常不一定要利用 H—D 曲线中的整个线性区，而应根据全息图的类型选用曲线的不同部分。例如，对平面振幅型全息图，常利用直线部分的下部和趾部的上部，平均黑度 D_0 在 0.6 附近；对透射振幅型体积全息图， D_0 在 1 附近；对反射振幅型体积全息图， D_0 在 1.76 附近；对各种漂白全息图，则随着所用漂白剂的不同而对 D_0 也有不同的要求。

在记录中实际得到的 γ 值除取决于所用乳剂的类型之外，还与所用的显影剂、曝光量和显影时间有关。如果胶片、显影液选得合适，曝光量和显影条件控制得当，就能够相当精确

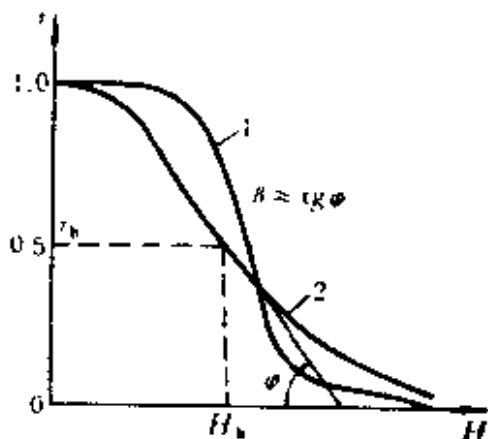
地得到所需要的 γ 值。

2、 $\tau-H$ 曲线

对于全息照相和相干光信息处理，感光特性曲线采用振幅透射系数对曝光量 H 的曲线表征较为方便。右图示出了两种不同反差度的胶片的

的 $\tau-H$ 曲线。曲线中段接近于直线。

在线性记录时，平均曝光量 H_b 应安置在曲线中部 $\tau_b = 0.5$ 的附近，对应的平均密度约为 0.6。实测表明，对于卤化银干板的平面振幅型全息图，在 $D=0.6$ 附近能得到最高的衍射效率。



二、记录介质的选择

记录介质应根据所选用的光源来选择，要求记录介质的感光峰值与光源的输出波长相一致。目前最常用的光源是 He—Ne 激光器，其输出波长为 632.8nm，可使用天津 I 型全息干板记录。如果使用氩离子激光器，则可选用重铬酸盐明胶记录。如果使用红宝石脉冲激光器，则可选用天津 II 型全息干板记录。

三、全息干板的裁、夹方法

- 1、裁于板时，应备有不同宽度的木条，根据所需要的尺寸选用合适的木条来控制干板的大小和刻线方向。干板平放在垫有干净纸的桌面或专用定位板上，乳胶面朝下。可用手轻摸干板两面的边角，感觉发涩的一面为乳胶面。将选择好的木条放在干板玻璃面上，使其一边与干板的一边对齐。压住木条，控制好玻璃刀的角度，沿着木条的另一边在干板玻璃面上划裁，划裁时用力要轻而均匀，玻璃刀角度在移动过程中要保持不变。划裁过程中可听到清脆的响声。注意切不可用力压玻璃，也不可反复划裁，要一次划到底。划好后用双手在划痕的两侧拿住干板的边沿轻轻捞开。手不要抓在干板乳胶面上，以免留下划痕。裁好的干板要玻璃面与乳胶面相对叠放在暗盒内。
- 2、装夹干板时应使乳胶面对向激光束。要尽量避免激光进入干板的侧面，激光束在干板内经两个表面的多次反射会在全息图上形成一组近似平行的宽条纹，增加全息图的噪音。
- 3、当记录反射全息图时，要注意有些银盐干板背面有防晕层，应先将其除去。防晕层会妨碍反射全息图的记录，可在暗室中用诸如乙醇之类的溶液擦除。

四、参考光和物光光束比的选择

在一般情况下，由于物光的动态范围较大，为了产生预定的偏且曝光员，通常都应使参考光强大于物光强。特别是在拍摄三维物体的全息图时，如果物光过强，由于散斑效应，

在全息图上会形成随机起伏的像，尤其是对于位相全息图这将成为散射源。

通常参考光和物光的强度比选在 2: 1—10: 1 的范围内为宜，过大或过小都会导致衍射效率的降低。但这也不是绝对的，有些全息图的光束比必须视具体情况而定。例如，在制作全息光栅、全息透镜等光学元件时，光强比最好为 1: 1 而单次曝光的全息干涉实验的光强比最好是 3: 1。

五、正确曝光

首先根据所用全息干板的特性曲线，找出线性记录的曝光范围。然后根据全息图的类型选取平均曝光量，从而确定出合适的曝光时间。例如，对于平面振幅型全息图，其平均曝光量取在 $\tau-H$ 曲线直线部分的中点，即 $\tau=0.5$ 所对应的 H 值，相当于 H—D 曲线中 D=0.6 时的曝光量。

装夹好于板后，操作者应离开全息台，待稳定 30-60s 后再进行曝光。若需连续几次曝光，中间均应有稳定时间。在曝光过程中，不要在室内走动，要注意保持环境的安静。

六、底片的常规处理

1、显影

常规显影使用 D19 显影液显影 4—5min($20 \pm 1^{\circ}\text{C}$)，水洗 30 s。D19 是硬调显影液，适合于一般振幅全息图。对于傅里叶变换全息图和像面全息图，由于全息图上光强分布差别较大，用 D19 显影液很难得到线性记录从而影响衍射效率。此时可采用软调显影液，例如 D76 显影液加水 2—10 倍稀释使用，显影时间相应延长

2、停显

一般用水冲洗即可停显，但最好是用停显液。由于停显液呈酸性，能中和显影液的碱性，不但可防止显影过度、显影不匀或产生灰雾等弊病，而且还可大大减小由于将显影液带入定影液中而引起的二色性灰雾，使干板上呈现的紫红色或绿黄色。

3、定影

常规定影处理采用 F 5 定影液，定影时间约 5min($16-20^{\circ}\text{C}$)。

4、水洗

水洗的目的是清除附着在全息干板上的定影液和其它杂质。水洗时间必须充分，但不要过长，以免药膜膨胀而影响底片质量。一般可在流水中冲洗 5—10 min。

5、干燥

一般采用自然干燥。有时为了便于及时检查全息图的拍摄效果，希望全息图能迅速干燥，可将全息图浸入无水乙醇中浸泡 1min，脱水后取出用吹风机吹干(不要用热风吹)，这样还可清除乳胶层中残留的敏化染料。

实验 12 高斯光束的参数测量及透镜变换实验

引言

激光器由光学谐振腔、工作物质、激励系统构成，相对一般光源，激光有良好的方向性，即光能量在空间的分布高度集中在光的传播方向上，但也有一定的发散度。在激光的横截面上，光强是以高斯函数型分布，故称为高斯光束。在激光的生产与应用中，如定向、制导、精密测量、光通讯等，需要了解激光光束的各种参数指标。因此，掌握高斯光束的测量方法是光电专业学生必须具备的能力。

一、实验目的

- 1、了解高斯光束光场分布的特性和参数指标。
- 2、掌握描述高斯光束传播特性的参数的物理意义。
- 3、了解掌握理想透镜对高斯光束的变换作用和变换规律。
- 4、熟悉高斯光束相关参数的测量方法。

二、实验原理

1、高斯光束的基本性质

众所周知，电磁场运动的普遍规律可用 Maxwell 方程组来描述。对于稳态传输光频电磁场可以归结为对光现象起主要作用的电矢量所满足的波动方程。在标量场近似条件下，可以简化为赫姆霍兹方程，高斯光束是赫姆霍兹方程在缓变振幅近似下的一个特解，它可以足够好地描述激光光束的性质。使用高斯光束的复参数表示和 ABCD 定律能够统一而简洁的处理高斯光束在腔内、外的传输变换问题。

在缓变振幅近似下求解赫姆霍兹方程，可以得到高斯光束的一般表达式：

$$A(r, z) = \frac{A_0 \omega_0}{\omega(z)} e^{-r^2/\omega^2(z)} \cdot e^{-i[\frac{kr^2}{2R(z)} - \psi]} \quad (12.1)$$

式中， A_0 为振幅常数， ω_0 定义为场振幅减小到最大值的 $1/e$ 的 r 值，称为腰斑。它是高斯光束光斑半径的最小值。 $\omega(z)$ 、 $R(z)$ 和 ψ 分别表示了高斯光束的光斑半径、等相面曲率半径和相位因子，是描述高斯光束的三个重要参数，其具体表达式分别为：

$$\begin{aligned} \omega(z) &= \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{Z_0}\right)^2} \\ R(z) &= Z_0 \left(\frac{z}{Z_0} + \frac{Z_0}{z} \right) \\ \psi &= \text{tg}^{-1} \frac{z}{Z_0} \end{aligned} \quad (12.2)$$

其中， $Z_0 = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}$ ，称为瑞利长度或共焦参数。

(1)：高斯光束在 $z = \text{const}$ 的面内，场振幅以高斯函数 $e^{-r^2/\omega^2(z)}$ 的形式从中心向外平

滑的减小，因而光斑半径 $\omega(z)$ 随坐标 z 按双曲线：

$$\frac{\omega^2(z)}{\omega_0^2} - \frac{z}{Z_0} = 1 \quad (12.3)$$

规律而向外扩展，如图 12.1 所示

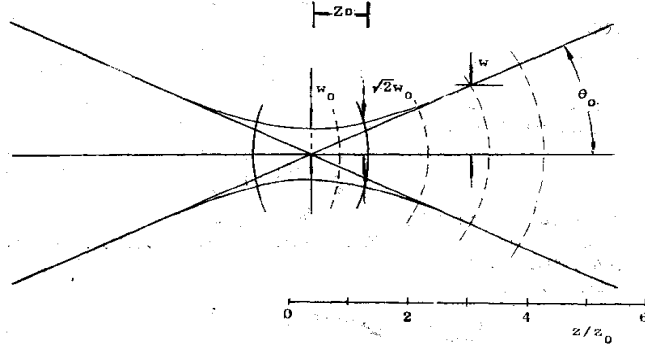


图 12.1 高斯光束以及相关参数的定义

(2)：在 (12.1) 式中令相位部分等于常数，并略去 $\psi(z)$ 项，可以得到高斯光束的等相面方程：

$$\frac{r^2}{2R(z)} + z = \text{const} \quad (12.4)$$

因而，可以认为高斯光束的等相面为球面。

(3)：瑞利长度的物理意义为：当 $|z| = Z_0$ 时， $\omega(Z_0) = \sqrt{2}\omega_0$ 。在实际应用中通常取 $z = \pm Z_0$ 范围为高斯光束的准直范围，即在这段长度范围内，高斯光束近似认为是平行的。所以，瑞利长度越长，就意味着高斯光束的准直范围越大，反之亦然。

(4)：高斯光束远场发散角 θ_0 的一般定义为当 $z \rightarrow \infty$ 时，高斯光束振幅减小到中心最大值 $1/e$ 处与 z 轴的交角。即表示为：

$$\begin{aligned} \theta_0 &= \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{\omega(z)}{z} \\ &= \frac{\lambda}{\pi\omega_0} \end{aligned} \quad (12.5)$$

2、高斯光束的复参数表示和高斯光束通过光学系统的变换

定义 $q = \frac{1}{R} - i \frac{1}{\pi\omega^2}$ ，由前面的定义，可以得到 $q = z + iZ_0$ ，因而 (12.1) 式可以改写为

$$A(r, q) = A_0 \frac{iZ_0}{q} e^{-kr^2/2q} \quad (12.6)$$

此时, $\frac{1}{R} = \text{Re}(\frac{1}{q})$, $\frac{1}{\omega^2} = -\frac{\pi}{\lambda} \text{Im}(\frac{1}{q})$ 。

高斯光束通过变换矩阵为 $M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$ 的光学系统后, 其复参数 q_2 变换为:

$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D} \quad (12.7)$$

因而, 在已知光学系统变换矩阵参数的情况下, 采用高斯光束的复参数表示法可以简洁快速的求得变换后的高斯光束的特性参数。

*3.刀口法测量高斯光束参数

高斯光束光斑的光强分布为:

$$I = I_0 \left[\frac{\omega_0}{\omega(z)} \right]^2 e^{-2r^2/\omega(z)} \quad (12.8)$$

(1) 采用 90/10 刀口法对高斯光束光斑及束腰进行测量,方法如下:

将刀片固定在可四维调节的光学平台上,且平台下面装有沿前后、左右两垂直方向都较长距离旋进的螺旋测微器,使刀片所在的平面垂直于高斯光束轴线(z 轴),如图 2 所示。设在刀片没有遮挡时高斯激光光束的功率为 P , 沿 x 轴方向旋转测微器移动刀口,当刀口运动 x_1 处时,刀片会挡住 10% 的激光功率,即此时功率计探测到的功率为 P_1 , 且 $P_1 = 90\%P$ 时,记录下此位置所对应的螺旋测微器示数 x_1 。再沿 $-x$ 轴方向继续移动刀口,当功率计示数为 P_2 , 且 $P_2 = 10\%P$ 时,记录下此位置所对应的螺旋测微器示数 x_2 。此时测量到的高斯光束 10%-90% 的直径 $\omega = x_1 - x_2$ 。再旋转纵向螺旋测微器,在高斯光束束腰两侧沿 z 轴等距离间隔测出一组光束直径 ω_n , 如图 3 所示, 就可以通过双曲线拟合方程 $\omega_n^2 = A + Bz + Cz^2$ 拟合出系数 A, B, C , 再通过公式 $\omega'_0 = \sqrt{A - B^2/4C}$ 计算出高斯光束束腰直径的测量值 ω'_0 。进而计算得实际的高斯光束束腰直径为 $\omega_0 = 1.561\omega'_0$, 对应的 z 坐标就是束腰的位置。

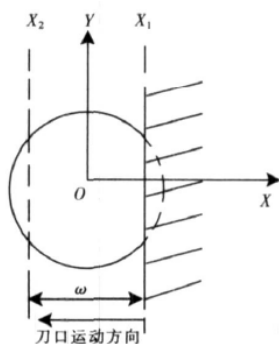


图 12.2 高斯光束横向测量示意图

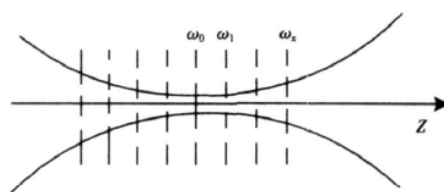


图 12.3、高斯光束纵向测量位置示意图

(2) 基本测量原理

当利用一刀口垂直于光束测 x 方向移动,将遮盖部分光束,则图二所示,此时透过的激光功率可由下式给出:

$$P(x) = \int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2P_0}{\pi\omega^2} \exp\left[-2(x^2 + y^2)/\omega^2\right] dy$$

$$P_0 = I_0 \cdot \pi\omega_0^2$$

$$= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_0}{\omega} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-2x^2/\omega^2) dx \quad (12.9)$$

因此,

$$\frac{P(x)}{P_0} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\omega} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-2x^2/\omega^2) dx$$

$$= \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2}x}{\omega}\right) \right] \quad (12.10)$$

$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-x^2) dx$ 是高斯误差函数。可以计算, 选择 P%, 1-P%时, 束腰半径与刀口的两位置坐标之差有如下关系:

P%	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%	55%
1-P%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%
$\omega/(x_2 - x_1)$	1.217	1.561	1.931	2.375	2.967	3.817	5.181	7.874	15.873

三、实验装置

- 1、He-Ne 内腔式激光器组件 ($TEM_{00}(632.8nm; 2mw)$)
- 2、光学导轨组件
- 3、可变光阑组件 ($\Phi 2-29mm$)
- 4、高斯光束变换透镜 (实现 2-4 倍扩束变换和聚焦功能)
- 5、激光衰减器 (实现 1-0.1%光强变化)
- 6、CCD 组件 (1/2 英寸 600 线)
- 7、图像采集卡 (DH-CG300)
- 8、BEAMVIEW 光束分析与测量软件
- 9、示波器
- 10、四维光学调节台 (附刀片)
- 11、功率计

四、实验内容与步骤

1、实验内容

- (1) 将 He-Ne 激光器开启, 调整高低和俯仰, 使其输出光束与导轨平行。可通过前后移动一个带小孔的支杆实现。调整好光路, 使激光束通过各光学元器件中心
- (2) 启动计算机, 运行 Beam View 激光光束参数测量软件。
- (3) He-Ne 激光器输出的光束测定及模式分析: 转动可变衰减器, 使激光光斑的最强位置大于其饱和值的 2/3 但不饱和。利用激光光束参数测量软件分析激光束的模式, 判定其输

出的光束为基模高斯光束还是高阶模式。利用激光光束参数测量软件显示激光束的二维和三维分布。

(4) He-Ne 激光器输出的光束束腰位置的确定：

- 调节好光路，使 He-Ne 激光器输出的光束的光轴与测量所用的光学导轨平行；
- 沿着测量所用的光学导轨前后移动 CCD 探测器，同时观察软件界面上的光斑图像；
- 确定光斑最小的位置，此位置即为激光束光束的束腰位置。
- 如果在前后移动 CCD 探测器时始终没有光斑最小的位置，说明激光束的束腰在谐振腔内，这时需加一辅助球面透镜，重复上述步骤，可确定出激光光束束腰的像位置。

通过成像物像公式：

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} \quad (12.11)$$

可计算出束腰的实际位置。

(5)* 用刀口法测量 He-Ne 激光器输出的光束束腰和束腰位置，并与用 CCD 测量的参数进行比较。

(6) He-Ne 激光光束经不同透镜、柱面镜变换后光场分布的测量：

透镜换成其它焦距的透镜或换成柱面镜，利用激光光束参数测量软件观测经过其它焦距的透镜或柱面镜变换后光场的变化情况，显示其二维和三维分布。

(7) 扩束系统的测量：保持测束腰系统不变。

学生自行从实验设备箱中所放置的透镜组中，选定合适的镜片组和，达到 1 倍、2 倍、3 倍、4 倍凸/凹透镜激光扩束镜组的效果，并通过软件中的直径测量功能记录数据、练习科学地对数据进行均值处理并作验证（实验设备中提供的 HN 激光器光束直径 800 微米）。

本实验系统中含有：焦距为+300,+150,+100,-150,-75,-50 的镜片组。可有 10 种不同的组合可能。提示：可根据无焦望远镜扩束比公式：

$$M = \frac{f_0}{f_i} \quad (12.12)$$

激光扩束镜即倒置的无焦望远镜。

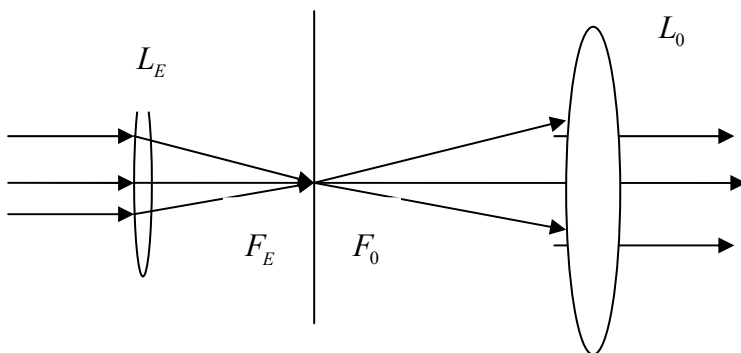


图 12.4 激光扩束镜原理

注意：在大约束腰的位置放置扩束镜片（学生思考这样放置的原因）。

2、实验步骤

- (1) 点亮氦氖激光器，调整光路，用激光光束分析仪测试氦氖激光的高斯光束参数，计算出腰斑位置和大小、远场发散角、共焦参数；

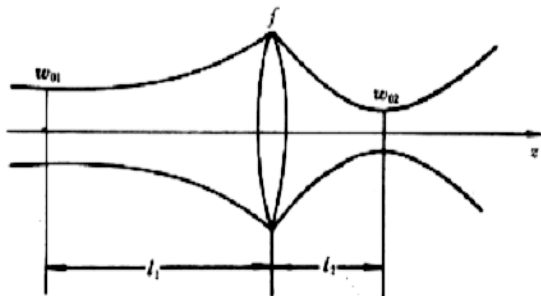


图 12.5 基于薄透镜的高斯光束
聚焦光学系统

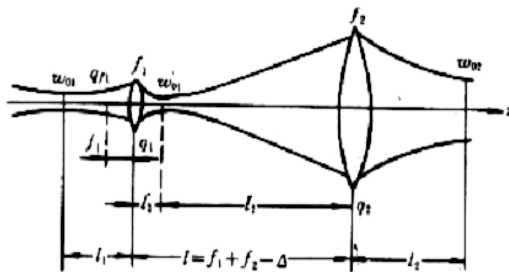


图 12.6 望远镜系统对高斯光束的
准直与扩束

- (2) 按照实验要求和图 12.4，自行选择合适的透镜，在光具座上搭建高斯光束聚焦光学系统，并测量高斯光束经过聚焦光学系统后高斯光束的参数。根据光学透镜的参数和步骤 1) 中测量到的高斯光束的参数，理论计算变换后的高斯光束的参数，并和试验测量结果对比分析。
- (3) 按照实验要求自己选择合适的透镜，搭建高斯光束扩束准直光学系统，并测量高斯光束经过扩束准直光学系统后高斯光束的参数。根据光学透镜的参数和步骤 1) 中测量到的高斯光束的参数，理论计算变换后的高斯光束的参数，并和试验测量结果对比分析。

五、注意事项

- 1、激光器电源电压较高，实验时应注意安全。
- 2、调整光路时，应注意人眼安全。
- 3、实验过程中，注意保护光学元器件的清洁。

六、思考题

- 1、设计高斯光束的聚焦光学系统应注意哪些问题？
- 2、如何优化设计高斯光束的准直光学系？
- 3、比较刀口法与 CCD 测量束腰以及束腰位置的优缺点。

七、参考文献

- 1、《激光光学：激光束的传输变换和光束质量控制》，吕百达，四川大学出版社，1992；
- 2、《强激光的传输与控制》，吕百达，国防工业出版社，1999；
- 3、杨晓冬，邵建新，廖生鸿，谭锦业，周杰，蒋跃文，刀口法测量高斯光束光斑半径研究，激光与红外，39(8)，829-832(2009)

附：BeamView激光光束参数测量软件安装说明

- 1、软件运行环境：Windows2000或Windows XP 操作系统。
- 2、本软件为免安装版本，解压后要先进行注册才能够使用。
- 3、软件注册方法：运行文件夹中的注册机，将会产生随机的机器码，将该机器码通过手机短信或者Email发送给软件开发单位（手机号码：13911676851），将会得到的注册码。将得到的注册码输入到注册码提示栏中，点击注册机可完成注册。
- 4、注意：务必将注册机与应用程序放在同一目录下，并且不要改变应用程序的名称，否则无法完成注册！
- 5、如果需要将应用程序拷贝到其它机器上运行，需要重新按上面的方法进行注册。

附：BeamView激光光束参数测量软件使用说明

本软件可以用来实时显示CCD相机采集到的光斑图像，采用二维和三维的方式进行显示，并且可以根据光斑图像计算出光斑的大小以及光斑质心位置坐标，软件界面上具体各部分功能如下面介绍所示：

一、图像操作区域：

- 1、显示：用来实时显示图像。
- 2、停止：停止显示图像。
- 3、扣除背景：从采集到的图像中以灰度值相减的方法扣除掉已知的背景图像；
- 4、载入图像：读入一幅8位灰度图像。
- 5、保存图像：将当前显示的图像保存为.bmp图像文件。
- 6、计算直径：根据图像计算出X和Y方向上的光斑大小和光斑质心位置坐标。
- 7、3D显示：将光斑图像以三维的方式显示出来。
- 8、帮助：获得本软件的帮助文档。

注意：上述3-8按钮只用在停止采集图像的时候才是可用的。

二、光斑信息区域：

分别显示光斑大小和光斑质心位置坐标，均从XY两个方向显示，单位分别为微米和像素。

鼠标所指像元区域：

当停止采集时，显示鼠标所在位置的坐标值（定义图像显示区域左上角为坐标原点）以及鼠标所指图像像元的灰度值（0-255）；右边图像显示客户区用来对图像进行二维显示，水平和垂直两条曲线分别显示鼠标所指位置所在行和所在列的像元的灰度信息。

实验 13 He-Ne 激光器的模式分析

引言

相对一般光源，激光具有单色性好的特点，也就是说，它具有非常窄的谱线宽度。这样窄的谱线，不是受激辐射后自然形成的，而是受激辐射经过谐振腔等多种机制的作用和相互干涉后形成的。所形成的一个或多个离散的、稳定的又很精细的谱线就是激光器的模。每个模对应一种稳定的电磁场分布，即具有一定的光频率。相邻两个模的光频率相差很小，我们用分辨率比较高的分光仪器可以观测到每个模。当从与光输出的方向平行（纵向）和垂直（横向）两个不同的角度去观测和分析每个模时，发现又分别具有许多不同的特征，因此，为方便每个模又相应称作纵模和横模。

在激光器的生产与应用中，我们常常需要先知道激光器的模式状况，如精密测量、全息技术等工作需要基横模输出的激光器，而激光稳频和激光测距等不仅要求基横模，而且要求单纵模运行的激光器。因此，模式分析是激光器的一项基本而又重要的性能测试。

一、实验目的

- 1、了解激光器的模式结构，加深对模式概念的理解。
- 2、通过测试分析，掌握模式分析的基本方法。
- 3、对本实验使用的分光仪器—共焦球面扫描干涉仪，了解其原理、性能，学会正确使用。

二、实验原理

1、激光器模的形成

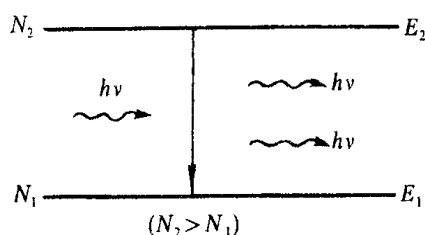


图 13.1 粒子数反转分布

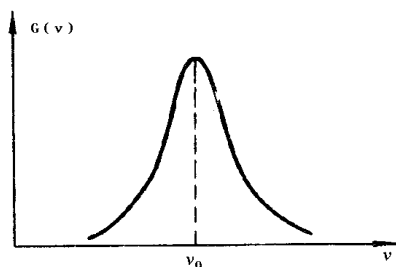


图 13.2 光的增益曲线

激光器的三个基本组成部分是增益介质、谐振腔和激励能源。如果用某种激励方式，在介质的某一对能级间形成粒子数反转分布，由于自发辐射和受激辐射的作用，将有一定频率的光波产生，在腔内传播，并被增益介质逐渐增强、放大，如图 13.1 所示。实际上，由于能级总有一定的宽度以及其它因素的影响，增益介质的增益有一个频率分布，如图 13.2 所示，图中 $G(\nu)$ 为光的增益系数。只有频率落在这个范围内的光在介质中传播时，光强才能获得不同程度的放大。但只有单程放大，还不足以产生激光，要产生激光还需要有谐振腔对其进行光学反馈，使光在多次往返传播中形成稳定、持续的振荡。形成持续振荡的条件是，光在谐振腔内往返一周的光程差应是波长的整数倍，即

$$2\mu L = q\lambda_q \quad (13.1)$$

式中， μ 为折射率，对气体 $\mu \approx 1$ ； L 为腔长； q 为正整数。这正是光波相干的极大条件，满足此条件的光将获得极大增强。每一个 q 对应纵向一种稳定的电磁场分布，叫作一个纵模， q 称作纵模序数。 q 是一个很大的数，通常我们不需要知道它的数值，而关心的是有几个不同的 q 值，即激光器有几个不同的纵模。从 (13.1) 式中，我们还看出，这也是驻波形成的条件，腔内的纵模是以驻波形式存在的， q 值反映的恰是驻波波腹的数目，纵模的频率为

$$\nu_q = q \frac{c}{2\mu L} \quad (13.2)$$

相邻两个纵模的频率间隔

$$\Delta\nu_{\Delta q=1} = \frac{c}{2\mu L} \approx \frac{c}{2L} \quad (13.3)$$

从 (13.3) 式中看出，相邻纵模频率间隔和激光器的腔长成反比，即腔越长，相邻纵模频率间隔越小，满足振荡条件的纵模个数越多；相反，腔越短，相邻纵模频率间隔越大，在同样的增益曲线范围内，纵模个数就越少。因而用缩短腔长的办法是获得单纵模运行激光器的方法之一。

光波在腔内往返振荡时，一方面有增益，使光不断增强；另一方面也存在着多种损耗，使光强减弱，如介质的吸收损耗、散射损耗、镜面的透射损耗、放电毛细管的衍射损耗等。所以，不仅要满足谐振条件，还需要增益大于各种损耗的总和，才能形成持续振荡，有激光输出。如图 13.3 所示，有五个纵模满足谐振条件，其中有两个纵模的增益小于损耗，所以，有三个纵模形成持续振荡。对于纵模的观测，由于 q 值很大，相邻纵模频率差异很小，一般的分光仪器无法分辨，必须使用精度较高的检测仪器才能观测到。

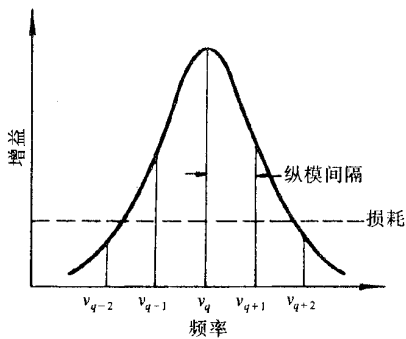


图 13.3 纵模和纵模间隔

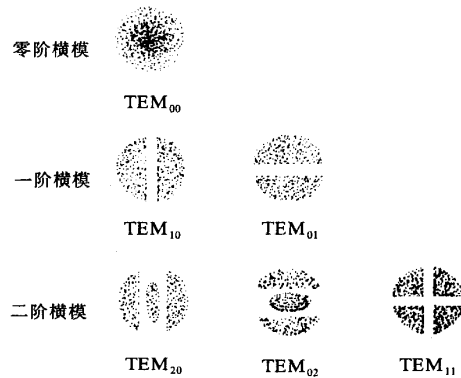


图 13.4 常见的横模光斑图

谐振腔对光多次反馈，在纵向形成不同的场分布，对横向是否也会产生影响。这是因为光每经过放电毛细管反馈一次，就相当于一次衍射，多次反复衍射，就在横向形成了一个或多个稳定的衍射光斑。每一个衍射光斑对应一种稳定的横向电磁场分布，称为一个横模。图 13.4 中，给出了几种常见的基本横模光斑图样。我们所看到的复杂的光斑则是这些基本光

斑的叠加。激光的模式用 TEM_{mnq} 来表示，其中 m、n 为横模的标记，q 为纵模的标记。m 是沿 X 轴场强为零的节点数，n 是沿 Y 轴场强为零的节点数。

2、共焦球面扫描干涉仪

共焦球面扫描干涉仪是一种分辨率很高的分光仪器，它已成为激光技术中一种重要的测量设备。本实验就是通过它将彼此频率差异甚小（几十至几百 MHz），用一般光谱仪器无法分辨的各个不同的纵模、横模展现成频谱图来进行观测的。在本实验中，它起着关键作用。

共焦球面扫描干涉仪是一个无源谐振腔，它由两块球形凹面反射镜构成共焦腔，即两块反射镜的曲率半径和腔长 l 相等（ $R'_1 = R'_2 = l$ ）。反射镜镀有高反射率膜。两块反射镜中的一块是固定不变的，另一块固定在可随外加电压而变化的压电陶瓷环上，如图 13.6 所示。

图中，①为由低膨胀系数材料制成的间隔圈，用以保持两球形凹面反射镜 R'_1 和 R'_2 总是处在共焦状态。②为压电陶瓷环，其特性是若在环的内外壁上加一定数值的电压，环的长度将随之发生变化，而且长度的变化量与外加电压的幅度成线性关系，这是扫描干涉仪被用来扫描的基本条件。由于长度的变化量很小，仅为波长数量级，所以，外加电压不会改变腔的共焦状态。但是当线性关系不好时，会给测量带来一定误差。

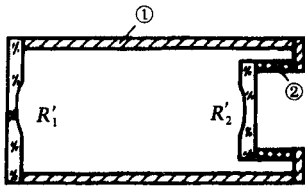


图 13.6 共焦球面扫描干涉仪内部结构示意图

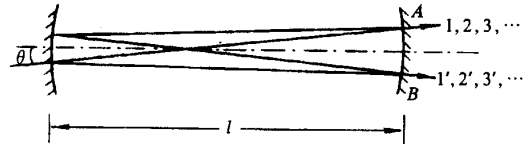


图 13.7 扫描干涉仪内部光路图

当一束激光以近光轴方向射入干涉仪后，在共焦腔中经四次反射呈 X 形路径，光程近似为 $4l$ ，见图 13.7 所示。光在腔内每走一个周期都会有一部分光从镜面透射出去。如在 A、B 两点，形成一束束透射光 1、2、3……和 1'、2'、3'……我们在压电陶瓷上加一线性电压，当外加电压使腔长变化到某一长度 l_a ，使相邻两次透射光束的光程差是入射光中模波长为 λ_a 这条谱线波长的整数倍时，即满足

$$4l_a = k\lambda_a \quad (13.6)$$

模 λ_a 将产生相干极大透射（ k 为扫描干涉仪的干涉序数，为一个正整数），而其它波长的模则不能透过。同理，外加电压又可使腔长变化到 l_b ，使模 λ_b 极大透射，而 λ_a 等其它模又不

能透过……因此，透射极大的波长值与腔长值之间有一一对应关系。只要有一定幅度的电压来改变腔长，就可以使激光器具有的所有不同波长（或频率）的模依次相干极大透过，形成扫描。

值得注意的是，若入射光的波长范围超过某一限度，外加电压虽可使腔长线性变化，但一个确定的腔长有可能使几个不同波长的模同时产生相干极大，造成重序。例如，当腔长变化到可使 λ_d 极大时， λ_a 会再次出现极大，于是有

$$4l_d = k\lambda_d = (k+1)\lambda_a \quad (13.7)$$

即 k 序中的 λ_d 和 $k+1$ 序中的 λ_a 同时满足极大条件，两个不同波长的模被同时扫出，叠加在一起。所以，扫描干涉仪本身存在一个不重序的波长范围限制，即所谓自由光谱范围，它是指扫描干涉仪所能扫出的不重序的最大波长差或频率差，用 $\Delta\lambda_{S.R.}$ 或 $\Delta\nu_{S.R.}$ 表示。假如上例中的 l_d 为刚刚重序的起点，则 $\lambda_d - \lambda_a$ 即为此干涉仪的自由光谱范围值。经推导，可得

$$\lambda_d - \lambda_a = \frac{\lambda_a \lambda_d}{4l_d} \quad (13.8)$$

由于 λ_d 与 λ_a 之间相差很小，腔长的变化仅为波长数量级，上式可近似表示为

$$\Delta\lambda_{S.R.} = \frac{\lambda^2}{4l} \quad (13.9)$$

式中 λ 为平均波长。用频率表示，则为

$$\Delta\nu_{S.R.} = \frac{c}{4l} \quad (13.10)$$

在模式分析实验中，由于我们不希望出现 (13.7) 式中的重序现象，故选用扫描干涉仪时，必须首先知道它的自由光谱范围 $\Delta\nu_{S.R.}$ 和待分析激光器的频率范围 $\Delta\nu$ ，并使 $\Delta\nu_{S.R.} > \Delta\nu$ 。这样，才能保证频谱图上不重序，腔长与模的波长（或频率）间是一一对应关系。

自由光谱范围还可用腔长的变化量来描述，即腔长变化量为 $\lambda/4$ 时所对应的扫描范围。因为，光在共焦腔内呈 X 型路径行进，四倍路程的光程差正好等于 λ ，干涉序数改变为 1。

另外，还可以看出，当满足 $\Delta\nu_{S.R.} > \Delta\nu$ 条件后，如果外加电压足够大，使腔长最大的变化量是 $\lambda/4$ 的 i 倍，那么将会扫描出 i 个干涉序，激光器的所有模将周期性地重复出现在干涉序 k 、 $k+1$ …… $k+i$ 中。

三、实验装置

如图 13.8 所示。实验装置各组成部分说明如下：

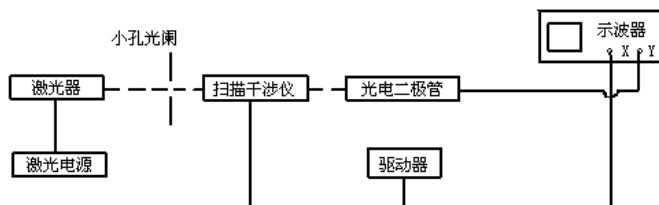


图 13.8 实验装置图

- (1) 待测 He-Ne 激光器。
- (2) 激光电源。
- (3) 小孔光阑。
- (4) 共焦球面扫描干涉仪。使激光器的各个模按波长（或频率）展开，其透射光中心波长为 632.8nm。仪器上有四个鼓轮，其中两个鼓轮用于调节腔的上下、左右位置，另外两个鼓轮用于调节腔的方位。
- (5) 驱动器。驱动器电压除了加在扫描干涉仪的压电陶瓷上，还同时输出到示波器的 X 轴作同步扫描。为了便于观察，我们希望能够移动干涉序的中心波长在频谱图中的位置，以使每个序中所有的模式能完整地展现在示波器的荧光屏上。为此，驱动器还增设了一个直流偏置电路，用以改变扫描的电压起点。
- (6) 光电二极管。将扫描干涉仪输出的光信号转变成电信号，并输入到示波器 Y 轴。
- (7) 示波器。用于观测 He-Ne 激光器的频谱图。

四、实验内容及步骤

- 1、按实验装置图连接线路。经检查无误，方可进行实验。
- 2、开启激光电源。
- 3、用直尺测量扫描干涉仪光孔的高度。调节 He-Ne 激光管的高低、仰俯，使激光束与光学平台的表面平行，且与扫描干涉仪的光孔大致等高。
- 4、使激光束通过小孔光阑。调节扫描干涉仪的上下、左右位置，使激光束正入射到扫描干涉仪中，再细调干涉仪上的四个鼓轮，使干涉仪腔镜反射回来的光点回到光阑的小孔附近（注意：不要使光点回到光阑的小孔中），且使反射光斑的中心与光阑的小孔大致重合，这时入射光束与扫描干涉仪的光轴基本平行。
- 5、开启扫描干涉仪驱动器和示波器的电源开关。调节驱动器输出电压的大小（即调节“幅度”旋钮）和频率，在光屏上可以看到激光经过扫描干涉仪后形成的光斑。（注意：如果在光屏上形成两个光斑，要在保持反射光斑的中心与光阑的小孔大致重合的条件下，调节扫描干涉仪的鼓轮，使经过扫描干涉仪后形成的两个光斑重合。）

-
- 6、降低驱动器的频率，观察光屏上的干涉条纹，调节干涉仪上的四个鼓轮，使干涉条纹最宽。
注意：调节过程中，要保持反射光斑的中心与光阑的小孔大致重合
 - 7、将光电二极管对准扫描干涉仪输出光斑的中心，调高驱动器的频率，观察示波器上展现的频谱图。进一步细调扫描干涉仪的鼓轮及光电二极管的位置，使谱线尽量强。
 - 8、根据干涉序个数和频谱的周期性，确定哪些模属于同一个干涉序。
 - 9、改变驱动器的输出电压（即调节“幅度”旋钮），观察示波器上干涉序数目的变化。改变驱动器的扫描电压起点（即调节“直流偏置”旋钮），可使某一个干涉序或某几个干涉序的所有模式完整地展现在示波器的荧光屏上。
 - 10、根据自由光谱范围的定义，确定哪两条谱线之间对应着自由光谱范围 $\Delta\nu_{S.R.}$ （本实验使用的扫描干涉仪的自由光谱范围 $\Delta\nu_{S.R.} = 3.75\text{GHz}$ ）。测出示波器荧光屏上与 $\Delta\nu_{S.R.}$ 相对应的标尺长度，计算出二者的比值，既示波器荧光屏上 1 毫米对应的频率间隔值。
 - 11、在同一干涉序内，根据纵模定义，测出纵模频率间隔 $\Delta\nu_{\Delta q=1}$ 。将测量值与理论值相比较（注：待测激光器的腔长 L 由实验室给出）。
 - 12、确定示波器荧光屏上频率增加的方向，以便确定在同一纵模序数内哪个模是基横模，哪些模是高阶横模。
 - 13、测出不同横模的频率间隔 $\Delta\nu_{\Delta m+\Delta n}$ ，并与理论值相比较，检查辨认是否正确，确定 $\Delta m + \Delta n$ 的数值。（注：谐振腔两个反射镜的曲率半径 R_1 、 R_2 由实验室给出）。
 - 14、观察激光束在远处光屏上的光斑形状。这时看到的应是所有横模的叠加图，需结合图 1.4 中单一横模的形状加以辨认，确定出每个横模的模序，既每个横模的 m 、 n 值。

五、注意事项

- 1、实验过程中要注意眼睛的防护，绝对禁止用眼睛直视激光束，观察者应佩戴激光防护镜。
- 2、开启或关闭扫描干涉仪的驱动器时，必须先将“幅度”旋钮置于最小值（反时针方向旋转到底），以免将其损坏。

六、预习要求

根据实验要求，查阅相关资料，了解激光产生的原理，气体激光器相比其他激光器的优点，熟悉驻波原理及腔内光场的形成过程及分布特点。

实验 14 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 脉冲激光器电光调 Q 与倍频实验

(I) $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器的电光调 Q 实验

引 言

激光器可以分为连续激光器和普通激光器。一台普通的脉冲固体激光器，输出的光脉冲宽度是几百微秒，甚至是毫秒量级，峰值功率只有几十千瓦级，显然满足不了诸如激光精密测距、激光雷达、高速摄影、高分辨率光谱学研究等的要求，正是在这些要求的推动下，人们研究和发展了调 Q 技术。早在 1960 年激光问世不久，1961 年就有人提出了调 Q 的概念，即设想采用一种方法把全部光辐射能压缩到极窄的脉冲中发射；1962 年，制成了第一台调 Q 激光器，输出峰值功率为 600 千瓦，脉冲宽度为 10-7s 量级；随后的几年发展的非常快，出现了多种调 Q 方法（如电光调 Q、声光调 Q、可饱和吸收调 Q 等），输出功率几乎呈直线上升，脉宽压缩也取得了很大进展；到了 80 年代，调 Q 技术产生脉宽为纳秒（ns）量级，峰值功率为吉瓦（GW）量级的巨脉冲已并非困难。调 Q 技术的出现是激光发展史上的一个重大突破。它不仅大大推动了上述一些应用技术的发展，而且成为科学研究的有力工具。

一、实验目的

- 1、掌握电光 Q 开关的原理及调试方法。
- 2、学会电光 Q 开关装置的调试及主要参数的测试。

二、实验原理

1、激光器工作原理及装置结构

本实验所使用主要实验装置为 XGL-1 型脉冲 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器，主要采用了闪光灯泵浦、开关电源、电光调 Q、腔外倍频技术。利用具有连续光谱的闪光灯照射 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 晶体，Nd 离子就从基态 E_1 跃迁至激发态 E_4 的一系列能级，其中最低的两个能级为 $^4F_{5/2}$ 和 $^4F_{7/2}$ ，相应于中心波长为 0.81 μm 和 0.75 μm 的两个光谱吸收带。由于 E_4 的寿命仅约为 1ns，所以受激的 Nd^{3+} 离子绝大部分都经过无辐射跃迁转移到了 E_3 态。 E_3 是一个亚稳态，寿命长达 250—500 μs ，很容易获得粒子数积累。 E_2 态的寿命为 50ns，即使有粒子处在 E_2 ，也会很快地弛豫到 E_1 。因此，相对 E_3 而言， E_2 态上几乎没有粒子。这样，就在 E_3 和 E_2 之间造成了粒子数反转。正是 E_3 — E_2 的受激辐射在激光谐振腔中得到增益而形成了激光，其波长为 1.064 μm 。只要泵浦光存在， Nd^{3+} 离子的能态就总是处在 E_1 — E_4 — E_3 — E_2 — E_1 的循环之中，这是一个典型的四能级系统。

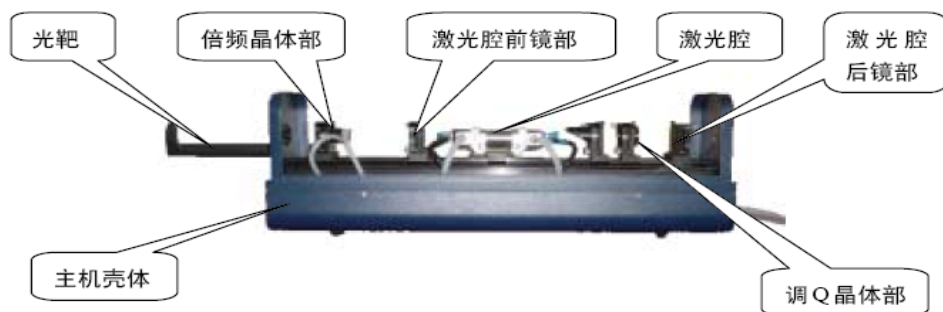


图 14.1 激光器结构

本实验装置主机主要构成：主机壳体；激光腔；倍频晶体（KTP）部；调Q晶体(KDP)部；激光腔前镜部；激光腔后镜部；光靶等，如图14.1。

实验中所使用的激光器的各主要参数如下表：

表 14.1 Nd³⁺:YAG 激光器主要技术指标

主要技术指标		
名称	内容	备注
输出波长	1064nm, 532nm	
输出能量	600mJ (1064nm, 不调Q) 250mJ (1064nm, 调Q) 100mJ (532nm, 调Q)	标称值为在较为理想的调整状态下的测量值
脉冲宽度	~10ns (调Q) ~200 μs (不调Q)	
光束发散角	≤5mrad	
指示激光	632.8nm	
重复频率	1Hz, 5Hz	
储能电容	100 μF	
输入电压	AC220V ± 10%, 50Hz	
最高充电电压	1000V	严禁超过最高电压使用
电光晶体电压	1—5KV (可调)	
退压延时	30—500 μs	

2、激光调 Q 原理

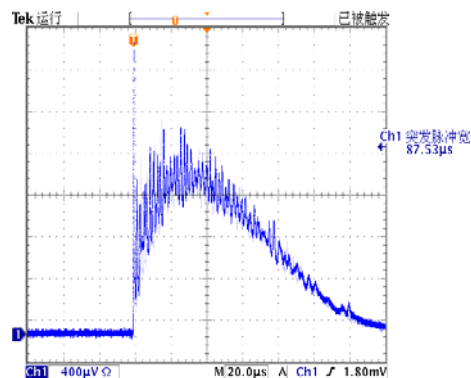


图 14.2 静态激光脉冲中的迟豫振荡

调 Q 技术的发展和运用，是激光发展史上的一个重要突破。一般的固体脉冲激光器输出的光脉冲，是由许多振幅、脉宽和间隔作随机变化的尖峰脉冲组成的，脉冲序列的长度大致与闪光灯泵浦时间相等，其脉宽持续在几 μs 甚至几 ms ，如图 14.2，这种现象称为激光器迟豫振荡。这种情况下，其峰值功率只有 kw 级水平。因此，压缩脉宽，增大峰值功率一直是激光技术所需解决的重要课题。调 Q 技术就是为了适应这种要求而发展起来的。

调 Q 基本概念：用品质因数 Q 值来衡量激光器光学谐振腔的质量优劣，是对腔内损耗的一个量度。调 Q 技术中，品质因数 Q 定义为腔内贮存的能量与每秒钟损耗的能量之比，可表达为：

$$Q = 2\pi\nu_0 \frac{\text{每秒损耗的激光能量}}{\text{腔内贮存的激光能量}} \quad (14.1)$$

式中 ν_0 为激光的中心频率。

如用 E 表示腔内贮存的激光能量， γ 为光在腔内走一个单程能量的损耗率，那么光在这一单程中对应的损耗能量为 γE 。用 L 表示腔长； n 为折射率； c 为光速。则光在腔内走一个单程所用时间为 nL / c 。由此，光在腔内每秒钟损耗的能量为 $\gamma Ec / nL$ 。这样 Q 值可表示为

$$Q = 2\pi\nu_0 \frac{E}{\gamma Ec / nL} = \frac{2\pi nL}{\gamma \lambda_0} \quad (14.2)$$

式中 λ 为真空中激光波长。可见 Q 值与损耗率总是成反比变化的，即损耗大 Q 值就低；损耗小 Q 值就高。

固体激光器由于存在弛豫振荡现象，产生了功率在阈值附近起伏的尖峰脉冲序列，从而阻碍了激光脉冲峰值功率的提高。如果我们设法在泵浦开始时使谐振腔内的损耗增大，即提高振荡阈值，振荡不能形成，使激光工作物质上能级的粒子数大量积累。当积累到最大值（饱和值时），突然使腔内损耗变小， Q 值突增。这时，腔内会象雪崩一样以飞快的速度建立起极强的振荡，在短时间内反转粒子数大量被消耗，转变为腔内的光能量，并在透反镜端面耦合输出一个极强的激光脉冲。通常把这种光脉冲称为巨脉冲。调节腔内的损耗实际上是调节 Q 值，调 Q 技术即由此而得名。也称为 Q 突变技术或 Q 开关技术。

用不同的方法去控制不同的损耗，就形成了不同的调 Q 技术。有转镜调 Q 技术，电光调 Q 技术、可饱和染料调 Q 技术、声光调 Q 技术、透射式调 Q 技术。

本实验以电光 Q 开关激光器的原理、调整、特性测试为主要内容。利用晶体的电光效应制成的 Q 开关，开关速度快；所获得激光脉冲峰值功率高，可达几 Mw 至 Gw ，脉冲宽度窄，

一般可达 ns 至几十 ns, 器件的效率, 可达动态效率 1%, 器件输出功率稳定性较好, 产生激光时间控制程度高, 便于与其它仪器联动, 器件可以在高重复频率下工作等优点. 所以这是一种已获广泛应用的 Q 开关。

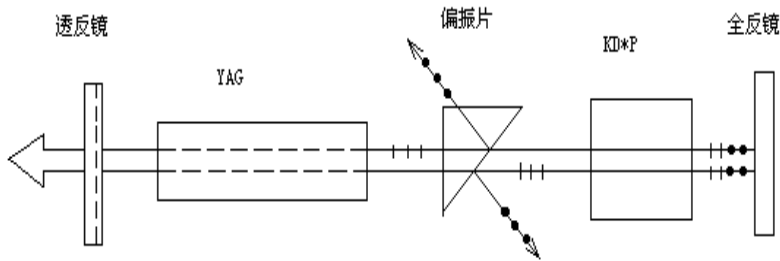


图 14.3 电光 Q 开关工作原理图

如图 14.3, YAG 棒在闪光灯的激励下产生无规则偏振光, 通过偏振器后成为线偏振光, 若起偏方向与 KD*P 晶体的晶轴 x(或 y)方向一致, 并在 KD*P 上施加一个 $V_{\lambda/4}$ 的外加电场。由于电光效应产生的电感应主轴 X' 和 y' 与入射偏振光的偏振方向成 $\pi/4$ 角, 这时调制器起到了一个 $1/4$ 波片的作用, 显然, 线偏振光通过晶体后产生了 $\pi/2$ 的位相差, 可见往返一次产生的总相差为 π , 线偏振光经这一次往返后偏振面旋转了 $\pi/2$, 不能通过偏振器。这样, 在调制晶体上加有 $1/4$ 波长电压的情况下, 由介质偏振器和 KD*P 调制晶体组成的电光开关处于关闭状态, 谐振腔的 Q 值很低, 不能形成激光振荡。

虽然这时整个器件处在低 Q 值状态, 但由于闪光灯一直在对 YAG 棒进行抽运, 工作物质中亚稳态粒子数便得到足够多的积累, 当粒子反转数达到最大时, 突然去掉调制晶体上的 $1/4$ 波长电压, 即电光开关迅速被打开, 沿谐振腔轴线方向传播的激光可自由通过调制晶体, 而其偏振状态不发生任何变比, 达时谐振腔处于高 Q 值状态, 形成雪崩式激光发射, 发射出一个能量高度集中的激光脉冲。

三、实验装置

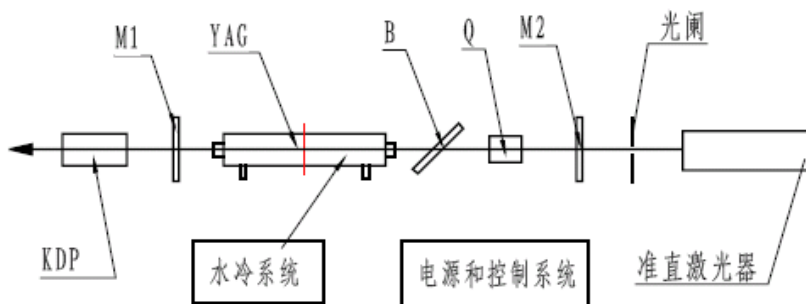


图 14.4 实验装置图

KDP: 倍频晶体 (或 KTP)

M1: 输出镜 (输出透过率 $T=80\%$)

YAG: 闪光灯、聚光腔和 YAG 棒组件

B: 布氏角偏振片

Q: 调 Q 晶体 (布氏角偏振片与调 Q 晶体组成调 Q 单元)

M2:全反射镜 (M1 和 M2 组成激光谐振腔)

四、实验内容与步骤

- 1、用 He-Ne 激光束或自准直平行光管，调整激光器各光学元件的高低水平位置，使各光学元件的对称中心基本位于同一直线上。再调整各光学元件的俯仰方位，使介质膜反射镜、偏振器、电光晶体的通光面与激光工作物质端面相互平行，不平行度小于一弧分。
- 2、打开水循环控制开关，观察水冷系统的水流流速是否正常，如正常按照以下步骤进行实验；如流速不正常，要检查水冷装置或仪器各连接开关查出并解决问题，水流流速正常后再按照以下步骤进行。
- 3、水流正常情况下，依次打开电钥匙开关、预燃开关、工作开关，启动激光器的工作电源。在不加 $\lambda/4$ 晶体电压情况下，工作电压取 550V，反复调整两块谐振腔片，使静态激光输出最强，记下输出激光能量。对 1.06 微米不可见的红外激光先用烧斑纸对光的有无和能量的大小进行粗略检查，然后用能量计准确测定其能量值。一般称不加调 Q 元件的激光输出为静态激光，而加调 Q 元件的激光输出为动态激光或巨脉冲激光。注意：能量计使用前调到正确的波长，并调零。
- 4、关门试验，加上偏振片及调 Q 晶体，给电光晶体加上恒定的 $\lambda/4$ 电压 ($V_{\lambda/4}$)，光轴绕转动 KD*P 晶体，充电并打激光，反复微调电光晶体，直至其 x、y 轴有偏振器的起偏方向平行。同时适当微调电压 $V_{\lambda/4}$ ，直到激光器几乎不能振荡为止 (出光明显比静态激光能量低)。此即说明电光 Q 开关已处于关闭状态 (低 Q 值状态)。
- 5、接通电光晶体的退压电路，打动态激光，微调闪光灯开始泵浦至退去 $V_{\lambda/4}$ 电压之间的延迟时间电位器，一面观察激光强弱，一面微调延迟电位器旋钮，直到激光输出最强。记下巨脉冲能量值。
- 6、改变脉冲泵浦能量，每增加工作电压 50V 测量一次，用能量计分别测出几组静、动态输出能量。一直测到 800V，计 6 组数据。利用以下公式，分别计算出在同一泵浦能量下的动态与静态激光输出能量之比 η ， η 称为动静比。

$$\eta = \text{动态激光输出能量} / \text{静态激光输出能量}$$

作图画出 η 随外加电压的变化关系。

- 7、按照与打开激光器相反的顺序，依次关闭各控制开关，关闭激光器。

五、实验注意事项

- 1、实验过程中，激光能量密度高，千万注意个人保护，绝对禁止直接或反射的激光射入眼内 (配戴激光防护镜)，不得向激光器腔内窥视，身体切勿接触射出的激光。
- 2、绝对禁止激光照射光亮物体表面、易燃易爆物品。
- 3、调 Q 时，电光晶体上电压有 3000V 左右，调节时注意不要触压！
- 4、电光晶体上外控电压已调好，切勿调节 $\times 10$ 电压旋钮。若退压电路也已调好，切勿调节 Delay 旋钮。
- 5、取放布儒斯特窗和电光晶体千万要小心，不要损伤晶体。不要在调 Q 状态下取放。
- 6、取放倍频晶体千万要小心，不要损伤晶体。

六、预习要求

根据实验要求，查阅激光器产生激光的物理原理、电光效应的原理及应用、光的偏振等相关光学资料，了解产生激光的基本条件，影响激光出射能量的因素，掌握电光调 Q 的原理。

七、思考题

- 1、调Q过程中，若发现调Q后能量很微弱（在烧斑纸上显示斑点减弱），有可能有哪几种原因引起？
- 2、调Q后为什么总能量反而比调Q前有所降低？

附：激光器操作使用方法及注意事项

- 1、连接电源，确定各线路正确连接。然后检查冷却系统的水管是否畅通，有无打结现象，确保水路循环能无阻运行。
- 2、打开位于水箱后控制面板上的电源总开关，此时冷却系统启动，水路开始循环，检查其循环畅通无阻后则可开动激光器。
- 3、在水箱前面是激光器的电源控制面板，启动步骤是：
 - 1) 按“电源”键，开通电源，此时“状态指示”中的“电源”指示灯亮。
 - 2) 开启“预燃”键，此时“状态指示”中的“预燃”指示灯亮。
 - 3) 一切正常后，开“启动”键，此时“状态指示”中的“启动”指示灯亮，慢调“电压调节”键由低到高输入氙灯电压，至出激光为止（大概在 500V 左右就会很清晰了，用上转换片在导轨上接受则可观察到绿色光斑，调试使输出圆整均匀的光斑即可）。
 - 4) 完成上述“静态激光的调试”后，可以开启调 Q 控制输出“动态激光”。控制氙灯电压（“电压调节”键控制）在较低输入（500V 以下为宜），先开启“晶压”键给晶体加上高压（输入的高压由晶体而定，是个定值。一般定好后不再改动，除非更换晶体。由“晶压调节”控制高压输入值。），此时“状态指示”中的“晶压”指示灯亮。调节晶体角度位置完成“关门”后，开启“退压”键，此时“状态指示”中的“退压”指示灯亮。给晶体退压，输出动态激光。
 - 5) 在“频率选择”栏里，有三种频率控制，是内信号控制分别是：每秒！次，每秒 5 次，每秒 10 次，即表示每秒输出激光的次数，也即，激光器的工作频率。外信号为外部加入，一般由自己的需要而定。外信号接口在电源的后面板。
 - 6) 关机顺序：如在动态工作，先关“退压”键，再关掉“晶压”键。然后关闭“启动”键，待到氙灯电压显示面板的指针慢慢返回零点后，再关“预燃”键，完了就可以关闭“电源”键。最后关闭水箱后控制面板上的电源总开关，水系统也停止工作。此时应将激光器用干净的布遮盖，防止入灰尘。
 - 7) 在整个调试工作过程中应避免“急开急停”，防止故障，要平稳变化调节。

实验 14 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 脉冲激光器电光调 Q 与倍频实验

(II) $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器的倍频实验

引言

强度较弱的光场，如普通光源的光场，在与物质相互作用时，物质对光场呈现线性性质。产生的各种光学现象，如折射、散射、吸收等与光场呈线性关系。本世纪 60 年代激光出现后，由于激光能量高度集中的特点，这种强光场足以体现物质对光场的非线性响应，因此开始发现与光强有关的光学效应，通常称为非线性光学效应。1961 年，弗兰肯(Franken)等将红宝石激光器发出的约为 3kw 的 694.3nm 光脉冲聚焦到石英晶体上，出射后观察到了红宝石激光的 347nm 二次谐波即倍频光，这是最早发现的非线性光学倍频现象。倍频技术扩大了激光的波段，可获得更短波长的激光，如将 1064nm 的激光通过倍频获得 532nm 的激光，则可用于眼科治疗、水下测距、水下摄影、水下通讯等。

一、实验目的

- 1、掌握倍频的基本原理和调试技能。
- 2、了解影响倍频效率的主要因素。
- 3、测量二倍频转换效率。

二、实验原理

原子是由原子核和核外电子构成。当频率为 ω 的光入射介质后，引起介质中原子的极化，即负电中心相对正电中心发生位移 r 形成电偶极矩 $m=er$ ，其中 e 是负电中心的电量。我们定义单位体积内原子偶极矩的总和为极化强度矢量 $P=Nm$ ， N 是单位体积内的原子数。极化强度矢量和入射场的关系式为

$$P(r,t) = \chi^{(1)}E + \chi^{(2)}:E^2 + \chi^{(3)}::E^3 + \dots \quad (14.3)$$

其中 $\chi^{(1)}$, $\chi^{(2)}$, $\chi^{(3)}$... 分别称为线性极化率、二级非线性极化率、三级非线性极化率...。并且在一般情况下， $\chi^{(1)}$, $\chi^{(2)}$, $\chi^{(3)}$... 每增加一次极化， χ 值减小七八个数量级。由于入射光是变化的，其振幅为 $E=E_0 \sin \omega t$ ，所以极化强度也是变化的。根据电磁理论，变化的极化场可作为辐射源产生电磁波—新的光波。在入射光的电场比较小时(比原子内的场强还小)， $\chi^{(1)}$, $\chi^{(2)}$, $\chi^{(3)}$ 等极小， P 与 E 成线性关系为 $P = \chi^{(1)}E$ ，新的光波与入射光具有相同的频率，这就是通常的线性光学现象。但当入射光的电场较强时，不仅有线性现象，而且非线性现象也不同程度地表现出来。新的光波中不仅含有入射的基波频率，还有二次谐波、三次谐波等频率产生，形成能量转移，频率变换。这就是只有在高强度的激光出现以后，非线性光学才得到迅速发展的原因。

设有下列两波同时作用于介质，介质产生的极化强度应为二列光波的叠加。有

$$\begin{aligned}
P &= \chi^{(2)} [A_1 \cos(\omega_1 t + k_1 z) + A_2 \cos(\omega_2 t + k_2 z)]^2 \\
&= \chi^{(2)} [A_1^2 \cos^2(\omega_1 t + k_1 z) + A_2 \cos(\omega_2 t + k_2 z) \\
&\quad + 2A_1 A_2 \cos(\omega_1 t + k_1 z) \cos(\omega_2 t + k_2 z)]
\end{aligned} \tag{14.4}$$

经推导得出，二级非线性极化波应包含下面几种不同频率成分：

$$\begin{aligned}
P_{2\omega_1} &= \frac{\chi^{(2)}}{2} A_1^2 \cos[2(\omega_1 t + k_1 z)], \\
P_{2\omega_2} &= \frac{\chi^{(2)}}{2} A_2^2 \cos[2(\omega_2 t + k_2 z)], \\
P_{\omega_1 + \omega_2} &= \chi^{(2)} A_1 A_2 \cos[(\omega_1 + \omega_2)t + (k_1 + k_2)z], \\
P_{\omega_1 - \omega_2} &= \chi^{(2)} A_1 A_2 \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + (k_1 - k_2)z], \\
P_{\text{直流}} &= \frac{\chi^{(2)}}{2} (A_1^2 + A_2^2)
\end{aligned} \tag{14.5}$$

从以上看出，二级效应中含有基频波的倍频分量($2\omega_1$)、($2\omega_2$)、和频分量($\omega_1 + \omega_2$)、差频分量($\omega_1 - \omega_2$)和直流分量。故二级效应可用于实现倍频、和频、差频及参量振荡等过程。当只有一种频率为 ω 的光入射介质时，那么二级非线性效应就只有除基频外的一种频率(2ω)的光波产生，称为二倍频或二次谐波。

获得倍频光时显然应力求具有尽可能高的转换效率。以输出倍频光与输入基频光的功率之比衡量效率高，从理论分析可得倍频效率的关系式如下

$$\eta = \frac{P^{2\omega}}{P^\omega} \propto \frac{\sin(\frac{L \cdot \Delta k}{2})}{(L \cdot \Delta k / 2)^2} \tag{14.6}$$

其中， L 是倍频晶体的通光长度， $\Delta k = 2k_1 - k_2 = 4\pi / \lambda [1(n_\omega - n_{2\omega})]$ 。只有当 $\Delta k = 2K_1 - K_2 = 4\pi / \lambda [1(n^\omega - n^{2\omega})] = 0$ 时，即 $n^\omega = n^{2\omega}$ 时，效率最高。我们将之称为位相匹配条件，但对一般光学介质大部分属于各向同性介质，由于存在正常色散效应，即相对于频率高的光波折射率总是较高，有 $n^{2\omega} > n^\omega$ ，不满足相位匹配条件。因此需选取特殊的非线性光学介质，此处选用各向异性晶体。对于各向异性晶体，由于存在双折射，可以利用晶体内同一波长的 o 光和 e 光所对应的折射率不同，以及 e 光折射率随入射光波与光轴的夹角而变化的性质来达到相位匹配的目的。因此，为了获得最好的倍频效果，除了入射光要足够强（功率密度高）、晶体的非线性极化系数要大外，还要使特定偏振方向的线偏振光以某一特定角度入射，这个特定的角度由相位匹配条件决定。

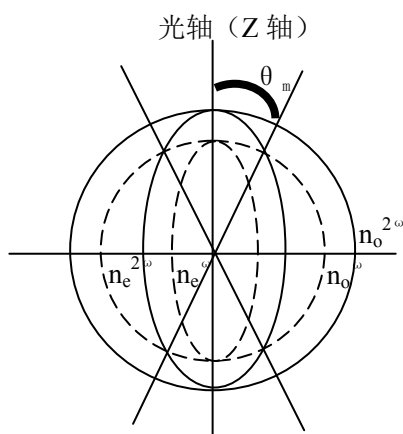


图14.5 负单轴晶体的折射率面

目前常用的负单轴晶体，如 KDP，它对基频光和倍频光的折射率可以用图 14.5 的折射率面来表示。图中实线是倍频光的折射率面，虚线是基频光的折射率面。球面为 o 光折射率面，椭球为 e 光折射率面。折射率面的定义为，它的每一根矢径长度（从原点到曲面的距离）表示以此矢径方向为波法线方向的光波的折射率。从图中可以看出，如果基频光是 o 光，倍频光是 e 光，那么当波面沿着跟光轴成 θ_m 角的方向传播时，二者折射率相同， θ_m 称为相位匹配角。这种方法称为第一类角度相位匹配，即 $o+o \rightarrow e$ 。

需要注意：相位匹配角 θ_m 是指基频光相对光轴（Z 轴）的夹角，而不是入射角，为减少反射损失和便于调整，恒使基频光正入射晶体，在实际晶体切割时，往往使其晶面法线方向与光轴的夹角为相位匹配角 θ_m 。可以想象，相位匹配角 θ_m 实际是以光轴为旋转轴，基频光波法线方向为母线的空间锥体角，因此，基频光在倍频晶体中的方位（以基频光和光轴组成的平面与晶体 X 轴的夹角 ϕ 表示，称为方位角）对倍频效率也有很大的影响，影响的程度因晶体种类而异。

三、实验装置

由于一般调 Q 脉冲激光器输出能量比较高，通常采用腔外倍频。这种方法虽不如腔内倍频效率高，但装置简单，便于调整和测量。本实验就是采用了腔外倍频的装置结构。

实验装置见图 14.6，并说明如下：

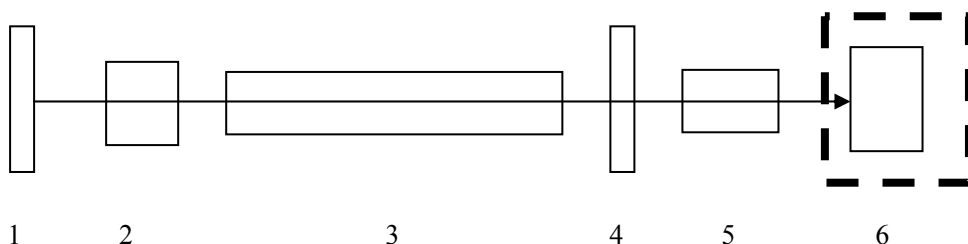


图14.6实验装置

①—④构成 YAG 激光器振荡级。其中：①是 1.06 微米全反射镜；②是 DKDP 电光调 Q

晶体及介质膜起偏器；③为 YAG 激光器的主体，包括 YAG 棒、氙灯、聚光腔和冷却系统；④是输出端平面反射镜，对 1.06 微米激光半透射半反射，输出能量大于 20mJ，脉宽约 10ns。经边束调制的 YAG 调 Q 激光器产生的 1.06 微米激光是全偏振光，通常为偏振方向在竖直方向上的 o 光，以满足倍频晶体相位匹配的要求。⑤KTP 倍频晶体，将 1.06 微米的红外激光转变成 0.53 微米的绿光，晶体的入射面镀有对 1.06 微米的增透膜，出射面镀有对 0.53 微米的增透膜，倍频效率约 5%~15%。KTP 晶体易损伤，操作时要细心。⑥能量计。

四、实验内容与步骤

由于本实验具有强光和高压电，为保证安全，必须首先仔细阅读实验室注意事项、激光器操作方法，然后才开始操作。

- 1、调整激光器出射光方向，使其和基座导轨同方向并与导轨上各光学器件处于等高的水平方向，这样便于接收调节。检测 YAG 激光器输出光能量是否正常。微调 YAG 放大器基座，与激光器保持共轴，使输出能量最佳。对 1.06 微米不可见的红外激光除可用能量计准确测定其能量值外，还可用烧斑纸对光的有无和能量的大小进行粗略检查。
- 2、由于静态激光输出峰值功率很低，很难得到较高效率的倍频光输出，我们采用动态光下的倍频光作为测量对象，因此按照调 Q 的实验步骤调整好动态激光。
- 3、将倍频晶体、平面分光镜、能量计放置在同一水平高度上。使 KTP 晶体处于 o+o→e 的第一类相位匹配方式。
- 4、由于晶体切割时，截面的法线与晶体的光轴夹角即为该晶体的相位匹配角，入射光只要垂直射到晶体上，就可获得最好的倍频效果。转动倍频晶体，使 1.06 微米的基频光以不同角度入射于晶体。从光强的变化中也可看出，当倍频光由弱的圆环或散开的光斑缩为一耀眼的光点时，即达到了最佳匹配状态。鉴于光束的发散，能量计与倍频晶体一般保持在 10cm 处。在测量的过程中，能量计放置的角度也会随着出射光方向的改变稍有变化。
- 5、将倍频晶体固定在最佳倍频位置，用能量计分别测出 1.06 微米的输入光强及 0.53 微

米的倍频光强、计算出倍频效率 $\eta = \frac{I_{2\omega}}{I_{\omega}}$ 。反复测三遍，取平均结果。注意：由输出镜

输出的 1064nm 基频光通过 KTP 倍频晶体后输出包含 532nm 和 1064nm 两种光。为了测得 532nm 激光能量，可以使用滤光片滤除 1064nm 的光。或使用一个 60° 等边色散棱镜将其分光，分别测得各自的能量： $I_{2\omega}$ (532nm 的能量)， I_{ω} (1064nm 的能量)，则倍频效率

$$\eta = \frac{I_{2\omega}}{I_{2\omega} + I_{\omega}}$$

- 6、YAG 激光器电源电压，即改变 1.06 微米基频输入光强，用能量计分别测出有 KTP 倍频和无 KTP 基频的能量，画出光强的关系曲线 $I_{2\omega} = I_{\omega}$ ，工作电压从 500V 开始，每 50V 测一组数据，测到 800V 为止。
- 7、可选实验：利用倍频晶体上的量角器，旋转倍频晶体 KTP 改变角度，选取一定的角度范围，以 KTP 架子上的箭头为基准，以 0 度为中心，每隔 2 度测量一个输出能量，可测量 10 组以上数据，并做 I-θ 曲线，找出最佳匹配角度。

五、实验注意事项

- 1、实验过程中，激光能量密度高，千万注意个人防护，绝对禁止直接或反射的激光射入眼内（配戴激光防护镜），不得向激光器腔内窥视，身体切勿接触射出的激光。
- 2、由于人眼对强绿光极其敏感容易致盲，操作者严禁佩戴高反射金属饰品，以防强光反射造成伤害。
- 3、调 Q 时，电光晶体上电压有 3000V 左右，调节时注意不要触压！
- 4、取放倍频晶体支架要小心，不要损伤晶体。

六、预习要求

根据实验要求，查阅非线性光学的基本知识，了解主要的非线性光学现象及产生的物理原因，熟悉双折射晶体作为倍频晶体使用时需要满足的相位匹配条件，掌握倍频光产生的原理。

实验 15 LED/LD 的光学和电学特性测试实验

引言

半导体光源主要有发光二极管 LED 和半导体激光器 LD 两种，是一类新型高效固体光源，具有节能、环保和寿命长等显著优点。从全球来看，半导体照明产业已形成以美国、亚洲、欧洲三大区域为主导的三足鼎立的产业分布与竞争格局。中国 LED 产业起步于 20 世纪 70 年代。目前，已初步形成了包括 LED 外延片的生产、LED 芯片的制备、封装以及 LED 产品应用在内的较为完整的产业链。在“国家半导体照明工程”的推动下，形成了七个国家半导体照明工程产业化基地。作为第四代照明光源或绿色光源，LED 和 LD 在光纤通讯、显示器件、光存储、办公现代化、医疗、军事、检测等领域显示出了其蓬勃发展的应用前景。

一、实验目的

- 1、掌握 LED/LD 的工作原理。
- 2、掌握 LED/LD 的电学特性（P-I 特性和 V-I 特性）和光学特性（发射光谱、发射角、发散角）。
- 3、了解 LED/LD 的热学特性（温度对阈值电流和输出照度的影响）和色度学特性（发光体的单色性及颜色分布）。

二、实验原理

1、LED 工作原理

发光二极管大多是由 III-IV 族化合物，如 GaAs（砷化镓）、GaP（磷化镓）、GaAsP（磷砷化镓）等半导体制成的，其核心是 PN 结。因此它具有一般 PN 结的 I-V 特性，即正向导通，反向截止、击穿特性。此外，在一定条件下，它还具有发光特性。在正向电压下，电子由 N 区注入 P 区，空穴由 P 区注入 N 区。进入对方区域的少数载流子（少子）一部分与多数载流子（多子）复合而发光，如图 15.1 所示。由于复合是在少子扩散区内进行的，所以光仅在靠近 PN 结面数微米以内产生。

假设发光是在 P 区中发生的，那么注入的电子与价带空穴直接复合而发光，或者先被发光中心捕获后，再与空穴复合发光。除了这种发光复合外，还有些电子被非发光中心（这个中心介于导带、价带中间附近）捕获，而后再与空穴复合，每次释放的能量不大，不能形成可见光。我们把发光的复合量与总复合量的比值称为内量子效率

$$\eta_{qi} = \frac{N_r}{G} \quad (15.1)$$

式中， N_r 为产生的光子数， G 为注入的电子-空穴对数。但是，产生的光子又有一部分会被 LED 材料本身吸收，而不能全部射出器件之外。作为一种发光器件，我们更感兴趣的是它能发出多少光子，表征这一性能的参数就是外量子效率

$$\eta_{qe} = \frac{N_T}{G} \quad (15.2)$$

式中， N_T 为器件射出的光子数。

发光二极管所发之光并非单一波长，其光谱曲线如图 1.2 所示。由图可见，该发光管所发之光中某一波长 λ_0 的光强最大，该波长为峰值波长。理论和实践证明，光的峰值波长 λ 与发光区域的半导体材料禁带宽度 E_g 有关，即 $\lambda \approx 1240/E_g$ (nm)，式中 E_g 的单位为电子伏特 (eV)。若能产生可见光 (波长在 380nm 紫光~780nm 红光之间)，半导体材料的 E_g 应在 3.26~1.63eV 之间。光谱曲线上两个半光强点所对应的波长差 $\Delta\lambda$ 为 LED 谱线宽度(简称谱宽)，其典型值在 30-40nm 之间。当器件工作温度升高时，光谱曲线随之向右移动，从 λ_0 的变化可以求出 LED 的波长温度系数。

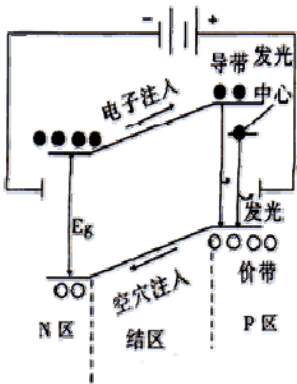


图 15.1 LED 发光原

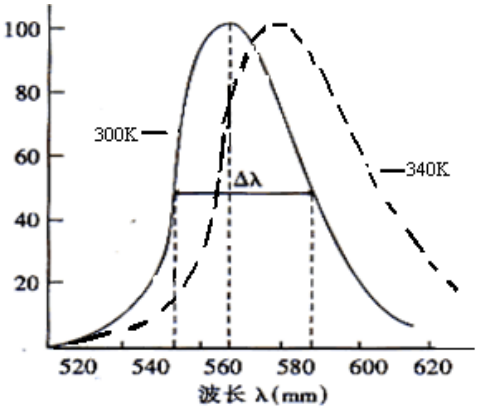


图 15.2 LED 光谱

2、LD 工作原理

从激光物理学中我们知道，半导体激光器的粒子数反转分布是指载流子的反转分布。正常条件下，电子总是从低能态的价带填充起，填满价带后才能填充到高能态的导带；而空穴则相反。如果我们用电注入等方法，使 PN 结附近区域形成大量的非平衡载流子，即在小于复合寿命的时间内，电子在导带，空穴在价带分别达到平衡，那么在此注入区内，这些简并化分布的导带电子和价带空穴就处于相对反转分布，称之为载流子反转分布。注入区称为载流子分布反转区或作用区。

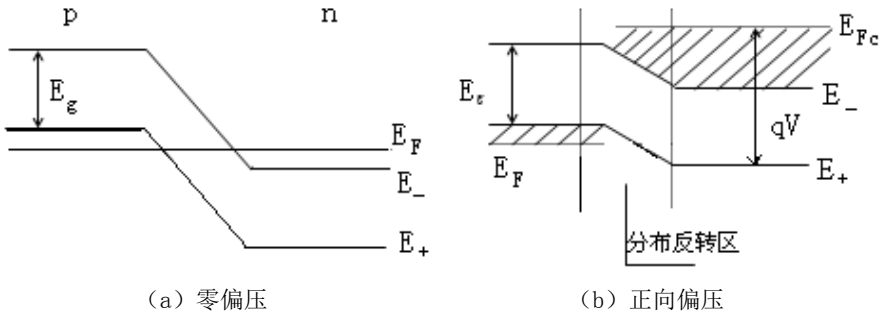


图 15.3 半导体激光器的能带图

结型半导体激光器所用的半导体材料是重掺杂半导体，能带结构如图 15.3(a)所示。平衡

态时，P 区价带顶没有电子，N 区导带底有高浓度的电子。当 PN 结加上正向偏压后，势垒降低，能带结构为图 15.3(b)所示，外加电压 V 使 N 区和 P 区的费米能级分开并分别进入导带和价带内。由于势垒降低，大量电子由 N 区越过势垒与 P 区的空穴复合，发出光子。空穴也可由 P 区流入 N 区与电子复合发射光子。当外加电压足够大 ($qV \geq E_g$) 时，在势垒区和它的两侧一个扩散长度范围内将出现一个分布反转区，这就是发射激光的工作区。

结型半导体激光器通常用与 PN 结平面相垂直的一对相互平行的自然解理面构成平面腔。在结型半导体激光器的作用区内，开始时导带中的电子自发地跃迁到价带和空穴复合，产生相位、方向并不相同的光子。大部分光子一旦产生便穿出 PN 结区，但也有一部分光子在 PN 结区平面内穿行，并行进相当长的距离，因而它们能激发产生出许多同样的光子。这些光子在平行的镜面间不断地来回反射，每反射一次便得到进一步的放大。这样重复和发展，就使得受激辐射趋于压倒性的优势，即在垂直于反射面的方向上形成激光输出。

半导体激光器的发射光谱取决于激光器光腔的特定参数，大多数半导体激光器是多纵模振荡即其发光谱线中有多个峰的光谱，如图 15.4 所示。半导体激光器的波长可以定义为它的光谱的统计加权。在规定输出光功率时，光谱内若干发射模式中最大强度的光谱波长被定义为峰值波长 λ_p 。一个半导体激光器能够维持的光谱线数目取决于光腔的结构和工作电流。

3、LED/LD 的 V-I 特性

LED 和 LD 都是半导体光电子器件，其核心部分都是 PN 结。因此其具有与普通二极管相类似的 V-I 特性曲线，如图 15.5 所示。当所加正向电压小于某一值时，电流极小，不发光；当电压超过某一值后，正向电流随电压迅速增加，发光。我们将这一电压称为阈值电压或开门电压。

4、LED/LD 的 P-I 特性

在结构上，由于 LED 与 LD 相比没有光学谐振腔。因此，LD 和 LED 的照度与电流的 P-I 关系特性曲线则有很大的差别，如图 15.6 所示。LED 的 P-I 曲线基本上是一条近似的线性直线，只有当电流过大时，由于 PN 结发热产生饱和现象，使 P-I 曲线的斜率减小。

对于半导体激光器来说，当正向注入电流较低时，增益小于 0，此时半导体激光器只能发射荧光；随着电流的增大，注入的非平衡载流子增多，使增益大于 0，但尚未克服损耗，在腔内无法建立起一定模式的振荡，这种情况被称为超辐射；当注入电流增大到某一数值时，增益大于损耗，半导体激光器输出激光，此时的注入电流值定义为阈值电流 I_{th} 。

由图 15.6 可以看出，注入电流较低时，LD 只发射微弱的荧光。当注入电流达到并超出阈值电流后，输出照度陡峭上升。我们把陡峭部分外延，将延长线和电流轴的交点定义为阈值电流 I_{th} 。可以根据其 P-I 曲线求出 LD 的外微分量子效率 η_D ，其定义是在阈值电流以上，激光器输出光子数的增量与注入电子数的增量之比，描述的是激光器的电/光转换效率，它具有如下关系：

$$P = P_{th} + \frac{\eta_d h\nu}{e} (I - I_{th}) \quad (15.3)$$

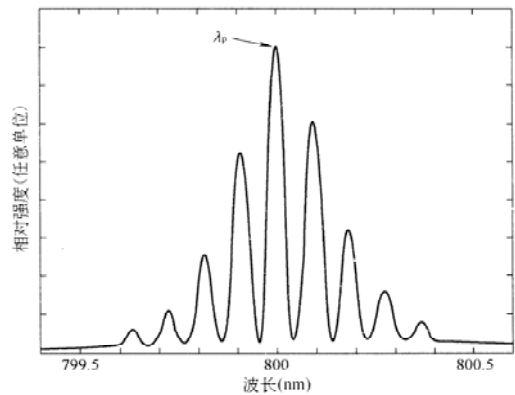


图 15.4 LD 光谱特性曲线

因此在曲线中，曲线的斜率表征的就是外微分量子效率。

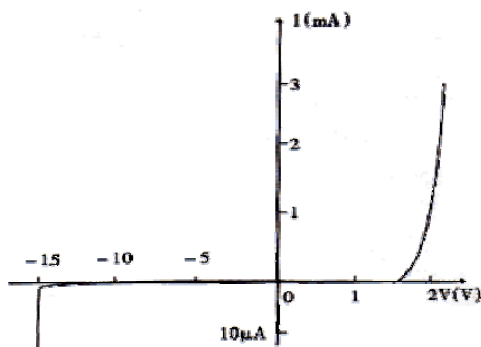


图 15.5 LED/LD 的 V-I 特性曲线

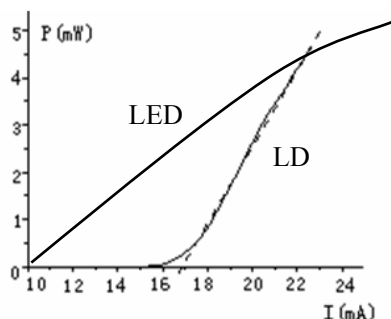


图 15.6 LED/LD 的 P-I 特性曲线

5、LD 的温度特性

由于光电子器件是由半导体材料制成，因此温度对其光电特性影响也很大。随着温度的增加，LD 的阈值逐渐增大，光照度逐渐减小，外微分量子效率逐渐减小，输出光功率明显下降，达到一定温度时，激光器就不激射了。阈值与温度的近似关系可以表示为：

$$I_{th}(T) = I_{th}(T_r) \exp[(T - T_r)/T_0] \quad (15.4)$$

式中， T_r 室温， $I_{th}(T_r)$ 为室温下的阈值电流， T_0 为特征温度。不同温度下，LD 的 P-I 曲线如图 15.7 所示，根据此图可以求出 LD 的特征温度。

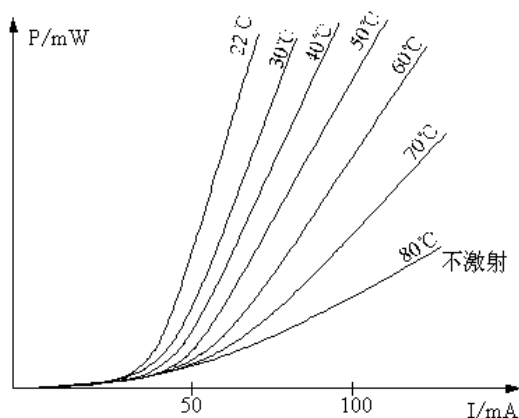


图 15.7 LD 的温度特征曲线

6、LED/LD 的辐射强度空间分布

LED 的辐射强度空间分布是指在规定的正向工作电流下，垂直和平行于 PN 结方向，辐射强度随空间角度的分布图，通常采用半值角 $\theta_{1/2}$ 或视角来描述，它的分布影响到与光纤之

间的耦合效率等。 $\theta_{1/2}$ 是指发光强度值为轴向强度值一半的方向与发光轴向（法向）的夹角，半值角的 2 倍称为视角（或称半功率角）。对于高指向性的 LED，半值角为 $5^\circ \sim 20^\circ$ 或更小；标准型的半值角为 $20^\circ \sim 45^\circ$ ；而散射型的半值角为 $45^\circ \sim 90^\circ$ 或更大，与光纤的耦合效率较低，可以作为中短距离、中小容量的光纤通信系统的光源。

对于半导体激光器输出的光场分布，人们通常用近场和远场特性来描述。近场分布是指光强在解理面上的分布，它往往和激光器的侧向模式联系在一起。远场特性是指光束在距输出腔面一定距离处空间上的强度分布，它常常与光束的发散角联系在一起。

由于半导体激光器有源层截面的不对称性和有源区很薄，其谐振腔长与辐射波长可以比拟，因此中心层截面的作用类似于一个狭缝，它使光束受到折射并发散。输出光束发散角度很大，光强分布（光斑形状）也不对称。垂直结平面的发散角度 θ_{\perp} 很大，平行结平面的发散角度 θ_{\parallel} 较小，如图 15.8 所示。由于受激辐射与自发辐射的本质不同，所以导致半导体激光器输出的光发散角窄（垂直发散角为 $30^\circ \sim 50^\circ$ ，水平发散角为 $0^\circ \sim 30^\circ$ ），与单模光纤的耦合效率高（约 $30\% \sim 50\%$ ），非常适合于作高速长距离光纤通信系统的光源。

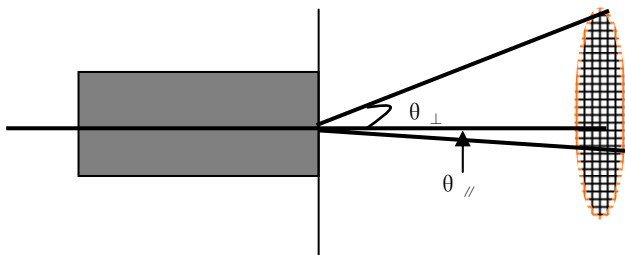


图 15.8 LED 的远场发散角

三、实验装置

该实验装置主要有：LED 光源、LD 光源、专用电源、调节支座、固定套、旋转台、照度计、光谱仪、计算机一台等。

四、实验内容和操作方法

（一）、测量 LED/LD 的 I-V-E 曲线及照度和光通量（电学特性）

- 1、如图 15.9 所示连接线路，光源选用 LED，连接时注意不要强行对接。
- 2、开机以前必须检查电箱的“限流”开关是否拔至最小档、电压调节旋钮是否逆时针调到最小位置。
- 3、开启 LED 的驱动电源，缓慢调节电流旋钮逐渐增加工作电流，通过电流显示记录电流值，电压显示记录电压值。每隔一定电流间隔，记录 LED 的电压值和光照度值，数据表格如下。绘制 LED 的 I-P 曲线和 V-I 曲线。

I (mA)							
照度 (功率)							
电压 V							

- 4、更换不同波长的 LED 重复第 3 步；

5、将 LED 换成 LD，开启电源前，重复第 2 步，缓慢调节电流旋钮逐渐增加工作电流，通过电流显示记录电流，电压显示记录电压值。每隔一定电流间隔，记录 LD 的电压值和光照度值。绘制 LD 的 I-E 曲线和 V-I 曲线。

6、从特性曲线中求出阈值电压、阈值照度、量子效率等。

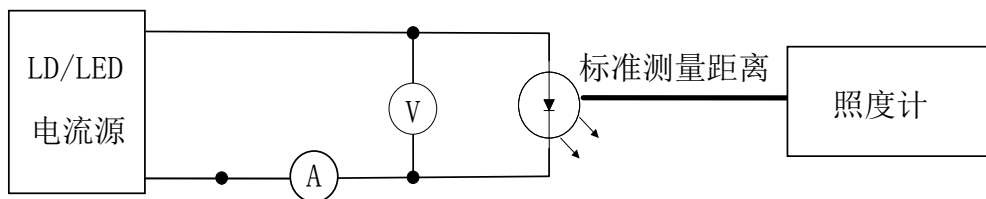


图 15.9 实验装置连接示意图

(二)、测量 LED/LD 温度特性

1、在实验内容一的光路基础上，安装温度控制器件，打开加温开关，保持 5-10 分钟等待温度达到一个平衡值。

2、重复实验内容一的步骤。对比同一个器件的两组数据，分析温度对器件的阈值电流、功率的影响。

(三)、测量 LED/LD 的发散角/散射角（光学特性）

1、通过支杆和调节支座将 LED 光源安装在旋转台上，并首先确保光束垂直照射功率计。

2、按同一个方向转动旋转台，并记录功率计数值，填写如下表格。

角度	0	20	40	60	80	100	120
照度							

3、将 LED 旋转 90 度，重复以上步骤。通过实验数据分析 LED 在空间上发散特性。

4、将光源更换为 LD，重复 1-3 项内容。总结 LD 的发射角性质，并与 LED 相比较。

(四)、测试 LED/LD 的光谱特性

1、通过支杆和调节支座将 LED/LD 光源对准垂直入射光谱仪的狭缝。

2、开启 LED/LD 的驱动电源前，要检查光谱仪的狭缝宽度是否最小。

3、根据光谱仪操作手册，熟练掌握软件的使用方法，通过软件测量 LED/LD 的光谱特性。

五、注意事项

- 1、LED/LD 接线必须驳接正确。
- 2、启动驱动器前要检查，限流开关是否在最小档，电压旋钮是否在最小值处。
- 3、插拔 LED/LD 之前，务必先把各个旋钮调到最小，然后关闭电源开关，再进行更换。
- 4、在 LD 的电学特性实验测试中，电流值请勿超过 40mA，以免烧坏元器件。
- 5、禁止将激光直射人眼，以免灼伤。

六、预习要求

根据实验内容，查阅有关发光二极管和半导体激光器的相关知识，熟悉它们的工作原理和基本特性（伏安特性、光谱特性、电光转换特性等）以及测试方法。

七、思考题

-
- 1、解释发光二极管的工作原理，分析并比较发光二极管与半导体激光器发光原理及性能上的区别？
 - 2、在 LED/LD 性能测量时，当电流过大时，会有什么现象出现？
 - 3、环境温度的改变对 LED/LD 的 P-I 特性曲线有何影响？
 - 4、在 LED/LD 性能测试时，反接电源电压会出现什么情况？

实验 16 单光子计数及生物超微弱光子辐射测量

引言

生物体的超微弱光子辐射（UPE—Ultraweak Photon Emission from Biological Objects）是生物体固有的一种功能，普遍存在于包括动植物在内的生物体中。UPE 与生物体的新陈代谢、细胞的分裂、死亡、变异以及细胞间信息传递等许多基本的生命过程都有着内在的联系，因而是反映生物体内部机能的一个窗口。

1922 年前苏联科学家 Alexander Gurwitsch 首次观察到洋葱根尖分裂时产生超微弱光子辐射现象，但由于实验条件的限制，后来一段时间这方面的研究未能开展起来。20 世纪 50 年代，由于灵敏度极高的光电倍增管的问世，才使科学地研究生物系统的自发超微弱发光成为可能。单光子计数技术利用弱光照射下光电倍增管输出电流信号自然离散化的特征，采用了脉冲高度甄别技术和数字计数技术，从而可以将光流强度低于光电倍增管室温下的热噪声水平（ 10^{-14}W ）的极微弱光信息检测出来。利用这种技术可以对生物体的超微弱光子辐射进行检测。

一、实验目的

- 1、学习光电倍增管的工作原理，熟悉弱光照射下光电倍增管输出电流信号自然离散化的特征。
- 2、了解光子计数方法的基本原理，掌握单光子计数采用的脉冲高度甄别技术和数字计数技术。
- 3、通过对生物超微弱光子辐射的测量掌握弱光检测技术。

二、实验原理

1、光电倍增管

光电倍增管是把微弱的光输入转换成光电子，并使光电子获得倍增的电真空器件，光电倍增管性能的好坏直接决定了单光子探测器性能的好坏。光电倍增管的工作原理如图 16.1 所示。光电倍增管由光电发射阴极（光阴极）和聚焦电极、电子倍增极及电子收集极（阳极）等组成，工作时这些电极的电位从阴极到阳极逐渐升高。当弱光信号照射到光电倍增管光阴极上时，每个入射的光子以一定的概率（即量子效率）使光阴极向真空中激发出光电子。这个光电子经聚焦极电场进入倍增系统，并通过进一步的二次发射得到的倍增放大。然后把放大后的电子用阳极收集作为信号输出。因为采用了二次发射倍增系统，所以光电倍增管在探测紫外、可见和近红外区的辐射能量的光电探测器中，具有极高的灵敏度和极低的噪声。另外，光电倍增管还具有响应快速、成本低、阴极面积大等优点。

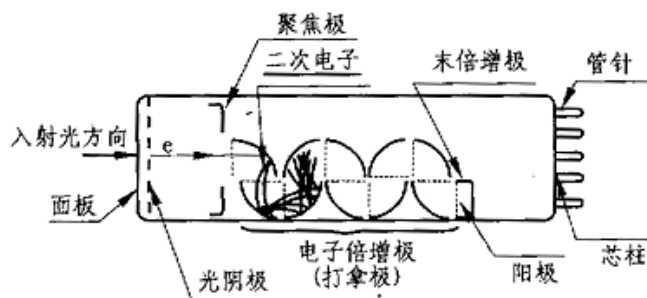


图 16.1 光电倍增管原理

2. 单光子计数原理

单光子计数主要采用的是一种逐个记录单光电子产生的脉冲数目的探测技术。光电倍增管是整个系统的基础，单光子信号经过光电倍增管，把光子信号转换为电信号。当入射光的辐射光功率低于 $1.0 \times 10^{-12} \sim 1.0 \times 10^{-14}$ 时，光电倍增管的光电阴极上产生的光电流不再是连续的，这样，在光电倍增管的输出端就有离散的数字脉冲信号输出。当有一个光子信号打到光电阴极上，就会产生一定数量的光电子。入射的光子信号打到光电倍增器件上产生光电子，然后经过倍增系统倍增产生电脉冲信号，称为“单光子脉冲”。

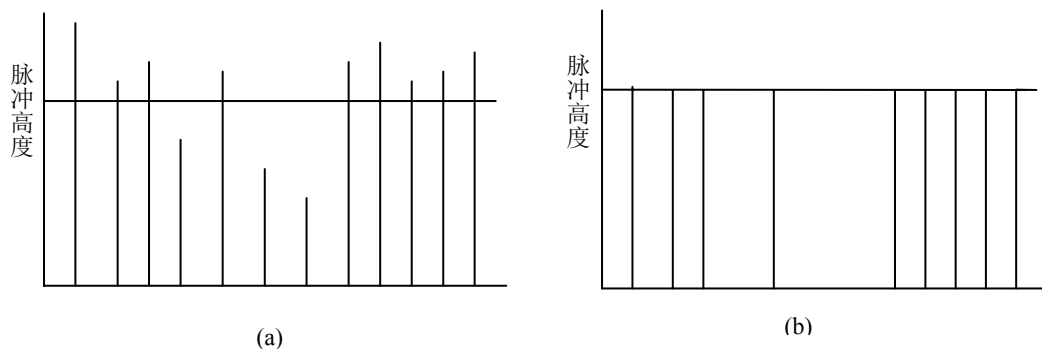


图 16.2 甄别器工作示意图：(a)放大器输出；(b)甄别器输出

光电倍增管中除出现单光子脉冲外，探测器的噪声也会出现脉冲（主要是热噪声），其中脉冲幅度较小的是探测器噪声脉冲，脉冲幅度较大的是单光电子脉冲。单光子计数技术主要是利用弱光下光电倍增管输出电流信号自然离散的特征，采用脉冲高度甄别和数字计数技术将淹没在背景噪声中的弱光信号提取出来。通过设置一定的鉴别电平 V_h ，用它来把高于 V_h 的脉冲鉴别输出，从而实现单光子计数。如图 16.2 所示，当输入脉冲高度低于 V_h 时，甄别器无输出。当输入脉冲高度高于 V_h 的脉冲，甄别器输出一个标准脉冲。如果把甄别器电平选在图 16.2 中的谷点对应的脉冲高度上，就能弃除了大量的噪声脉冲。因对光电子脉冲影响较小，从而可以大大提高信噪比。

三、实验装置和操作方法

GSZF-2B 型或 WSZ-5A 型单光子计数器，半导体制冷系统，计算机（已安装单光子计数实验系统电脑控制软件）。

1、单光子计数系统的基本结构

单光子计数系统由样品室、单光子计数器，半导体制冷系统，计算机采集、控制系统等部分组成。系统的基本结构如图 16.3 所示。

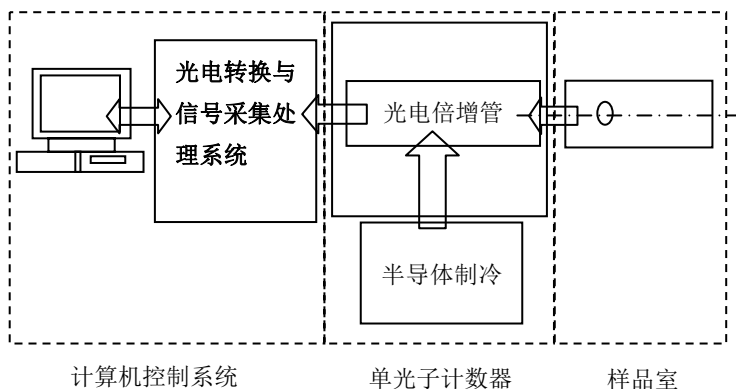


图16.3 单光子计数系统基本结构

2、单光子计数器

单光子计数器由光电倍增管、制冷系统、宽带放大器、甄别器、计数器组成。单光子计数器的组成如图 16.4 所示。

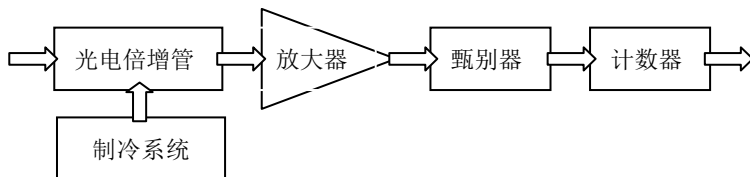


图 16.4 单光子计数器的组成

- （1）制冷系统。采用制冷技术降低光电倍增管工作温度，去除热噪声，提供稳定性。
- （2）放大器。放大器的功能是把光电子脉冲和噪声脉冲线性放大，经放大后的脉冲信号送至脉冲幅度甄别器。
- （3）甄别器。甄别器即脉冲甄别器，其功能是鉴别输出光电子脉冲，弃除光电倍增管的热发射噪声脉冲，如图 16.2 所示
- （4）计数器。计数器的作用是在规定的测量时间间隔内将甄别器的输出脉冲累加计数，并送入计算机进行处理。

3、单光子计数系统的操作方法

- （1）接通水源。制冷器采用自来水冷却。
- （2）打开电源。通水 2min 后，接通制冷器的电源开关和单光子计数系统的电源开关。
- （3）设定控温仪表温度。控温仪表为智能化仪表，PV 显示测量温度，SV 显示设定温度，参

考设定温度值为 -20°C 。设定温度的具体操作是：按“SET”键一次，SV单元的数值出现闪动，其中最后一位为修改位，使用“▽”或“△”键将显示数值设定为所需数值后，再按“<”键一次，亮位向左移一位，用上述方法修改此位数值，以此类推，将SV单元数值设定为所需温度值后，再按“SET”键一次，闪动现象消失，温度设定完成，控温开始。

- (4) 启动测量软件。等待数分钟，待PV显示值与SV显示值相符后，可以启动软件测量。
- (5) 测量无样本时的阈值电压。在单光子计数系统工作平台参数设置栏内，设置模式为阈值方式。关闭灯光，保持黑暗环境，并在样品室上遮盖黑布，测量没有样本时的阈值电压，并记录。
- (6) 放置样品。植物叶子样本分为不经光刺激和经光刺激两种。光刺激可用光源（40W白炽灯）近距离照射植物叶子样本的表面，记录照射时间。然后将测量样品放入样品室，并正对光电管入光口，盖严盖子，在样品室上遮盖黑布。
- (7) 设定数值范围和采样参数。将单光子计数系统设置为时间模式，并适当地设定数值范围和采样参数。所设定的参数应保证曲线完整，并尽可能在屏幕上显示较大且清晰，以便进一步分析。记录下设定的参数。参考参数如下：
数值范围 起始点 0，终止点 500，最大值 50，最小值 0；
采样参数 时间单位毫秒（ms），采样间隔 1000，积分间隔 1000，高压 8，域值 40，冷却温度 -20°C 。
- (8) 开始计数。点击单光子计数系统工作平台上的“开始”，系统自动进入计数状态。计数结束后，将计数结果保存至指定位置，以备分析讨论。
- (9) 测量不同照射时间的样品。重新设置后，重复步骤 6、7、8 中其他过程。其中植物样本的被照时间应不同。
- (10) 关机。仪器使用完毕后，依次关闭单光子计数系统电源及制冷器电源，2 分钟后，再切断水源。

四、实验内容

1、研究在弱光测量时杂散光对测量结果的影响：

在没有样品的情况下，分别在室内开灯不遮盖黑布和室内关灯、盖黑布的两种情况下，测量光计数率。分析测量结果，研究在弱光测量时杂散光对测量的影响。

2、测量植物叶片样品的超微弱光子辐射：

分别测量植物叶片样品没有光刺激和光刺激后，延迟激发光子数目的统计数据，并进行分析比较。

3、用 Origin 软件对数据进行分析讨论。

五、注意事项

- 1、光电倍增管要防止强光的直接照射。在调节光路准直时，要先把光阑筒前的入射光孔挡住。
- 2、光电倍增管要经过长时间工作才能趋于稳定。因此，开机后需要经过充分的预热时间（半

小时以上)才能进行测量。

- 3、测量时,应避免杂散光的影响。背景的明暗对实验结果影响很大,须尽量使背景环境较暗,必要时需调整计算机屏幕的明暗度。
- 4、实验中用半导体制冷器降低光电倍增管的工作温度。实验开始时,先接通水源,2 分钟后接通电源;实验结束时,先关闭电源,2 分钟后关闭水源。实验中如遇停水,应立即关闭制冷电源,否则将会严重损坏仪器。
- 5、进水出水不得接反,否则仪器不工作且出现报警。

六、预习要求

1、复习和查阅资料

复习关于“光电效应”的相关内容,熟悉光电效应的实验规律和光子理论。认真阅读实验讲义,了解实验内容;

查阅有关光电倍增管、单光子计数等方面的文献资料(3 篇以上),熟悉光电倍增管、单光子计数实验的基本原理和系统结构;

查阅 Origin 软件的应用手册,学习对数据进行拟合和分析的方法。

2、原理描述和讨论

实验前进行实验原理的讨论,由每位实验者描述、讲解实验的基本原理和实验的内容。

七、思考题

- 1、光电倍增管的工作原理是什么?
- 2、甄别器的作用和原理是什么?
- 3、影响单光子计数器测量的因素有哪些?实验中应如何避免?
- 4、实验装置为什么要通水?
- 5、如何用 Origin 软件对实验数据进行分析(数据拟合、画图表等)?

实验 17 条纹投影三维面形测量

引 言

非接触三维自动测量是随着计算机技术的发展而开展起来的新技术研究,它包括三维形体测量、应力形变分析和折射率梯度测量等方面。应用到的技术有莫尔条纹、散斑干涉、全息干涉和光阑投影等光学技术和计算机条纹图像处理技术。条纹投影以及各种光阑投影自动测量技术在工业生产控制与检测、医学诊断和机器人视觉等领域正占有越来越重要的地位。本试验是利用投影式相移技术,对形成的被测物面条纹进行计算机相移法自动处理的综合性实验。

一、实验目的

- 1、了解投影光栅相位法的形成机理。
- 2、了解一种充分发挥计算机特长的条纹投影相位移处理技术。
- 3、对于非接触测量有一定的感性认识。

二、实验原理

投影光栅相位法是三维轮廓测量中的热点之一,其测量原理是光栅图样投射到被测物体表面,相位和振幅受到物面高度的调制使光栅像发生变形,通过解调可以得到包含高度信息的相位变化,最后根据三角法原理完成相位---高度的转换。根据相位检测方法的不同,主要有 Moire 轮廓术、Fourier 变换轮廓术,相位测量轮廓术,本实验就是采用了相位测量轮廓术。

相位测量轮廓术采用正弦光栅投影相移技术。基本原理是利用条纹投影相移技术将投影到物体上的正弦光栅依次移动一定的相位,通过对采集到的移相变形条纹图进行计算得到包含物体高度信息的相位。

基于相位测量的光学三维测量技术本质上仍然是光学三角法,但与光学三角法的轮廓术有所不同,它不直接去寻找和判断由于物体高度变动后的像点,而是通过相位测量间接地实现,由于相位信息的参与,使得这类方法与单纯基于光学三角法有很大区别。

1. 相位测量轮廓术的基本原理

将规则光栅图像投射到被测物表面,从另一角度可以观察到由于受物体高度的影响而引起的条纹变形。这种变形可解释为相位和振幅均被调制的空间载波信号。采集变形条纹并对其进行解调,从中恢复出与被测物表面高度变化有关的相位信息,然后由相位与高度的关系确定出高度,这就是相位测量轮廓术的基本原理。

投影系统将一正弦分布的光场投影到被测物体表面,由于受到物面高度分布的调制,条纹发生形变。由 CCD 摄像机获取的变形条纹可表示为:

$$I_n(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\Phi(x, y) + \delta_n] \quad (n=0, 1, \dots, N-1) \quad (17.1)$$

其中 n 表示第 n 帧条纹图。 $I_n(x, y)$ 、 $A(x, y)$ 和 $B(x, y)$ 分别为摄像机接收到的光强值、物面背景光强和条纹对比度。 δ_n 为附加的相移值, 如采用多步相移法采集变形条纹图, 则每次相移量 δ_n 。所求被测物面上的相位分布可表示为:

$$\Phi(x, y) = \arctan \left[\frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x, y) \sin(2\pi / N)}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x, y) \cos(2\pi / N)} \right] \quad (17.2)$$

用相位展开算法可得物面上的连续相位分布 $\Phi(x, y)$ 。已知 $\Phi_r(x, y)$ 为参考平面上的连续相位分布, 由于物体引起的相位变化为

$$\Phi_h(x, y) = \Phi(x, y) - \Phi_r(x, y) \quad (17.3)$$

根据所选的系统模型和系统结构参数可推导出高度 h 和相位差 $\Phi_h(x, y)$ 的关系, 最终得到物体的高度值。下面具体分析高度和相位差之间的关系:

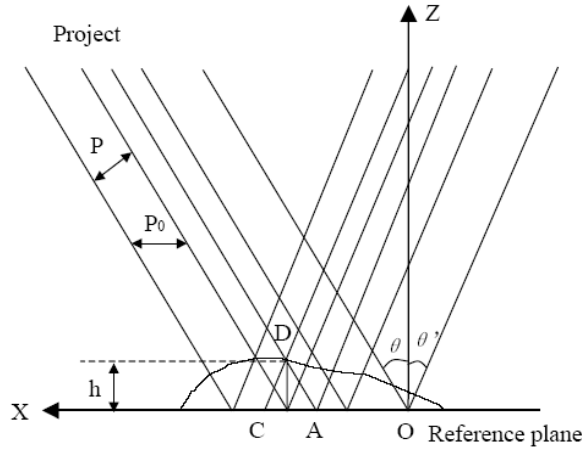


图 17.1 系统中高度和相位的关系

实际照明系统中, 采用远心光路和发散照明两种情况下, 都可以通过对相位的测量而计算出被测物体的高度。只是前者的相位差与高度之间存在简单的线性关系, 而在后一种情况下相位差与高度差之间的映射关系是非线性的。本实验的照明系统为远心光路。如图 17.1 所示, 在参考平面上的投影正弦条纹是等周期分布的, 其周期为 p_0 , 这时在参考平面上的相位分布 $\Phi(x, y)$ 是坐标 x 的线性函数, 记为:

$$\Phi(x, y) = kx = 2\pi x / p_0 \quad (17.4)$$

以参考平面上 O 点为原点, CCD 探测器上 D_c 点对应参考平面上 C 点, 其相位为 $\Phi_C(x, y) = (2\pi / p_0) \cdot \overline{OC}$, D_c 点与被测三维表面 D 点在 CCD 上的位置相同, 同时其相位等于参考平面上 A 点的相位。则有 $\Phi_D = \Phi_A = (2\pi / p_0) \cdot \overline{OA}$, 显然

$$\overline{OA} = (p_0 / 2\pi) \Phi_{CD} \cdot \quad (17.5)$$

则 D 点相对于参考平面的高度 h 为 $h = \frac{AC}{\text{tg}\theta + \text{tg}\theta'}$, 当观察方向垂直于参考平面时, 上式

可表示为:

$$h = \frac{AC}{\text{tg}\theta'} = (p_0 / \text{tg}\theta) (\Phi_{CD} / 2\pi) \quad (17.6)$$

根据式(6)就可以求出物体上各点的高度值。

2. 相位的求取过程

如前所述, 求得物体加入测量场前后的展开相位差就可以获得物体的高度, 因此相位的求取过程是整个测量过程中重要的一环。而条纹图中的相位信息可以通过解调的方法恢复出来, 常用的方法主要有傅立叶变换法和多步相移法。用傅立叶变换或多步相移求相位时, 由于反正切函数的截断作用, 使得求出的相位分布在 $-\pi$ 和 π 之间, 不能真实的反映出物体表面的空间相位分布, 因此相位的求取过程可分为两大步: 求: 截断相位和截断相位展开。

2.1 求取截断相位

从条纹图中恢复出的相位信息由于它们恢复出的相位要经过反正切运算, 使得求出的相位只能分布在 $-\pi$ 和 π 的四象限内, 这种相位称为截断相位 ϕ 。与之相对应的真实相位称为展开相位 ϕ 。

傅立叶变换法仅仅通过对一幅条纹图处理就可以恢复出截断相位, 获取图像时间短, 更适合求测量速度快的场合。而相移算法是相位测量中的一种重要方法, 它不仅原理直观, 计算简便, 而且相位求解精度与算法直接相关, 可以根据实际需要选择合适的算法。其中, 最常用的是使可控相位值 δ_n 等间距地变化, 利用某一点在多次采样中探测到的强度值来拟合出该点的初相位值, N 帧满周期等间距法是最常用的相移算法。下面以标准的四步相移算法为例来说明。四步相移算法中, 式(1)中 $n=4$, 相位移动的增量 δ_n 依次为: $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 相应的四帧条纹图:

$$\begin{cases} I_1(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y)] \\ I_2(x, y) = A(x, y) - B(x, y) \sin[\phi(x, y)] \\ I_3(x, y) = A(x, y) - B(x, y) \cos[\phi(x, y)] \\ I_4(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \sin[\phi(x, y)] \end{cases} \quad (17.7)$$

联立上式中的四个方程，可以计算出相位函数

$$\phi(x, y) = \arctan \left[\frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right] \quad (17.8)$$

对于更常用的 N 帧满周期等间距相移算法，采样次数为 N ， $\delta_n = n \sim N$ ，则

$$\phi(x, y) = \arctan \left[\frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x, y) \sin(2\pi / N)}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x, y) \cos(2\pi / N)} \right] \quad (17.9)$$

本论文采用 N 帧满周期等间距相移算法，理论分析证明， N 帧满周期等间距算法对系统随机噪声具有最佳抑制效果，且对 $N-1$ 次以下的谐波不敏感。

2.2 截断相位展开

相位测量轮廓术通过反正切函数计算得到相位值（见式(17.9)），该相位函数被截断在反三角函数的主值范围 $(-\pi, \pi)$ 内，呈锯齿形的不连续状。因此，在按三角对应关系由相位值求出被测物体的高度分布之前，必须将此截断的相位恢复为原有的连续相位，这一过程就是相位展开(Phase unwrapping)，简称 PU 算法。

相位展开的过程可从图 17.2 和图 17.3 中直观地看到。图 2 是分布在 $-\pi$ 和 π 之间的截断相位。相位展开就是将这一截断相位恢复为如图 3 所示的连续相位。相位展开是利用物面高度分布特性来进行的。它基于这样一个事实：对于一个连续物面，只要两个相邻被测点的距离足够小，两点之间的相位差将小于 π ，也就是说必须满足抽样定理的要求，每个条纹至少有两个抽样点，即抽样频率大于最高空间频率的两倍。由数学的角度而言，相位展开是十分简单的一步，其方法如下：沿截断的相位数据矩阵的行或列方向，比较相邻两个点的相位值（如图 17.2，如果差值小于 $-\pi$ ，则后一点的相位值应加上 2π ；如果差值大于 π ，则后一点的相位值应减去 2π ）。

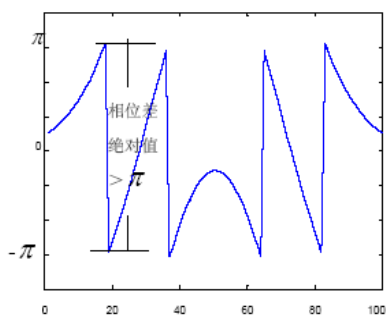


图 17.2 截断相位

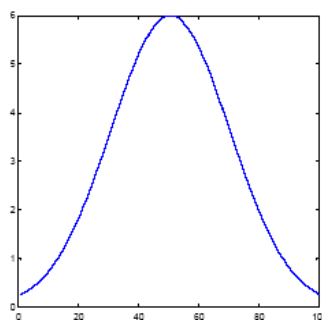


图 17.3 连续相位

下面以一维相位函数 $\phi_w(j)$ 为例说明上述相相位展开过程。 $\phi_w(j)$ 为一维截断相位函数，其中， $0 \leq j \leq N-1$ ，这里， j 是采样点序号， N 是采样点总数。展开后的相位函数用 $\phi_u(j)$ 来表示，则相位展开过程可表示如下：

$$\begin{aligned} \phi_u(j) &= \phi_w(j) + 2\pi n_j \\ n_j &= \text{INT}(\phi_w(j) - \phi_w(j-1) / 2\pi + 0.5) + n_{j-1} \\ n_0 &= 0 \end{aligned} \quad (17.10)$$

上式中，INT是取整运算符。

实际中的相位数据都是与采样点对应的一个二维矩阵，所以实际上的相位展开应在二维阵列中进行。首先沿二维矩阵中的某一列进行相位展开，然后以展开后的该列相位为基准，沿每一行进行相位展开，得到连续分布的二维相位函数。相应的，也可以先对某行进行相位展开，然后以展开后的该行相位为基准，沿每一列进行相位展开。只要满足抽样定理的条件，相位展开可以沿任意路径进行。

对于一个复杂的物体表面，由于物体表面起伏较大，得到的条纹图十分复杂。例如，条纹图形中存在局部阴影，条纹图形断裂，在条纹局部区域不满足抽样定理，即相邻抽样点之间的相位变化大于 π 。对于这种非完备条纹图形，相位展开是一个非常困难的问题，这一问题也同样出现在干涉型计量领域。最近已研究了多种复杂相位场展开的方法，包括网格自动算法、基于调制度分析的方法、二元模板法、条纹跟踪法、最小间距树方法等，使上述问题能够在一定程度上得到解决或部分解决。

3. 高度计算

在上面分析了测量高度和系统结构参数的关系，如公式(17.6)。其中有三个与系统结构有关的参数，即投射系统出瞳中心和 CCD 成像系统入瞳中心之间的距离 L ，共轭相位面上的光栅条纹周期 p_0 ，以及投射光轴和成像光轴之间的夹角 θ 。这几个参数是在系统满足一定约束条件下测得参数值，这些约束条件包括：

- 1) CCD 成像系统的光轴必须和参考面垂直，即保证一定的垂直度；
- 2) 投射系统的出瞳和成像系统的入瞳之间的连线要与参考面平行；

3) 投射系统的光轴和 CCD 光轴在同一平面内，并交于参考面内一点。

为了方便系统测量，本实验采用简便的标定法，避免参数标定的繁琐过程，提高系统的适应性。标定测量原理如图 17.4 所示，首先建立如图 4 所示的物空间坐标系 $O\text{-}XYZ$ 和相位图像坐标系 O_pIJ ：以参考面所在的平面为 XOY 平面(也就是零基准面)，垂直于 XOY 面并交 XOY 于点 O 的轴为 Z 轴，此时建立的坐标系称为物空间坐标系；选择相位图的横轴为 J 、竖轴为 I 建立相位图像坐标系。在参考面初始位置 $z_1=0$ 时，可以通过多步相移法获得参考面上的截断相位分布，该截断相位的展开相位分布为 $\phi(i, j, 1)$ ， i, j 是相位图坐标系中的坐标值；将参考面沿 z 轴正方向平移一定距离 ΔZ 到达 $z_2 = \Delta Z$ 后，同样通过多步相移法获得参考面条纹分布，并由此求得展开相位 $\phi(i, j, 2)$ ；同理，依次等间距移动参考面到多个位置 $z_k = (k-1)\Delta z$ 并得到对应位置参考面上的展开相位 $\phi(i, j, k)$ ，其中 $k=3, 4, \dots, K$ 。由于在 $z_k, k=1, 2, \dots, K$ 的参考面作为后续测量的相位参考基准，因此把它们统称为基准参考面。

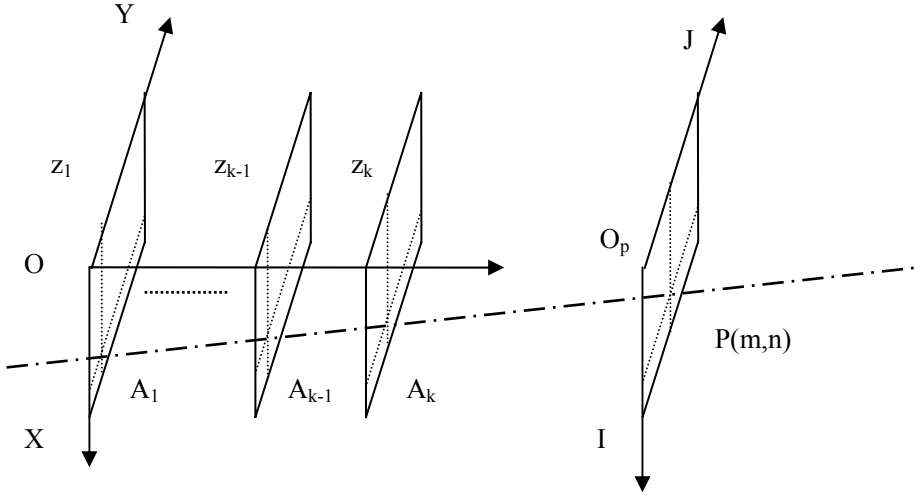


图 17.4 不同位置参考面高度与相位的对应关系

由相位-高度映射算法，物面高度(相对于参考平面) 可表示为：

$$\frac{1}{h(x, y)} = a(x, y) + \frac{b(x, y)}{\phi_h(x, y)} \quad (17.11)$$

一般情况下， $\frac{1}{h(x, y)}$ 和 $\frac{1}{\phi_h(x, y)}$ 成线性关系。但在实际测量中由于成像系统的像差

和畸变(特别是在图像的边缘部分)， $\frac{1}{h(x, y)}$ 和 $\frac{1}{\phi_h(x, y)}$ 之间的关系用高次曲线表示更为

恰当。本文采用二次曲线，(17.10) 式可改写为：

$$\frac{1}{h(x,y)} = a(x,y) + b(x,y) \frac{1}{\phi_h(x,y)} + c(x,y) \frac{1}{\phi_h^2(x,y)} \quad (17.12)$$

为了求出 $a(x,y)$ 、 $b(x,y)$ 、 $c(x,y)$ ，图 17.4 中基准参考平面(其法线方向与摄像机光轴平行)的个数必须大于等于 4，相邻平面间的距离为一已知常数。

首先令 $\phi_h(x,y)$ 为零基准面上的连续相位分布，由平面 2、平面 3、平面 4 三个平面得到的三个线性方程可解出 $a(x,y)$ 、 $b(x,y)$ 、 $c(x,y)$ 三个未知常数(注：这里每个常数实际上是二维常数矩阵)；保存三个常数到计算机中，由测量时得到相位图的绝对相位，对相位图中的每一点进行相应运算，就可以确定每一点的高度值，即实现面形的测量

三、实验装置

光纤式白光点光源，精密平移台，干板架，成像镜头，面阵 CCD，图像采集卡，光栅，条纹投影测量物、电脑等。

四、实验内容和操作方法

1. 光路调整

(1) 用半导体激光做高度基准，调整各光学透镜中心高度一致。各个元件都固定在导轨上。首先校准激光束水平度。可用可变光阑，在邻近激光器的位置，使激光束通过光阑的中心，再把光阑沿导轨平行移至台上尽量远位置，调整激光器俯仰角度和光阑的高度，使光阑中心与激光束中心重合。再将光阑沿导轨平行移至邻近激光器的位置，调整激光器俯仰角度和光阑的高度，使光阑中心与激光束中心重合。重复上述过程，直到邻近和远离两个位置光阑中心与激光束中心都重合。在此光束中逐个放入透镜的支架，调整支架高度，使有无透镜时激光束中心不发生上下偏移，此时系统各光学元件光轴重合；

(2) 将白光点光源放入光路中，将透镜 1 放入光路中，调节白光点光源的高度，使从透镜出射的光通过测量物的中心；

(3) 将固定标准平面的支架固定在导轨上，将固定光学件的导轨与装置 CCD 的导轨 1 成 25 度左右角安置；

(4) 调节标准平面的俯仰，使标准平面垂直系统的光轴；调节方法与步骤(1)类似，在标准平面上做一标记点，相当于步骤(1)中的光阑中心；

(5) 调整各个透镜间的距离，将白光点光源放置在透镜 1 的焦平面上，从透镜 1 出射近似平行光照明正弦光栅，透过透镜 2 照射到待测物体表面；

(6) 调节 CCD 的高度，使 CCD 镜头中心与透镜 2 尽量等高；

(7) 调节 CCD 与被测面的距离，使光栅像充满整个 CCD 像面。

2. 实验测量过程

(1) 将 2 线/mm 的正弦光栅放入调整好的光路中，调节 CCD 与被测面的距离，使光栅像充满整个 CCD 像面；

(2) 调整测量物的高度，使光栅像照射到感兴趣区域，同时此区域可被 CCD 接收；

(3) 打开软件图像采集功能，将有标定光源的图像信息记录下来

(4) 沿垂直于导轨方向移动光栅，每次移动 $1/5$ 栅距 (0.1mm)，记录每次移动后的光栅图像，共 5 幅；(若用 4 次相移则为 0.125mm 四帧条纹图共五幅图像)

3. 软件处理

用软件处理 6 幅图像，再现被测面的面形特征。

4 结果分析

将测量结果报告输出，根据误差程度分析误差原因，调整实验精度，优化实验方案

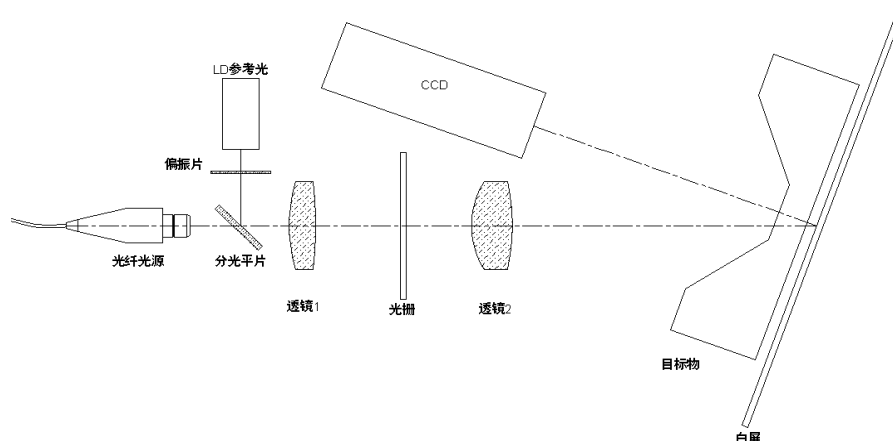


图 17.5 系统光路

五、注意事项

- 1、注意电源开关的开启顺序和关闭顺序。
- 2、光学器件的光学表面是经过精密加工光洁度极高的表面，不能用手触摸；不得用擦镜纸以外的物品去擦拭。
- 3、测量完毕，应把各组件整理整齐。

六、预习要求

根据实验内容，查阅相关投影光栅相位法、条纹投影相位移处理技术等文献资料，熟悉这些方法的理论基础，了解面阵 CCD 的工作原理。

七、思考题

- 1、相位检测方法有那些？各种方法间异同点是什么？
- 2、光学三维测量技术理论基础是什么？

实验 18 电光、声光与磁光调制系列实验

(I) 电光调制实验

引言

当给晶体或液体加上电场后，该晶体或液体的折射率发生变化，这种现象称为电光效应。电光效应在工程技术和科学研究中有许多重要应用，它有很短的响应时间（可以跟上频率为 10^{10}Hz 的电场变化），可以在高速摄影中作快门或在光速测量中作光束斩波器等。在激光出现以后，电光效应的研究和应用得到迅速的发展，电光器件被广泛应用于激光通讯、激光测距、激光显示和光学数据处理等方面。

一、实验目的

- 1、掌握晶体电光调制的原理和实验方法。
- 2、了解一种激光通信的方法。

二、实验原理

1、一次电光效应和晶体的折射率椭球

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：

$$n = n_0 + aE_0 + bE_0^2 + \dots \quad (18.1)$$

式中 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，也称线性电光效应或泡克耳斯(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，也称平方电光效应或克尔(Kerr)效应。一次电光效应只存在于不具有对称中心的晶体中，二次电光效应则可能存在于任何物质中，一次效应要比二次效应显著。

光在各向异性晶体中传播时，因光的传播方向不同或者是电矢量的振动方向不同，光的折射率也不同。如图 18.1，通常用折射率椭球来描述折射率与光的传播方向、振动方向的关系。在主轴坐标中，折射率椭球及其方程为

$$\frac{x^2}{n_1^2} + \frac{y^2}{n_2^2} + \frac{z^2}{n_3^2} = 1 \quad (18.2)$$

式中 n_1 、 n_2 、 n_3 为椭球三个主轴方向上的折射率，称为主折射率。当晶体加上电场后，折射率椭球的形状、大小、方位都发生变化，椭球方程变成

$$\frac{x^2}{n_{11}^2} + \frac{y^2}{n_{22}^2} + \frac{z^2}{n_{33}^2} + \frac{2yz}{n_{23}^2} + \frac{2xz}{n_{13}^2} + \frac{2xy}{n_{12}^2} = 1 \quad (18.3)$$

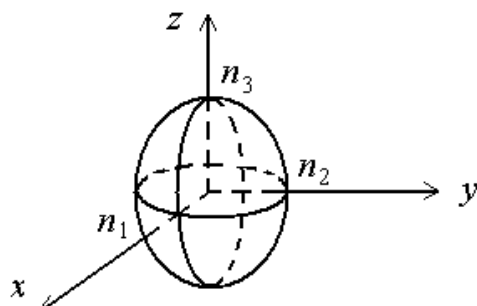


图 18.1 折射率椭球

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 （磷酸二氘钾）类型的晶体用它的纵向电光效应， LiNbO_3 （铌酸锂）类型的晶体用它的横向电光效应。本实验研究铌酸锂晶体的一次电光效应，用铌酸锂晶体的横向调制装置测量铌酸锂晶体的半波电压及电光系数，并用两种方法改变调制器的工作点，观察相应的输出特性的变化。

2、电光调制原理

要用激光作为传递信息的工具，首先要解决如何将传输信号加到激光辐射上去的问题，我们把信息加载于激光辐射的过程称为激光调制，把完成这一过程的装置称为激光调制器。由已调制的激光辐射还原出所加载信息的过程则称为解调。因为激光实际上只起到了“携带”低频信号的作用，所以称为载波，而起控制作用的低频信号是我们所需要的，称为调制信号，被调制的载波称为已调波或调制光。按调制的性质而言，激光调制与无线电波调制相类似，可以采用连续的调幅、调频、调相以及脉冲调制等形式，但激光调制多采用强度调制。强度调制是根据光载波电场振幅的平方比例于调制信号，使输出的激光辐射的强度按照调制信号的规律变化。激光调制之所以常采用强度调制形式，主要是因为光接收器一般都是直接地响应其所接受的光强度变化的缘故。

激光调制的方法很多，如机械调制、电光调制、声光调制、磁光调制和电源调制等。其中电光调制器开关速度快、结构简单。因此，在激光调制技术及混合型光学双稳器件等方面有广泛的应用。电光调制根据所施加的电场方向的不同，可分为纵向电光调制和横向电光调制。下面我们来具体介绍一下这两种调制原理和典型的调制器。

表 18.1 电光晶体(electro-optic crystals)的特性参数

点群 对称性	晶体材料	折射率		波长 (μm)	非零电光系数 (10^{-12}m/V)
		n_o	n_e		
$3m$	LiNbO_3	2.297	2.208	0.633	$\gamma_{13} = \gamma_{23} = 8.6, \gamma_{33} = 30.8$ $\gamma_{42} = \gamma_{51} = 28, \gamma_{22} = 3.4$ $\gamma_{12} = \gamma_{61} = -\gamma_{22}$
32	Quartz (SiO_2)	1.544	1.553	0.589	$\gamma_{41} = -\gamma_{52} = 0.2$ $\gamma_{62} = \gamma_{21} = -\gamma_{11} = 0.93$
$\bar{4}2m$	KH_2PO_4 (KDP)	1.5115	1.4698	0.546	$\gamma_{41} = \gamma_{52} = 8.77, \gamma_{63} = 10.3$
		1.5074	1.4669	0.633	$\gamma_{41} = \gamma_{52} = 8, \gamma_{63} = 11$
$\bar{4}2m$	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (ADP)	1.5266	1.4808	0.546	$\gamma_{41} = \gamma_{52} = 23.76, \gamma_{63} = 8.56$
		1.5220	1.4773	0.633	$\gamma_{41} = \gamma_{52} = 23.41, \gamma_{63} = 7.828$
$\bar{4}3m$	KD_2PO_4 (KD*P)	1.5079	1.4683	0.546	$\gamma_{41} = \gamma_{52} = 8.8, \gamma_{63} = 26.8$
$\bar{4}3m$	GaAs	3.60		0.9	$\gamma_{41} = \gamma_{52} = \gamma_{63} = 1.1$
		3.34		1.0	$\gamma_{41} = \gamma_{52} = \gamma_{63} = 1.5$
		3.20		10.6	$\gamma_{41} = \gamma_{52} = \gamma_{63} = 1.6$
$\bar{4}3m$	InP	3.42		1.06	$\gamma_{41} = \gamma_{52} = \gamma_{63} = 1.45$
		3.29		1.35	$\gamma_{41} = \gamma_{52} = \gamma_{63} = 1.3$
$\bar{4}3m$	ZnSe	2.60		0.633	$\gamma_{41} = \gamma_{52} = \gamma_{63} = 2.0$
$\bar{4}3m$	$\beta\text{-ZnS}$	2.36		0.6	$\gamma_{41} = \gamma_{52} = \gamma_{63} = 2.1$

2.1、 KDP 晶体纵调制

设电光晶体是与 xy 平行的晶片，沿 z 方向的厚度为 L ，在 z 方向加电压（纵调制），在输入端放一个与 x 方向平行的起偏振器，入射光波沿 z 方向传播，且沿 x 方向偏振，

射入晶体后，它分解成 ξ 、 η 方向的偏振光（图 18.2），射出晶体后的偏振态由式表示：

$$\hat{J}_{\xi\eta} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} e^{i(\Gamma/2)} \\ e^{-i(\Gamma/2)} \end{pmatrix},$$

首先进行坐标变换，得到 xy 坐标系内琼斯矩阵的表达式（参见第一章附录）：

$$R(\pi/4)\hat{J}_{\xi\eta} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i(\Gamma/2)} \\ e^{-i(\Gamma/2)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\Gamma/2) \\ -i \sin(\Gamma/2) \end{pmatrix}$$

如果在输出端放一个与 y 平行的检偏振器，就构成泡克耳斯盒。由检偏器输出的光波琼斯矩阵为：

$$\hat{J}'_{xy} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\Gamma/2) \\ -i \sin(\Gamma/2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -i \sin(\Gamma/2) \end{pmatrix}, \quad (18.4)$$

其中 Γ 为两个本征态通过厚度为 L 的电光介质获得的相位差，给出： $\Gamma = \pi V/V_\pi$ 。(18.4) 式表示输出光波是沿 y 方向的线偏振光，其光强为

$$I' = \frac{I_0}{2} (1 - \cos \Gamma) = I_0 \sin^2 \left(\frac{\pi V}{2V_\pi} \right). \quad (18.5)$$

上式说明光强受到外加电压的调制，称振幅调制， I_0 为光强的幅值，当 $V = V_\pi$ 时 $I' = I_0$ 。

图 18.3 为泡克耳斯盒（振幅型纵调制系统）示意图， z -切割的 KD*P 晶体两端胶合上透明电极 ITO 1、ITO 2，电压通过透明电极加到晶体上去。在玻璃基底上蒸镀透明导电膜，就构成透明电极，膜层材料为锡、钢的氧化物，膜层厚度从几十微米到几百微米，其透明度高（>80%~90%），膜层的面电阻小（几十欧姆）。在通光孔径外镀铬，再镀金或铜即

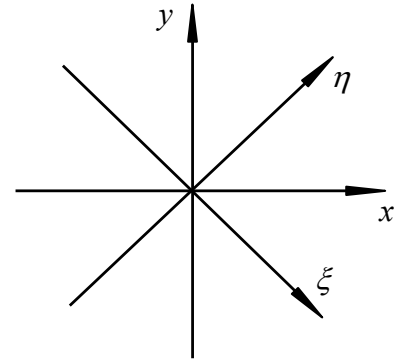


图 18.2 xy 坐标和 $\xi\eta$ 坐标系（感生坐标系）

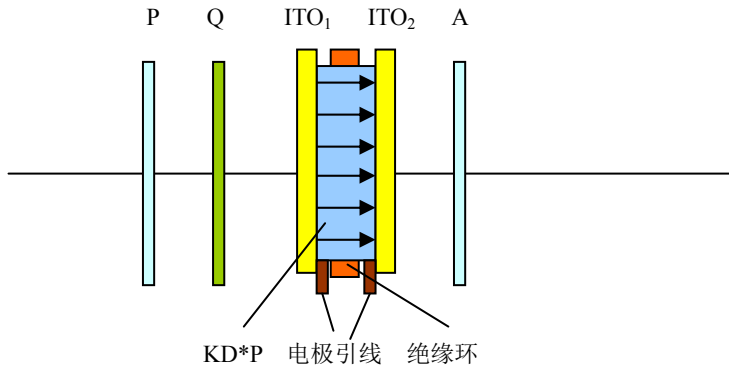


图 18.3 泡克耳斯盒

P，起偏振器；Q，四分之一波片；A，检偏振器；ITO，透明电极

可将电极引线焊上。KD*P 调制器前后为一对互相正交的起偏振镜 P 与检偏振镜（分析镜）

A , P 的透过率极大方向沿 KD^*P 感生主轴 ξ 、 η 的角平分线。在 KD^*P 和 A 之间通常还加相位延迟片 Q (即四分之一波片), 其快、慢轴方向分别与 ξ 、 η 相同。

由于入射光波预先通过四分之一波片移相, 因而有

$$I' = \frac{I_0}{2} [1 - \cos(\Gamma + \Gamma_0)] \Big|_{\Gamma_0=\pi/2} = I_0 \sin^2 \left(\frac{\pi V}{2V_\pi} + \frac{\pi}{4} \right). \quad (18.6)$$

加上预置的相位 Γ_0 后, 工作点移到调制曲线的中点附近, 使线性大大改善. 泡克耳斯盒的特性曲线见图 2.3. 其输出随着外电压的加大而加大, 表明有更多的能量从 x -偏振态转移到 y -偏振态中去.

如果在电极间加交变电压

$$V = V_m \sin \Omega t, \quad (18.7)$$

则

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin(\Gamma_m \sin \Omega t) \\ &= \frac{1}{2} + \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1} \left(\frac{\Gamma_m}{2} \right) \sin(2k+1)\Omega t, \end{aligned} \quad (18.8)$$

式中 $J_{2k+1}(z)$ 为 $2k+1$ 阶贝塞尔函数,

$$\Gamma_m = \frac{\pi V_m}{V_\pi}. \quad (18.9)$$

当 Γ_m 不大时 (即调制电压幅度较低时), (2.5) 式近似表为

$$T = \frac{1}{2} + \frac{\Gamma_m}{2} \sin \Omega t, \quad (18.10)$$

可见系统的输出光波的幅度也是正弦变化, 称正弦振幅调制。

图 18.4 表示振幅型电光调制器 (amplitude electro-optic modulator) 的特性曲线。

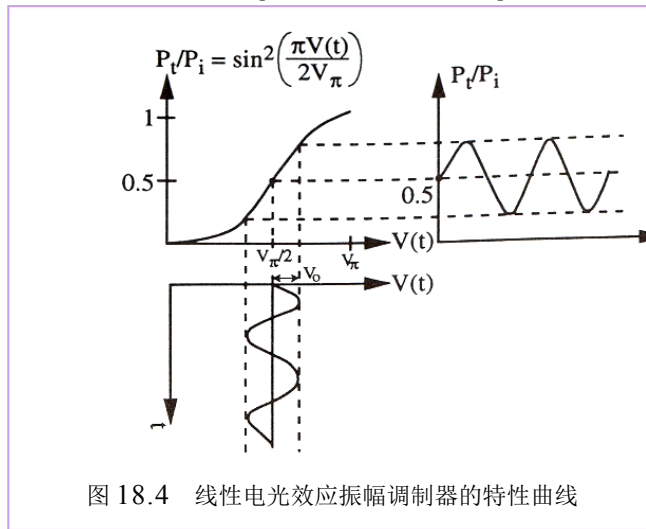


图 18.4 线性电光效应振幅调制器的特性曲线

图中 $P_i(t)$ 为输入光信号的功率， $P_t(t)$ 为输出光信号的功率， $P_t(t)/P_i(t)$ 即器件的透过率。 $V(t)$ 为调制电压。可以看出 $1/4$ 波片的作用相当于工作点偏置到特性曲线中部线性部分，在这一点进行调制效率最高，波形失真小。如不用波片 ($\Gamma_0=0$)，输出信号中只存在二次谐波分量。

对于 He-Ne 激光，KDP 的半波电压为

$$V_\pi = \frac{\lambda_0}{2n_o^3\gamma_{63}} = 8.971 \times 10^3 V. \quad (18.11)$$

如果用 KD^*P (磷酸二氘钾)， $V_\pi = 3.448 \times 10^3 V$ ，调制电压仍相当高，给电路的制造带来不便。常常用环状金属电极代替透明电极，但电场方向在晶体中不一致，使透过调制器的光波的消光比下降。

2.2、铌酸锂晶体横调制(transverse modulation)

(18.9) 式表明纵调制器件的调制度近似为 Γ_m ，与外加电压振幅成正比，而与光波在晶体中传播的距离（即晶体沿光轴 z 的厚度 L ，又称作用距离）无关。这是纵调制的重要特性。纵调制器也有一些缺点。首先，大部分重要的电光晶体的半波电压 V_π 都很高。由于 V_π 与 λ 成正比，当光源波长较长时（例如 $10.6 \mu m$ ）， V_π 更高，使控制电路的成本大大增加，电路体积和重量都很大。其次，为了沿光轴加电场，必须使用透明电极，或带中心孔的环形金属电极。前者制作困难，插入损耗较大；后者引起晶体中电场不均匀。解决上述问题的方案之一，是采用横调制。图 18.5 为横调制器示意图。电极 D_1 、 D_2 与光波传播方向平行。外加电场则与光波传播方向垂直。

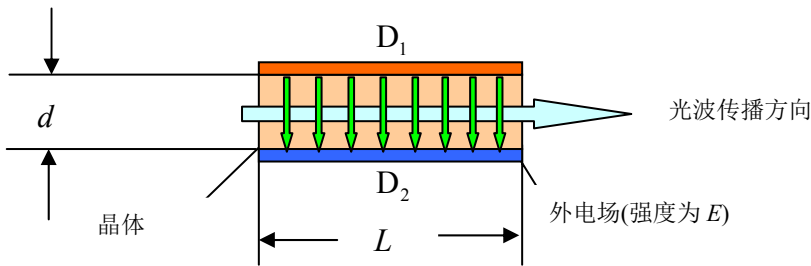


图 18.5 横调制；电极 D_1 、 D_2

我们已经知道，电光效应引起的相位差 Γ 正比于电场强度 E 和作用距离 L (即晶体沿光轴 z 的厚度) 的乘积 EL 、 E 正比于电压 V ，反比于电极间距离 d ，因此

$$\Gamma \sim \frac{LV}{d} \quad (18.12)$$

对一定的 Γ ，外加电压 V 与晶体长宽比 L/d 成反比，加大 L/d 可使得 V 下降。电压 V 下降不仅使控制电路成本下降、而且有利于提高开关速度。

铌酸锂晶体具有优良的加工性能及很高的电光系数， $\gamma_{33} = 30.8 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ ，常常用来做成横调制器。铌酸锂为单轴负晶体，有

$$n_x = n_y = n_o = 2.297, \quad n_z = n_e = 2.208。$$

令电场强度为 $E = E_z$ ，代入方程 (2.1-8) 得到电场感生的法线椭球方程式：

$$\left(\frac{1}{n_o^2} + \gamma_{13} E_z \right) (x^2 + y^2) + \left(\frac{1}{n_e^2} + \gamma_{33} E_z \right) z^2 = 1, \quad (18.13)$$

或写作：

$$\frac{x^2}{n_x^2} + \frac{y^2}{n_y^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1, \quad (18.14)$$

其中

$$n_x = n_y \approx n_o - \frac{1}{2} n_o^3 \gamma_{13} E_z, \quad (18.15)$$

$$n_z \approx n_e - \frac{1}{2} n_e^3 \gamma_{33} E_z。 \quad (18.16)$$

应注意在这一情况下电场感生坐标系和主轴坐标系一致，仍然为单轴晶体，但寻常光和非寻常光的折射率都受到外电场的调制。设入射线偏振光沿 xz 的角平分线方向振动，两个本征态 x 和 z 分量的折射率差为

$$n_x - n_z = (n_o - n_e) - \frac{1}{2} (n_o^3 \gamma_{13} - n_e^3 \gamma_{33}) E。 \quad (18.17)$$

当晶体的厚度为 L ，则射出晶体后光波的两个本征态的相位差为

$$\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n_x - n_z) L = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n_o - n_e) L - \frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{n_o^3 \gamma_{13} - n_e^3 \gamma_{33}}{2} EL, \quad (18.18)$$

上式说明在横调制情况下，相位差由两部分构成：晶体的自然双折射部分(式中第一项)及电光双折射部分（式中第二项）。通常使自然双折射项等于 $\pi/2$ 的整倍数。

横调制器件的半波电压为

$$V_\pi = \frac{d}{L} \frac{\lambda_0}{n_e^3 \gamma_{33} - n_o^3 \gamma_{13}}, \quad (18.19)$$

我们用到关系式 $E=V/d$ 。由上式可知半波电压 V_π 与晶体长宽比 L/d 成反比。因而可以通过加大器件的长宽比 L/d 来减小 V_π 。

横调制器的电极不在光路中，工艺上比较容易解决。横调制的主要缺点在于它对波长 λ_0 很敏感， λ_0 稍有变化，自然双折射引起的相位差即发生显著的变化。当波长确定时（例如使用激光），这一项又强烈地依赖于作用距离 L 。加工误差、装调误差引起的光波方向的稍许变化都会引起相位差的明显改变，因此通常只用于准直的激光束中。或用一对晶体，第一块晶体的 x 轴与第二块晶体的 z 轴相对，使晶体的自然双折射部分(18.18 式中第一项)相互补偿，以消除或降低器件对温度、入射方向的敏感性。有时也用巴比涅—索勒尔（Babinet-Soleil）补偿器，将工作点偏置到特性曲线的线性部分。

迄今为止，我们所讨论的调制模式均为振幅调制，其物理实质在于：输入的线偏振光在调制晶体中分解为一对偏振方位正交的本征态，在晶体中传播过一段距离后获得相位差 Γ ， Γ 为外加电压的函数。在输出的偏振元件透光轴上这一对正交偏振分量重新叠加，输出光的振幅被外加电压所调制，这是典型的偏振光干涉效应。

2.3、改变直流偏压对输出特性的影响

(1) 当 $U_0 = \frac{U_\pi}{2}$ 、 $U_m \ll U_\pi$ 时，将工作点选定在线性工作区的中心处，如图 18.6

(a) 所示，此时，可获得较高效率的线性调制，把 $U_0 = \frac{U_\pi}{2}$ 代入相应公式，得

$$\begin{aligned} T &= \sin^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{2U_\pi} U_m \sin \omega t\right) \\ &= \frac{1}{2} [1 - \cos(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{U_\pi} U_m \sin \omega t)] \\ &= \frac{1}{2} [1 + \sin(\frac{\pi}{U_\pi} U_m \sin \omega t)] \end{aligned} \quad (18.20)$$

由于 $U_m \ll U_\pi$ 时 $T \approx \frac{1}{2} [1 + (\frac{\pi U_m}{U_\pi}) \sin \omega t]$

$$\text{即} \quad T \propto \sin \omega t \quad (18.21)$$

这时，调制器输出的信号和调制信号虽然振幅不同，但是两者的频率却是相同的，输出信号不失真，我们称为线性调制。

(2) 当 $U_0 = 0$ 、 $U_m \ll U_\pi$ 时，如图 3 (b) 所示，把 $U_0 = 0$ 代入相应公式

$$\begin{aligned} T &= \sin^2\left(\frac{\pi}{2U_\pi} U_m \sin \omega t\right) \\ &= \frac{1}{2} [1 - \cos(\frac{\pi}{U_\pi} U_m \sin \omega t)] \\ &\approx \frac{1}{4} \left(\frac{\pi}{U_\pi} U_m\right)^2 \sin^2 \omega t \end{aligned}$$

$$\approx \frac{1}{8} \left(\frac{\pi U_m}{U_\pi} \right)^2 (1 - \cos 2\omega t)$$

$$\text{即} \quad T \propto \cos 2\omega t \quad (18.22)$$

从上式可以看出，输出信号的频率是调制信号频率的二倍，即产生“倍频”失真。若把 $U_0 = U_\pi$ 代入相应公式，经类似的推导，可得

$$T \approx 1 - \frac{1}{8} \left(\frac{\pi U_m}{U_\pi} \right)^2 (1 - \cos 2\omega t) \quad (18.23)$$

即 $T \propto \cos 2\omega t$ ，输出信号仍是“倍频”失真的信号。

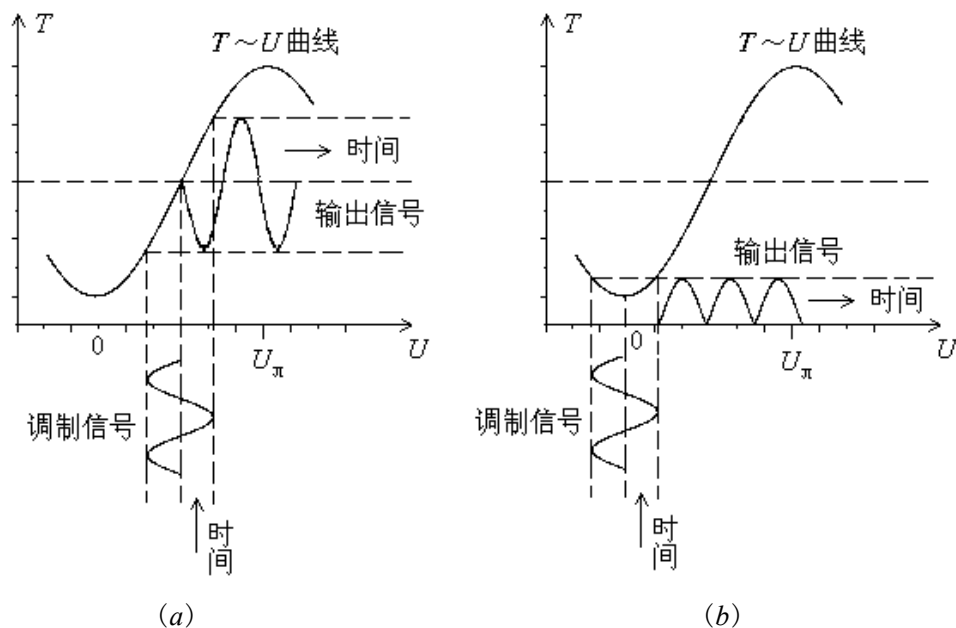


图 18.6 调制信号与输出信号

(3) 直流偏压 U_0 在 0 伏附近或在 U_π 附近变化时，由于工作点不在线性工作区，输出波形将失真。

(4) 当 $U_0 = \frac{U_\pi}{2}$ ， $U_m > U_\pi$ 时，调制器的工作点虽然选定在线性工作区的中心，但不满足小信号调制的要求。因此，工作点虽然选定在了线性区，输出波形仍然是失真的。

2.4、用 $\lambda/4$ 波片进行光学调制

上面分析说明电光调制器中直流偏压的作用主要是在使晶体中 x' 、 y' 两偏振方向的光之间产生固定的位相差，从而使正弦调制工作在光强调制曲线上的不同点。

直流偏压的作用可以用 $\lambda/4$ 波片来实现。在起偏器和检偏器之间加入 $\lambda/4$ 片，调整 $\lambda/4$ 波片的快慢轴方向使之与晶体的 x' , y' 轴平行，即可保证电光调制器工作在线性调制状态下，转动波片可使电光晶体处于不同的工作点上。

三、实验装置

- 1、电光调制电源组件
- 2、光接收放大器组件
- 3、He-Ne 激光器组件
- 4、电光调制晶体组件（电光晶体：3*4*35mm）
- 5、起偏器组件
- 6、检偏器组件

四、实验内容和操作方法

1、观察电光调制箱内置波形信号，以及解调信号

器件放置如图 18.7 所示，激光束与台面平行，其它器件依次放入光路，并保持与激光束同轴等高。

将晶体与电光调制箱连接，打开开关，调制切换选择“内”，输出切换选择“外”，通过“选择”键选择“正弦波”或“方波”，适当调整“调制幅度”和“高压调节”旋钮，使波形不失真。

将示波器与探测器接通，则可观测到解调出来的内置波形信号，适当旋转光路中的偏振片和 $\lambda/4$ 波片，得到最清晰稳定波形。将示波器的另一通道与电光调制箱的“信号输出”连接，则可直接得到内置波形信号，与解调出来的波形信号作对比。

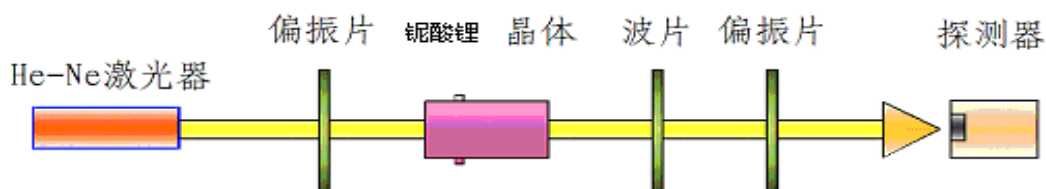


图 18.7 电光调制光路示意图

2、音频信号的电光调制与解调

将 mp3 音源于电光调制实验箱的“外部输入”连接，调制切换选择“外”，输出切换选择“内”，则首先可从实验箱内置的扬声器听到清晰的 mp3 播放的音乐。

再将输出切换选择“外”，把提供的外置扬声器（音箱）与接收探测器连接，则可听到 mp3 播出的音乐。适当调整“调制幅度”和“高压调节”旋钮，旋转光路中

的偏振片和 $\lambda/4$ 波片，使音乐最清晰。

五、注意事项

- 1、He-Ne 激光管出光时，电极上所加的直流高压，要注意人身安全。
- 2、晶体又细又长，容易折断，晶体电极上面的铝条不能压的太紧或给晶体施加压力，以免压断晶体。
- 3、电源的旋钮顺时针方向为增益加大的方向，因此，电源开关打开前，所有旋钮应该逆时针方向旋转到头，关仪器前，所有旋钮逆时针方向旋转到头后再关电源。

六、预习要求

根据实验内容，查阅相关电光相应（包括泡克耳斯相应和克尔效应）的相关知识和原理。了解波片的工作原理。

七、思考题

- 1、如何保证光束正入射于晶体的端面，怎样判断？不是正入射时有何影响？
- 2、起偏器和检偏器既不正交又不平行时，会出现何种情况？
- 3、 $1/4$ 波片改变工作点，观察调制现象时为何只出现线性调制和倍频失真，而没有其它失真？

实验 18 电光、声光与磁光调制系列实验

(II) 声光调制实验

引言

声光效应是指光通过某一受到超声波扰动的介质时发生衍射的现象,这种现象是光波与介质中声波相互作用的结果。早在本世纪 30 年代就开始了声光衍射的实验研究。60 年代激光器的问世为声光现象的研究提供了理想的光源,促进了声光效应理论和应用研究的迅速发展。声光效应为控制激光束的频率、方向和强度提供了一个有效的手段。利用声光效应制成的声光器件,如声光调制器、声光偏转器、和可调谐滤波器等,在激光技术、光信号处理和集成光通讯技术等方面有着重要的应用。

一、实验目的

- 1、了解声光效应的原理。
- 2、了解喇曼—纳斯衍射和布喇格衍射的实验条件和特点。
- 3、测量声光偏转和声光调制曲线。
- 4、完成声光通信实验光路的安装及调试。

二、实验原理

当超声波在介质中传播时,将引起介质的弹性应变作时间和空间上的周期性的变化,并且导致介质的折射率也发生相应变化。当光束通过有超声波的介质后就会产生衍射现象,这就是声光效应。有超声波传播的介质如同一个相位光栅。

声光效应有正常声光效应和反常声光效应之分。在各项同性介质中,声—光相互作用不导致入射光偏振状态的变化,产生正常声光效应。在各项异性介质中,声—光相互作用可能导致入射光偏振状态的变化,产生反常声光效应。反常声光效应是制造高性能声光偏转器和可调滤波器的基础。正常声光效应可用喇曼—纳斯的光栅假设作出解释,而反常声光效应不能用光栅假设作出说明。在非线性光学中,利用参量相互作用理论,可建立起声—光相互作用的统一理论,并且运用动量匹配和失配等概念对正常和反常声光效应都可作出解释。本实

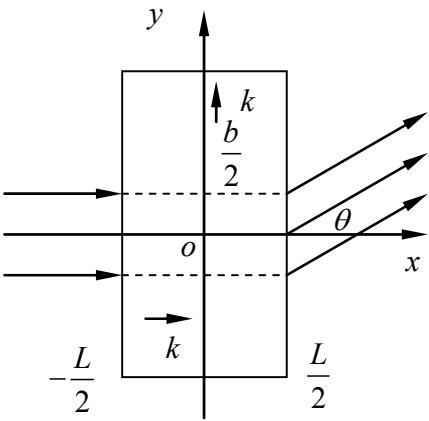


图 18.8 声光衍射

验只涉及到各项同性介质中的正常声光效应。

设声光介质中的超声行波是沿 y 方向传播的平面纵波，其角频率为 ω_s ，波长为 λ_s 波矢为 \mathbf{k}_s 。入射光为沿 x 方向传播的平面波，其角频率为 ω ，在介质中的波长为 λ ，波矢为 \mathbf{k} 。

介质内的弹性应变也以行波形式随声波一起传播。由于光速大约是声速的 10^5 倍，在光波通过的时间内介质在空间上的周期变化可看成是固定的。

由于应变而引起的介质的折射率的变化由下式决定

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)PS \quad (18.24)$$

式中， n 为介质折射率， S 为应变， P 为光弹系数。通常， P 和 S 为二阶张量。当声波在各项同性介质中传播时， P 和 S 可作为标量处理，如前所述，应变也以行波形式传播，所以可写成

$$S = S_0 \sin(\omega_s t - k_s y) \quad (18.25)$$

当应变较小时，折射率作为 y 和 t 的函数可写作

$$n(y, t) = n_0 + \Delta n \sin(\omega_s t - k_s y) \quad (18.26)$$

式中， n_0 为无超声波时的介质的折射率， Δn 为声波折射率变化的幅值，由 (18.24) 式可求出

$$\Delta n = -\frac{1}{2} n^3 P S_0 \quad (18.27)$$

设光束垂直入射 ($\mathbf{k} \perp \mathbf{k}_s$) 并通过厚度为 L 的介质，则前后两点的相位差为

$$\begin{aligned} \Delta\Phi &= k_0 n(y, t) L \\ &= k_0 n_0 L + k_0 \Delta n L \sin(\omega_s t - k_s y) \\ &= \Delta\Phi_0 + \delta\Phi \sin(\omega_s t - k_s y) \end{aligned} \quad (18.28)$$

式中， k_0 为入射光在真空中的波矢的大小，右边第一项 $\Delta\Phi_0$ 为不存在超声时光波在介质前后两点的相位差，第二项为超声波引起的附加相位差（相位调制）， $\delta\Phi = k_0 \Delta n L$ 。可见，当平面光波入射在介质的前界面上时，超声波使出射光波的波振面变为周期变化的皱折波面，从而改变出射光的传播特性，使光产生衍射。

设入射面上 $x = -\frac{L}{2}$ 的光振动为 $E_i = A e^{i\omega t}$ ， A 为一常数，也可以是复数。考虑到在出射

面 $x = \frac{L}{2}$ 上各点相位的改变和调制，在 xy 平面内离出射面很远一点的衍射光叠加结果为

$$E \propto A \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} e^{i[(\omega t - k_0 n(y, t) - k_0 y \sin \theta)]} dy$$

写成等式时，

$$E = C e^{i\omega t} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} e^{i\delta\Phi \sin(k_s y - w_s t)} e^{-ik_0 y \sin \theta} dy \quad (18.29)$$

式中， b 为光束宽度， θ 为衍射角， C 为与 A 有关的常数，为了简单可取为实数。利用一与贝塞耳函数有关的恒等式

$$e^{ia \sin \theta} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(a) e^{im\theta}$$

式中 $J_m(a)$ 为（第一类） m 阶贝塞耳函数，将（5）式展开并积分得

$$E = Cb \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(\delta\Phi) e^{i(w - mw_s)t} \frac{\sin[b(mk_s - k_0 \sin \theta)/2]}{b(mk_s - k_0 \sin \theta)/2} \quad (18.30)$$

上式中与第 m 级衍射有关的项为

$$E_m = E_0 e^{i(w - mw_s)t} \quad (18.31)$$

$$E_0 = Cb J_m(\delta\Phi) \frac{\sin[b(mk_s - k_0 \sin \theta)/2]}{b(mk_s - k_0 \sin \theta)/2} \quad (18.32)$$

因为函数 $\sin x/x$ 在 $x=0$ 取极大值，因此有衍射极大的方位角 θ_m 由下式决定：

$$\sin \theta_m = m \frac{k_s}{k_0} = m \frac{\lambda_0}{\lambda_s} \quad (18.33)$$

式中， λ_0 为真空中光的波长， λ_s 为介质中超声波的波长。与一般的光栅方程相比可知，超声波引起的有应变的介质相当于一光栅常数为超声波长的光栅。由（18.31）式可知，第 m 级衍射光的频率 w_m 为

$$w_m = w - mw_s \quad (18.34)$$

可见，衍射光仍然是单色光，但发生了频移。由于 $w \gg w_s$ ，这种频移是很小的。

第 m 级衍射极大的强度 I_m 可用（18.31）式模数平方表示：

$$\begin{aligned} I_m &= E_0 E_0^* = C^2 b^2 J_m^2(\delta\Phi) \\ &= I_0 J_m^2(\delta\Phi) \end{aligned} \quad (18.35)$$

式中， E_0^* 为 E_0 的共轭复数， $I_0 = C^2 b^2$

第 m 级衍射极大的衍射效率 η_m 定义为第 m 级衍射光的强度与入射光的强度之比。由（18.35）式可知， η_m 正比于 $J_m^2(\delta\Phi)$ 。当 m 为整数时， $J_{-m}(a) = (-1)^m J_m(a)$ 。由（9）式和（18.35）式表明，各级衍射光相对于零级对称分布。

当光束斜入射时，如果声光作用的距离满足 $L < \lambda_s^2 / 2\lambda$ ，则各级衍射极大的方位角 θ_m

由下式决定

$$\sin \theta_m = \sin i + m \frac{\lambda_0}{\lambda_s} \quad (18.36)$$

式中 i 为入射光波矢 k 与超声波波面的夹角。上述的超声衍射称为喇曼—纳斯衍射，有超声波存在的介质起一平面位光栅的作用。

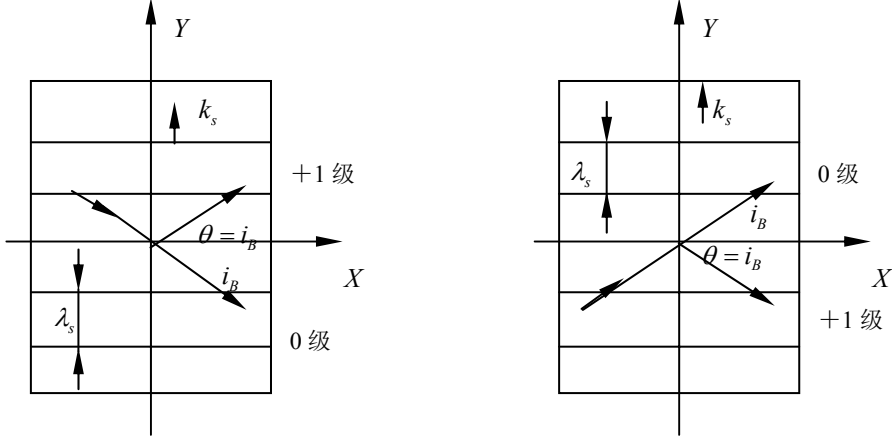


图 18.9 布拉格衍射

当声光作用的距离满足 $L > 2\lambda_s^2 / \lambda$ ，而且光束相对于超声波波面以某一角度斜入射时，在理想情况下除了 0 级之外，只出现 1 级或 -1 级衍射。如图 18.9 所示。这种衍射与晶体对 X 光的布喇格衍射很类似，故称为布喇格衍射。能产生这种衍射的光束入射角称为布喇格角。此时有超声波存在的介质起体积光栅的作用。可以证明，布喇格角满足

$$\sin i_B = \frac{\lambda}{2\lambda_s} \quad (18.37)$$

式中 (13) 称为布喇格条件。因为布喇角一般都很小，故衍射光相对于入射光的偏转角

$$\Phi = 2i_B \approx \frac{\lambda}{\lambda_s} = \frac{\lambda_0}{nv_s} f_s \quad (18.38)$$

式中， v_s 为超声波的波速， f_s 为超声波的频率，其它量的意义同前。在布喇格衍射条件下，一级衍射光的效率为

$$\eta = \sin^2 \left[\frac{\pi}{\lambda_0} \sqrt{\frac{M_2 L P_s}{2H}} \right] \quad (18.39)$$

式中， P_s 为超声波功率， L 和 H 为超声换能器的长和宽， M_2 为反映声光介质本身性质的一常数， $M_2 = n^6 p^2 / \rho v_s^5$ ， ρ 为介质密度， p 为光弹系数。在布喇格衍射下，衍射光的效率也由 (18.34) 式决定。理论上布喇格衍射的衍射效率可达 100%，喇曼—纳斯衍射中一级

衍射光的最大衍射效率仅为 34%，所以使用的声光器件一般都采用布喇格衍射。

由（18.38）式和（18.39）式可看出，通过改变超声波的频率和功率，可分别实现对激光束方向的控制和强度的调制，这是声光偏转器和声光调制器的基础。从（18.34）式可知，超声光栅衍射会产生频移，因此利用声光效应还可以制成频移器件。超声频移器在计量方面有重要应用，如用于激光多普勒测速仪。

以上讨论的是超声行波对光波的衍射。实际上，超声驻波对光波的衍射也产生喇曼—纳斯衍射和布喇格衍射，而且各衍射光的方位角和超声频率的关系与超声行波的相同。不过，各级衍射光不再是简单地产生频移的单色光，而是含有多个傅立叶分量的复合光。

三、实验装置

TSGMG-1/Q 型高速正弦声光调制器及驱动电源，可用在激光照排机、激光传真机、电子分色机或者其他文字、图像处理等系统中。

1、主要技术指标

激光波长:	632.8nm
工作频率:	150MHz
衍射效率:	≥70%
正弦重复频率:	≥8MHz
静态透过率:	≥90%

2、工作原理

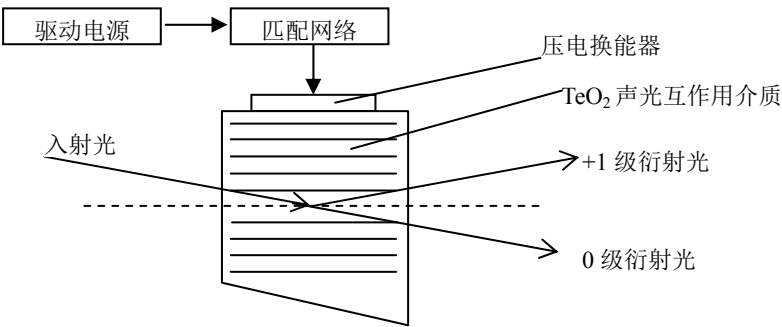


图 18.10 布拉格衍射原理图

本产品由声光调制器及驱动电源两部分组成。驱动电源产生 150MHz 频率的射频功率信号加

入声光调制器，压电换能器将射频功率信号转变为超声信号，当激光束以布拉格角度通过时，由于声光互作用效应，激光束发生衍射（如图 18.10），这就是布拉格衍射效应。外加文字和图像信号以正弦（连续波）输入驱动电源的调制接口“调制”端，衍射光光强将随此信号变化，从而达到控制激光输出特性的目的，如图 18.11 所示。

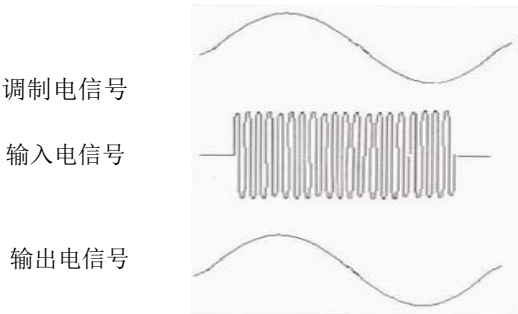


图 18.11 衍射光随调制信号的变化

声光调制器由声光介质（氧化碲晶体）和压电换能器（铌酸锂晶体）、阻抗匹配网络组成，声光介质两通光面镀有 632.8nm 的光学增透膜。整个器件由铝制外壳安装。外形尺寸和安装尺寸如图 18.12 示（单位：mm）。

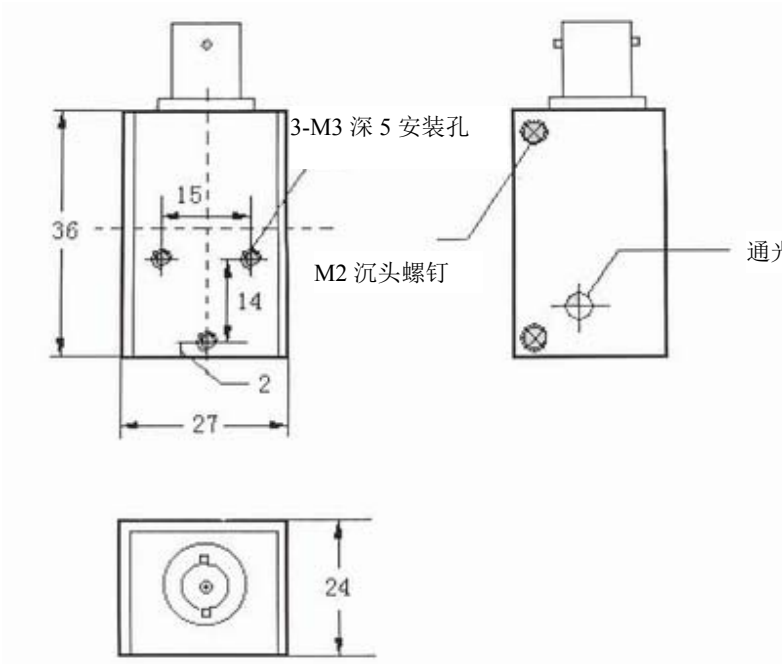


图 18.12 声光调制器外形尺寸

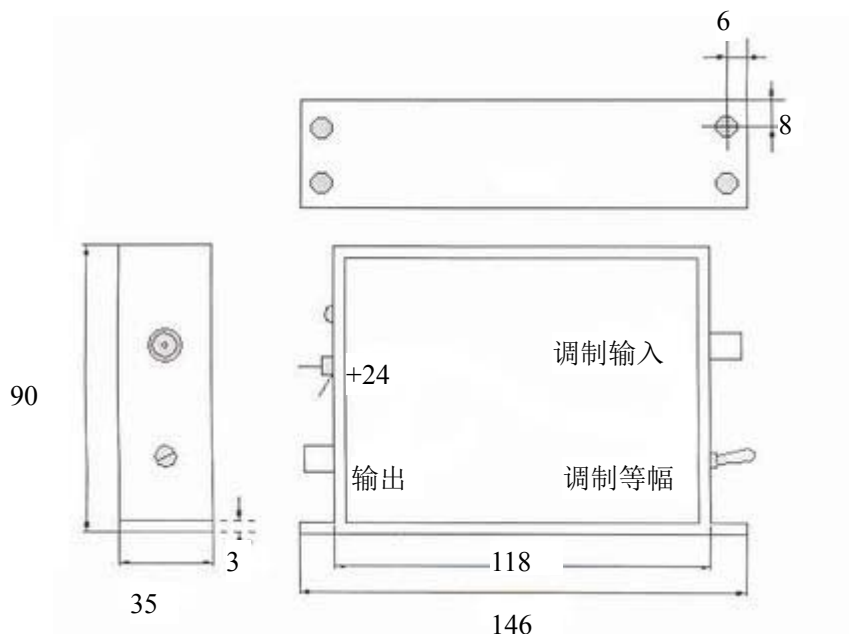


图 18.13 驱动电源外形尺寸

驱动电源由振荡器、转换电路、调制门电路、电压放大电路、功率放大电路组成。外输入调制信号由“调制输入”端输入，工作电压为直流+24V，“输出”端输出驱动功率，用高频电缆线与声光器件相联。外形尺寸和安装尺寸如图 18.13 示（单位：mm）。

四、实验内容和操作方法

- 1、如图 18.14，正确连接声光调制器各个部分，开机预热 5 分钟；
- 2、调整光路同轴等高，使激光束按照一定角度入射声光调制器晶体，保证激光束穿过晶体后出现清晰的衍射光斑在白纸上；观察该布拉格衍射光斑，并通过测量 0-1 级衍射光斑的距离和晶体到白纸屏的距离计算衍射角。
- 3、进一步调整晶体的角度和位置，使零级斑一侧的衍射光斑更明亮，用狭缝 1 级或 2 级衍射斑通过，并用界探测器接收。
- 4、将 mp3 与声光调制器连接，扬声器与探测器连接，则可听到 mp3 播出的音乐声。

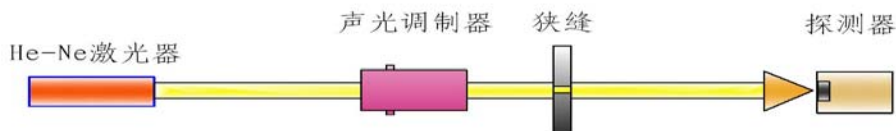


图 18.14 声光调制光路示意图

五、注意事项

- 1、用高频电缆将声光器件和驱动电源“输出”端联接；
- 2、接上+24V 的直流工作电压。调制输入电信号幅度在 250~350mV 之间；
- 3、调整声光器件在光路中的位置和光的入射角度，在一级衍射光达到最好状态；
- 4、驱动电源“调制输入”端接上外调制信号，并拨动调制开关到“调制”即可正常工作；
- 5、+24V 的直流工作电压不得接反，否则驱动电源烧坏；
- 6、驱动电源不得空载，即加上直流工作电压前，应先将驱动电源“输出”端与声光器件或其他 $50\ \Omega$ 负载相连；
- 7、产品应小心轻放，特别是声光器件更应注意，否则将可损坏晶体而报废；
- 8、声光器件的通光面不得接触，否则损坏光学增透膜。

六、预习要求

根据实验内容，查阅声光效应的相关知识和原理。

七、思考题

- 1、什么是声光效应？
- 2、简述布拉格声光调制实现的过程？
- 3、产生布拉格声光衍射的条件是什么，布拉格声光衍射及拉曼-奈斯衍射的区别及联系？

实验 18 电光、声光与磁光调制系列实验

(III) 磁致旋光实验

引 言

磁光效应是指光与磁场中的物质，或光与具有自发磁化强度的物质之间相互作用所产生的各种现象，主要包括法拉第(Faraday)效应、柯顿-莫顿(Cotton-Mouton)效应、克尔(Kerr)效应、塞曼(Zeeman)效应、光磁效应等。

磁场中某些非旋光物质具有旋光性，该现象称为“法拉第(Faraday)效应”或“磁致旋光效应”。法拉第于 1845 年发现该效应，故称法拉第效应。

一、实验目的

- 1、掌握磁光效应的原理和实验方法。
- 2、计算磁光介质的 Verdet 常数。

二、实验原理

磁场可以使某些非旋光物质具有旋光性。该现象称为磁致旋光(法拉第)效应，是磁光效应的一种形式。当线偏振光在媒质中沿磁场方向传播距离 d 后，振动方向旋转的角度 α 等于：

$$\alpha = VedB \quad (18.40)$$

式中 B 是磁感应强度， Ve 是物质常数，称为费尔德(Verdet)常数。

法拉第效应产生的旋光与自然旋光物质产生的旋光有一个重大区别。自然旋光物质有确定的右旋或左旋性质，当光沿某一传播方向通过物质时，若振动方向由 α 方向变为 β 方向，则当光波反向通过同一物质时， β 方向的振动将回复到 α 方向。磁致旋光的情况则不同。产生法拉第效应的原因是，外磁场使物质分子的磁矩定向排列，出现了定向旋转的磁矩电流，可以设想，顺着磁矩电流方向旋转的光波电场和逆向旋转的光波电场与物质的作用情况不同，从而左、右旋圆偏振光对应的折射率不同，出现了旋光，然而应该注意，上述的作用情况仅仅取决于圆偏振光的电场旋转方向是否与磁矩电流一致，而不取决于是左旋的或右旋的，因为后者与光波的传播方向有关。因此，不论光波的传播方向如何，当光波通过磁致旋光媒质时，偏振方向的旋转方向是确定的，它只和磁场方向有关。

三、实验装置

电磁线圈电流与磁场强度对应表

磁光玻璃棒，材料 ZF4(重火石玻璃)、长度 50mm、直径 5.5mm

四、实验内容和操作方法

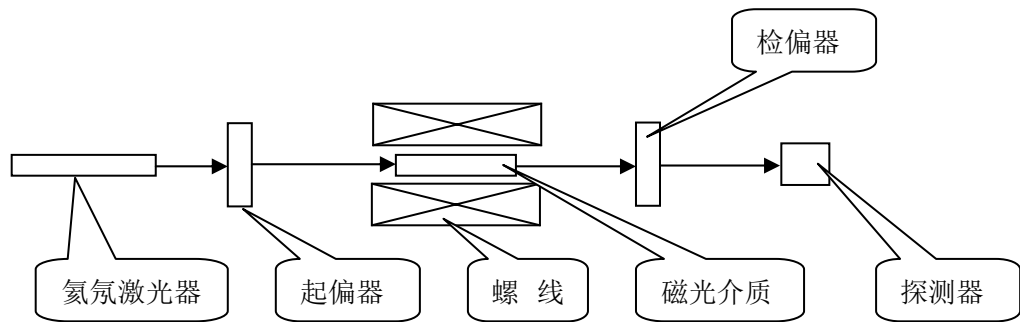


图 18.15 实验光路图

- 1、按照图 18.15 实验光路图搭建光路。
- 2、将氦氖激光器调整水平，并穿过电磁线圈中心孔。
- 3、放入磁光介质。将玻璃棒放置于电磁线圈中心。
- 4、将检偏器指示刻度转到 0 度位置。
- 5、调整起偏器，使得起偏器与检偏器之间正交。使用探测器观测光强变化，光强
- 6、至最小值。
- 7、开启电磁线圈电源，缓慢增加电流旋钮至最大。同时观察激光输出强度变化。
- 8、调整检偏器角度，使得激光输出由强变弱，至最小。关闭电磁线圈电源。
- 9、记录检偏器转动角度并记录数据。
- 10、根据数据计算磁光介质 Verdet 常数。
- 11、放入 2 根玻璃棒，增加磁场中介质长度。再按照 18.8 步骤进行实验。
- 12、改变通电线圈电流方向。重复 18.8 步骤进行实验。

五、实验数据

	电流	磁场强度	旋转角度	Verdet 常数
介质 50mm，正向电流				
介质 100mm，正向电流				
介质 50mm，反向电流				
介质 100mm，反向电流				

六、注意事项

电磁线圈长时间通电将导致表面温度升高，测量数据后应及时关闭电源。

七、预习要求

根据实验内容，查阅磁致旋光的相关知识和原理。

八、思考题

- 1、试分析磁光介质长度加倍，旋转角度增加不到二倍原因。
- 2、若光波通过磁场中的磁光介质偏振角度旋转 α ，之后经反射镜原路返回，试分析返回
- 3、后激光的偏振角度？

实验 19 调制偏振光相位延迟测量实验

引言

在光学技术领域，特别是在偏光技术应用中，光学相位延迟器件是光学调制系统中的重要器件。这类器件是基于晶体的双折射性质，利用光通过晶体可以改变入射光波的振幅和相位差的特点，改变光波的偏振态。相位延迟器件包括各种波片和补偿器，和其它偏光器件相配合，可以实现各种偏振态之间的相互转换、偏振面的旋转以及各类偏振光的调制，广泛应用于光纤通讯、光弹力学、光学精密测量等领域中。相位延迟量是光学相位延迟器件的重要参数，与器件的厚度、光学均匀性、应力双折射等诸多因素有关，其精度直接关系到应用系统的质量，因此准确的测定相位延迟量，提高其测量精度是非常有意义的，得到了越来越多的重视和研究。

目前，对光学相位延迟量的测量方法有很多，包括半阴法、补偿法、电光调制法、机械旋光调制法、磁光调制法、相位探测法、光学外差测量法、分频激光探测法、分束差动法等等。测量方法的发展历程，经历了由简单到复杂，由直接测量到补偿法测量，由标准波片补偿到电光、磁光补偿。补偿法的一个问题是补偿器本身会带来一定的误差，如：标准波片“不标准”，电光补偿存在非线性性、补偿器光轴与测量光束不垂直等。本实验提出一种新的光学相位延迟量测量方法：用调制偏振光准确判断极值点位置，用索列尔-巴比涅相位补偿器进行相位补偿，结合了补偿法和电光调制法的优点，又降低了补偿器本身对结果的影响，测量精度高，适用范围广。

一、实验目的

- 1、了解偏振光学理论
- 2、掌握索列尔-巴比涅相位补偿器的应用
- 3、了解晶体电光调制理论
- 4、掌握相位延迟测量方法
- 5、设计系统并测量不同零级波片
- 6、设计光学相位延迟发生器

二、实验原理

1、调制原理

在本实验中，采用调制偏振光的方法准确判断极值点的位置。调制偏振光的产生，利用了介质的电光效应。各向同性介质在外电场作用下，表现出各向异性的双折射特性，透射光是一对振动方向相互垂直的线偏振光。通过调节外加电场大小，可对偏振光的振幅或相位进行调制。由电场所引起的晶体折射率的变化，称为电光效应。

根据前面实验中的电光效应理论，如图 18.1，通常用折射率球来描述光在各向异性晶体中传播时折射率与光的传播方向、振动方向的关系。在主轴坐标中，折射率椭球及其方程为

$$\frac{x^2}{n_1^2} + \frac{y^2}{n_2^2} + \frac{z^2}{n_3^2} = 1 \quad (19.1)$$

式中 n_1 、 n_2 、 n_3 为椭球三个主轴方向上的折射率，称为主折射率。当晶体加上电场后，折射率椭球的形状、大小、方位都发生变化，椭球方程变成

$$\frac{x^2}{n_{11}^2} + \frac{y^2}{n_{22}^2} + \frac{z^2}{n_{33}^2} + \frac{2yz}{n_{23}^2} + \frac{2xz}{n_{13}^2} + \frac{2xy}{n_{12}^2} = 1 \quad (19.2)$$

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（磷酸二氧钾）类型的晶体用它的纵向电光效应， $LiNbO_3$ （铌酸锂）类型的晶体用它的横向电光效应。例如，KDP

晶体沿光轴方向（ z 方向）加外电场 E_z 后，从单轴晶体变成了双轴晶体，折射率椭球与 xy 平面的交线由圆变成了主轴在 45° 方向上的椭圆（图 19.1）。沿 z 轴传播一对正交的本征模，分别在 ξ 、 η 方向偏振，折射率由 (19.3) 式表示。

$$\begin{aligned} n_\xi &= n_o - \frac{1}{2} n_o^3 \gamma_{63} E_z, \\ n_\eta &= n_o + \frac{1}{2} n_o^3 \gamma_{63} E_z, \\ n_z &= n_e \end{aligned} \quad (19.3)$$

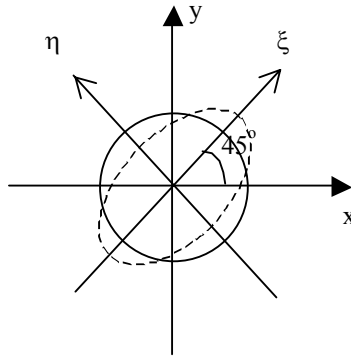


图 19.1 折射率椭球交线变化图

当光波在 z 方向传播的距离为 L 时，两个本征模的相位差为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n_\eta - n_\xi)L = \frac{2\pi}{\lambda}n_o^3\gamma_{63}E_zL = \frac{2\pi}{\lambda}n_o^3\gamma_{63}V \quad (19.4)$$

可见，沿 ξ 、 η 方向振动的出射偏振光其相位差和外加电压 V 的大小成正比，可通过调节外加电场大小的方式实现偏振光的调制。晶体作为调制器，其 Jones 矩阵在 ξ 、 η 系可写为

$$\hat{W} = \begin{pmatrix} e^{i\frac{\delta}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\delta}{2}} \end{pmatrix} \quad (19.5)$$

2、测量原理

测量系统如图 19.2 所示。

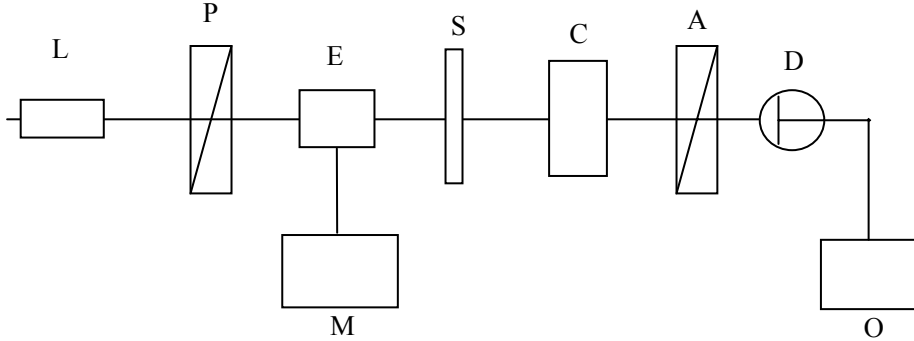


图 19.2 测量系统图

L：光源；P：起偏器；E：电光调制器，即电光晶体，通过调制信号源 M 加上调制信号；S：待测波片；C：索列尔-巴比涅相位补偿器；A 为检偏器；D，光探测器，接收光，并经过滤波放大等处理后，最终结果显示在示波器 O 上。

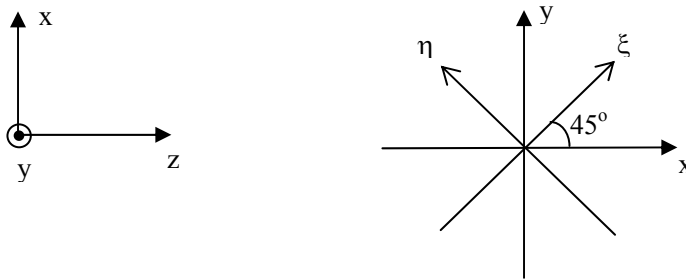


图 19.3 感生主轴与 xy 轴关系

系统的方位坐标规定为：光束传播方向为 z 轴，起偏器、检偏器的透振方向沿 x 轴，电光调制器加电后的感生轴 ξ 、 η 方向和待测波片及补偿器的快慢轴方向一致，和 x 轴成 45 度角（见图 19.3）。

索列尔-巴比涅相位补偿器的作用类似于一个相位延迟量可调的零级波片。由成对的晶体楔 A 和 A' 和一块平行晶片 B 组成。A 和 A' 两光轴都平行于折射棱边，它们可以彼此相对移动，形成一个厚度可变的石英片；平行晶片 B 的光轴与晶体楔 A 垂直（见图 19.4）。

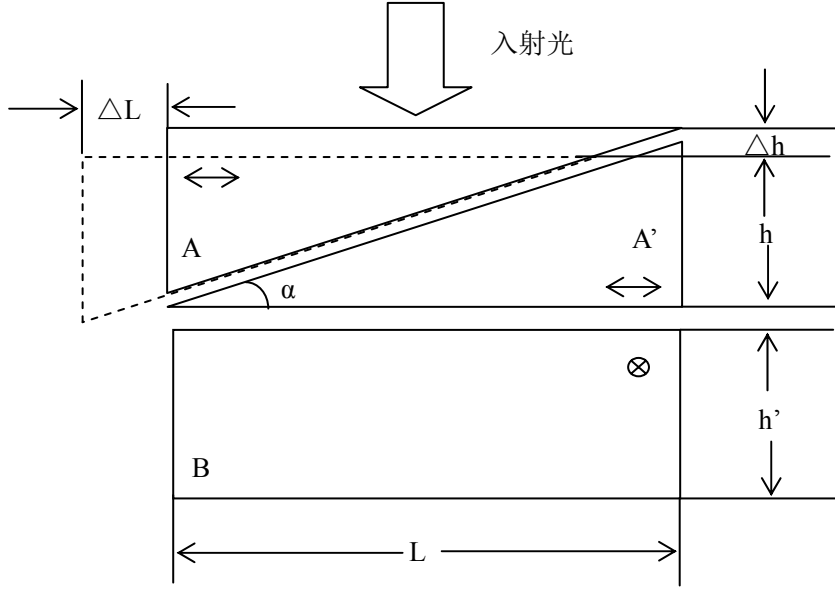


图 19.4 索列尔-巴比涅相位补偿器

晶体楔厚度为 h ，宽为 L ，楔角为 α ，则

$$h = L \tan \alpha \quad (19.6)$$

晶体楔平移 ΔL 后，沿光束通过方向厚度改变量为

$$\Delta h = \tan \alpha \Delta L \quad (19.7)$$

光通过补偿器后产生的相位延迟量为

$$\begin{aligned} \delta_c &= \frac{2\pi}{\lambda} [(n_o - n_e)h + (n_e - n_o)h'] = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o)(h' - h) = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o)\Delta h \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o) \tan \alpha \Delta L \end{aligned} \quad (19.8)$$

其中, n_o 、 n_e 分别是晶体发生双折射的 o 光和 e 光对应的主折射率。(19.8) 式表明光通过补偿器后产生的相位延迟量正比于厚度改变量 Δh , 也正比于晶体楔的平移量 ΔL 。

我们用 Jones 矩阵分析光通过图 19.2 系统的过程。调制器 E、待测波片 S、补偿器 C 的相位延迟分别为 $\delta_E, \delta_S, \delta_C$, 则在 ξ 、 η 系中它们的 Jones 矩阵分别为

$$\hat{W}_E = \begin{pmatrix} e^{i\frac{\delta_E}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\delta_E}{2}} \end{pmatrix}, \quad \hat{W}_S = \begin{pmatrix} e^{i\frac{\delta_S}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\delta_S}{2}} \end{pmatrix}, \quad \hat{W}_C = \begin{pmatrix} e^{i\frac{\delta_C}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\delta_C}{2}} \end{pmatrix} \quad (19.9)$$

设入射光矢量为 $\hat{E} = E_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$, 则检偏器 A 后出射光矢量在 x, y 系可写为

$$\begin{aligned} \hat{J} &= \hat{P}_x \hat{R}(-\phi) \hat{W}_C \hat{W}_S \hat{W}_E \hat{R}(\phi) \hat{P}_x \hat{E} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(-\phi) & -\sin(-\phi) \\ \sin(-\phi) & \cos(-\phi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\frac{\delta_C}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\delta_C}{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\frac{\delta_S}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\delta_S}{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\frac{\delta_E}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\delta_E}{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_0 \\ E_0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (19.10)$$

上式中, ϕ 为 ξ 、 η 系和 x, y 系的转角。化简 (19.10) 式, 得

$$\hat{J} = E_0 \begin{pmatrix} e^{i\frac{\delta_C+\delta_S+\delta_E}{2}} \cos^2 \phi + e^{-i\frac{\delta_C+\delta_S+\delta_E}{2}} \sin^2 \phi \\ 0 \end{pmatrix} \quad (19.11)$$

当 $\phi = 45^\circ$ 时, (19.11) 式化为

$$\hat{J} = E_0 \begin{pmatrix} \cos \frac{\delta_C + \delta_S + \delta_E}{2} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (19.12)$$

出射光强为

$$I = \hat{J}^2 = I_0 \cos^2 \left(\frac{\delta_C + \delta_S + \delta_E}{2} \right) = I_0 - I_0 \sin^2 \left(\frac{\delta_C + \delta_S + \delta_E}{2} \right) \quad (19.13)$$

由 (19.10) 式可知, 若 $\delta_E = 0$ (调制器电压为 0 时即可满足该条件), 当 $\delta_S + \delta_C = \pi$ 时, $I = 0$, 此时称为完全补偿。那么只要找到光强为零的位置, 则 $\delta_S = \pi - \delta_C$, 即可由补偿器 C 的相位延迟 δ_C 得到待测波片 S 的相位延迟 δ_S 。在判断消光点的位置时, 如果直接由功率计来测定, 则由于外界杂散光的影响及功率计本身响应范围的限制, 消光点的位置难以准确测定。为提高消光点位置的测量精度, 可在调制器 E 上采用正弦调制信号, 即

$$\delta_E = K \sin \omega t \quad (19.14)$$

其中, K 为常数, ω 为调制信号频率。将 (19.14) 式代入 (19.13) 式得

$$I = I_0 - I_0 \sin^2 \left(\frac{\delta_C + \delta_S}{2} + \frac{K}{2} \sin \omega t \right) \quad (19.15)$$

将这种具备形如 $I = A + B \sin^2 (C + D \sin \omega t)$ 的函数模型称为具有最优解调特性。将

(19.15) 式用 Bessel 函数展开得

$$I = \frac{I_0}{2} \left\{ 1 + \cos(\delta_S + \delta_C) \left[J_0(K) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(K) \cos(2n\omega t) \right] - \sin(\delta_S + \delta_C) \left[2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(K) \cos(2n-1)\omega t \right] \right\} \quad (19.16)$$

其中 $J_n(\chi)$ 表示 χ 的 n 阶 Bessel 函数。

从 (19.16) 式中可知, 当完全补偿时, $\delta_S + \delta_C = \pi$, (19.16) 式大括号中第三项为 0, 即信号中只剩下偶次谐波成分。由于高阶分量值很小, 处理时通常可忽略掉高阶偶次谐波, 只留下二次谐波。利用这一特性, 系统通过检波检测出倍频成分, 从而准确判断消光位置, 实现高精度测量。此时,

$$\delta_S = \pi - \delta_C = \pi - \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o) \tan \alpha \cdot \Delta L \quad (19.17)$$

(19.17) 式说明在完全补偿条件下, 从补偿器的平移量 ΔL , 即可得到待测波片的相位延迟量 δ_S 。

三、实验装置

1、测试光源组件 (632.8nm; >2mw) (一个)

- 2、 格兰-泰勒棱镜组件（消光比 100000: 1）（两个）
- 3、 $\lambda/4$ 石英零级波片（一个）
- 4、 $\lambda/2$ 石英零级波片（一个）
- 5、 索列尔-巴比涅相位补偿器（400-1000nm, $0-2\pi$ ）（一个）
- 6、 选频放大光电探测器（一个）
- 7、 光调制器（KD*P）（一个）
- 8、 调制电源组件（一个）
- 9、 准直系统组件（一个）
- 10、 工作台（一个）

四、实验内容和操作方法

- 1、 在光学防震平台上进行调试。各部件调整时保证等高共轴。
- 2、 调整激光器 L 方向，使出射光平行于台面。后续放入的探测器和各种光学元件其表面均应和光线传播方向垂直。
- 3、 放入光探测器 D 及信号处理电路。
- 4、 放入偏振棱镜 P，调整其偏振方位与激光器 L 输出光束的偏振择优方位一致，使得 P 的输出光强为极大。
- 5、 放入检偏棱镜 A，通过出射光强最小，粗调起偏 P、检偏棱镜 A 正交。
- 6、 放入 KD*P 调制器 E。KD*P 加电，通过观察输出信号的变化，细调起偏、检偏棱镜正交。当 P、A 正交时，输出交流信号频率加倍。记录此时检偏棱镜 A 的正交位置。这时从调制器出射的是一对正交的调制偏振光，偏振方向沿 KD*P 晶体的感生主轴方向。
- 7、 放入补偿器 C，使 C 处于零延迟位置以外的其他任何位置。
- 8、 绕轴旋转补偿器 C 使出射光最小，通过输出交流信号频率加倍来判断。此时补偿器快慢轴和入射正交调制偏振光的偏振方向重合。记下此时补偿器旋转的位置。
- 9、 补偿器 C 相对上述位置旋转 45 度。
- 10、 补偿器定标。由于索列尔-巴比涅相位补偿器能够提供 $0-2\pi$ 范围内任意的相位延迟量，调节补偿器 C 的平移旋钮，观察输出信号的变化，由二次谐波出现的位置，可定出 0 和 2π 相位延迟量对应补偿器的平移位置 x_1 ， x_2 。两个最小值之间的平移距离

$\Delta x = x_2 - x_1$ 作为仪器常数，随光源波长的不同而不同。可在 $0-2\pi$ 之间对补偿器线性定标。根据

$$\varphi_c = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o) \tan \alpha \cdot \Delta L = C \cdot \Delta L$$

补偿器的定标系数为： $C = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o) \tan \alpha = \frac{2\pi}{\Delta X}$ ，该系数和光源波长、补偿器楔角值及材料的折射率差有关。每次测量前应先对补偿器定标。

-
- 11、调节补偿器 C 的平移旋钮，使补偿器 C 恢复到零延迟位置 x_1 。至此，系统调试完毕，进入测量状态。
 - 12、补偿器定标，其方法和步骤参见上面第 10 步。
 - 13、放入待测元件 S。旋转 S，找到零点位置（信号倍频）。然后将 S 准确旋转 45 度（此时 S 的快、慢轴和补偿器 C 快慢轴重合）。
 - 14、将检偏棱镜 A 准确旋转 90 度，此时 P 和 A 的偏振方向平行。
 - 15、调节补偿器 C 的平移旋钮，找到零点位置（信号倍频） X' ，此时补偿器 S 的平移量为 $\Delta L = X' - X_1$ ，根据定标系数，可得到补偿器提供相位延迟为 φ_c ，待测元件 S 的相位延迟即为 $\varphi_s = \pi - \varphi_c$ 。
 - 16、对待测元件 S 不同方向，不同位置多次测量取平均。

五、注意事项

为保证实验结果的精确度，整个实验应在光学平台上进行

六、预习要求

参考以下资料，掌握调制偏振光在相位延迟测量的基本原理

- 1、宋菲君编写《信息光子学物理》，北京大学出版社，2006；
- 2、范玲，宋菲君，调制偏振光在光学相位延迟测量中的频谱分析，2007

实验 20 椭圆偏法测量薄膜厚度和折射率

引言

在近代科学技术和日常生活中，各种薄膜的应用日益广泛。因此，能够迅速和精确地测量薄膜参数是非常重要的。

在实际工作中可以利用各种传统的方法测定薄膜光学参数，如：布儒斯特角法测介质的折射率，干涉法测膜厚。另外，还有称重法、X 射线法、电容法、椭圆偏法等。其中，因为椭圆偏振法具有测量精度高，灵敏度高，非破坏性等优点，并可用于研究固体表面及其膜层的光学特性，已在光学、半导体学、凝聚态物理、生物学、医学等诸多领域得到广泛的应用。椭圆偏振测厚技术是一种测量纳米级薄膜厚度和薄膜折射率的先进技术，同时也是研究固体表面特性的重要工具。

一、实验目的

- 1、了解椭圆偏仪的构造和椭圆偏振法测定薄膜参数的基本原理。
- 2、通过对薄膜样品厚度和折射率的测量，初步掌握椭圆偏振仪的使用和数据处理的方法。

二、实验原理

1、椭圆偏法测量薄膜参数的基本原理

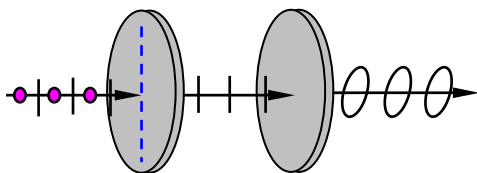


图 20.1 椭圆偏振光的产生
 P —起偏器， D — $1/4$ 波片

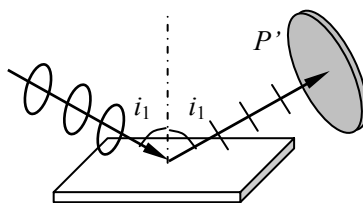


图 20.2 椭圆偏振光的产生
 F —薄膜样品， P' —检偏器

光是一种电磁波，且是横波。电场强度 \vec{E} 和磁场强度 \vec{H} 与光的传播方向构成一个右旋的正交三矢族。与光的强度、频率、位相等参量一样，偏振态也是光的基本量之一。如果已知入射光束的偏振态，当测得通过某薄膜后的出射光偏振态，就能确定该薄膜影响系统光学性能的某些物理量，如折射率、薄膜厚度等。

如图 19.1 所示，一束自然光（非偏振激光）经过起偏器后变成线偏振光，改变起偏器的方位角可以改变线偏光的振动方向。此线偏光穿过 $1/4$ 波片后，由于双折射效应分成两束光，即 o 光和 e 光。对正晶体的 $1/4$ 波片， o 光沿快轴方向偏振， e 光沿慢轴方向偏振， o 光的振动位相超前 e 光 $\pi/2$ ；对负晶体的 $1/4$ 波片情况反之。因此， o 光 e 光合成后的光矢量端点形成椭圆偏振光。当椭圆偏振光入射到待测的膜面上时，如图 20.2 所示，反射光的偏振态将发生变化，对于一定的样品，总可以找到一个起偏方位角，使反射光由椭圆偏振光变成线偏振光。这时，转动检偏器，在某个方位角下得到消光状态。这种方法被称为消

光测量法。

下面来分析如何通过椭圆方法测量薄膜折射率和厚度。图 20.3 所示为光在一均匀和各向同性的单层介质膜上的反射和折射。单层介质膜有两个平行的界面，通常，上部是空气（或真空），即折射率 $n_1=1$ 。中间是一层厚度为 d 、折射率为 n_2 的介质薄膜，下层是折射率为 n_3 的衬底，介质薄膜均匀地附在衬底上。当一束光射到薄膜面上时，在上界面和下界面形成多次反射和折射，并且各反射光和折射光分别产生多光束干涉，其干涉结果反映了膜的光学特性。

设 i_1 为光的入射角， i_2 和 i_3 分别为在上界面和下界面上的折射角。根据折射定律有

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 = n_3 \sin i_3 \quad (20.1)$$

考虑光从空气中入射到薄膜上，则 $n_1=1$ 。在下界面，考虑两束相邻的反射光，其光程差（是否有半波损失取决于 n_2 和 n_3 的关系）

$$\chi = n_2(AC + CB) - AD \quad (20.2)$$

因为 $AC = CB = \frac{d}{\cos i_2}$ ， $AD = AB \sin i_1 = 2d \sin i_1 \cdot \tan i_2$ ，所以

$$\chi = \frac{2n_2 d}{\cos i_2} - 2d \sin i_1 \cdot \tan i_2 = 2n_2 d \cos i_2 \quad (20.3)$$

则任意相邻两束反射光之间的位相差

$$2\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \chi = \frac{4\pi}{\lambda} n_2 d \cos i_2 = \frac{4\pi d}{\lambda} \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i_1} \quad (20.4)$$

式中， λ 为真空中的波长， d 和 n_2 为介质膜的厚度和折射率。光波的电矢量可以分解成在入射面内振动的 p 分量和垂直于入射面振动的 s 分量。由菲涅尔公式

$$\begin{cases} r_{1p} = (n_2 \cos i_1 - n_1 \cos i_2) / (n_2 \cos i_1 + n_1 \cos i_2) \\ r_{1s} = (n_1 \cos i_1 - n_2 \cos i_2) / (n_1 \cos i_1 + n_2 \cos i_2) \\ r_{2p} = (n_3 \cos i_2 - n_2 \cos i_3) / (n_3 \cos i_2 + n_2 \cos i_3) \\ r_{2s} = (n_2 \cos i_2 - n_3 \cos i_3) / (n_2 \cos i_2 + n_3 \cos i_3) \end{cases} \quad (20.5)$$

式中， r_{1p} 、 r_{1s} 和 r_{2p} 、 r_{2s} 分别为 p 和 s 分量在上界面和下界面上一次反射的反射系数。若用 E_{ip} 和 E_{is} 分别代表入射光电矢量的 p 和 s 分量，用 E_{rp} 及 E_{rs} 分别代表反射光电矢量的 p 分量之和及 s 分量之和，则膜对两个分量的总反射系数 R_p 和 R_s 为

$$R_p = \frac{E_{rp}}{E_{ip}} = \frac{r_{1p} + r_{2p} e^{-i2\delta}}{1 + r_{1p} r_{2p} e^{-i2\delta}} \quad (20.6)$$

$$R_s = \frac{E_{rs}}{E_{is}} = \frac{r_{1s} + r_{2s} e^{-i2\delta}}{1 + r_{1s} r_{2s} e^{-i2\delta}} \quad (20.7)$$

显然，总反射系数比 R_p/R_s 是一个复数，在椭圆偏振法测量中，通常引入 $\tan \psi$ 和 Δ 表示其模和幅角，即

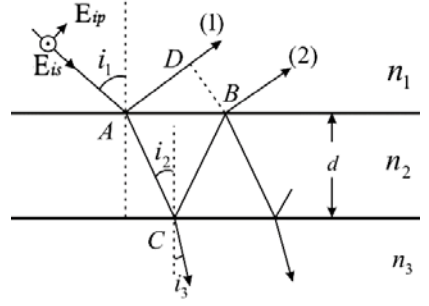


图 20.3 光的反射和折射

$$\tan \psi \cdot e^{i\Delta} = \frac{R_p}{R_s} = \frac{r_{1p} + r_{2p} e^{-i2\delta}}{1 + r_{1p} r_{2p} e^{-i2\delta}} \frac{1 + r_{1s} r_{2s} e^{-i2\delta}}{r_{1s} + r_{2s} e^{-i2\delta}} \quad (20.8)$$

上式简称为椭偏方程，其中的 ψ 和 Δ 称为椭偏参数（由于具有角度量纲也称椭偏角）。

由式（20.1）、（20.5）、（20.8）可以看出，参数 ψ 和 Δ 是 n_1 、 n_2 、 n_3 、 λ 、 d 和 i_1 的函数（ i_2 和 i_3 可用 i_1 表示）。其中 n_1 、 n_3 、 λ 和 i_1 可以是已知量，如果能从实验中测出 ψ 和 Δ 的值，原则上就可以算出薄膜的折射率 n_2 和厚度 d ，这就是椭圆偏振法测量的基本原理。

2、 ψ 和 Δ 的物理意义

用复数形式表示入射光（下标 i ）和反射光（下标 r ）的 p 和 s 分量，即

$$E_{ip} = |E_{ip}| e^{i\theta_p}, \quad E_{is} = |E_{is}| e^{i\theta_s} \quad (20.9)$$

$$E_{rp} = |E_{rp}| e^{i\theta_p}, \quad E_{rs} = |E_{rs}| e^{i\theta_s} \quad (20.10)$$

式中各绝对值为相应电矢量的振幅，各 θ 值为相应界面处的位相。由式（20.8）、（20.9）和（20.10）可得

$$\tan \psi \cdot e^{i\Delta} = \frac{|E_{rp}|}{|E_{rs}|} \frac{|E_{is}|}{|E_{ip}|} e^{i[(\theta_{rp}-\theta_{rs})-(\theta_{ip}-\theta_{is})]} \quad (20.11)$$

比较等式两端即可得

$$\tan \psi = \frac{|E_{rp}|}{|E_{rs}|} \frac{|E_{is}|}{|E_{ip}|} \quad (20.12)$$

$$\Delta = (\theta_{rp} - \theta_{rs}) - (\theta_{ip} - \theta_{is}) \quad (20.13)$$

式（20.12）、（20.13）表明，参量 ψ 与反射前后 p 和 s 分量的振幅比有关，参量 Δ 与反射前后 p 和 s 分量的位相差有关。可见， ψ 和 Δ 直接反映了光在反射前后偏振态的变化。这样若测得入射光和反射光中两分量的振幅比和相位差，则可求得椭偏参数 ψ 和 Δ 。

3、 ψ 和 Δ 的测量原理

椭偏参数 ψ 和 Δ 是可以通过实验测量的量。为了使问题简化，可以在实验中使用入射光为等幅椭偏光，即 $|E_{ip}|/|E_{is}|=1$ ，则式（20.12）变为

$$\tan \psi = |E_{rp}|/|E_{rs}| \quad (20.14)$$

通过调整仪器，使反射光成为线偏光，即 $\theta_{rp}-\theta_{rs}=0$ 或 π ，则式（20.13）变为

$$\Delta = -(\theta_{ip} - \theta_{is}) \quad \text{或} \quad \Delta = \pi - (\theta_{ip} - \theta_{is}) \quad (20.15)$$

可见，这时 $\tan \psi$ 只是反射光 p 分量和 s 分量的幅值比（图 20.4 所示），而 Δ 只与反射前光的 p 波和 s 波的相位差有关。

椭圆偏振仪（简称椭偏仪）的光路原理如图 20.5 所示。氦氖激光器发出波长为 632.8 nm 的自然光，先后通过起偏器、1/4 波片入射在待测薄膜样品上，反射光通过检偏器射入光电

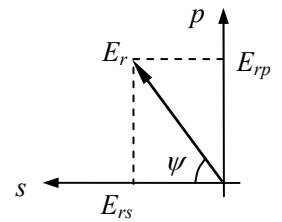


图 20.4 反射光的 p 和 s 分量

检测器。在图 20.5 中的坐标系中, x 轴和 x' 轴均在入射面内且分别与入射光束或反射光束的传播方向垂直, 而 y 和 y' 轴则垂直于入射面。如前所述, p 和 s 分别代表平行和垂直于入射面的二个方向, 因此 x 轴和 x' 轴分别对应于入射光和反射光的 p 方向, y 轴和 y' 轴分别对应于入射光和反射光的 s 方向。图 20.5 中, t 代表起偏器的偏振方向, 与 x 轴夹角为 P ; t' 代表检偏器的偏振方向, 与 x' 轴夹角为 A ; f 代表 $1/4$ 波片的快轴方向。

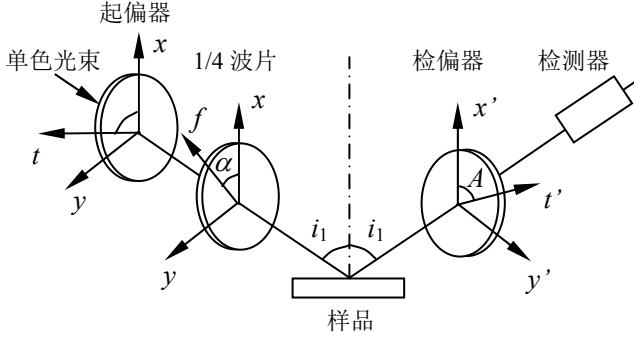


图 20.5 光路原理

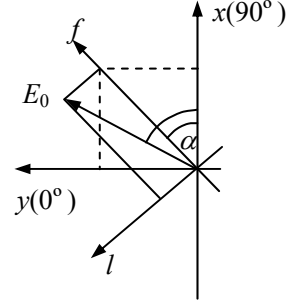


图 20.6 $1/4$ 波片快轴取向

无论起偏器的方位如何, 经过它获得的线偏振光再经过 $1/4$ 波片后一般成为椭圆偏振光。为了在膜面上获得 x 和 y 二分量等幅的椭圆偏振光, 只须转动 $1/4$ 波片, 使其快轴方向 f 与 x 方向的夹角 $\alpha = \pm\pi/4$ 即可。图 20.6 中, E_0 为通过起偏器后的电矢量, 设 E_0 沿快轴方向 f 的分量为 E_f , 沿慢轴方向的分量为 E_l , 通过波片后 E_f 的位相超前 $E_l \pi/2$, 如图 20.6 所示。因此有

$$E_f = E_0 \cos(P - \frac{\pi}{4}) e^{i\pi/2} \quad (20.16)$$

$$E_l = E_0 \sin(P - \frac{\pi}{4}) \quad (20.17)$$

将透射后的 E_f 和 E_l 沿 x 、 y 方向投影, 可得

$$E_x = E_{ip} = E_f \cos \frac{\pi}{4} - E_l \sin \frac{\pi}{4} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 e^{i(P + \frac{\pi}{4})} \quad (20.18)$$

$$E_y = E_{is} = E_f \cos \frac{\pi}{4} + E_l \sin \frac{\pi}{4} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 e^{i(\frac{3\pi}{4} - P)} \quad (20.19)$$

由以上两式可知, 当波片快轴方向 f 取 $\pi/4$ 时, 无论起偏角 P 为多少, E_{ip} 和 E_{is} 两分量大小始终相等, 均为 $\frac{\sqrt{2}}{2} E_0$, 满足条件 $|E_{ip}|/|E_{is}| = 1$ 。而位相差

$$\theta_{ip} - \theta_{is} = (P + \frac{\pi}{4}) - (\frac{3\pi}{4} - P) = 2P - \frac{\pi}{2} \quad (20.20)$$

同理, 当波片快轴方向 f 取 $-\pi/4$ 时有 $\theta_{ip} - \theta_{is} = \frac{\pi}{2} - 2P$ 。

由图 20.7 可以看出, 当检偏器的偏振方向 t' 与合成的反射线偏振光束的电矢量 E_r 垂直时, 反射光在检偏器后消光, 此时有

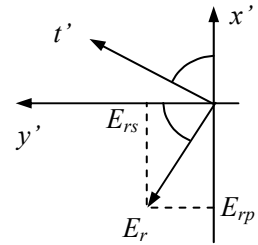


图 20.7 检偏器透光轴的取向

$$\frac{|E_{rp}|}{|E_{rs}|} = \tan A \quad (20.21)$$

由式 (20.14)、(20.15)、(20.20) 和 (20.21) 有

$$\begin{cases} \tan \psi = \tan A \\ \Delta = (\theta_{rp} - \theta_{rs}) - (2P - \frac{\pi}{2}) \\ \theta_{rp} - \theta_{rs} = 0 \quad \text{或} \quad \pi \end{cases} \quad (20.22)$$

可见 Δ 可从起偏器的方位角 P 算出, ψ 可由检偏器的方位角 A 得到。

因此, 在图 20.5 的装置中只要使 1/4 波片的快轴 f 与 x 轴的夹角为 $\pm\pi/4$, 然后测出检偏器消光时起偏器和检偏器方位角 (P, A), 便可求出对应的 (ψ, Δ), 从而完成总反射系数比的测量。测量中, 为了提高测量的准确性, 常常不是只测一次消光状态所对应的 P 和 A 值, 而是将 1/4 波片快轴相对于 s 方向置 $\pi/4$ 时的两个消光位置 (反射后 p 和 s 光的位相差为 0 或为 π 时均能合成线偏振光) 和置 $-\pi/4$ 的两个消光位置所对应的四组 (P_1, A_1), (P_2, A_2), (P_3, A_3) 和 (P_4, A_4) 值测出, 经处理后再算出 Δ 和 ψ 值。

尽管原则上由 Δ 和 ψ 能算出 n_2 和 d , 但实际上要直接解出 (n_2, d) 和 (ψ, Δ) 的函数关系式是很困难的。一般将 (n_2, d) 和 (ψ, Δ) 的关系制成数值表或列线图而求得 n_2 和 d 值, 编制数值表的工作通常由计算机来完成。目前日益广泛地采用计算机直接处理数据。

另外, 求厚度 d 时, 当 n_1 和 n_2 为实数时, 式 (20.4) 中的 i_2 为实数, 两相邻反射光线间的位相差亦为实数, 其周期为 2π , 2δ 可能随着 d 的变化而处于不同的周期中。若令 $2\delta = 2\pi$ 时对应的膜层厚度为第一个周期厚度 d_0 , 由 (20.4) 式可以得到

$$d_0 = \frac{\lambda}{2\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i_1}} \quad (20.23)$$

若膜厚大于 d_0 , 可用其它方法 (如干涉法) 确定所在的周期数 m , 则总膜厚是

$$D = (m-1)d_0 + d \quad (20.27)$$

三、实验装置和操作方法

1、仪器的组成和结构

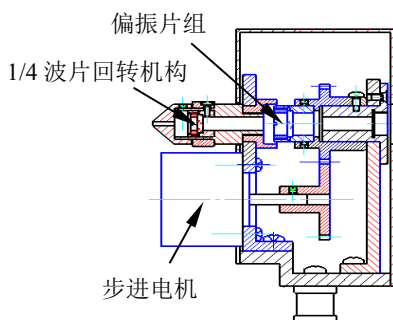


图 20.8 起偏机构

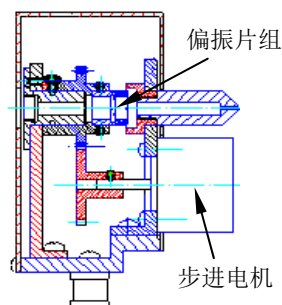


图 20.9 检偏机构

椭圆偏振仪是集光、机、电于一体的仪器。椭圆偏振仪主要由光源机构、起偏机构、检偏机构、接收机构、主机机构和装卡机构共六部分组成。

- (1) 光源机构：主要由 150mm，功率 0.8mW，波长为 632.8nm 的氦氖激光器等组成。
- (2) 起偏机构：主要由步进电机、偏振片机构、1/4 波片机构等组成，如图 20.8 所示。通过起偏机构，首先使入射到其上的自然光（非偏振激光）变成线偏振光出射，通过 1/4 波片又使线偏振光变成椭圆偏振光（波片位置出厂时已调节好，无须调节）。起偏机构可测得起偏角。
- (3) 检偏机构：主要由步进电机、偏振片等组成，如图 20.9 所示，其结构形式与起偏机构相似，通过检偏机构可测出检偏角。
- (4) 接收机构：主要由光电倍增管、支架、底板及检偏度盘副尺等组成，如图 20.10 所示。
- (5) 主体机构：主要由大刻度盘、上回转托盘、下回转托盘及箱体等组成，如图 20.11 所示。下回转托盘上固定有光源机构和起偏机构，可绕大刻度盘上的下悬立轴回转。上回转托盘上固定有检偏机构和接收机构，可绕大刻度盘上的下悬立轴回转。大刻度盘通过三个大刻度盘支柱固定在箱体上，其上固定装卡机构以装卡被测样品。箱体由箱体上面板、底板及底脚等组成。

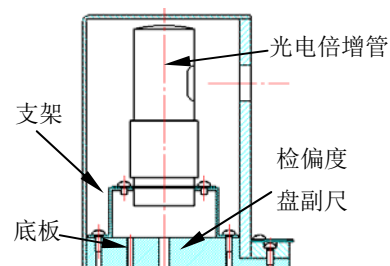


图 20.10 接收机构

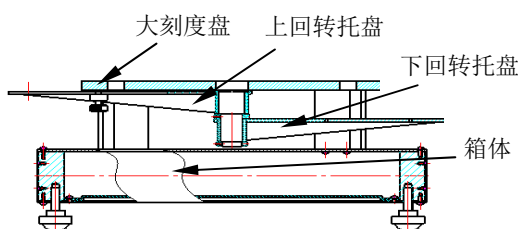


图 20.11 主体机构

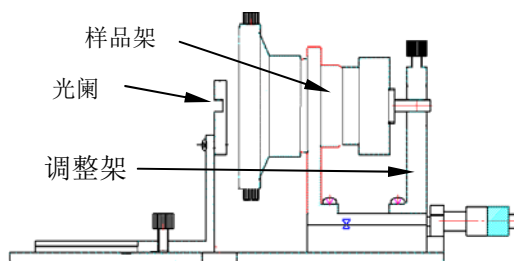


图 20.12 装卡机构

- (6) 装卡机构：装卡机构主要由样品架、调整架、光阑机构等组成，如图 20.12 所示。样品架可以夹持直径 $\phi 10 \sim \phi 14$ ，厚度 $\leq 13\text{mm}$ 的被测样品。调整架可对被夹持的样品作上下俯仰、左右偏摆、前后移动的三维调节。光阑机构置于被测样品表面处，起限制其它杂散光的进入。光阑机构可前后移动，以方便被测样品的装卡。

2、仪器的性能指标

该仪器主要性能指标如下：

测量范围：薄膜厚度范围：1nm~4000nm；

折射率范围：1.05~2.50；

偏振器方位角范围： $0^\circ \sim 180^\circ$ ；

偏振器步进角： $0.014^\circ/\text{步}$ ；

测量膜厚和折射率重复性精度分别为 $\pm 0.5\text{nm}$ 和 ± 0.005 ；

入射角连续调节范围： $30^\circ \sim 90^\circ$ ；精度为 0.05° ；

入射光波长：632.8nm；

光学中心高度：80mm；

允许样品尺寸： $\phi 10 \sim \phi 140\text{mm}$ ，厚度 $\leq 13\text{mm}$ ；

3、操作方法

- (1) 开启主机电源，点亮氦氖激光器（预热 30 分钟后再测量为宜）。
- (2) 将电控箱调节旋钮逆时针旋到头，联接好主机与电控箱间的各种数据线，开启电控箱电源。联接主机与 PC 机间的 USB 线。
- (3) 装卡被测样品。（注意：旋紧吸盘拉杆时要视被测样品直径和质地而适当调节，切记不可用力过大，使样品损坏）。
- (4) 选定入射角 i （如 70° ），调节起偏机构悬臂和检偏机构悬臂，使经样品表面反射后的激光束刚好通过检偏器入光口。
- (5) 顺时针旋转电控箱调节旋钮，将读数调到 150 伏左右（视仪器情况而定）即可。
- (6) 双击桌面图标，运行程序。点击‘进入’按钮，再点击‘实验’，选择实验类型（通常选择第一类），再点击‘实验’，填入相应参数，‘确定’后，点击‘测量’，填入相应参数点击‘确定’。此时，如果一切准备就绪，就可以点击‘测量’，开始实验。等待测量结束后，选择数据平均次数，点击‘确定’。现在窗体会回到进入时的对话框，同时测量数据已自动填入参数栏内，点击‘测量’旁的‘计算’按钮。程序将自动计算出测量结果。点击‘确定’，第一组数据测量完毕。（提示：在实验过程中，如果扫描曲线的谷点过低，接近‘0’点，此时可适当把电控箱电压上调一些。）
- (7) 重新设定一个入射角 i ，重复上面的过程，测量第二组结果。
- (8) 两次测量完毕后，点击‘折射率拟合’，在弹出对话框中选择拟合类型。点击‘确定’，得到薄膜的真实厚度及折射率。

四、实验内容

测量硅衬底上二氧化硅膜的折射率 n_2 和厚度 d 。

选择入射角 70° 和 65° 分别测量（ ψ , Δ ），其他测量设置均选为：扫描次数 6 次，数据采集次数 20 次，增益 1。

五、注意事项

- 1、激光光源点亮后会发出较强的激光，对人眼能造成一定的伤害，故在使用中，绝对禁止直视光源。
- 2、调整架可三维调节，要轻轻操作。旋紧吸盘拉杆时要视被测样品直径和质地而适当调节，切记不可用力过大，使样品损坏。
- 3、光阑机构可前后移动，放样品时应将光阑移开一段距离，以方便被测样品的装卡，装好样品后，再将光阑移到样品前适当位置。

六、预习要求

1、复习和资料阅读

复习关于“相互垂直同频的简谐振动合成”和“光的偏振”的内容，熟悉相位条件对合成影响，以及偏振片、双折射的偏振特点、波片等方面的知识，掌握椭圆偏振光形成的条件。认真阅读实验讲义，根据实验内容，查阅有关椭圆偏振仪测量薄膜厚度和折射率方面的文献资料（3 篇以上），掌握消光法的基本思想，理解椭偏参数与被测参数（薄膜厚度、

折射率等)的关系,以及偏振片旋转过程中实验现象和测量原理。

2、原理描述和讨论

实验前进行实验原理的讨论,由每位实验者描述、讲解实验的基本原理和实验的内容。

3、偏振光实验

实验前进行预备性实验,实验者自主设计并观察线偏振光、椭圆和圆偏振光等,并进行识别。

六、思考题

- 1、什么是1/4波片快慢轴? 1/4波片的作用是什么?
- 2、一般情况下,两个同频、振动方向相互垂直的谐振动合成是什么轨迹? 满足什么相位关系时合成为线轨迹? 什么相位关系时合成为正椭圆轨迹?
- 3、如何实现在膜面上获得x和y二分量等幅的椭圆偏振光?
- 4、椭偏法测量薄膜厚度的基本原理是什么?
- 5、用椭偏仪测薄膜的厚度和折射率时,对薄膜有何要求?

实验 21 激光全息振动分析

引言

振动模态（也称振型）分析是科学研究和工程中常遇到的一个科学问题，激光全息干涉计量技术常用于记录和分析物体的机械振动模态。这对于机械构件的设计具有重要意义。

一、实验目的

- 1、掌握用激光全息干涉计量技术测量物体振幅的原理
- 2、学会用激光全息干涉法测平面物体的振幅

二、实验原理



图 21.1 物体的振动模态分析

先以一个简单的例子介绍正弦振动物体的时间平均全息图的基本特征。为此选择一个一端固定其余边自由的悬臂梁作为被测物体，该悬臂梁用沿垂直于它表面的 z 方向传播的平面波照明，见图 21.1。该物体在其平衡位置附近作正弦振动，物体上每个点的振动位移为

$$z(x, y) = Z(x, y) \sin \omega t \quad (21.1)$$

式中 $Z(x, y)$ 是在 y 位置机械振动的振幅； ω 是振动的圆频率。设由静止在平衡位置上的悬臂梁散射到全息图上的光的复振幅为

$$U(x, y) = a(x, y) \exp[i\phi(x, y)] \quad (21.2)$$

如果从点光源发出的光传播到静止物体上某点经过的距离为 l_0 ，则当物体振动时，光从该点返回全息图所通过的距离为

$$l_o - 2Z(x, y) \sin \omega t, \quad (21.3)$$

相应的相位差为

$$\delta = \Delta\phi(x, y, t) = (2\pi / \lambda) 2Z(x, y) \sin \omega t. \quad (21.4)$$

因此，在任意时刻全息图平面上的复振幅为

$$U_o(x, y, t) = a(x, y) \exp \left\{ i \left[\phi(x, y) + \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) Z(y) \sin \omega t \right] \right\} \quad (21.5)$$

将全息干版同时对 $U(x, y, t)$ 和参考光曝光，曝光时间为一个振动周期 T ，就可记录时间平均全息图。当这张全息图经显影定影并用参考光照明再现时，再现光的复振幅与曝光时间间隔 T 内 $U_o(x, y, t)$ 的时间平均成正比

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} \int_0^T a(x, y) \exp \left\{ i \left[\phi(x, y) + \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) Z(y) \sin \omega t \right] \right\} \\ = U_o(x, y) \frac{1}{T} \int_0^T \exp \left[i \left(\frac{4\pi}{\lambda} Z(y) \sin \omega t \right) \right] dt \end{aligned} \quad (21.6)$$

其再现光强为

$$I = U^2(x, y) \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T \exp \left[i \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) Z(y) \sin \omega t \right] dt \right\}^2 \quad (21.7)$$

因 $T \gg 1/\omega$

故有

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \exp \left[i \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) Z(y) \sin \omega t \right] dt = J_0 \left[\left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) Z(y) \right] \quad (21.8)$$

将其代入式 (21.7) 后，式 (21.7) 变为

$$I = a(x, y)^2 J_0^2 \left[\left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) Z(y) \right] \quad (21.9)$$

式中的相位差 $\left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) Z(y)$ 可记为 δ ，这样式 (21.9) 变为

$$I = a(x, y)^2 J_0^2[\delta] \quad (21.10)$$

可见，) 式 (21.10) 表征了时间平均全息干涉图的基本特征，即再现的时间平均全息干涉图

（虚像）被由零阶贝塞尔函数平方描述的条纹所调制。该函数曲线如图 21.2 所示。干涉图上的暗条

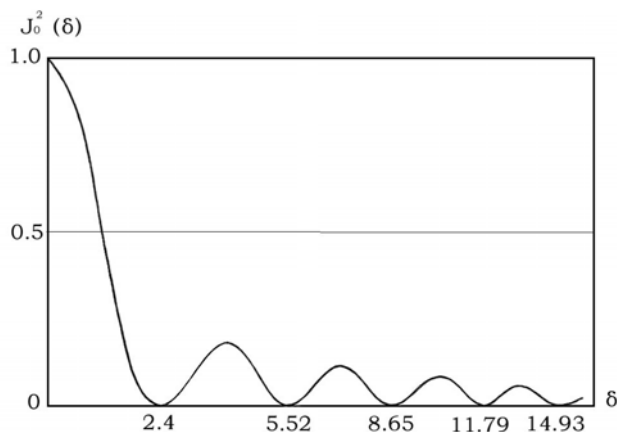


图 21.2 正弦振动时间平均全息干涉条纹函数 $J_0^2(\delta)$ 曲线

纹的中心就在以物面上其振幅 $Z(y)$ 能使式 (21.9) 中的贝塞尔函数为零的各点处。因此, 物体的振幅可根据振动体振幅引起的相位差应等于某级序暗条纹处贝塞尔函数为零的宗量值关系求出。

三、实验装置

He-Ne 激光器, 光学平台, 光学组件, 全息干版, 冲印设备。。

四、实验内容和操作方法

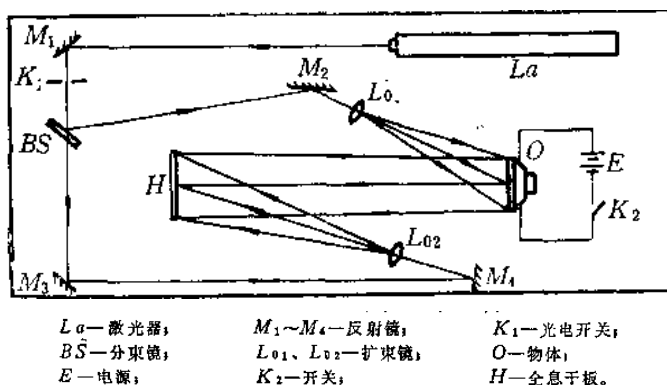


图 21.3 实验光路

全息测振的方法分两大步: 即记录实时全息图和时间平均全息图。记录实时全息图的目的是为了判断物体的振型。测量光路见图 21.3, 具体测量方法如下。

1、记录实时全息图并找出所要分析的振型

(1) 现按图排好光路。同一光路中的物光和参考光应等光程。参考光和物光的比例应在 3:

1---10: 1 左右。参考光和物光的夹角要合适(约 30°)。试件是一块金属板, 表面用白漆涂白, 竖直放置, 其一边夹在虎钳上, 其它边自由。采用声激振器(或压电晶片)对试件激振。用实时全息图拾振, 判断振型。

- (2) 关闭曝光定时器, 在实时全息片夹上装上一块干版, 药面对着物体,
- (3) 开启曝光定时器, 在物体静止状态下, 使光路中的物光和参考光对干版曝光。
- (4) 关闭曝光定时器, 从实时全息片架上小心翼翼地取下曝好光的干版(与片架同时取下, 不要触动和改变干版与底片架之间的相对位置), 将其置于显影定影液中作显影定影处理, 则处理好的干版就成为一张实时全息图。
- (5) 开启曝光定时器, 将处理好的还未干燥的实时全息图重新装到实时干版架的原来位置上, 光路仍处于记录实时全息图的原来状态, 即原来的物光还照在物体上, 原来的参考光照仍在处理好的实时全息图上。这时通过干版可看到调制条纹(由冲洗时乳剂层厚度改变而引成)。
- (6) 通过调节音频信号发生器的频率, 改变声激振器的振动频率, 通过实时全息图注意观察调制条纹的分布情况, 当调到使调制条纹向金属平板的夹持部分平移并出现平行条纹时, 这就调出了一弯振型。调节音频信号发生器输出信号的电压幅度, 使平行条纹不致太密。

2、拍摄时间平均全息图

- (1) 取下实时全息图, 在声激振器不停振, 并保持已调出的振型的条件下, 关闭曝光定时器, 在时间平均全息图片架上装上另一张干版。
- (2) 开启曝光定时器, 使光路 1 中的物光和参考光对干版曝光。
- (3) 在干版架上取下曝好光的干版, 将其作显影和定影处理, 并加以晾干, 则该干版就成为一张记录了平均全息图的干版。
- (4) 将晾干了了的干版重新夹到干版架上, 用光路中的参考光照射, 则干版可再现出时间平均干涉图。
- (5) 作图像处理, 测出试件上被测的条纹级数 N 和查出对应的贝塞尔函数宗量。

注: 除了用实时全息图判断振型外, 还可用观察李萨如图形和实时全息图相结合的方法来判断振型。试件是一块合金铝质矩形薄板, 沿长度方向竖直放置, 其上端自由, 下端夹在台虎钳上。试件背面用 502 胶粘贴上两片压电晶体, 一片与音频讯号发生器相联, 用作激振; 另一片与示波器 Y 轴输入相接, 用作拾振。与此同时, 音频讯号发生器的输出信号还应接到示波器的 X 轴输入, 藉此

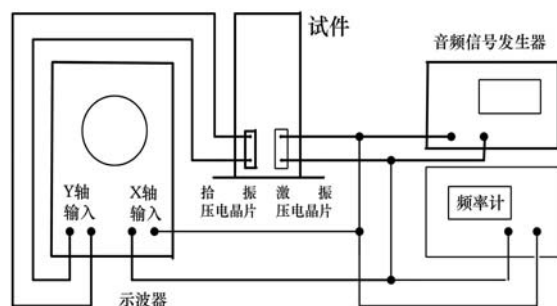


图 21.4 实验系统

观察李萨如图形, 如图 21.4 所示。当试件处于共振状态时, 示波器上可以看到一个正椭圆。同时, 实时全息图再现像上的调制条纹, 向试件的夹持边平移, 出现平行条纹, 则就调出了

一弯振型。

压电晶片是钛酸钡陶瓷晶片，加上交变电压后，它会产生面内收缩，导致机械振动，从而可激励试件振动；感受到加速度或机械变形时，它会产生电压，可以用以拾振，它有使用方便、噪声低、频率响应宽等优点。压电陶瓷片两面镀银，可以在其上焊接导线。

五、注意事项

- 1、实验中切勿直视激光，以免对眼睛造成伤害。即使在激光器关闭下，也不能用眼睛窥视激光器窗口。
- 2、膜片振动最强的时刻必须落在曝光时间之内，为此应先开始曝光，后接通信号发生器。
- 3、干版的显影时间应控制在干版特性曲线的线性部分。

六、预习要求

根据实验内容，查阅《信息光学实验基础》、《现代光学实验教程》、《光信息科学与技术专业实验》等文献资料，熟悉和掌握激光全息振动实验的相关知识。

七、思考题

- 1、请叙述激光全息测物体振幅的基本要点。
- 2、如何定义时间平均全息干涉图上的条纹级数？
- 3、为什么在拍摄一般的全息图时，要求物体不能有任何移动，而在本实验中，被摄物可以以固定的频率和不变的振幅振动，再现时仍可以看到被摄物？
- 4、时间平均全息图能给出物体的振型，但不能给出振动的瞬态分布。如果要将振动物体任一瞬态波面与静止波波面相比，实验时应作如何改进？

实验 22 全息无损检测

(I)

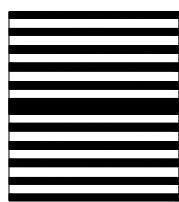
一、实验目的

- 1、掌握二次曝光法、实时观察法检测物体表面及内部缺陷的基本原理；
- 2、了解全息无损检验中的一些特殊的试验技术，如加载方法的选择，条纹控制技术，缺陷的定量分析及实时观察法中的光强匹配问题；

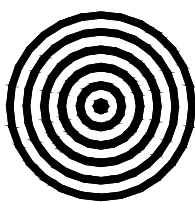
二、实验原理

无损检测是指在材料或产品缺陷的检验过程中不需要破坏或明显改变被测元件的一种检测方法。通常这种检验的目的是要确定元件中存在的裂缝，空隙，脱胶，脱层，砂眼，残余应力等缺陷的为位置和尺寸。

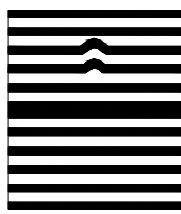
全息照相术可以准确地记录物光波的振幅和位相，再现时又能够得到逼真的原物体的虚像或其共轭像。这个虚像是被摄物体的波前再现。全息无损检测就是对物体变形前后的两状态的波前进行比较，根据再现时物体像表面上形成的干涉条纹来判定缺陷的位置和大小。全息无损检验通常采用二次曝光法。它是先拍摄一张待检物体在原始状态（未加载）下的全息图，然后通过一定的加载方式使物体发生微量形变，并在同一张全息干板上进行第二次曝光，记录变形后的物体的全息图。全息干板经常规处理后用原参考光再现，可以看到物体像上附加有一组干涉条纹。该干涉条纹是物体形变前后两列物光产生干涉形成的。当被检验物体表面无缺陷时，干涉条纹呈现有规则的变化，例如是跟巨大致相等的平行条纹或是一组同心圆（如图一）。这种有规律的条纹是由于物体均匀形变而引起的，一般称为背景条纹。但是，当被检验物体内部或表面存在缺陷时，则在物体表面的相应位置上会出现干涉条纹的异常情况，条纹的走向不再是均匀变化，而出现突变（如图二）。这种条纹称为特征条纹。



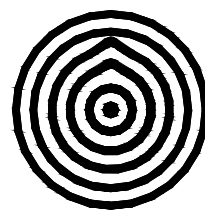
(a)



(b)



(c)



(d)

图 22.1 二次曝光物体无缺陷再现全息图

图 22.2 二次曝光物体有缺陷再现全息图

全息无损检验通常采用实时观察法，和二次曝光法。

1、**实时观察法**是把记录有待测物体的初始像信息的全息图精确复位，然后按照原光路

再现，这样可以在全息图的透射光中看到物体上重叠着它的再现像。实际上，由于干板不可能瓦努乔安复位或乳胶收缩，不加载时，仍能在物体表面上看到一些粗大的条纹。当对物体加载时，通过全息图可实时观察条纹的变化，从而可以判断缺陷的位置和大小。采用实时法，可以不必拍摄一系列的二次曝光全息图，通过实时观察还可以较准确地掌握加载量和时机，以确定缺陷的位置和大小。此法方便可靠，可以提高效率。

在实时法全息无损检测中，为了防止漏检，常常需要对物体加以较大的载荷，以便使缺陷对应的表面产生突变。这样，物体的整个表面也产生了较大的变形，干涉条纹也随之变密，缺陷则常常会被掩盖。此时，可以采用条纹控制技术，将密集的条纹展宽，以便观察缺陷的位置和大小。此外，当家测大尺寸物体时，由于物体表面形变不均，而条纹间距又反比于受理范围直接的四次方，有些部位的条纹可能太密，用肉眼无法看清缺陷造成的扰动。这时，可以采用分区扫描的办法分别展宽各区域的条纹，以便搜索缺陷的位置和大小。条纹展宽的方法是：在实时观察中，稍微改变物光路中聚光镜 L 的轴向位置或通过摆动条纹控制反射镜 M_2 改变物光的照射方向，以使物光波前的方位有一微小改变，从而使物体波前与再现像波前较好地重合，使整个物体表面上的干涉条纹变宽。

2、二次曝光法是先对初始状态（未加载）的待检物体拍摄一张三维全息图，然后在光路不变的情况下对物体加载使其产生变形，在同一干板上再曝光一次。这样，物体在两种状态下的信息就记录在同一块全息干板上。全息图再现时，两列物光波产生干涉，于是在再现的物体像上就出现了干涉条纹。

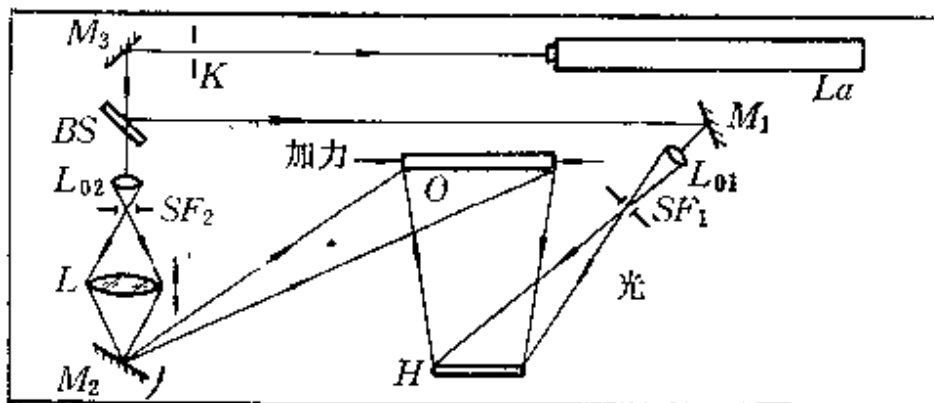
加载方法有很多，要根据备件物体的状态来决定。在全息无损检测中一般常用的加载方法有机械加力法，加热法，压差加载法等等。机械加力法是通过简单的拉伸，压缩，弯曲或施加点载荷的方式使物体变形，适用于各种复合材料的裂变实验。加热法一般是用红外灯，电吹风，电热器，微波烘烤等对被检验物体加热，是指产生热变形，这种方法简单可行。压差加载法是使物体内外产生一定的压力差，从而使之承受载荷。产生压力差的方法有表面真空室吸附法，真空室法和内部充气法。表面真空吸附法是将被检物体作为真空室的一壁，使其两表面产生压力差，适用于材料本身抗弯强度较高，表面平直的物体。真空室法是将物体周围密封后置于一真空室中，利用材料内部残留的空气与真空室间的压力差，灵敏地显露内部缺陷。内部充气法是利用加压系统对物体内部充以几个到上百个大气压，使其产生弹性形变。本实验中采用的是加热法和真空室法。

三、实验装置和操作方法

1、仪器的组成和结构

全息防震平台，激光器，反射镜（若干），分束镜，干板架，全息干板，照度计。

2、实验光路



L_a —激光器;
 BS —分束镜;
 E —电源;
 $M_1 \sim M_4$ —反射镜;
 L_{01} 、 L_{02} —扩束镜;
 K_2 —开关;
 K_1 —光电开关;
 O —物体;
 H —全息干板。

图 22.3 实验光路图

四、实验内容

- 1、将激光器输出的光升到与曝光定时器、分束镜 BS 、反射镜 M_1 、 M_2 、 M_3 、物体 O 、干版 H 调至等高。
- 2、按光路图排光路。先排参考光路，在 M_2 与 H 之间加扩束镜，使扩束的光束直径正好落在干版上，测量参光光程。
- 3、排物光光路，使物光光程等于参考光光程相等，若不等，可前后移动 L_{01} 或 L_{02} 。扩束越大，光强越小，反之越大。然后加入扩束镜。
- 4、在 H 处放一块毛玻璃，用照度计测量挡住参考光量物光，记下数值；再挡住物光，量参考光，记下数值。让物光与参考光光强之比在 $1:2 \sim 1:5$ 之间，夹角在 $20^\circ \sim 50^\circ$ 之间。
- 5、选择适当的加载方法。本实验用蜂窝板为待检物体，加载方式为加热法和真空室加压法。
- 6、光路排好后，检查各光具座的稳定性（如螺钉是否拧紧，磁座是否吸住等）。检查后关掉曝光定时器开关，装上干版（底片）稳定 $2 \sim 3$ 分钟进行第一次曝光（即物体在静止，没加任何外力的光波）。曝光时间以物体反光强弱，激光器的功率大小而定。
- 7、实时法检测：对未加载的物体拍摄一张全息图，在原地经显影，定影等常规处理后。等晾干后，观察物体表面条纹，并加载荷。当条纹最清晰时，为最佳加载量。
- 8、二次曝光法检测：换上一块未经曝光的全息干板，在最佳加载下进行第一次曝光，然后在再去掉载荷进行第二次曝光，得到二次曝光全息图。将处理好的全息干版放在干版架上，挡住物光，用原参考光进行照明。在原物体上会看到衍射条纹，物体有缺陷的地方，记录下缺陷的大小与衍射条纹的位置。

五、注意事项

- 1、实验中切勿直视激光，以免对眼睛造成伤害。即使在激光器关闭下，也不能用 眼

睛窥视激光器窗口。

- 2、干版的显影时间应控制在干版特性曲线的线性部分。

六、预习要求

根据实验内容，查阅《信息光学实验基础》、《现代光学实验教程》、《光信息科学与技术专业实验》等文献资料。

七、思考题

- 1、叙述全息无损检验的基本原理，分析这种技术的优点和局限性。
- 2、若实验中所用的分束镜的分束比不是连续可调的，而全息干板位置上两束光的强度比不满足 1:1 的要求，该利用哪些手段进行调节才能达到要求？

实验 21 全息无损检测

(II)

一、实验目的

- 1、加深二次曝光法和实时观察法全息干涉基本原理的理解；
- 2、应用拍摄全息图，定性分析物体受力及形变情况。

二、实验原理

全息应力分析通常采用实时观察法，和二次曝光法。

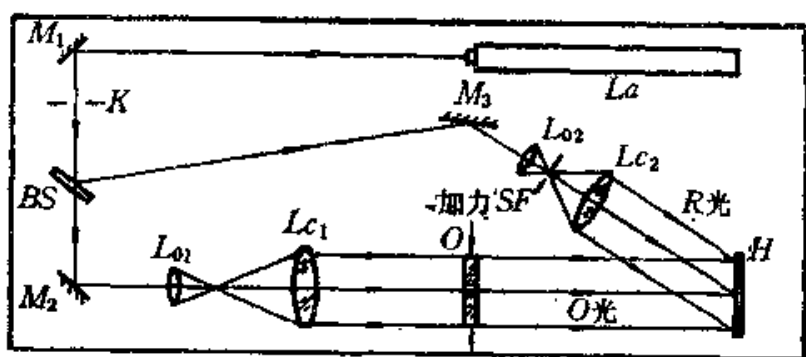
- 1、实时观察法是先对物体在初始状态下（常态或受力稳定后）曝光一次，对干板进行原位处理或取下处理后精确复位，然后用原光路照明，在改变试样的受力状态的同时，可观察到干涉条纹的变化，这些条纹就反映了试样应力的方向和大小。这是因为试样受力状态改变时，光波的波面也随之发生改变，这个变形的波面与用原参考光再现出的初始状态下的波面产生干涉而出现干涉条纹，干涉条纹的状况必然反映了试样受力变形的状况。
- 2、二次曝光法是在同一块全息干板上作两次曝光：先对初始状态（未加载）的待检物体拍摄一张三维全息图（相当于普通干涉的标准波面）；然后在光路不变的情况下对物体进行受力加载使其产生变形，在同一干板上再曝光一次（相当于测试波面）。这样，物体在两种状态下的信息就记录在同一块全息干板上。全息图再现时，两列物光波产生干涉，于是在再现的物体像上就出现了干涉条纹。通过分析这些干涉条纹，可以得出物体上的应力和形变情况。

三、实验装置和操作方法

1、仪器的组成和结构

全息防震平台，激光器，反射镜（若干），分束镜，干板架， 全息干板，照度计。

2、实验光路



L_a —激光器, $M_1 \sim M_4$ —反射镜, K_1 —光电开关,
 BS —分束镜, L_{01} 、 L_{02} —扩束镜, O —物体,
 E —电源, K_2 —开关, H —全息干板。

图 22.4 实验光路图

四、实验内容

- 1、按照实验光路图安排好光路。参考光与物光的光束比一般在 1:1~5:1 之间, 夹角在 $20^\circ \sim 50^\circ$ 之间。将激光器输出的光升到与曝光定时器、分束镜 BS、反射镜 M_1 、 M_2 、 M_3 、物体 O、干版 H 调至等高。
- 2、光路排好后, 检查各光具座的稳定性 (如螺钉是否拧紧, 磁座是否吸住等)。检查后关掉曝光定时器开关, 装上干版 (底片) 稳定 2~3 分钟进行第一次曝光 (即物体在静止, 没加任何外力的光波)。在原地显影、定影的过程中注意不能碰动任何一件光路元件。曝光时间以物体反光强弱, 激光器的功率大小而定。
- 3、实时法检测: 等干板晾干后, 用原参考光照明, 并一边对试样加力, 一边观察物体表面条纹, 当条纹最清晰时, 为最佳加载量。
- 4、二次曝光法检测: 换上一块未经曝光的全息干板, 在最佳加载量下进行第一次曝光, 然后在再去掉载荷进行第二次曝光, 得到二次曝光全息图。将处理好的全息干版放在干版架上, 挡住物光, 用原参考光进行照明。在原物体上会看到衍射条纹, 这些条纹反映了物体所受应力的情况。

五、注意事项

- 1、实验中切勿直视激光, 以免对眼睛造成伤害。即使在激光器关闭下, 也不能用眼睛窥视激光器窗口。
- 2、干版的显影时间应控制在干版特性曲线的线性部分。

六、预习要求

根据实验内容, 查阅《信息光学实验基础》、《现代光学实验教程》、《光信息科学与技术

专业实验》等文献资料。

七、思考题

- 1、 分析比较实时法和二次曝光法的优点和缺点。
- 2、 在实时法中，即使全息图能完全复位，当物体受力状态不变时，再现像上也存在干涉条纹，这些条纹是怎样产生的？

实验 23 光纤信息及光通信系列实验

(I) 光纤信息技术的演示与测量

一、 光纤光学基本知识演示

实验目的

通过具体演示，使实验者对光纤光学有基本的认识，为以后的实验打下基础。

实验仪器用具

He-Ne 激光器 1 套；手持式光源 1 台；光纤耦合架 1 套；633nm 单模光纤 1 米；普通通信光纤跳线 3 米；光纤支架 1 套；光功率测试仪一台；手持式光功率计 1 台；SZ—04 型调整架 6 个；SZ—42 型调整架 1 个；SZ—13 型调整架 1 个；光纤切割刀 1 套。

学习和实验内容

演示 1 观察光纤基模场远场分布

操作 取一根约 1 米长的 633nm 单模光纤，剥去其两端的涂敷层，用光纤切割刀切制光学端面，然后参照图 1 示意，由物镜将激光从任一端面耦合进光纤，用白屏接收光纤输出端的光斑，观察光场分布。其中，中心亮的部分对应纤芯中的模场，外围对应包层中的场分布。

演示 2 观察光纤输出的近场和远场图案

操作 取一根普通通信光纤（单模、多模皆可，相对 633nm 为多模光纤），参照演示 1 的操作步骤，将 He-Ne 激光器的输出光束经耦合器耦合进入光纤，用白屏接收出射光斑，分别

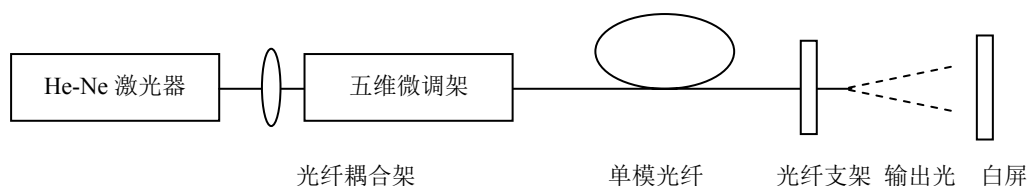


图 23.1 光纤基模场远场分布

观察其近场和远场图案。

演示 3 观察光纤输出功率和光纤弯曲（所绕圈数及圈半径）的关系

操作 取一根约 3 米长的普通通信光纤（为方便起见，可带 Fc/Pc 接头），将光源输出的光耦合进光纤，由手持式光功率计检测光纤输出光的功率，并记录此时的功率读数；将光纤绕于手上，改变绕的圈数和圈半径，观察并分析光纤输出功率与所绕圈数及圈半径大小的关系。

二、 光纤与光源耦合方法实验

实验目的

- 1、学习光纤与光源耦合方法的原理；
- 2、实验操作光纤与光源耦合。

实验仪器用具

He-Ne 激光器 1 套；光纤耦合架 1 套；633nm 单模光纤 1 米；光纤支架 1 套；光功率测试仪一台；SZ—04 型调整架 6 个；SZ—42 型调整架 1 个；SZ—13 型调整架 1 个；光纤切割刀 1 套。

学习和实验内容

1、耦合方法

光纤与光源的耦合有直接耦合和经聚光器件耦合两种。聚光器件有传统的透镜和自聚焦透镜之分。自聚焦透镜的外形为“棒”形（圆柱体），所以也称之为自聚焦棒。实际上，它是折射率分布指数为 2（即抛物线型）的渐变型光纤棒的一小段。

直接耦合是使光纤直接对准光源输出的光进行的“对接”耦合。这种方法的操作过程是：将用专用设备使切制好并经清洁处理的光纤端面靠近光源的发光面，并将其调整到最佳位置（光纤输出端的输出光强最大），然后固定其相对位置。这种方法简单，可靠，但必须有专用设备。如果光源输出光束的横截面面积大于纤芯的横截面面积，将引起较大的耦合损耗。

经聚光器件耦合是将光源发出的光通过聚光器件将其聚焦到光纤端面上，并调整到最佳位置（光纤输出端的输出光强最大）。这种耦合方法能提高耦合效率。耦合效率 η 的计算公式为

$$\eta = \frac{P_1}{P_2} \times 100\% , \quad \text{或} \quad \eta = -10 \lg \frac{P_1}{P_2} (dB)$$

式中 P_1 为耦合进光纤的光功率（近似为光纤的输出光功率）。 P_2 为光源输出的光功率。

2、实验操作

(1) 直接耦合

- A. 切制处理好光纤光学端面，然后按图 2 示意进行耦合操作。
- B. 计算耦合效率，对自己的工作进行评估。

(2) 透镜耦合

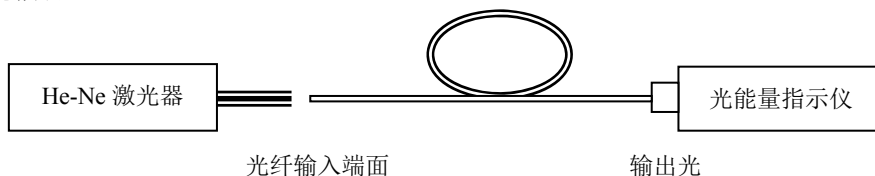


图 23.2 直接耦合原理示意图

- 切制处理好光纤光学端面，然后按示意图 3 进行耦合操作；
- 计算耦合效率，对自己的工作进行评估；
- 比较、评估两种耦合方法的耦合效率。

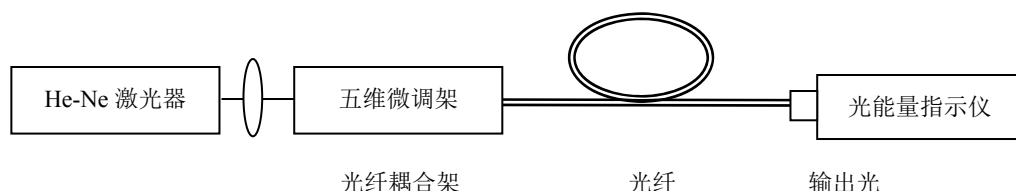


图 23.3 聚光器件耦合原理示意图

三、 多模光纤数值孔径（NA）测量实验

实验目的

- 学习光纤数值孔径的含义及其测量方法；
- 实验操作远场光斑法测量多模光纤的数值孔径。

实验仪器用具

He-Ne 激光器 1 套；光纤耦合架 1 套；633nm 多模光纤 1 米；光纤支架 1 套；光功率测试仪一台；SZ—04 型调整架 6 个；SZ—42 型调整架 1 个；SZ—13 型调整架 1 个；光纤切割刀 1 套。

数值孔径（NA）是多模光纤的一个重要参数。它表示光纤收集光的本领的大小以及与光源耦合的难易程度。光纤的 NA 大，收集、传输能量的本领就大。

学习和实验内容

1、 光纤数值孔径的几种定义

(1) 最大理论数值孔径 $NA_{\max, t}$

$NA_{\max, t}$ 的数学表达式为

$$NA_{\max, t} = n_0 \cdot \sin \theta_{\max i} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta}$$

式中 $\theta_{\max i}$ 为光纤允许的最大入射角， n_0 为周围介质的折射率，空气中为 1， n_1 和 n_2 分别

为光纤纤芯中心和包层的折射率， $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ 为相对折射率差。最大理论数值孔径 $NA_{\max, t}$

由光纤的最大入射角的正弦值决定。

(2) 远场强度有效数值孔径 NA (NA_{eff})

远场强度有效数值孔径是通过测量光纤远场强度分布确定的，它定义为光纤远场辐射图上光强下降到最大值的 5% 处的半张角的正弦值。CCITT（国际电报电话咨询委员会）组织规定的数值孔径指的就是这种数值孔径 NA，推荐值为 $(0.18—0.24) \pm 0.02$ 。

2、光纤数值孔径的测量

(1) 远场光强法

远场光强法是 CCITT 组织规定的 G. 651 多模光纤的基准测试方法。该方法对测试光纤样品的处理有严格要求，并且需要很高的仪器设备：强度可调的非相干稳定光源；具有良好线性的光检测器等。

(2) 远场光斑法

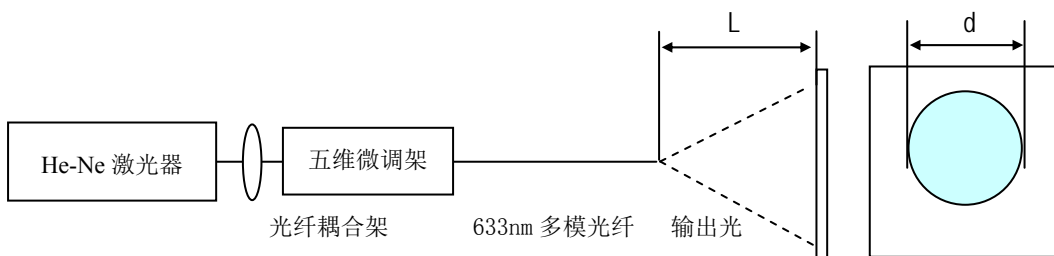


图 23.4 远场光斑法原理图

这种测试方法的原理本质上类似于远场光强法，只是结果的获取方法不同。虽然不是基准法，但简单易行，而且可采用相干光源。原理性实验多半采用这种方法。其测试原理如图 23.4 所示。测量时，在暗室中将光纤出射远场投射到白屏上（最好贴上坐标格纸，这样更方便），测量光斑直径（或数坐标格），通过下面式子计算出数值孔径。

$$NA = k \cdot d$$

式子中 k 为一常数，可由已知数值孔径的光纤标定； d 为光纤输出端光斑的直径。例如，设光纤输出端到接收屏的距离为 50cm， $k = 0.01$ ， $d = 20$ cm，立即可以算出数值孔径为 0.20。

对于未知的 k ，我们可以由上述的距离和光斑直径根据 $\theta = \arctg(d/2L)$ 求出 θ ，再由 $NA = \sin \theta$ 求出 NA 的近似值。建议我们在实验中采用该方法。

注：本实验提供的多模光纤的数值孔径为 0.275 ± 0.015 。

四、 光纤传输损耗性质及测量实验

实验目的

- 1、 学习光纤传输损耗的含义、表示方法及测量方法；
- 2、 实验操作截断法测量光纤的传输损耗。

实验仪器用具

He-Ne 激光器 1 套；光纤耦合架 1 套；通信光纤 1 盘；光纤支架 1 套；光功率测试仪一台

学习和实验内容

1、光纤传输损耗特性和测量方法

(1) 光纤传输损耗的含义和表示方法

光波在光纤中传输，随着传输距离的增加，光波强度（或光功率）将逐渐减弱，这就是传输损耗。光纤的传输损耗与所传输的光波长 λ 相关，与传输距离 L 成正比。

通常，以传输损耗系数 $\alpha(\lambda)$ 表示损耗的大小。光纤的损耗系数为光波在光纤中传输单位距离所引起的损耗，常以短光纤的输出光功率 P_1 和长光纤的输出光功率 P_2 之比的对数表示，即

$$\alpha(\lambda) = \frac{1}{L} 10 \lg \frac{P_1}{P_2} \text{ (dB/km)}$$

光纤的传输损耗是由许多因素所引起的，有光纤本身的损耗和用作传输线路时由使用条件造成的损耗。

(2) 光纤的传输损耗的测量方法

光纤传输损耗测量的方法有截断法、介入损耗法和背向散射法等多种测量方法。

A. 截断法

这是直接利用光纤传输损耗系数的定义的测量方法，是 CCITT 组织规定的基准测试方法。在不改变输入条件下，分别测出长光纤的输出光功率和剪断后约为 2 米长的短光纤的输出光功率，按传输损耗系数 $\alpha(\lambda)$ 的表示式计算出 $\alpha(\lambda)$ 。这种方法测量精度最高，但它是一种“破坏性”的方法。

B. 介入损耗法

介入损耗法原理上类似于截断法，只不过用带活动接头的连接线替代短光纤进行参考测量，计算在预先相互连接的注入系统和接收系统之间（参考条件）由于插入被测光纤引起的光功率损耗。显然，光功率的测量没有截断法直接，而且由于连接的损耗会给测量带来误差。因此这种方法准确度和重复性不如截断法。

C. 背向散射法

背向散射法是通过光纤中的后向散射光信号来提取光纤传输损耗的一种间接的测量方法。只需将待测光纤样品插入专门的仪器就可以获取损耗信息。不过这种专门仪器设备（光时域反射计—OTDR）价格昂贵。

2、实验操作截断法测量光纤的传输损耗

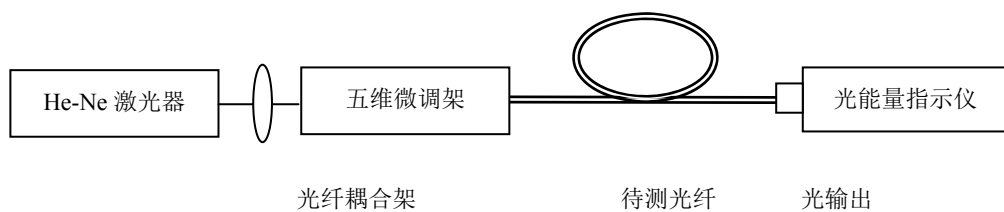


图 23.5 截断法测量光纤传输损耗原理示意图

本操作以截断法做原理性的实验。如示意图 23.5。

实验 23 光纤信息及光通信系列实验

(二) 光纤通信器件参数测量实验

一、 光纤分束器参数测量实验

实验目的

- 1、 了解光纤分束器及其用途和性能参数；
- 2、 实验操作光纤分束器参数测量。

实验仪器用具

手持式光源 1 套；1310nm 分束器 1 个；手持式光功率计 1 台。

学习和实验内容

1、 光纤分束器简介

(1) 光纤分束器和用途

光纤分束器是对光实现分路、合路、插入和分配的无源器件。在光纤通信系统中，用于数据母线和数据线路的光信号的分路和接入，以及从光路上取出监测光以了解发光元件和传输线路的特性和状态；在光纤用户网、区域网、有线电视网中，光纤分束器更是必不可少的器件；在光纤应用领域的其它许多方面光纤分束器也都被派上了各自的用场，它的应用将越来越广泛。

光纤分束器的种类很多，它可以由两根以上（最多可达 100 多根）的光纤经局部加热熔合而成，最基本的是一分为二。

(2) 光纤分束器主要特性参数

光纤分束器的主要特性参数是分光比，插入损耗和隔离度。

A. 分光比 分光比等于输出端口的光功率之比。例如，图 23.6 中输出端口 3 与输出端口 4 的光功率之比 $P_3/P_4=3/7$ ，则分光比为 3：7。通常的 3dB 耦合器，两个输出端口的光功率之比为 1：1。对于两个输出端口的光方向耦合器，分光比可为 1：1—1：99 之间。

B. 插入损耗 插入损耗表示光分束器损耗的大小，由各输出端口的光功率之和与输入光功率之比的对数表示，单位为分贝（dB）。例如，用符号 α 表示损耗，端口 1 输入光功率 P_1 ，端口 3 和端口 4 输出的光功率为 P_3 和 P_4 ，则



图 23.6 光分束器端口示意

$$\alpha = -10 \lg \frac{P_3 + P_4}{P_1} (dB)$$

一般情况下，要求 $\alpha \leq 0.5 \text{dB}$ 。

C. 隔离度 从光分束器端口示意图中的端口 1 输入的光功率 P_1 ，应从端口 3 和端口 4 输出，理论上，端口 2 不该有光输出，而实际上端口 2 有少量光功率 P_2 输出， P_2 的大小就表示了 1、2 两个端口间的隔离度。如用符号 A_{1-2} 表示端口 1、2 的隔离度，那么

$$A_{1-2} = -10 \lg \frac{P_2}{P_1} (dB)$$

2、实验操作

在光纤分束器简介的基础上，参照图 23.7 对光纤分束器的性能进行测量。

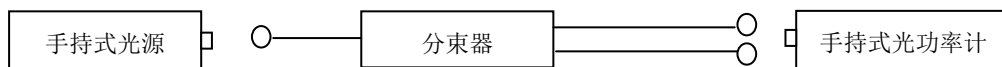


图 23.7 光纤分束器性能测试示意

二、 可调光衰减器参数测量实验

实验目的

- 1、了解光衰减器及其用途和性能参数；
- 2、实验操作可调光衰减器参数测量。

实验仪器用具

手持式光源 1 套；手持式光功率计一台；可调光衰减器 1 只；单模光纤跳线（FC/PC）2 根。

学习和实验内容

1、光衰减器简介

光衰减器是一种用来降低光功率的光无源器件。根据不同的应用，它分为可调光衰减器和固定光衰减器两种。在光纤通信中，可调光衰减器主要用于调节光线路电平，在测量光接收机灵敏度时，需要用可调光衰减器进行连续调节来观察光接收机的误码率；在校正光能量指示仪和评价光传输设备时，也要用可调光衰减器。固定光衰减器结构比较简单，如果光纤通信线路上电平太高就需要串入固定光衰减器。光衰减器不仅在光纤通信中有重要应用，而且在光学测量、光计算和光信息处理中也都是不可缺少的光无源器件。

可调光衰减器一般采用光衰减片旋转式结构，衰减片的不同区域对应金属膜的不同厚

度。根据金属膜厚度的不同分布，可做成连续可调式和步进可调式。为了扩大光衰减的可调范围和精度，采用衰减片组合的方式，将连续可调的衰减片和步进可调衰减片组合使用。

可变衰耗器的主要技术指标是衰减范围、衰减精度、衰耗重复性、插入损耗等。

对于固定式光衰减器,在光纤端面按所要求镀上有一定厚度的金属膜即可以实现光的衰耗;也可以用空气衰耗式，即在光的通路上设置一个几微米的气隙，即可实现光的固定衰耗。

2、实验操作测量可调光衰减器的特性参数

根据实验对象，选择具体的操作内容。参照示意图 23.8。

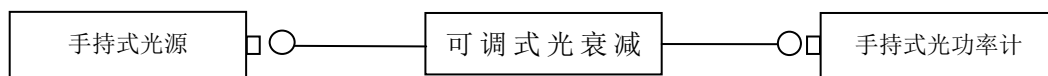


图 23.8 可调衰减器性能测试示意图

三、 光纤隔离器参数测量实验

实验目的

- 1、了解光隔离器及其用途和主要性能参数；
- 2、实验操作光隔离器参数测量。

实验仪器用具

手持式光源 1 套；手持式光功率计一台；光纤隔离器 1 只。

学习和实验内容

1、光隔离器简介

光隔离器是一种只允许光波沿光路单向传输的非互易性光无源器件。它的作用是隔离反向光对前级工作单元的影响。

光隔离器的主要技术指标有：插入损耗、反向隔离度和回波损耗等。目前，在 1310nm 波段和 1550nm 波段反向隔离度都可做到 40dB 以上。光通信系统对光隔离器性能的要求是，正向插入损耗低、反向隔离度高、回波损耗高、器件体积小、环境性能好。

2、光隔离器的主要性能、指标

A. 插入损耗

光隔离器的插入损耗由下式表示：

$$\alpha_L = -10 \lg \frac{P_{out}}{P_{in}} (dB)$$

式中， P_{in} 、 P_{out} 为光隔离器的输入、输出光功率。插入损耗主要是由光隔离器中的偏振器、

法拉第旋光元件和准直器等元件的插入而产生的。光隔离器的插入损耗一般在 0.5dB 以下，最好的指标可以达到 0.1dB 以下。

B. 隔离度

隔离度是光隔离器的重要指标之一，用符号 I_{SO} 表示。数学表达式为

$$I_{SO} = -\lg\left(\frac{P_R'}{P_R}\right)$$

式中， P_R 、 P_R' 分别为反向输入、输出光功率。

实际应用中的光隔离器，其隔离度应在 30dB 以上，越高越好。

C. 回波损耗

光隔离器的回波损耗定义为：光隔离器的正向输入光功率 P_{in} 和反回到输入端的光功率 P_{in}' 之比，由下面式子表示

$$\alpha_{RL} = -\lg\left(\frac{P_{in}'}{P_{in}}\right)$$

回波直接影响系统的性能，所以回波损耗是一个相当重要的指标。优良的光隔离器其回波损耗都在 55 dB 以上。

由于光隔离器所用光学材料价格较高、工艺复杂，因此隔离器的价格也较高。

3、实验操作—测量光隔离器的特性参数

根据实验对象，选择具体的操作内容。图 23.9 为示意图。

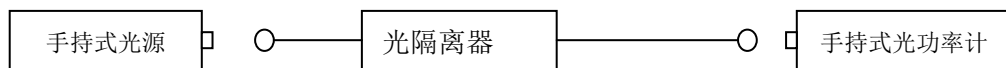


图 23.9 光隔离器性能测试示意

四、 光纤光开关实验

实验目的

- 1、了解光开关及其用途和主要性能参数；
- 2、实验操作光开关参数测量。

实验仪器用具

手持式光源 1 套，手持式光功率计 1 台，机械式光开关 1 套，单模光纤跳线 2 根。

学习和实验内容

1、光开关简介

光开关是一种将光波在时间上或空间上进行切换的器件。它起着控制和转换光路的作用

用。是光纤通信系统、光纤网络系统、交换技术、光纤测试技术以及光纤传感等不可缺少的器件。光开关应具备插入损耗小、开关速度快、串扰小、消光比高、重复性好、寿命长、结构紧凑等性能。

根据工作原理，光开关可分机械式光开关和非机械式光开关两大类。机械式光开关是靠移动光纤或光学元件等使光路发生改变达到通、断的目的。

2、光开关的主要特性参数

光开关的主要特性参数有插入损耗，隔离度，工作波长，消光比，开关时间等。

A. 插入损耗：插入损耗表示输出端口的光功率比输入端口的光功率减小，以分贝表示。

其表示式为 $\alpha = -10 \lg \frac{P_{in}}{P_{out}} (dB)$ ，式中 P_{in}, P_{out} 分别为输入端口和输出端口的光功率。

B. 隔离度：光开关的隔离度定义为，用分贝表示的两个相隔离的输出端口的光功率的

比值。表示式为 $\alpha = -10 \lg \frac{P_{in}}{P_{im}}$ ，式中 P_{in}, P_{im} 为 i 端口输入给 n 端口时，在 n 输出端口和 m

输出端口分别测得的光功率。

C. 消光比：两个窗口之间处于导通和非导通状态的分贝表示的插入损耗之差。

D. 开关时间：开关端口从某一初始状态转为“通”或“断”所需要的时间，它从施加给开关或从开关撤去转换能量的时刻起测量。

3、实验操作光开关参数测量

参考测试示意图 23.10 进行实验操作。实验中用到的光开关为机械式光开关，棱镜的移动采用电磁铁驱动方式。

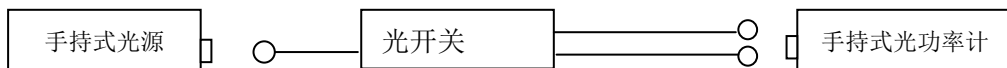


图 23.10 光开关性能测试示意图

实验 23 光纤信息及光通信系列实验

（三） 光纤通信与传感技术实验

一、 波分复用（WDM）原理性实验

实验目的

- 1、学习光波分复用（WDM）的含义、意义；
- 2、操作双波长波分复用（WDM）原理实验

实验用具

1310nm 光信号源 1 台，1550nm 光信号源 1 台，双踪示波器一台，1310 nm /1550 nm 合波器 1 只，1310 nm /1550 nm 分波器 1 只，两端带 PC/FC 接头光纤 3 米，红外光接收器 1 台，跳线 2 根，光纤活动接头 5 个。

学习和实验内容

光波分复用（WDM）技术是一种增加通信容量的技术。

一根现有的普通单模光纤可传输的带宽极宽，仅 1550nm 传输窗口就可传输成千上万个光信道。所以利用光波分复用技术的前景十分光明。

光波分复用（WDM）也称光频分复用，两者的物理原理相同。习惯上，光频分复用是指光频细分，即光信道非常密集；而光波分复用是指光频粗分，光信道相隔较大，甚至在光纤的不同窗口上，其复用的信道也较少。

波分复用是复用光纤信道。即指一根光纤中同时传输具有不同波长的几个载波，而每个载波又各自载荷一群数字信号。经此光纤信道长距离传输，到终端由分波器将各载波分开，然后进入到各自的通道，进行分离解调，恢复各载波载送的信息。“复用”分为单向复用和双向复用，显然，双向复用的复用量将增大一倍。

2. 操作双波长波分复用（WDM）实验

根据介绍的知识，参照原理框图 23.11，按老师要求操作实验。

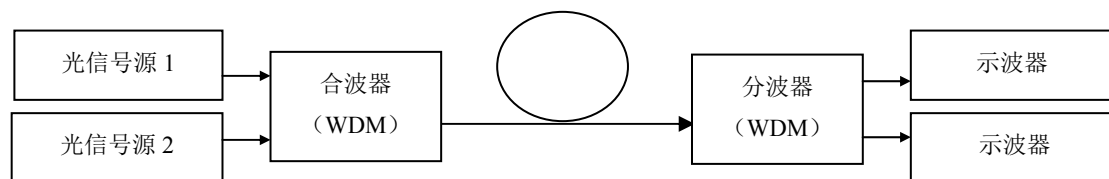


图 23.11 WDM 原理实验框

二、 M—Z 光纤干涉实验

实验目的

- 1、了解 M—Z 干涉的原理和用途；
- 2、实验操作调试 M—Z 干涉仪并进行性能测试。

实验仪器用具

He-Ne 激光器 1 套；光纤干涉演示仪 1 套；633nm 单模光纤 1 根；光纤切割刀 1 套。

学习和实验内容

2、 M—Z 干涉仪的原理和用途

以光纤取代传统 M—Z（马赫-泽得尔）干涉仪的空气隙，就构成了光纤型 M—Z 干涉仪。这种干涉仪可用于制作光纤型光滤波器、光开关等多种光无源器件和传感器，在光通信、光传感领域有广泛的用途，其应用前景非常美好。

光纤型 M—Z 干涉仪实际上是由分束器构成。当相干光从光纤型分束器的输入端输入后，在分束器输出端的两根长度基本相同的单模光纤会合处产生干涉，形成干涉场。干涉场的光强分布（干涉条纹）与输出端两光纤的夹角及光程差相关。令夹角固定，那么外界因素改变的光程差直接和干涉场的光强分布（干涉条纹）相对应。

3、 实验操作

- （1）按图 23.12 所示仔细将光耦合进光纤分束器的输入端，此时可用光能量指示仪监测，固定好位置；精心调试分束器输出端两根光纤的相对位置，使其在会合处产生干涉条纹。
- （2）固定调试好的相对位置，分析观察到的现象。

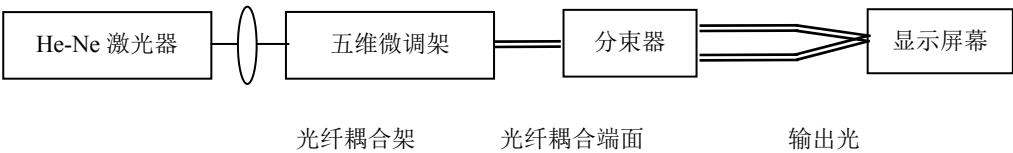


图 23.12 聚光器件耦合原理示意图

三、 光纤温度传感原理实验

实验目的

- 1、了解传感的意义；
- 2、操作光纤温度传感原理实验。

实验仪器用具

He-Ne 激光器 1 套；光纤干涉演示仪一套；633nm 单模光纤 1 根；光纤切割刀一套。

学习和实验内容

2、传感的意义和传感器定义

在信息社会中，人们的一切活动都是以信息的获取和信息的交换为中心的。传感器是信息技术的三大技术之一。随着信息技术进入新时期，传感技术也进入了新阶段。“没有传感器技术就没有现代科学技术”的观点已被全世界所公认，因此，传感技术受到各国的重视，特别是倍受发达国家的重视，我国也将传感技术纳入国家重点发展项目。

传感器定义：能感受规定的被测的量，并按照一定规律转换成可用的输出信号的器件或装置称为传感器。

光纤传感器有两种，一种是通过传感头（调制器）感应并转换信息，光纤只作为传输线路；另一种则是光纤本身既是传感元件，又是传输介质。光纤传感器的工作原理是，被测的量改变了光纤的传输参数或载波光波参数，这些参数随待测信号的变化而变化。光信号的变化反映了待测物理量的变化。

3、实验操作

本实验中传感量是温度，温度改变了光波的位相，通过对位相的测量来实现对温度的测量。具体的测量技术是，运用干涉测量技术把光波的相位变化转换为强度（振幅）变化，实现对温度的检测。操作步骤参考实验十。光纤 M—Z 型干涉仪进行对温度传感的测量，利用干涉仪的一臂作参考臂，另一臂作测量臂（改变温度），配以检测显示系统就可以实现对温度传感的观测。本操作只对温度引起光波参数改变作定性的干涉图案的变化观测。详细的量化可参考专门资料。（注：受温变化光纤长度为 360mm）

四、 光纤压力传感原理实验

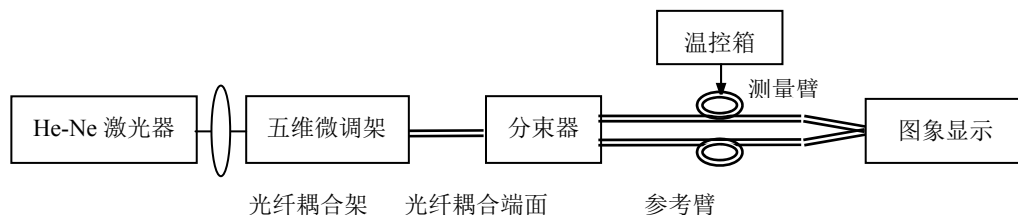


图 23.13 温度传感原理示意图

实验目的

- 1、了解传感的意义；
- 2、操作光纤压力传感原理实验。

实验仪器用具

He-Ne 激光器 1 套；光纤干涉演示仪一套；633nm 单模光纤 1 根；光纤切割刀一套。

学习和实验内容

1、 光纤 M—Z 型压力传感原理

M—Z 干涉仪型传感器属于双光束干涉原理，由双光束干涉的原理可知，干涉场的干涉光强 为 $I \propto (1 + \cos\delta)$

δ 为干涉仪两臂的光程差对应的位相差， δ 等于 2π 整数倍时为干涉场的极大值。压力改变了干涉仪其中一臂的光程，于是改变了干涉仪两臂的光程差，即位相差，位相差的变化由按上式规律变化的光强反映出来。

2、 实验操作

本实验中传感量是压力，压力改变了光波的位相，通过对位相的测量来实现对压力的测量。具体的测量技术是运用干涉测量技术把光波的相位变化转换为强度（振幅）变化，实现对压力的检测。操作方案采用光纤干涉仪进行对压力传感的测量，利用干涉仪的一臂作参考臂，另一臂作测量臂（改变应力），配以检测显示系统就可以实现对压力传感的观测。本操作只对压力引起光波参数改变作定性的干涉图案的变化观测。详细的量化可参考专门资料。

注：变形光纤长度为 60mm。

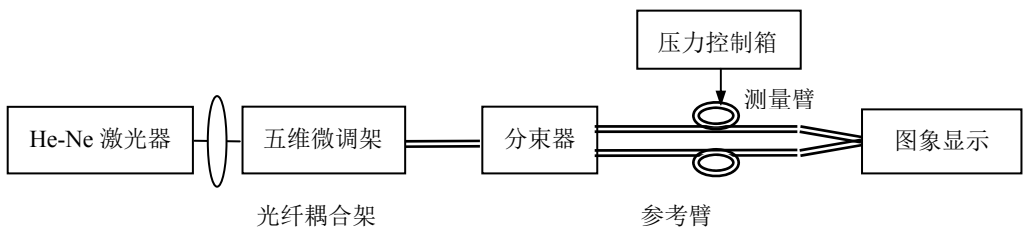


图 23.13 压力传感原理示意图

五、 光发射机消光比测量实验

实验目的

- 1、 了解光发射机消光比的含义和表示方法；
- 2、 实验操作光发射机消光比的测量。

实验用具

带外调制接口光源 1 台；误码仪 1 台；手持式光功率计 1 台；跳线 2 根。

学习和实验内容

1、 了解光发射机消光比的含义、表示方法

消光比是光发射机的重要指标之一。在数字通信系统中，光发射机发送的是“0”码和“1”码的光脉冲。理想的光发射机，在发射“0”码时应无光功率输出，而实际使用中的光发射机，由于本身的缺陷，或者由于直流偏置选择不当，使得在发射“0”码时也有光功

率输出。描述光发射机的这种性质用消光比（EXT）来表示。其定义为

$$\text{EXT} = \frac{\text{全“0”码的平均输出光功率}}{\text{全“1”码的平均输出光功率}}$$

消光比的增大将使接收机的灵敏度降低，消光比越大，灵敏度下降越厉害。因此，为了保证光接收机有足够的灵敏度，通常要求光发射机的消光比小于 10%。

2、实验操作光发射机消光比的测量

分别使数字光信号源输出全“0 码”、全“1 码”，直接用跳线将光信号源输出的光输入给光能量指示仪接收，记录下相应的光功率，由消光比（EXT）定义式即可算得其值。

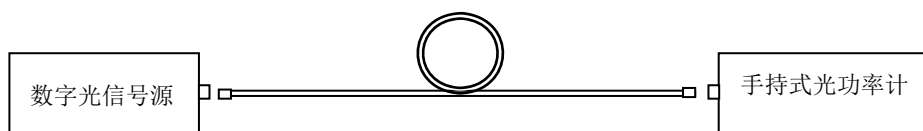


图 23.15 光发射机消光比测试框

本实验中的数字光信号源为由误码仪产生伪随机码调制的带外调制接口的光源。实验上可以分别测出光源加上伪随机码时的光功率和撤去伪随机码时的光功率，然后代入式子计算出即可。必须注意的是，因为伪随机码的“0”码和“1”码的几率基本相等，所以全“1”码的光功率应该是加上伪随机码时测得的光功率的 2 倍。

六、掺铒光纤放大器原理性实验

实验目的

- 1、学习掺铒光纤放大器的基本知识；
- 2、实验操作掺铒光纤放大器的放大特性。

实验用具

掺铒光纤放大器 1 套；光隔离器 2 个；手持式光源 1 台；手持式光功率计 1 台；980 nm /1550 nm 分波器（WDM）1 个；外接电源 1 套；光纤活动接头 3 个。

学习和实验内容

1、学习掺铒光纤放大器（EDFA）的基本知识

（1）光纤放大器概念、用途

光放大器是实现全光通信的关键性部件。光纤放大器有两类，一类是使用一般传输光纤制作的光放大器，这是借助传输光纤材料的三阶非线性效应产生的增益机制而使光信号得以放大的一种分布式光纤放大器；另一类是利用光纤中的掺杂物质引起激活机制实现光放大的光纤放大器，掺铒光纤放大器属于此类。掺铒光纤放大器（EDFA）的出现和应用，引起了光纤通信领域一场新的变革。称 EDFA 是光纤通信史上的一个里程碑。

(2) EDFA 的基本结构和工作原理

EDFA 由掺铒光纤、泵浦光源、耦合器（WDM）和光隔离器等几部分组成。铒光纤是放大器的工作物质，选择长度由掺杂浓度决定，各种掺杂浓度都有一个最佳长度，设计放大器时应选择在最佳长度上。泵浦光源为大功率 LD，工作波长一般选择 980nm。光耦合器的作用是将信号光和泵浦光有效地合波，并一块进入掺铒光纤；光隔离器是一种非互易性光学器件，其作用是使铒光纤放大器工作在行波状态，隔离反向波对信号源或前级的工作状态的影响。实用的 EDFA 可用一个泵源正向泵浦或反向泵浦，也可用两个泵源双向泵浦。

(3) EDFA 的主要特性

A. 增益特性 这是掺铒光纤放大器最主要的性能。其增益与输入信号有关，小信号输入增益大，大信号输入增益小，并且增益有一个饱和值，即输入信号过大时则掺铒光纤放大器的增益饱和，输出趋于一个有限的固定值。

B. 噪声特性 掺铒光纤放大器具有比电子放大更优良的信号噪声比，所以它可以作光接收机的前置放大器，从而获得更好的接收机灵敏度。

C. 光频响应：掺铒光纤放大器的放大是有一定光频范围的，称此为光频响应。典型的掺铒光纤放大器的光频响应带宽为 35nm，相当于 4300GHz，这是非常宽的。

2、实验操作掺铒光纤放大器的放大特性

在本实验中，可采用图 23.16 布置示意进行操作。

测出光信号进入放大器前的光功率 P_{in} ；然后将信号光输入给 EDFA，在 EDFA 的输出端（光隔离器 2 的输出端）测输出光功率 P_{out} ，由 (23.1) 式计算放大器的放大倍数。或者由 (23.2) 式计算以分贝表示的放大器的增益 (dB)。

$$\alpha = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (23.1)$$

$$\alpha = 10 \lg \frac{P_{out}}{P_{in}} (dB) \quad (23.2)$$

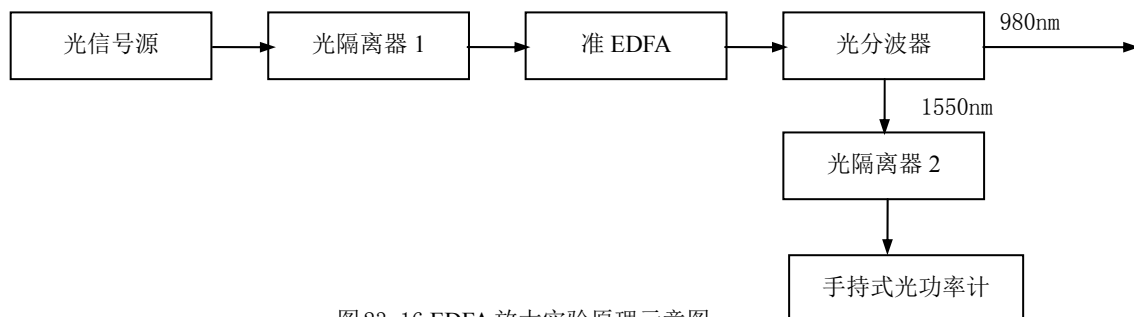


图 23.16 EDFA 放大实验原理示意图

七、 开路音频模拟信号传输实验

实验目的

- 1、使实验者建立通过内调制的方式上载信息到光载波的感性认识；了解模拟通信系统的基本组成和开路光通信的优越性；
- 2、操作开路音频模拟信号传输实验。

实验仪器用具

可见 LD 光载波源 1 套；音频信号源 1 台；光检测器 1 套；解调系统 1 套。

学习和实验内容

1、 基本概念和优越性

光通信有无线光通信和有线光通信两类。有线光通信即光纤通信，而无线光通信则是开路光通信，以大气做信道的光通信。开路光通信无需线路，简单经济。在太空通信有着非常美好的前景。

通信的传输信号有数字信号和模拟信号两种，相应的系统为数字通信系统和模拟通信系统。模拟通信系统不需要复杂昂贵的编码系统，有独到之处。

调制是上载信息的手段，有内调制、外调制两种，内调制无需调制器，直接调制 LD 的工作电流，简单方便、经济。

2、 操作开路音频模拟信号传输实验

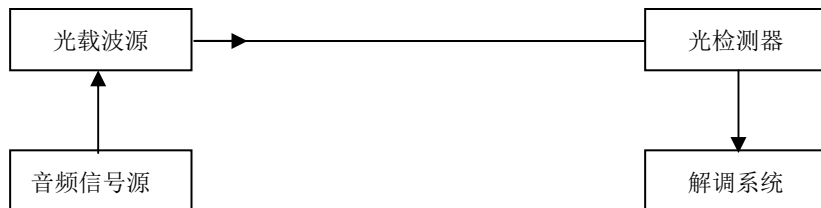


图 23.17 音频模拟通信系统框

按示意图连接线路，并对该简单装置的音质效果进行评价。

实验 24 真空镀膜

引言

真空镀膜技术是一种新颖的材料合成与加工的新技术，是表面工程技术领域的重要组成部分。它利用物理、化学手段将固体表面涂覆一层特殊性能的镀膜，从而使固体表面具有耐磨损、耐高温、耐腐蚀、抗氧化、防辐射、导电、导磁、绝缘和装饰等许多优于固体材料本身的优越性能，达到提高产品质量、延长产品寿命、节约能源和获得显著技术经济效益的作用。

真空镀膜主要具有以下几个优点：①它可用一般金属（铝，钛等）代替日益缺乏的贵重金属（金，银）并使产品降低成本，提高质量，节省原材料。②由于真空分子碰撞少，污染少，可获得表面物理研究中所要求的纯净，结构致密的薄膜。③镀膜时间和速度可准确控制，所以可得到任意厚度均匀或非均匀薄膜。④被镀件和蒸镀物均可金属或非金属，镀膜时被镀件表面不受损坏，薄膜与基体具有同等的光洁度。因此真空镀膜技术被誉为最具发展前途的重要技术之一，并已在高技术产业化发展中展现出诱人的市场前景。这种新兴的真空镀膜技术已在国民经济各个领域得到应用，如航空、航天、电子、信息、机械、石油、化工、环保、军事等领域。

一、实验目的

- 1、了解真空蒸发镀膜的基本原理。
- 2、掌握真空蒸发从镀材、基底、蒸发源的制作以及蒸发镀膜的整个过程。

二、实验原理

真空镀膜实质上是在高真空状态下利用物理方法在镀件的表面镀上一层薄膜的技术，它是一种物理现象。真空镀膜按其方式不同可分为真空蒸发镀膜、真空溅射镀膜和现代发展起来的离子镀膜。这里只介绍真空蒸发镀膜技术。

任何物质在一定温度下，总有一些分子从凝聚态（固态，液态）变成为气态离开物质表面，但固体在常温常压下，这种蒸发量是极微小的。如果将固体材料置于真空中加热至此材料蒸发温度时，在气化热作用下材料的分子或原子具有足够的热震动能去克服固体表面原子间的吸引力，并以一定速度逸出变成气态分子或原子向四周迅速蒸发散射。当真空度高，

分子平均自由程 $\bar{\lambda}$ 远大于蒸发器到被镀物的距离 d 时（一般要求 $\bar{\lambda} = (2 \sim 3) d$ ，材料的蒸气分子在散射途中才能无阻当地直线达到被镀物和真空室表面。在化学吸附（化学键力引起的吸附）和物理吸附（靠分子间范德瓦尔斯力产生的吸附）作用下，蒸气分子就吸附在基片表面上。当基片表面温度低于某一临界温度，则蒸气发分子在其表面发生凝结，即核化过程，

形成“晶核”。当蒸气分子入射到基片上密度大时，晶核形成容易，相应成核数目也就增多。在成膜过程继续进行，晶核逐渐长大，而成核数目却并不显著增多。由于（1）后续分子直接入射到晶核上；（2）已吸收分子和小晶核移徙到一起形成晶粒；（3）两个晶核长大到互相接触合并成晶粒等三个因素，使晶粒不断长大结合。构成一层网膜。当它的平均厚度增加到一定厚度后，在基片表面紧密结合而沉积成一层连续性薄膜。

总的说来，真空蒸发镀膜主要包括以下几个物理过程：

①采用各种形式的热能转换方式，使镀膜材料蒸发或升华，成为具有一定能量（0.1~0.3eV）的气态粒子（原子、分子或原子团）；

②气态粒子通过基本上无碰撞的直线运动方式传输到基片；

③粒子沉积在基片表面上并凝聚成薄膜。

固体物质在常温和常压下，蒸发量极低。真空度越高，蒸发源材料的分子越易于离开材料表面向四周散射。真空室内的分子越少，蒸发分子与气体分子碰撞的概率就越小，从而能无阻挡地直线达到基片的表面。

当气体分子平均自由程等于蒸发源到基片的距离时，约有 63% 的分子会在途中发生碰撞；当平均自由程 10 倍于蒸发源到基片的距离时，就只有 9% 左右的分子在途中发生碰撞，可见只有当气体分子平均自由程大于 d 时，蒸发物质分子才能沿途无阻挡地、直线达到被镀基片或零件的表面。蒸发时一般要选择比 d 大 2~3 倍，因为在蒸发过程中，真空室内温度升高后要放出大量气体，会使真空度降低。要得到足够大的，就要求 P 足够小。这时的平均自由程与蒸发源到基片的距离相比要大得多。

在平衡状态下，若物质的分子蒸发热 ΔH 与温度无关，则饱和蒸气压 P_s 和绝对温度 T 有如下关系：

$$P_s = K \cdot e^{-\frac{\Delta H}{RT}} \quad (24.1)$$

式中 R 为气体普适常数， K 为积分常数。

在真空环境下，若物质表面静压强为 P ，则单位时间内从单位凝聚相表面蒸发出的质量，即蒸发率为

$$\Gamma = 5.833 \times 10^{-2} \alpha \sqrt{\frac{M}{T}} (P_s - P) \quad (24.2)$$

式中 α 为蒸发系数， M 为克分子量， T 为凝聚相物质的温度。

若真空度很高（ $P \approx 0$ ）时蒸发的分子全部被凝结而无返回蒸发源，并且蒸发出向外飞行的分子也没有因相互碰撞而返回，此时蒸发率为

$$\Gamma = 5.833 \times 10^{-2} \alpha \sqrt{\frac{M}{T}} P_s = 5.833 \times 10^{-2} \alpha \sqrt{\frac{M}{T}} K \cdot e^{-\frac{\Delta H}{RT}} \quad (24.3)$$

根据数学知识从(3)式可知，提高蒸发率 Γ 主要决定于上式指数因式，因而温度 T 的升高将使蒸发率迅速增加。

在室温 $T=293K$ ，气体分子直径 $\sigma=3.5 \times 10^{-8}cm$ 时，由气体分子动力学可知气体分子平均自由

程 $\bar{\lambda}$ 可表示为

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 n} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 p} \approx \frac{5 \times 10^{-3}}{p} \tag{24.4}$$

式中 k 为波尔兹曼常数, n 为气体分子密度。气体压强 P 为帕时, $\bar{\lambda}$ 的单位为米。根据 (24. 4) 式可列出表 24. 1。

从表中看出, 当真空度高于 10^{-2} 帕时, $\bar{\lambda}$ 大于 50cm; 在蒸发源到被镀物 d 为 15~20cm 情况下是满足 $\bar{\lambda} = (2 \sim 3) d$ 。因此将真空镀膜室抽至 10^{-2} 帕以上真空度是必需, 方可得到牢固纯净的薄膜。

P (帕)	1000	100	10	1	1×10^{-1}	1×10^{-2}	1×10^{-3}
λ (m)	5×10^{-6}	5×10^{-4}	5×10^{-4}	5×10^{-3}	5×10^{-2}	5×10^{-1}	5

表 24.1

三、实验装置

1、仪器的组成和结构

本实验采用 DM—450A 型真空镀膜机进行抽真空实验及镀膜实验。真空镀膜机由抽真空系统、电气系统、镀膜室等组成。

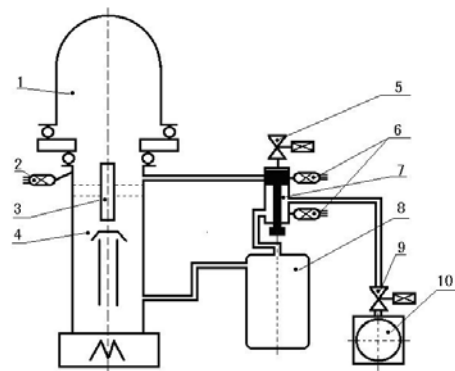


图 24.1 真空镀膜实验装置示意图

1. 镀膜真空室 2. 电离规管 3. 高阀 4. 油散泵 5. 电磁充气阀
6. 热耦规管 7. 低阀 8. 储气桶 9. 磁力充气阀 10. 机械泵

蒸发器是由热稳定性良好、化学性质稳定、出气量少、纯度高的耐高温材料制成。对于丝状和片状蒸发物一般采用钨和铂丝做成正弦式、螺旋式丝状蒸发器如图 24.2。对粉末状蒸发物则采用钽、钼、铂等材料做成舟状蒸发器如图 24.3。



图 24.2 丝状蒸发器

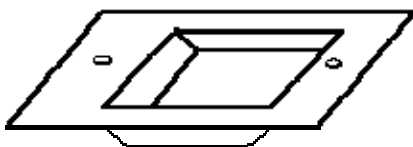


图 24.3 舟状蒸发器

本实验蒸发物为铝薄片。蒸发器采用直径为 0.5mm 的单股钨丝制成螺旋式或波浪式蒸发器，它可使蒸发铝条放置稳定，接触面大受热均匀。实验时先将铝条变成 V 字型，悬挂在钨蒸发器上。当系统真空度达到 10^{-2} 帕以上时，通电加热钨蒸发器至白炽状态，使铝熔化蒸发（铝在真空中蒸发温度为 990°C ）铝蒸发前要先液化，因钨在液化铝中有一定溶解度和液化铝的表面张力作用，故液态铝一般不会掉下来，而很好的附着于钨蒸发器上。

四、实验内容

1、实验前请检查各阀门所处状态

低阀：推进 高阀：关

双热偶程控复合真空计：自动启动档

水龙头：打开

2、准备

(1) 清洗衬底玻璃基板、钨丝和待蒸发的高纯铝丝；

(2) 清洗镀膜工作室；

(3) 将洗净的基片和铝丝放置在指定位置。

3、抽取真空

(1) 开总电源，开双热偶程控复合真空计电源，开机械泵电源，抽系统；

(2) 观察热偶计示数变化，当热偶计示数到 Pa 数量级时，拉出低阀，机械泵直接抽真空室直到复合计示数为 Pa 数量级，同时记录抽气曲线；

(3) 先把低阀推进，等一段时间待系统真空度降到 Pa 数量级时再把高阀打开；

(4) 扩散泵电源;

(5) 约 20 分钟后, 扩散泵起作用, 观察真空度的变化, 记下真空室抽气曲线;

4、蒸镀铝膜

(1) 按实验室提供的具体操作步骤完成抽熔铝丝和加热蒸发等过程;

(2) 关闭扩散泵电源.

5、测量系统漏率

关闭高阀, 记录真空室的真空度与时间的关系, 开始每隔 2 秒记录一次, 真空度变化慢时视情况延长测量时间间隔, 直到真空度降低至 Pa 数量级, 停止记录. 做系统漏率曲线.

6、关机步骤

(1) 此时扩散泵电源已关, 低阀处于推进状态, 高阀处于关闭状态;

(2) 机械泵继续工作, 直到约 40 分钟后关闭水和机械泵电源;

(3) 关闭真空计电源和总电源.

五、注意事项

- 1、自拟实验步骤和操作程序. 同老师讨论后, 方可实验. 认真观察并记录实验过程中发生的实验现象和问题, 并在实验报告上详细解释其中两个.
- 2、清洗后的玻璃片和铝条等, 应带白手套或用清洁的镊子去拿取安装.
- 3、实验中若遇到临时突然停电, 应立刻关闭阀门 3 和封闭扩散泵, 退出加热电炉, 其他阀门、开关恢复到实验前状态.

六、预习要求

根据实验内容, 查阅有关真空实验技术及应用、真空镀膜的发展等文献资料, 了解真空技术的基本知识; 掌握低、高真空的获得和测量的基本原理及方法; 了解真空镀膜的基本知识.

七、思考题

- 1、机械泵和扩散泵的工作原理?
- 2、热耦真空计和电离真空计的工作原理? 使用时注意什么?
- 3、镀膜前为什么要对玻璃基片进行清洗?
- 4、影响镀膜层质量及厚度有哪些因素?
- 5、使用油扩散泵应该注意哪些事项?
- 6、如果实验中突然停水、停电你如何处理?

