



# 《光信息专业实验 (I) 》课程 实验报告

学院：物理学院

专业：物理学 年级：2021级

实验人姓名、学号：路尚润21305127

参加人姓名、学号：邓逸枫21305409

组号：B3组

日期：2024年5月21日 星期二

上午[ ] 下午[√] 晚上[ ]

室温：26°C 相对湿度：80%

指导教师：陈科

## 1.1 傅里叶变换光学系统实验

### 1. 实验目的

1. 了解透镜对入射波前的相位调制原理
2. 加深对透镜复振幅、传递函数、角谱、透过率等参量的物理意义的认识
3. 观察透镜的 FT 图像，观察 4f 系统的 IFT 图像，并进行比较。
4. 在 4f 系统变换平面 T 插入各种空间滤波器，观察频谱处理图像。

### 2. 简述实验原理

#### 2.1 透镜的透过率函数形式

透镜由于本身各处厚度的变化，使得入射光在通过透镜时，各处走过的光程不同，即所受时间延迟不同，因而具有相位调制能力。位相延迟因子 $t(x, y)$ 与透镜厚度 $D(x, y)$ 的关系为

$$t(x, y) = \exp(jknD_0) \exp\left[-j\frac{k}{2f}(x^2 + y^2)\right]$$

其中， $D_0$ 为透镜中心厚度， $n$ 为透镜折射率。第一项位相因子仅表示透镜对于入射光波的常量位相延迟，不影响位相的空间分布，即波面形状。第二项起调制作用的因子，它表明光波通过透镜时的位相延迟与该点到透镜中心的距离平方成正比。考虑透镜孔径后，式(1)写为

$$t(x, y) = \exp\left[-j\frac{k}{2f}(x^2 + y^2)\right] P(x, y)$$

其中光瞳函数 $P(x, y)$ 为

$$P(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{孔径内} \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

#### 2.2 透镜的傅里叶变换性质

在单色平行光垂直照射的情况下，夫琅禾费衍射光场的复振幅分布正比于衍射屏投射系数的傅立叶变换。透镜像方焦平面上的光波场复振幅分布 $E(x_f, y_f)$ 表达式如下：

$$E(x_f, y_f) = \frac{\exp[jk(z + f)]}{j\lambda f} \exp\left[jk\frac{x_f^2 + y_f^2}{2f}\left(1 - \frac{z}{f}\right)\right] T\left(\frac{x_f}{\lambda f}, \frac{y_f}{\lambda f}\right)$$

对二维光学图像傅立叶变换时，若将图像放置在透镜的物方焦平面上，则在像方焦平面上得到图像的准确傅立叶变换。若将输入图像放在透镜与其像方焦平面之间，则像方焦平面上频谱图

样的大小随衍射屏到像方焦平面的距离二改变；并且当输入图像紧贴透镜后放置时可获得最大的频谱图样。

### 2.3 孔径的衍射与滤波特性

实际透镜孔径大小有限，产生衍射和滤波效应。傅立叶频谱面上，原点附近光斑代表物的低频信息；离原点较远处的光斑，代表物的高频信息。

由于孔径的衍射效应，任何有限大小通光孔径的成像系统，都无法形成理想像点，而是形成一个亮斑。

其次，透镜有限大小的通光孔径，也限制了傅里叶频谱高频成分的传播，从而产生渐晕效应。孔径越大，越靠近物体，则渐晕效应越小，使得透镜存在一个分辨极限。

### 2.4 相干光学图像处理系统(4F系统)原理图

4f 系统是对物平面上的图形连续进行两次傅立叶变换。从傅立叶变换的性质可知，函数进行两次傅立叶变换后，其函数的性质不变，但自变量改变符号，所以经 4f 系统得到的是倒象。

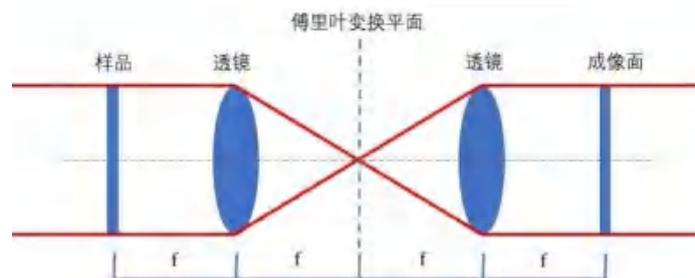


图1 4f系统原理图

### 2.5 空间滤波实验

大多数光学系统都是线性系统，即系统传递函数具有线性。利用这一性质，可以对透镜焦平面上形成的光分布进行简单操作，取舍分离，而实现滤波和选择性滤波。选择性滤波原理：

对于2-D频谱面，较小的 $f_x, f_y$ 值域对应低频，较大的对应高频。常见的高通滤波，低通滤波就是在低频区或高频区加屏蔽光阑。如果事先获得某试片的频谱照相负片，容易把它从噪声中提取出来，就可用该负片作滤波器实现图像提取。

## 3. 实验用具及光路图

实验用具：激光器、扩束物镜（连小孔滤波器）、准直透镜、小飞机样品、傅立叶变换透镜、反傅里叶变换透镜、频谱处理器、CMOS 光电接收器、实验测控用计算机。

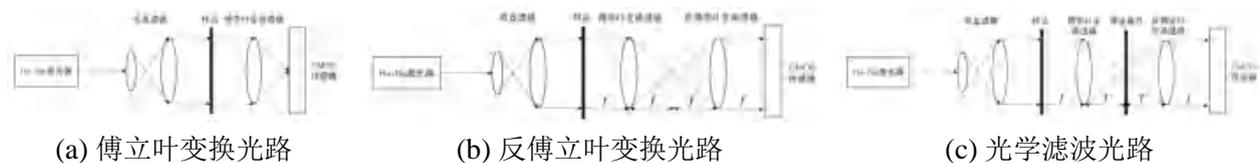


图2 具体实验光路图

## 4. 实验步骤(以实际实验操作为准)

### 4.1 傅里叶变换

- ①安装傅里叶变换光路仪器，调节水平准直，使得光轴同轴。
- ②在准直透镜后插入样品，并保证CMOS相机在傅里叶变换透镜的后焦面。
- ③打开软件捕捉图像，分别观察小飞机和大飞机的傅里叶变换频谱。

### 4.2 傅里叶反变换

④利用傅里叶反变换透镜搭建4f系统，前后移动CMOS相机使得图像最清晰。

⑤捕捉两种图案的傅里叶反变换后的图样。

### 4.3 光学滤波

①在傅里叶变换面插入空间滤波器。

②分别测量各种滤波器的滤波图样。

## 5. 实验结果、比较与分析

### 5.1 透射样品的傅里叶变换频谱图

实验中采用的飞机图案如图3所示

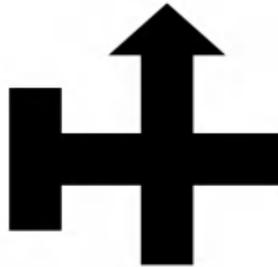
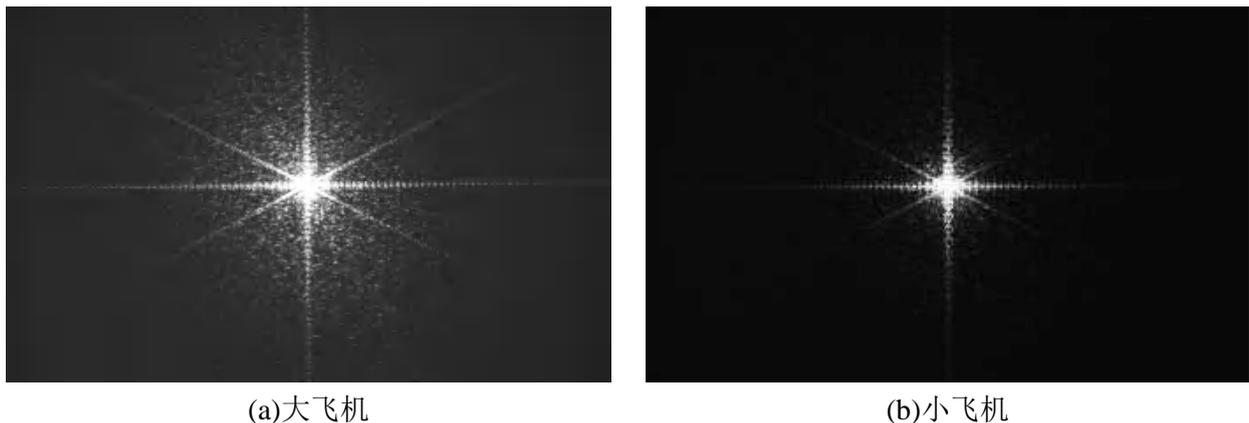


图3 飞机图案

同时，实验中有一大一小的图案，首先分别观测了其傅里叶变换频谱图



(a)大飞机

(b)小飞机

图4 傅里叶变换频谱图

#### 分析：

①傅里叶变换图像呈现出米字，其中斜向实际上是由于三角形存在导致的，而横向和纵向均为四方图案产生的。

②中心亮斑代表低频分量，而距离中心越远，频率分量越低，说明频率越高，强度越小。

③相比于小飞机，大飞机的频谱图更大，更清晰，亮度更高，这是因为其整体尺度更大，透过的光更多，并且周长很长，高频分量更多。

④大飞机是在环境开灯时进行捕捉的，因此背景噪声较大，而小飞机则是在关灯下捕捉的，因此背景噪声较小。

⑤对理想的四方形状，横向和纵向的傅里叶空间频谱的光强分布应呈现 $\text{sinc}^2 x$ 和 $\text{sinc}^2 x y$ 的形式。实验中大部分的形状均为四方，但大小不一致，故水平和垂直方向的光强应为许多矩形的叠加。

### 5.2 透射样品的频谱反傅里叶变换成像图

接着我们做了反傅里叶变换，实验结果如图5所示。

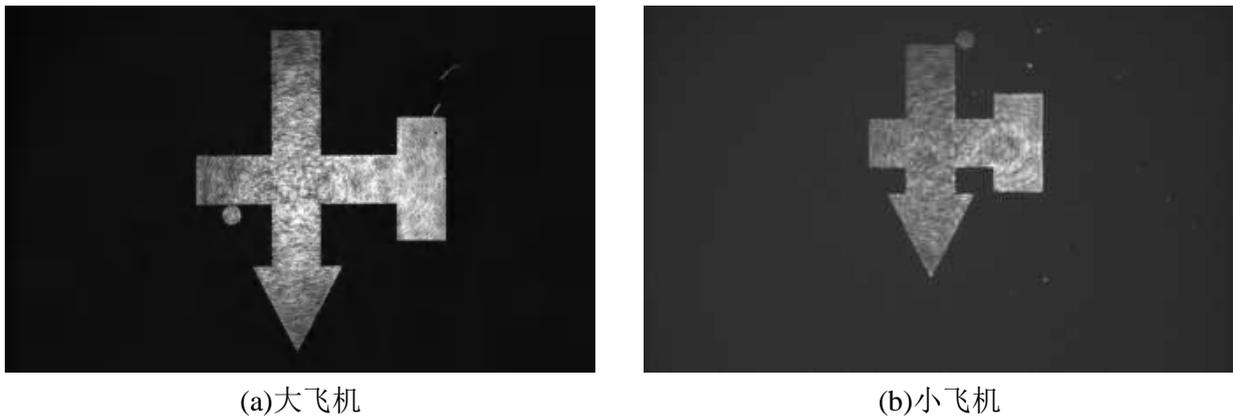


图5 透射样品的反傅里叶变换图像

**分析：**

①样品的反傅里叶变换图像应该是原物的倒向。这是因为做两次傅里叶变换，使得函数不变而自变量改变符号，因此反傅里叶变换图像是原物像的倒像，与理论相符。

②实验中样品表面以及一些器件表面会存在一些瑕疵和灰尘，此时傅里叶反变换会出现一些明显的“衍射环”和瑕疵斑点。

③实验中使用的4f系统对位置十分敏感，需要精确调整CMOS相机的位置才能观测到棱角分明的反变换图像，而在位置不精确时边界会出现一些“毛刺”。

**5.3 空间滤波成像实验**

实验中有四种滤波器，分别为低通狭缝、低通圆孔、高通条纹、高通圆点，且每类滤波器均分为大中小尺寸。实验中我们分别将其放在傅里叶变换面上，进行滤波并观测。

**(1) 高通条纹**

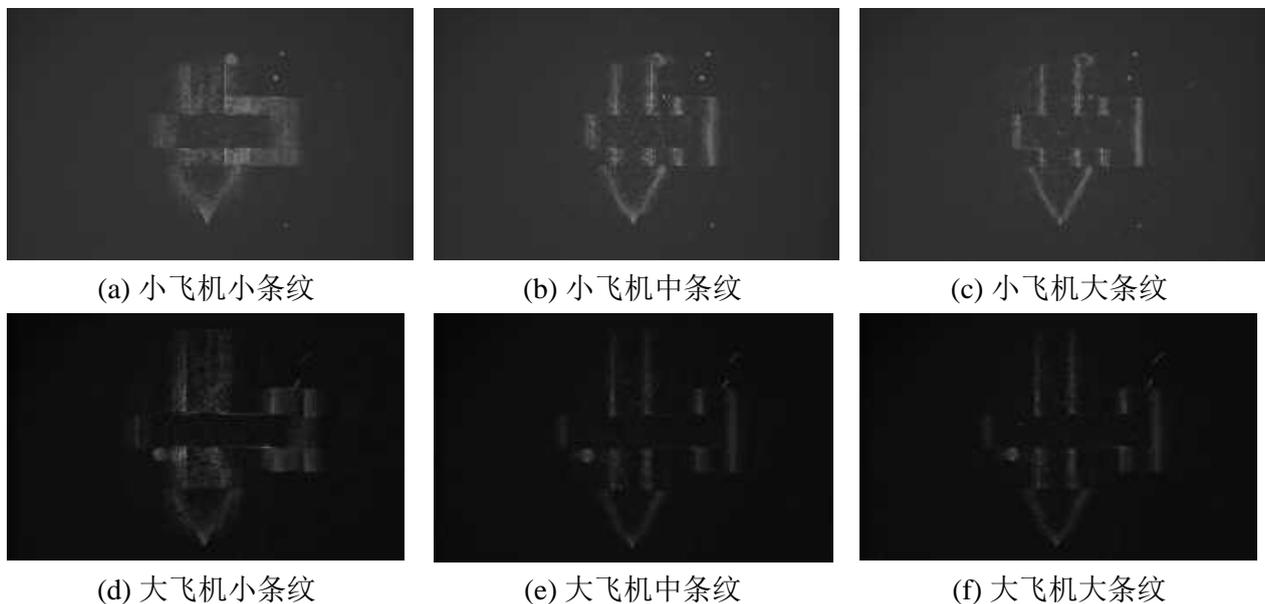


图6 高通条纹滤波后的图案

竖直条纹的作用是除了中心竖直位置的光不能通过，而其余方向的高频光可以通过，且条纹越粗，滤波宽度越宽。从图中可以看出：

①输出图像的横向边缘几乎全部丢失，这是因为所有纵向分量均被滤掉导致的，包括纵向的高频和低频信息，因此强度和锐利度均丢失了。

②图像的纵向边缘较为清晰，这是因为纵向仅仅滤掉了低频分量，因此保留了较好的纵向

图像。

③输出图像很暗，这是因为黑线滤去了频谱的低频分量，其强度较高，代表了图像的整体强度。而又因为高频分量强度很低，因此较暗。

④可以看到，条纹越粗，边缘越清晰，亮度越低，这是因为滤掉的低频分量更多，而高频会保留更多的信息，呈现清晰的边缘。

### (2) 高通圆点

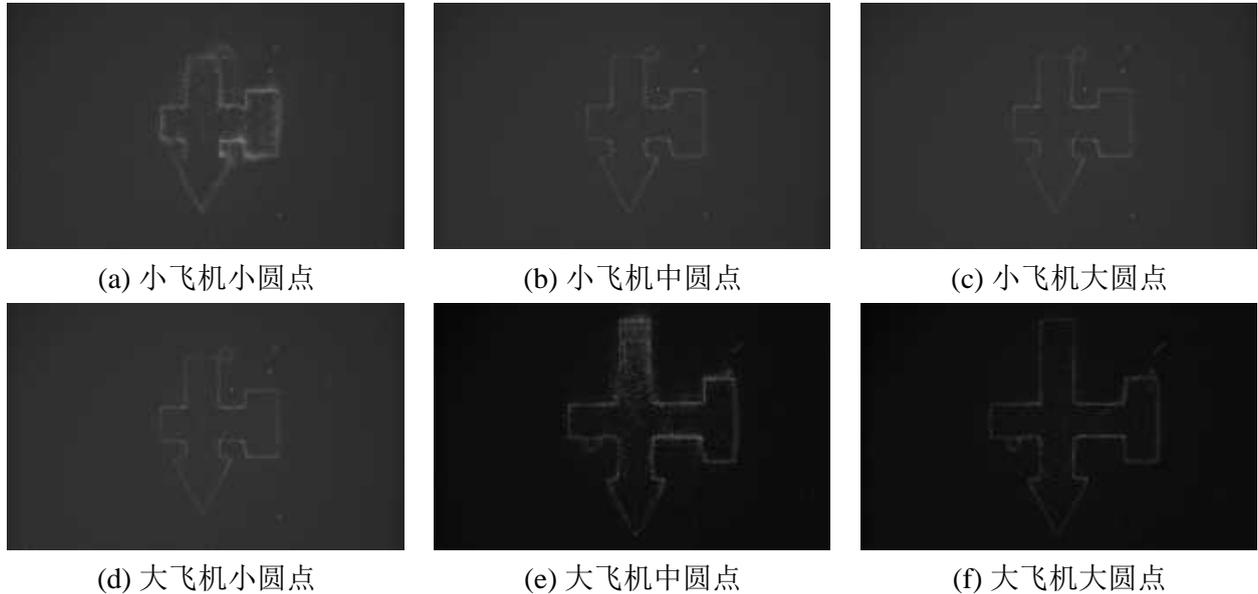


图7 高通圆点滤波后的图案

高通圆点滤波器的作用是让除了中心圆点位置外的高频光可以通过，而中心位置的低频光不能通过。滤波器的圆点半径越大，滤波的频率范围越宽。从图中可以看出：

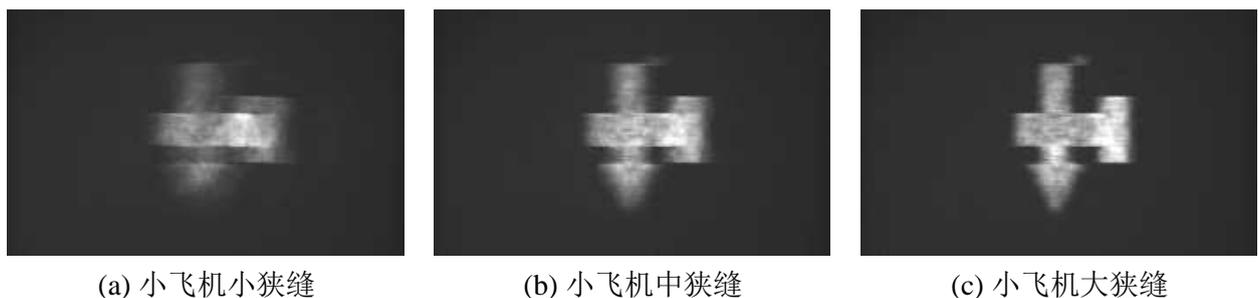
①输出图像的边缘总体较为清晰。这是因为高频信息通过滤波器时被保留，而低频信息被滤掉。高频信息主要代表图像的细节和边缘部分，因此图像边缘清晰。

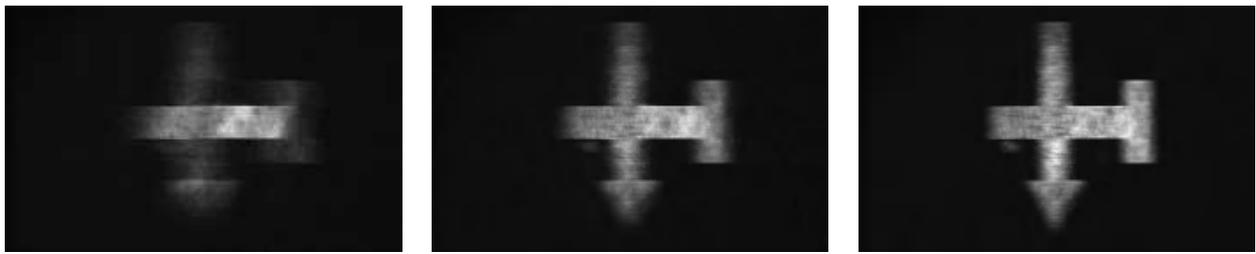
②输出图像的整体亮度较低。这是因为滤去了低频分量，而低频分量通常携带较多的能量，代表图像的整体强度。由于高频分量的能量较低，因此输出图像显得较暗。

③输出图像中的中频和低频信息几乎全部丢失，导致图像中的大部分平滑区域变得模糊或者消失。这是因为这些频率分量被圆点滤波器的中心部分滤掉。

④随着圆点半径的增加，输出图像的边缘更加清晰，但亮度进一步降低。这是因为更大的半径滤掉了更多的低频分量，同时允许更多的高频分量通过。因此，边缘信息保留得更多，但整体亮度会因为低频成分的减少而进一步降低。

### (3) 低通狭缝





(d) 大飞机小狭缝

(e) 大飞机中狭缝

(f) 大飞机大狭缝

图8 低通狭缝滤波后的图案

低通垂直狭缝滤波器的作用是让中心垂直位置的低频光可以通过，而其他方向的高频光不能通过。狭缝越窄，低频通过的范围越小。从图中可以看出：

①输出图像的横向边缘保留较好。这是因为低通滤波器允许横向高频信息通过，而这些高频信息主要包含图像的整体强度和大致结构，使得横向边缘保留较好。

②输出图像的纵向边缘变得模糊。这是因为垂直狭缝滤波器滤掉了大部分纵向高频信息，而这些高频信息主要代表图像的细节和锐利度。

③输出图像的整体亮度较高。这是因为低频分量通常携带较多的能量，代表图像的整体强度。低通滤波器允许这些低频分量通过，因此输出图像的整体亮度较高。

④随着狭缝变窄，输出图像的横向细节减少，变得更加模糊。这是因为狭缝变窄意味着通过的低频范围变小，更多的横向低频成分被滤掉，导致横向细节减少，图像变得更加模糊。

⑤图像的纵向边缘依然保留一定的清晰度，这是因为纵向的低频分量依然可以通过垂直狭缝，而这些分量对于保持纵向边缘的基本结构有一定作用。

#### (4) 低通圆孔



(a) 小飞机小圆孔

(b) 小飞机中圆孔

(c) 小飞机大圆孔



(d) 大飞机小圆孔

(e) 大飞机中圆孔

(f) 大飞机大圆孔

图9 低通圆孔滤波后的图案

低通圆孔滤波器的作用是让中心圆孔位置的低频光可以通过，而其他方向的高频光不能通过。圆孔半径越大，低频通过的范围越宽。从图中可以看出：

①输出图像的整体结构和大致形状保留较好。这是因为低频分量主要包含图像的整体强度和大致结构，低通滤波器允许这些低频分量通过。

②输出图像的细节和锐利度显著减少。这是因为高频分量主要包含图像的细节和边缘信息，而这些高频分量被低通滤波器滤掉，导致图像的细节和锐利度减少，显得更加模糊。

③输出图像的整体亮度较高。这是因为低频分量携带较多的能量，代表图像的整体强度，低通滤波器允许这些低频分量通过，因此输出图像的整体亮度较高。

④随着圆孔半径的增加，输出图像的细节损失减少，边缘变得更加清晰。这是因为更大的圆孔半径允许一些中频分量通过，保留更多的图像细节和边缘信息，但高频分量依然会被滤掉。

⑤图像的平滑过渡部分保留较好。这是因为低通滤波器主要通过低频分量，这些分量能够很好地描述图像的平滑过渡部分，使得这些部分在输出图像中得以保留。

#### 5.4 夫琅禾费衍射实验

实验中我们还搭建了夫琅禾费衍射实验系统，即利用平行光照射到小飞机上，并用两个反射镜将夫琅禾费衍射图像呈到远处的白板上，实验结果如图10所示。

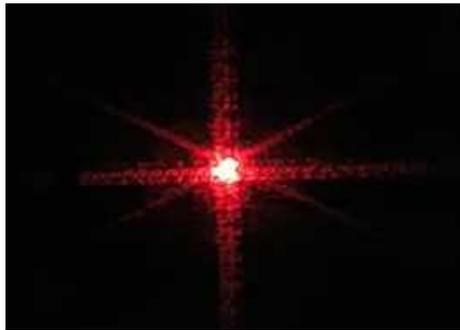


图10 夫琅禾费衍射的图案

可以看出，夫琅禾费衍射图样与傅里叶变换频谱图都呈现出了“米”字，这是因为二者成像原理一致：

夫琅禾费衍射图样本质上是透射物（如孔、缝隙或光栅）的光场分布的二维傅里叶变换。在实际光学实验中，透过物体的光经过透镜后，在透镜的焦平面上形成的图样（即衍射图样）与物体的傅里叶变换结果一致。傅里叶变换将空间域中的信息转换到频域，而夫琅禾费衍射在物理上表现出这种转换。故二者成像基本一致。

#### 5.5 激光调节(选做)

在做完以上实验后，我们做了相关的选做部分，即打乱激光的准直扩束系统，重新进行调节。实验中不断调节出射狭缝位置、透镜角度以及透镜距狭缝的距离等，最终实现了较好的平行光出射，调节结果如图11所示。

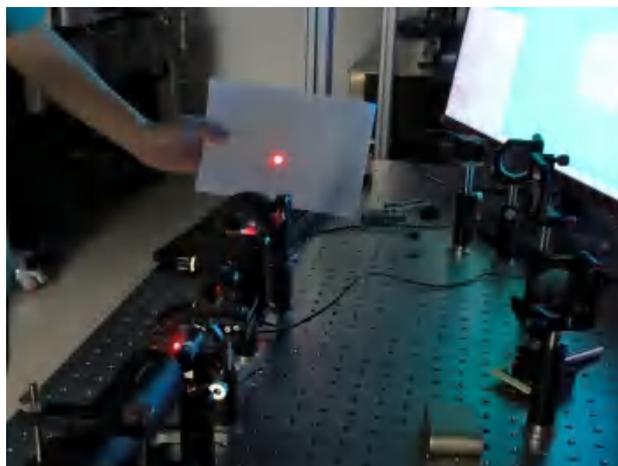


图11 激光调节输出结果

可以看出调节结果很好，呈现出较好的平行以及Gauss波包的形式。

## 6. 实验总结与收获

### 实验总结:

在本次实验中,我们搭建了傅里叶变换光路、反傅里叶变换光路和光学滤波光路,研究了飞机图案的空间频谱及成像,同时对比了夫琅禾费衍射结果并重新对激光出射模块进行了调节。

首先进行了傅里叶变换实验,利用CCD观察了小飞机和大飞机的空间频谱,发现其呈现“米”字,且较大的样品其边长更长,频谱更加清晰。接着我们搭建了傅里叶反变换的4f系统,观察了其反变换图像,呈现出与原图形的倒像,且边缘十分清晰。最后加入滤波器,分别利用4种不同的滤波器,3种尺寸进行了滤波,分析了其变化原因,实验效果较好。

### 误差分析:

实验中在滤波中发现,小瑕疵在高通滤波器中会格外明显,这是因为小尺寸的变换更多高频分量,并不会被高通滤波器影响,反而较大尺寸的透射光会被大幅度滤掉,因而几乎消失。

### 实验收获:

经过本次实验,不仅对傅里叶变换光路重新进行了理解,初步理解了空间频谱的思想,对滤波模式也有了更深的理解。

## 7. 思考题

### 7.1 为什么透镜对通过的光波具有相位调制能力?透镜相位调制表达式各项的物理意义是什么?

当光波通过透镜时,由于透镜材料的折射率和透镜形状的不同,各个光线在透镜中的传播路径长度不同,导致光波相位发生变化。这种相位的变化可以理解为透镜对光波进行相位调制。位相延迟因子 $t(x,y)$ 与透镜厚度 $D(x,y)$ 的关系为

$$t(x,y) = \exp(jknD_0)\exp\left[-j\frac{k}{2f}(x^2 + y^2)\right]$$

其中, $D_0$ 为透镜中心厚度, $n$ 为透镜折射率。第一项位相因子仅表示透镜对于入射光波的常量位相延迟,不影响位相的空间分布,即波面形状。第二项起调制作用的因子,它表明光波通过透镜时的位相延迟与该点到透镜中心的距离平方成正比。

### 7.2 什么叫渐晕效应?怎样减弱渐晕效应?

渐晕效应是指光学系统中,图像的边缘部分的亮度较中心部分显著降低的现象。这种效应导致图像四周变暗,使得整体亮度不均匀。这是因为光学元件的通光孔径有限,限制了较高频率的空间频率成分传播,从而导致衍射频谱不完整,图像细节减少,锐利度降低,亮度不均匀。

#### 减弱方法:

- ① 设计时增加通光孔径的直径,减少边缘光线被遮挡的几率。
- ② 采用特殊的透镜排列和设计,减少光学渐晕。
- ③ 高质量的镀膜和材料可以减少自然渐晕的影响。
- ④ 尽量靠近成像物体,保证更可能多的光通过。

### 7.3 什么叫光学 4f 系统?如何使用这一系统做光学信息处理?

光学 4f 系统是一种常用的光学信息处理系统,由两个透镜和两个共轭傅里叶平面组成,因而得名“4f系统”。在这种系统中,两个透镜的焦距均为 $f$ ,并且它们之间的间距为 $2f$ 。

利用4f系统，可以进行各种光学信息处理，如滤波、边缘检测、图像增强等。下面是具体步骤：

首先将待处理的图像放置在输入平面上，该图像通过光束照射产生相应的光场分布。输入光场通过第一透镜，在傅里叶平面上形成该图像的傅里叶变换频谱。在傅里叶平面上放置特定的空间滤波器，可以选择性地通过或阻挡特定频率的光。例如，使用低通滤波器可以平滑图像，去除高频噪声；使用高通滤波器可以增强边缘细节。经过空间滤波后的频谱信息通过第二透镜进行逆傅里叶变换，在输出平面上形成处理后的图像。在输出平面上得到经过处理后的图像。

#### 7.4 如果用白光作光源，进行本实验的傅里叶变换实验，即把准直He-Ne激光替换为准直白光，观察准十字透射物的频谱图，会看到什么样的频谱图？

在傅里叶变换实验中，如果用准直白光代替准直He-Ne激光作为光源，并观察准十字透射物的频谱图，会看到一个与使用单色光时显著不同的频谱图。这是因为白光包含了多种波长的光，而傅里叶变换实验的结果依赖于光的波长。

因为每个波长的光都会在傅里叶变换平面上产生自己的衍射图样，结果是频谱图呈现出彩色斑点或彩色条纹。这些彩色斑点或条纹对应于不同波长的光。在傅里叶变换的中心位置，白光的所有波长会叠加，形成一个白色斑点。

对于标准十字架可能会观察到：

位于频谱图的中心，由所有波长的零级衍射叠加形成的白色斑点，准十字透射物的傅里叶变换会在不同波长处形成一系列平行于原始十字方向的彩色条纹，每个波长的光在不同位置形成各自的衍射极大值，会在频谱图中形成多种颜色的散斑。

No.

Date

### [实验步骤]

#### 1. 傅里叶变换

- ① 安装光路 ② 调整元件 ③ 加入中间滤波器 ④ 调整并观测

#### 2. 傅里叶反变换

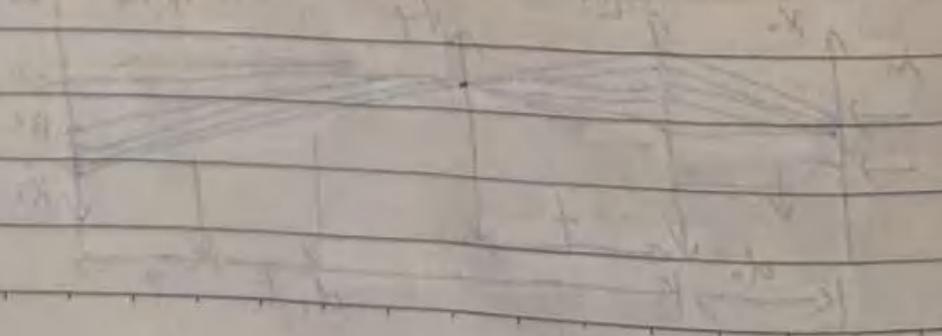
- ① 插入反傅里叶变换透镜, 并调整观测

#### 3. 光学滤波

- ① 在傅里叶变换透镜和反傅里叶变换透镜的焦点重合处放入空间滤波器
- ② 观察滤波图像。

陈科

2024.5.21





# 《光信息专业实验（I）》课程 实验报告

学院：物理学院

专业：物理学 年级：2021级

实验人姓名、学号：路尚润21305127

参加人姓名、学号：邓逸枫21305409

组号：B3组

日期：2024年5月28日 星期二

上午[ ] 下午[√] 晚上[ ]

室温：26°C 相对湿度：80%

指导教师：陈科

## 1.2 共焦测量实验

### 1. 实验目的

1. 了解共焦成像原理及其测量特点。
2. 掌握共焦光学层析方法以及层析图象重建的方法。
3. 了解激光共焦测量的应用场合。

### 2. 简述实验原理

#### 2.1 激光共焦测量的原理

共焦成像分为反射式及透射式两种，本实验使用的是反射式共焦成像，实验原理见图1。点光源置于准直物镜焦点上，发出的光经过准直物镜后准直为平行光，被半反射镜反射后，由共焦透镜汇聚照射在试样上。若试样放置于共焦透镜的焦面上，则此时入射光反射后经共焦透镜恢复成平行光源路返回，汇聚在成像透镜的焦点上形成二次成像，这就是共焦成像。

共焦成像利用放置在光源后的照明针孔和放置在检测器前的探测针孔实现点照明和点探测，来自光源的光通过照明针孔发射出的光聚焦在样品焦平面的某个点上，该点所发射的荧光成像在探测针孔上，该点以外的任何发射光均被探测针孔阻挡。照明针孔与探测针孔对被照射点或被探测点来说是共轭的，因此被探测点即共焦点，被探测点所在的平面即共焦平面。

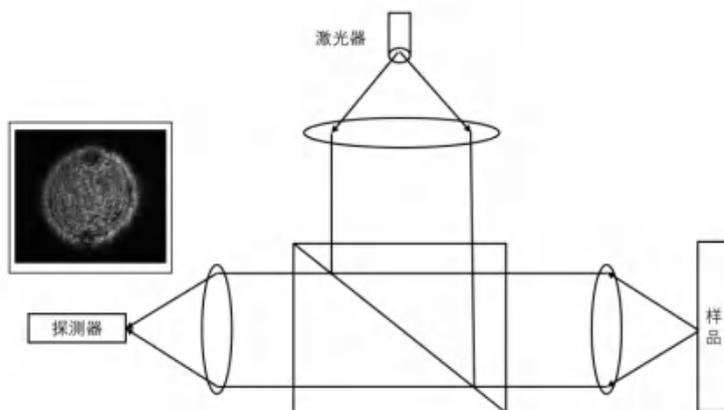


图1 反射式共焦成像原理图

计算机以像点的方式将被探测点显示在计算机屏幕上，为了产生一幅完整的图像，由光路中的扫描系统在样品焦平面上扫描，从而产生一幅完整的共焦图像。只要载物台沿着Z轴上下

移动，将样品新的一个层面移动到共焦平面上，样品的新层面又成像在显示器上，随着 Z 轴的不断移动，就可得到样品不同层面连续的光切图像。

共焦成像在测量上的特点：

- a、共焦测量具有很高的轴向分辨率，只有当被测物体处于透镜焦平面时，其反射像才能被有效地记录下来。
- b、对被测物体的不同层次进行扫描可以得到不同层次的像，利用不同层次的像就可以重构出物体的三维图像。
- c、当输入的光源是激光光源时，因为其单色性好，所以图像会具有较高的衬度。

### 2.2 由共焦测量获取三维形貌的原理

设样品在光束照射下的复振幅为  $u(x_0, y_0)$ ，共焦透镜和成像透镜的光瞳分别为  $P_1(\xi_1, \eta_1)$  和  $P_2(\xi_2, \eta_2)$ ，于是透过共焦透镜的复振幅为：

$$U_1(x_1, y_1) = h_1(x_0, y_0)U(x_0 - x_1, y_0 - y_1)$$

$(x_1, y_1)$  是共焦透镜后某一垂直于光轴的平面的坐标系， $h_1(x_1, y_1)$  是共焦透镜振幅的点扩散函数。

$$h_1 = \iint_{-\infty}^{\infty} P_1(\xi_1, \eta_1) \exp \left[ \frac{jk}{d} (\xi_1 x_0 + \eta_1 y_0) \right] d\xi_1 d\eta_1$$

设  $M$  为透镜的放大率。则成像透镜的后焦平面上的光振幅分布为：

$$U_2(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} P_1(x_1, y_1) h_2 \left( \frac{x}{M} - x_0, \frac{y}{M} - y_0 \right) dx_0 dy_0$$

若是用的光阑孔径趋向无穷小（即 CCD 的接收面积趋向一点）时， $x = y = 0$ ，则探测到的光强为：

$$I(x, y) = \left| \iint h_1(x_0, y_0) \cdot u(x_0 - x_1, y_0 - y_1) * h_2(-x_0, -y_0) dx_0 dy_0 \right|^2$$

对偶点扩散函数，可以改写为：

$$I(x, y) = |h_1(x_0, y_0) h_2(x_0, y_0) * U(x_0, y_0)|^2$$

### 3. 实验用具及光路图

实验用具：激光器、准直扩束系统（含衰减器）、半透半反镜、平面反射镜、成像透镜、CMOS（成像）传感器、计算机、金属片（粗糙、平滑）。

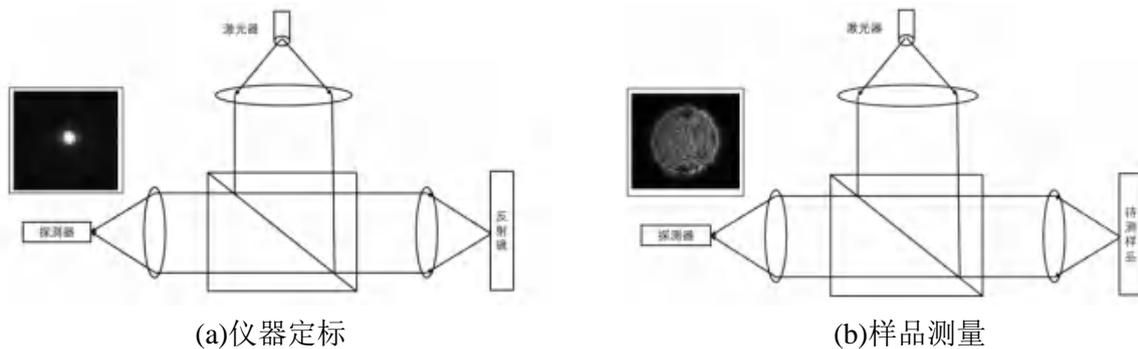


图2 具体实验光路图

### 4. 实验步骤

#### 4.1 共焦成像关系定标

- ① 打开激光器、计算机及软件。
- ② 在平移台安装平面反射镜，并调节使其垂直光轴方向，具体调节方式为：调节垂直和水平旋钮，使得镜面在X-Y方向上移动时激光亮斑不会发生大幅变化。



可以看出,此时光斑呈现出很好的圆形,且杂光较少,这得益于我们对衰减片的调节,此光斑强度可以保证光斑变大后仍然能对光斑进行较好地观测。

实验中以 $5\mu\text{m}$ 为单位,逐渐增大刻度,测量数据如表1所示。

表1 共焦成像定标测量结果

离焦量/ $\mu\text{m}$	光斑直径(增大)	光斑直径(降低)	光斑直径(平均值)
-110	432.5	431.9	432.2
-105	414.1	413.6	413.9
-100	392.7	394.2	393.5
-95	380.5	375.4	378.0
-90	354.8	354.1	354.5
-85	334.1	334.5	334.3
-80	310.8	315.7	313.3
-75	298.8	295.5	297.2
-70	277.4	276.4	276.9
-65	261.5	256.7	259.1
-60	235.3	239.8	237.6
-55	216.2	217.6	216.9
-50	200.4	199.6	200.0
-45	183.6	181.5	182.6
-40	161.7	164.3	163.0
-35	143.7	146.5	145.1
-30	128.1	128.9	128.5
-25	114.8	116.2	115.5
-20	93.5	94.2	93.9
-15	78.2	79.2	78.7
-10	63.5	63.1	63.3
-5	49.2	45.8	47.5
0	35.5	35.3	35.4
5	39.2	39.9	39.6
10	49.5	53.8	51.7
15	62.9	65.2	64.1
20	77.3	82.8	80.1
25	91.8	93.2	92.5
30	108.2	112.5	110.4
35	119.8	124.8	122.3
40	136.5	143.2	139.9
45	150.9	155.6	153.3
50	165.6	169.1	167.4
55	177.8	180.7	179.3
60	192.1	199.2	195.7
65	208.9	218.2	213.6
70	231.6	238.5	235.1
75	249.7	255.8	252.8
80	268.3	273.6	271.0
85	285.2	294.6	289.9
90	307.5	316.1	311.8
95	324.8	327.5	326.2
100	343.8	348.2	346.0
105	362.1	366.5	364.3
110	382.5	384.8	383.7
115	405.2	406.1	405.7

将平均值绘图,实验结果如图5所示,可以看出,左侧的标定曲线线性度更好,因此对左侧曲线进行拟合,并在实验中使用左侧定标进行测量。

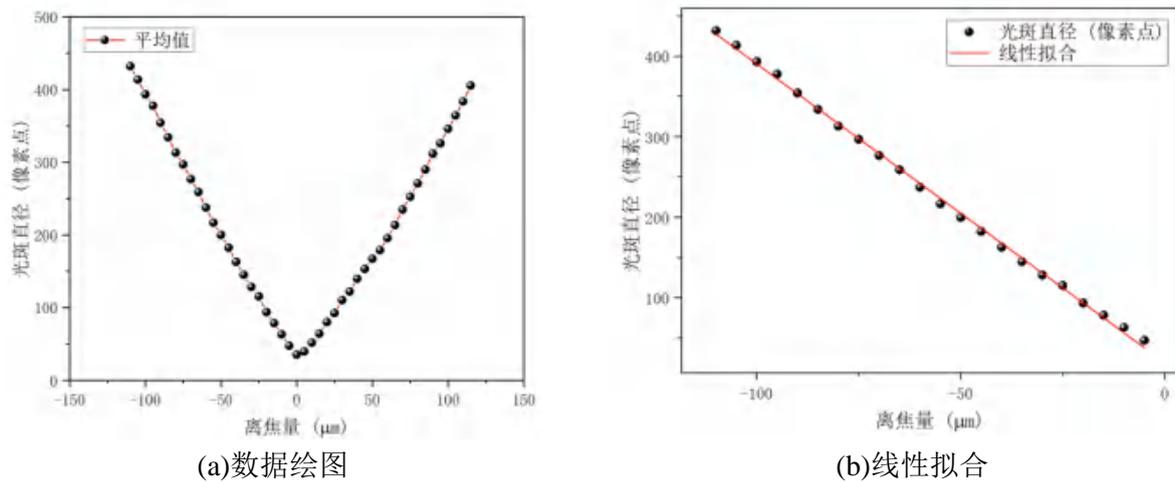


图5 标定曲线及拟合

拟合结果为：

$$D = 19.69 - 3.71 \cdot z$$

拟合评分为R-Square=0.99863，拟合评分极高，实验测量结果极好，其反变换式为

$$\Delta z = -0.2696 \cdot \Delta D$$

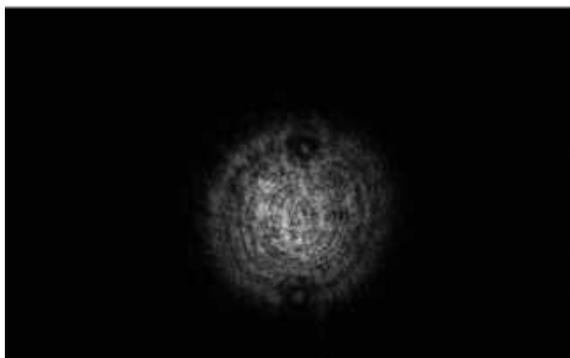
根据此即可利用圆斑直径变化量计算出离焦量。

**结果分析：**

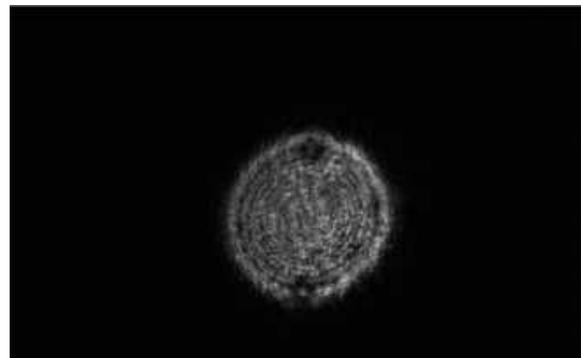
- ① 可以看到，光斑直径随着离焦量的增大而增大，呈现出很好的V字形形状。
- ② 较小的离焦量即可引起较大的圆斑半径变化。

**误差分析：**

- ① 实验中我们通过由大到小以及由小到大进行了两次定标测量，取平均值进而消除由于调节方向带来的误差，即可能由于人为调节而导致的“滞后”。
- ② 光路中存在由于半反射镜导致的两个光斑，实验中尽量保证其与测量光斑分离，从而不会影响测量结果。
- ③ 实验中的关键步骤是光路准直且各个界面垂直于光轴，而人为调节必然会产生一定的误差，但实验中我们利用多方向精确调节，保证了仪器的准确性。
- ④ 实验中发现，光斑并非为完全的圆形，内部有非均匀的细节杂斑，如下图，因此仪器读取难免会产生误差。可以看出，离焦量为正时圆斑的边缘有些毛刺，并不清晰，十分影响仪器读数，因此定标曲线线性度相对较低。



(a)离焦量为正时的圆斑



(b)离焦量为负时的圆斑

图6 圆斑内部细节

- ⑤ 实验中选取合适的光强是十分重要的，因为较大的圆斑会将光强分散，光强较小将会使得其难以观测；而较小的圆斑光强过于集中，会增大瑕疵影响观测。

### 5.2 金属反射片1和金属反射片2的局部形貌测量

接着我们将反射镜替换为金属片样品，测量其表面纹理。两个金属样品的平整度不同，其分别的测量结果如表2所示，根据换算，并把平均值位置归零，即可得到样品表面的相对高度。

表2 样品测量结果

光滑样品			粗糙样品		
距离X/mm	光斑直径	相对高度/ $\mu\text{m}$	距离X/mm	光斑直径	相对高度/ $\mu\text{m}$
5.000	176.8	0.48	5.700	159.5	0.23
5.050	177.7	0.24	5.750	152.8	2.04
5.100	183.4	-1.30	5.800	152.5	2.12
5.150	190.8	-3.29	5.850	164.2	-1.04
5.200	191.1	-3.37	5.900	164.9	-1.22
5.250	182.5	-1.05	5.950	172.8	-3.35
5.300	198.6	-5.39	6.000	140.8	5.27
5.350	184.6	-1.62	6.050	145.7	3.95
5.400	171.5	1.91	6.100	151.3	2.44
5.450	170.2	2.26	6.150	127.2	8.94
5.500	167.5	2.99	6.200	167.2	-1.84
5.550	172.4	1.67	6.250	167.5	-1.92
5.600	182.8	-1.13	6.300	164.5	-1.12
5.650	187.4	-2.37	6.350	163.6	-0.87
5.700	192.2	-3.67	6.400	166.2	-1.57
5.750	179.2	-0.16	6.450	168.9	-2.30
5.800	176.2	0.64	6.500	176.5	-4.35
5.850	173.8	1.29	6.550	153.7	1.80
5.900	170.3	2.24	6.600	158.2	0.58
5.950	169.3	2.50	6.650	146.2	3.82
6.000	181.3	-0.73	6.700	181.2	-5.62
6.050	169.2	2.53	6.750	167.3	-1.87
6.100	158.8	5.34	6.800	175.6	-4.11

将相对高度绘图，实验结果如图7所示。

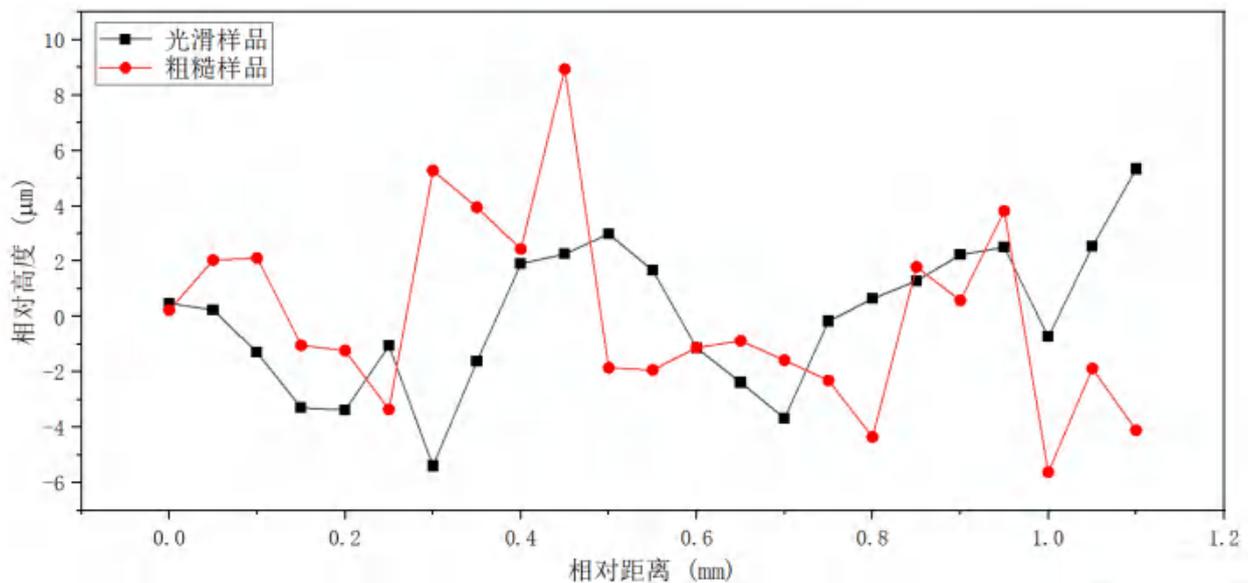


图7 相对高度与水平距离的关系

为表征样品表面平整度，采用PV、RMSD与EM三个指标进行评价：

① PV是表面形貌的最大峰谷值， $PV = z_{max} - z_{min}$ ；

② RMSD是表面形貌的均值方根， $RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \Delta z_i^2}{N-1}}$ ；

③ EM是测量极值与平均值之差， $EM = z_{max} - \bar{z}$ 。

计算结果如表3所示

样品	PV/ $\mu\text{m}$	RMSD/ $\mu\text{m}$	EM/ $\mu\text{m}$
样品1	10.73	2.53	5.34
样品2	14.56	3.35	8.94

### 5.3 金属反射片局部形貌测量结果对比与分析

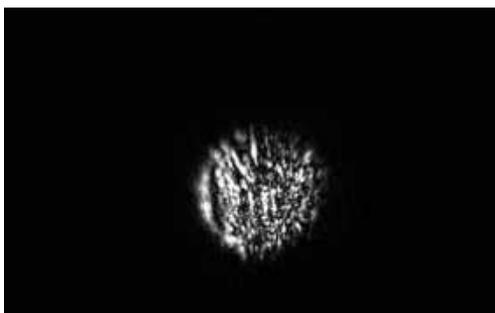
#### 结果分析：

首先，根据绘图可以看出，光滑样品的变化是连续的，较为平缓的，并未出现过大的跃变；而粗糙样品的变化是突变的，出现了多个极大极小值，这也印证了粗糙样品表面存在多个划痕。

根据数据分析也可以看出，样品1的评价数值普遍小于样品2，说明其粗糙度较低，但实际上两者的数值基本相近，这说明样品划痕的深度是基本一致的，但粗糙样品的极值数量更多，即实际上，粗糙与平滑的区别并不一定是划痕深度，更多的是划痕密度，或者说峰值个数。因为可以看出，平滑样品的高度变化十分连续、平滑，而粗糙则是出现多个上下峰值，变化迅速。这是因为金属表面本身就会出现较大的凹凸不平，但这并不意味着粗糙，只能说是由于金属的范性，形成了形变，而真正的粗糙则是由于多个划痕引起的斜率较大的变化。

#### 误差分析：

① 实验中，之所以能够观察到不同大小的圆斑，是因为金属样品表面存在凹凸不平，前后的位置改变导致离焦量不同，从而产生不同大小的圆斑，但圆斑由于金属表面有着细致的纹理，因此成像并非完全圆形，影响观测。



(a)平滑样品的初始成像状态



(b)粗糙样品的初始成像状态

图8 样品初始成像

② 金属片自身可能存在倾斜，会引起整体的幅度变化，造成实验数据的偏差。在具体实验中，我们首先大幅度调节水平X位移，保证其圆斑半径不会产生整体的大幅度变化，从而消除金属片倾斜产生的误差。

## 6. 实验总结与收获

#### 实验总结：

在本次实验中，我们进行了共焦测量的方法，搭建了反射式共焦成像光路，实现了样品表

面形貌和纹理的测量，且进行了定量分析。

首先，我们定标测量了光斑直径 $d$ 随离焦量 $z$ 的变化关系，得到所用的定标曲线，呈现出较好的V字形，初步观测可以发现左侧曲线更加线性，因此对其进行拟合，进行定标换算，拟合评分 $R\text{-Square}=0.99863$ ，线性度极好，同时进行了误差分析。

接着，我们对两种不同粗糙度的样品表面纹理进行了测量，发现平滑样品的变化幅度较小且平缓，而粗糙样品的变化幅度较大，并且曲线出现多个锐利的峰值。同时利用三个参数对平整度进行了表征，可以发现光滑样品的确呈现出较小的数值，更加平滑。但经过分析，实际上粗糙与平滑影响的是变化趋势，而并非是变化幅度的大小。

总的来说，实验进行了完整的反射式共焦测量实验，分析完整且进行了完善的误差分析。

#### 误差分析：

实验中存在一些误差，在实验中进行过具体分析，在此不再赘述。

#### 实验收获：

经过本次实验，对共焦成像实验有了更深的理解，对透镜等实验仪器的运用有着更深的理解。

#### 实验建议：

实验中软件读取数值存在上下浮动，这可能是由于桌面振动等导致仪器晃动而产生的，实际上可以考虑将一段时间内的成像半径取平均值作为输出，既能保证数据变化连续，又能稳定输出。

## 7. 思考题

### 7.1 说明实现共焦测量的关键技术。

①点光源和点探测器：在共焦测量系统中，使用点光源和点探测器来确保只有焦点处的光线能够被有效探测到，使得系统具有高空间分辨率。

②高质量光学元件：高质量的物镜、反射镜和其他光学元件对于共焦测量至关重要，具有高透过率、低散射以及精确的波前修正能力，以确保测量的精度和准确度。

③光源：激光作为光源是共焦系统的常见选择，其具有高亮度、高方向性和单色性，可以提高系统的分辨率。

④数据处理和成像软件：共焦测量生成的数据量大且复杂，需要高效的数据处理和成像软件来进行数据分析和图像重建，这些软件不仅需要具备快速处理能力，还需要能够进行多种图像分析。

⑤精密调节机构：为了实现三维成像或测量，需要通过精密的机构移动样品。

### 7.2 什么叫层析性？为什么共焦成像可以实现层析性？

层析性是指成像系统能够获取物体内部不同深度层面的图像。

#### 共焦成像实现层析性的原因：

共焦显微镜通过物镜将点光源聚焦在特定平面上，当物体处于该平面时，其反射光也是平型光，而不同平面反射光也会呈现出不同的反射光模式，汇聚后也会得到不同的圆斑大小，这保证了不同位置的反射光呈现不同的光斑。因此，共焦透镜的焦面为参照，通过测量光斑直径即可换算出样品表面的离焦量，进而重构三维共焦成像。

### 7.3 共焦显微镜与传统显微镜在原理上有什么区别？

#### 传统显微镜：

传统显微镜利用全场照明方式，光源发出的光通过聚焦后照亮整个样品，物镜收集并聚焦样品反射或透射的光，形成图像。样品的所有层面同时被照亮并成像，导致不同深度的光叠加在一起，产生二维图像。

#### **共焦显微镜：**

共焦显微镜使用点光源和点探测器，并通过物镜将光聚焦在样品的一个特定平面。只有焦点处的光能够通过针孔光阑并被检测到，其他离焦的光被阻挡。这种点扫描方式使得共焦显微镜能够获取样品的不同深度层面的光学切片图像。

#### **7.4 若金属表面形貌的实验结果呈现出局部波动但整体向上变大或整体向下变小的趋势，则说明实验中哪个环节没有调节好？是否可以如何通过数据处理消除此影响？为什么？**

事实上，我们在前面的误差分析中进行过分析，这实际上是由于金属表面与光轴没有垂直导致的，即大幅度移动水平坐标 $X$ 会导致光斑产生交大幅度的改变，即由于金属水平方向倾斜，从而影响离焦量导致的。

原则上可以通过数据处理消除，因为这种变化是来自于样品的倾斜，而倾斜角度不变，因此仅需将数据整体进行一个拟合，即可得到一个趋势线，虽然拟合评分并不高但也有效。如果数据点足够多，可以平均多个数据点然后利用整体拟合，从而消除曲线的整体趋势。

No.

Date

### 实验 1.2 共焦测量实验

实验地点: 陆达理室

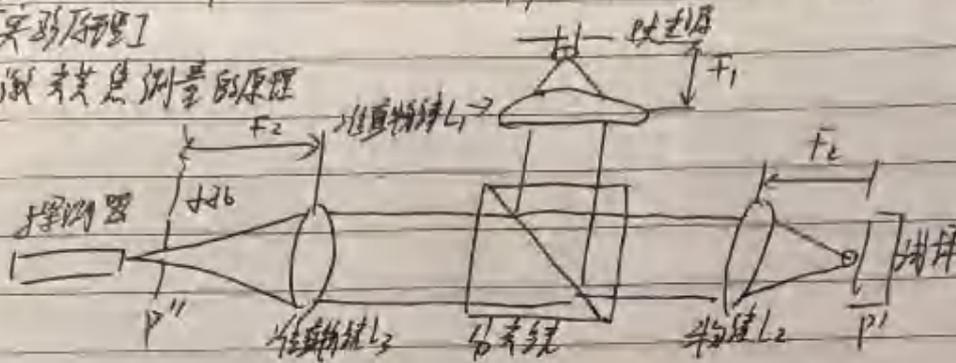
实验时间: 2024年5月28日

实验人: 路南润 21305127

合作人: 邓逸桐 21305409

[实验原理]

#### 1. 激光共焦测量的原理



传统衍射显微镜受到衍射的限制, 致使它无法提供无限的放大率的, 其成像依旧是停留在平面成像。

共焦成像 反射式与透射式, 本实验用反射式, 点光源发出的光经物镜反射, 经平面镜反射, 汇聚到样品上, 其反射后经过透镜恢复为平行光经原路返回, 经透镜成像透镜的焦面上二次成像。

#### 2. 三维形貌层析的共焦测量

设样品在反射面反射, 复振幅分布为  $U(x_0, y_0)$ ,  $L_2, L_3$  焦距分别为  $f_1, f_2, f_3$  和  $P_1(x_1, y_1)$  和  $P_2(x_2, y_2)$ 。

则有 
$$U_1(x_1, y_1) = h_1(x_0, y_0) U(x_0 - x_1, y_0 - y_1)$$

$$h_1 = \iint_{-\infty}^{\infty} P_1(x, y) \exp\left[-\frac{ik}{2} (x^2 + y^2)\right] dx dy$$

设  $M$  为透镜放大率:

$$U_2(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} P_2(x, y) h_2\left(\frac{x}{M} - x_0, \frac{y}{M} - y_0\right) dx_0 dy_0$$

若光源为行趋光子光源, 则有

$$Z(x, y) = \left| \iint_{-\infty}^{\infty} h_1(x_0, y_0) \cdot U(x_0 - x_1, y_0 - y_1) \cdot h_2(x_1, y_1) dx_0 dy_0 \right|^2$$

[实验步骤]

#### 1. 共焦成像系统搭建

- ① 打开光源 ② 调整物镜 ③ 调整光阑 ④ 记录

扫描测量

路南润

2024.5.28



# 《光信息专业实验（I）》课程 实验总结

学院：物理学院

专业：物理学 年级：2021级

实验人姓名、学号：路尚润21305127

参加人姓名、学号：邓逸枫21305409

组号：B3组

日期：2024年5月21日 星期二

上午[ ] 下午[] 晚上[ ]

室温：26°C 相对湿度：80%

指导教师：陈科

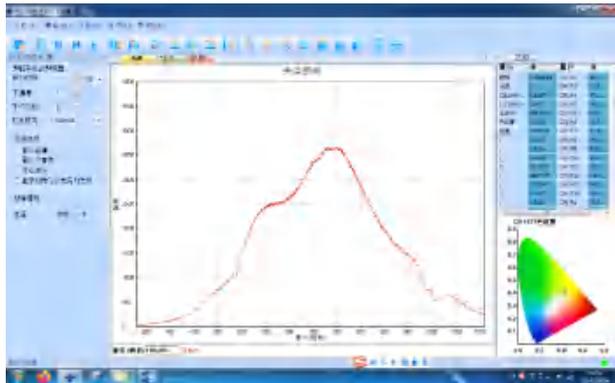
## 1.3 色度学实验

### [ 实验现象、实验结果 ]

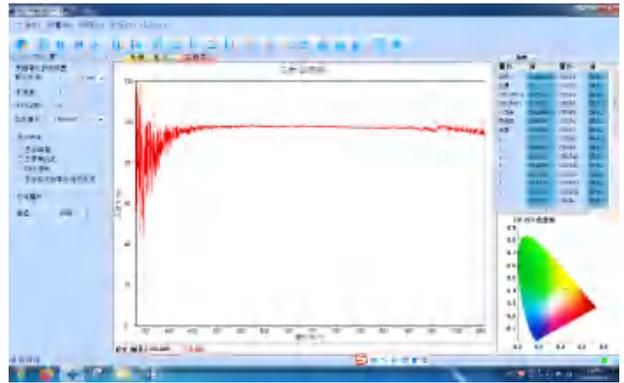
#### 1. 反射物体色坐标测量

##### (1) 反射探头式

##### a. 标准白板反射光强光谱视图、及其反射率光谱视图



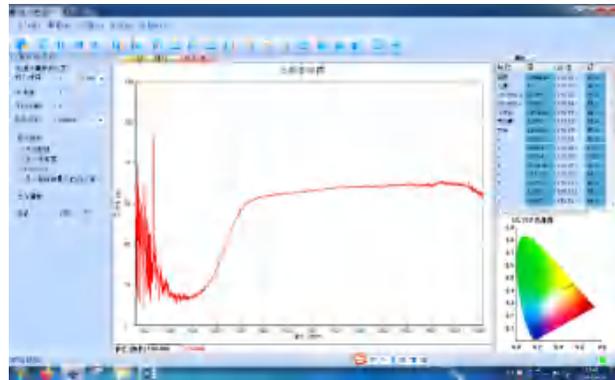
(a)反射光强光谱视图



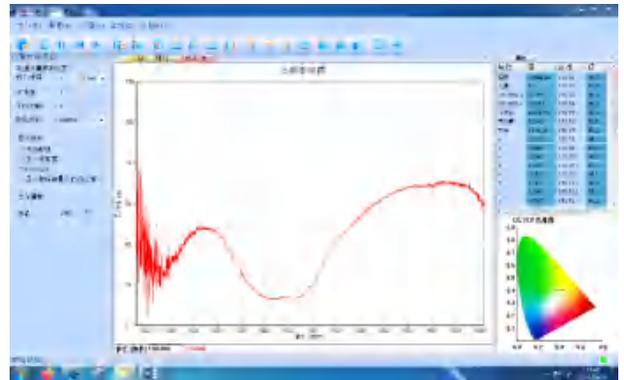
(b) 反射率光谱视图

图1 反射探头式测量标准白板光谱视图

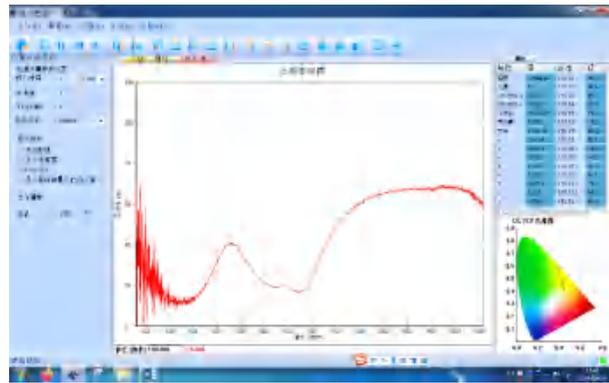
##### b. 黄绿蓝色卡反射率光谱视图



(a)黄色卡反射率光谱视图



(b)蓝色卡反射率光谱视图



(c)绿色卡反射率光谱视图

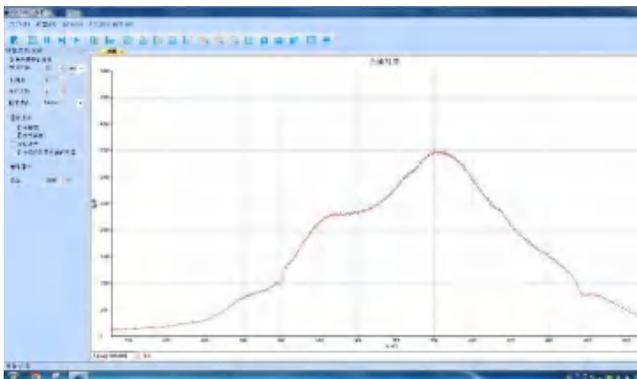
图2 反射探头式红绿蓝色卡反射率光谱视图

c. 表 1 采用 0°照明、漫反射接收几何条件、标准照明体 A 的反射颜色测量结果

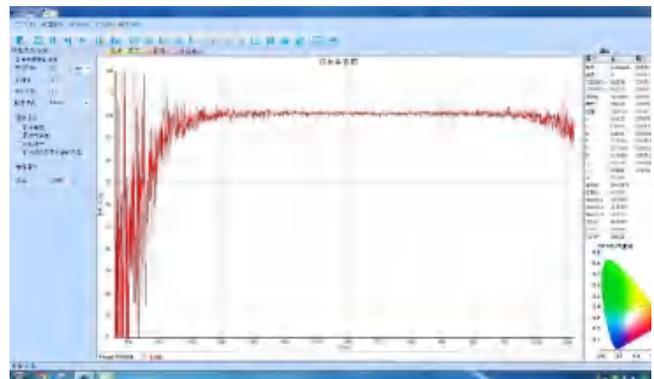
色标卡颜色（日光下观察）	A 光源下观察颜色	色坐标	与参考白板的色差
参考白板	白黄	(0.4518,0.4090)	/
黄	黄	(0.5153,0.4373)	0.069520788
绿	绿偏黄	(0.4224,0.4754)	0.072617629
蓝	蓝偏绿	(0.3368,0.3946)	0.115898059

(2) 0° /45° 式测量结果

a. 标准白板反射光强光谱视图、及其反射率光谱视图



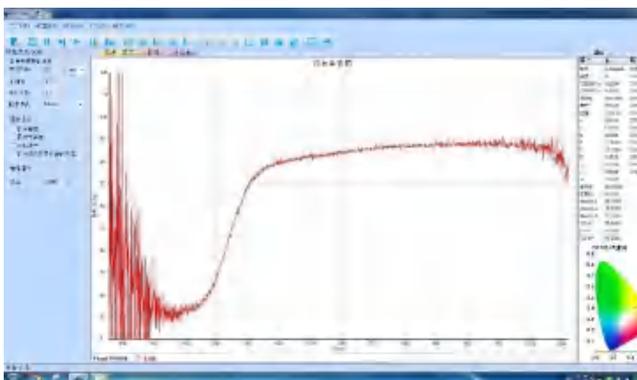
(a)反射光强光谱视图



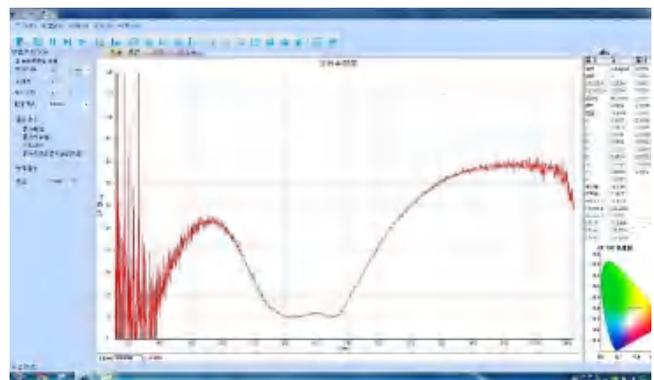
(b) 反射率光谱视图

图3 0° /45° 式测量标准白板光谱视图

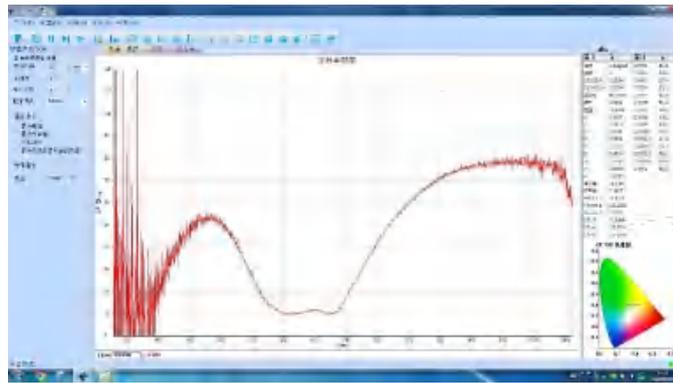
b. 黄绿蓝色卡反射率光谱视图



(a)黄色卡反射率光谱视图



(b)蓝色卡反射率光谱视图



(c)绿色卡反射率光谱视图

图4 0° /45° 式红绿蓝色卡反射率光谱视图

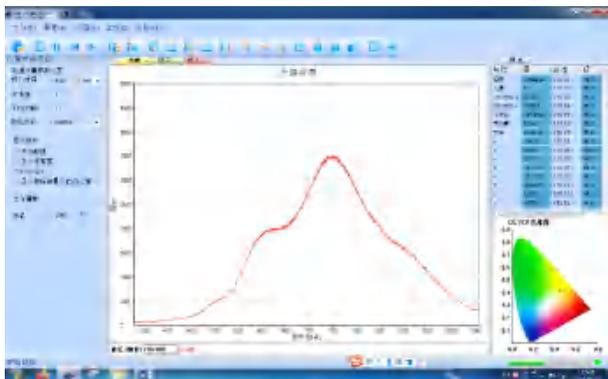
c.

表 2 0° /45° 式标准照明体 A 的反射颜色测量结果

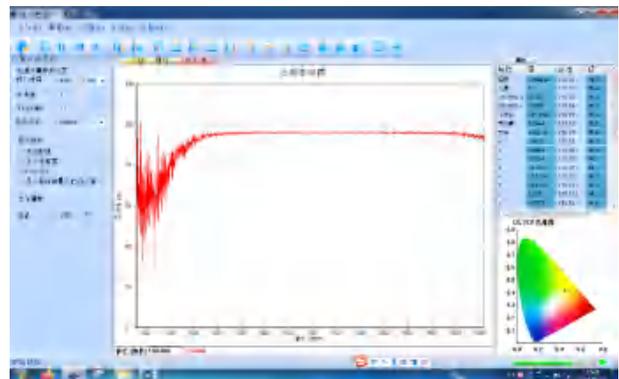
色标卡颜色（日光下观察）	A 光源下观察颜色	色坐标	与参考白板的色差
参考白板	白黄	(0.4512,0.4085)	/
黄	黄	(0.5234,0.4380)	0.077994166
绿	绿偏黄	(0.4014,0.5053)	0.108858991
蓝	蓝偏绿	(0.3007,0.3913)	0.151479669

(3) 积分球式测量结果

a. 标准白板反射光强光谱视图、及其反射率光谱视图



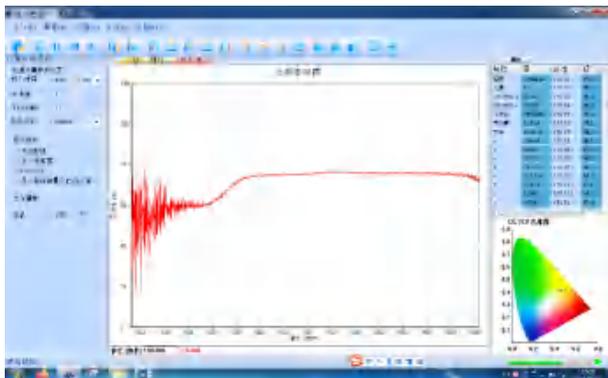
(a)反射光强光谱视图



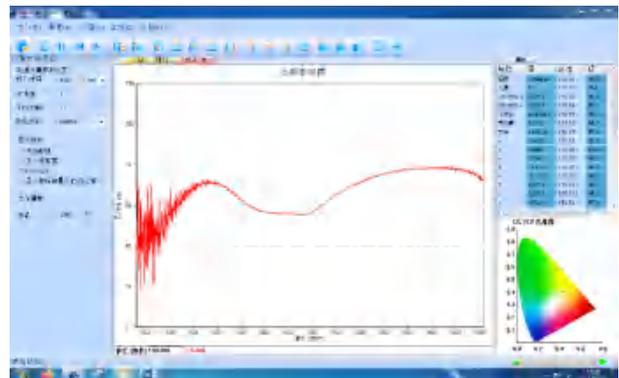
(b) 反射率光谱视图

图5 积分球式测量标准白板光谱视图

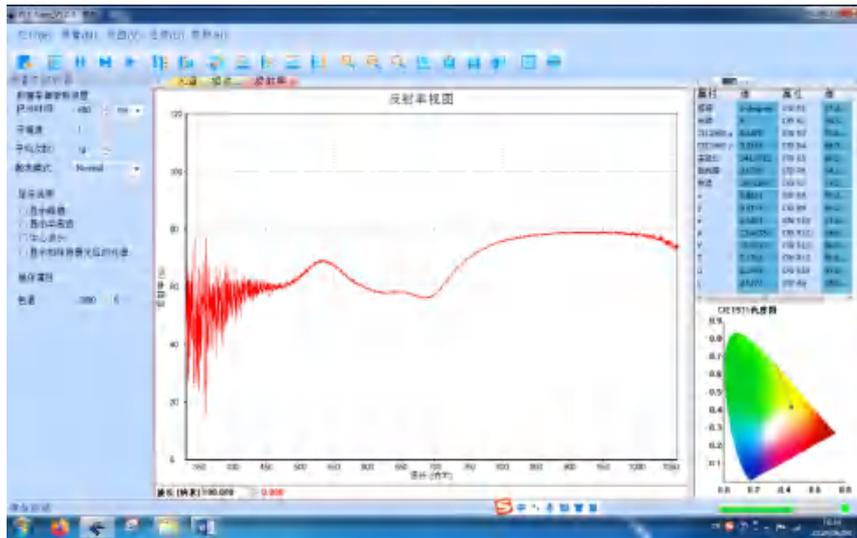
b. 黄绿蓝色卡反射率光谱视图



(a)黄色卡反射率光谱视图



(b)蓝色卡反射率光谱视图



(c)绿色卡反射率光谱视图

图6 积分球式红绿蓝色卡反射率光谱视图

c. 表 3 积分球式标准照明体 A 的反射颜色测量结果

色标卡颜色（日光下观察）	A 光源下观察颜色	色坐标	与参考白板的色差
参考白板	白黄	(0.4522,0.4094)	/
黄	黄	(0.4664,0.4122)	0.014473424
绿	绿偏黄	(0.4415,0.4174)	0.013360015
蓝	蓝偏绿	(0.4308,0.4069)	0.021545533

(4)反射物体色坐标测量实验现象、结果、误差的简单分析

**实验现象:**

黄色色卡在长波区域呈现出较为平稳的高反射率，绿色色卡在530nm附近有一个明显的高反射峰，蓝色色卡：在470nm附近有一个明显的高反射峰。三种色卡的测量结果色坐标均处于对应的色区，符合实验预期。

**实验效果:**

三种测量方法在一定误差范围内均能较好地反映物体的反射特性，标准白板和三种色卡的光谱图在三种测量方法下具有相同的变化趋势。不同测量方法下的色坐标存在一定差异，可以利用色差判断测量效果，色卡与参考白板的色差越大，杂散光影响越小，测量结果越好。故综合起来的测量效果：反射式>0° /45° 式>积分球式

**实验误差:**

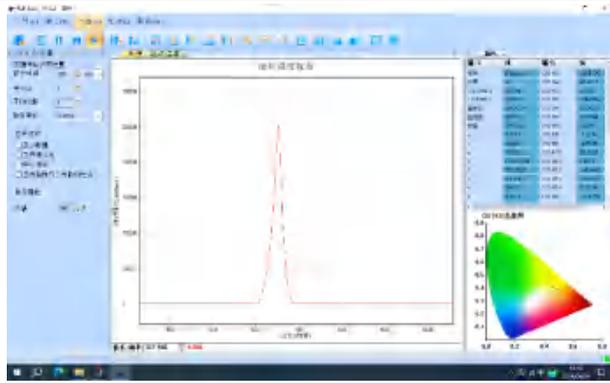
①卤钨灯本身即非理想白光光源，其黄光成分比例较高，测量结果会导致黄光部分更强。

②实验中虽然已经去背景光，但实际上还有许多杂散光进入传感器，比如光打在金属或其他表面的散射，可能会影响实际测量。

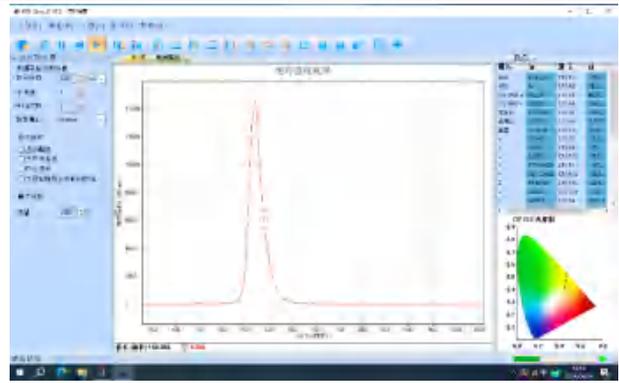
③实验中由于杂散光以及环境振动等的影响，会导致数据浮动，虽然实际实验中采用平均的方式进行测量，但难免还会有一定的误差。

2. 发光物体色坐标测量

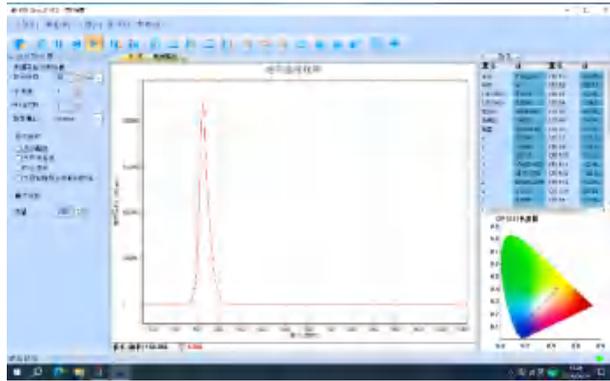
a. 4种不同颜色LED发光光谱视图



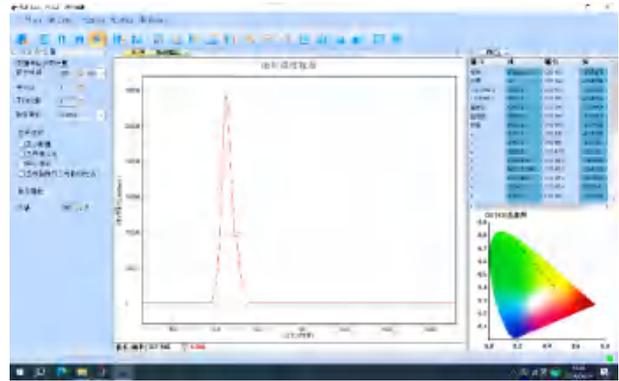
(a) 红光光谱视图



(b) 黄光光谱视图



(c) 蓝光光谱视图



(d) 绿光光谱视图

图7 4种不同颜色LED发光光谱视图

b.

表4 单色 LED 的测量结果

发光物体	X	Y	Z	色坐标	色温/K	显色指数
红光 LED	2199.6	873.58	0.1319	(0.7157,0.2842)	1557.4	-33.53
黄光 LED	3751.4	4211.2	43.851	(0.4685,0.5260)	3335.8	0.0517
蓝光 LED	10432	4817.3	65084	(0.1299,0.0600)	284908	-74.41
绿光 LED	1542.5	6857.2	605.29	(0.1713,0.7615)	8724.1	-40.78

c. 发光物体色坐标测量实验现象、结果、误差的简单分析

**结果分析:**

在实验中共测量了四种LED的发光，红光、黄光、蓝光和绿光，其主波长分别为637nm、573.7nm、469.4nm和526.2nm，并分别在这些点位呈现出明显的峰值，体现出较好的单色性。实验绘制的色坐标也与预期基本一致，并且均位于马蹄图的边界处，饱和度较高，单色性好。

**误差分析:**

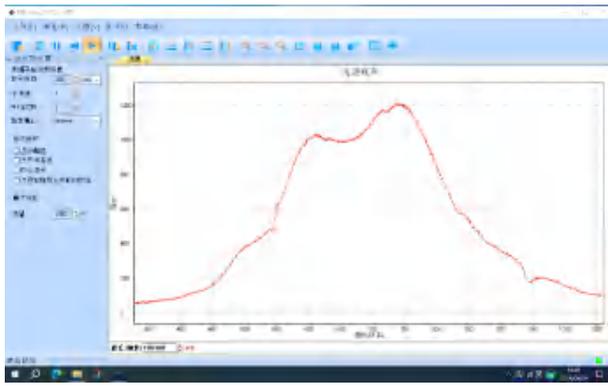
①实验中可以看出，LED分布区域较小，单色性较好，但其仍然有一定的光谱宽度。

②实验中发现绿色LED的光谱存在一个小平台，可能是由于输运发光时存在另一个跃迁途径，产生了波长更长的光。

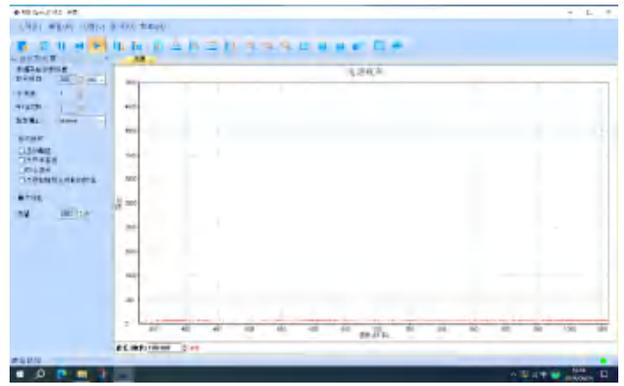
③同样地，LED测量中数据也会存在波动，但对整体实验数据测量并无太大影响。

3. 透射物体色坐标测量

a. 卤钨灯参考光谱视图、暗光谱视图



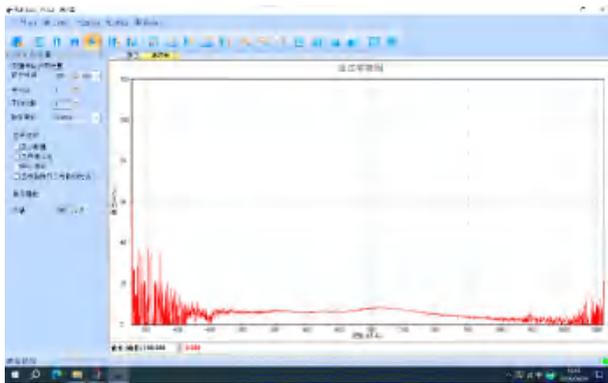
(a) 参考光谱



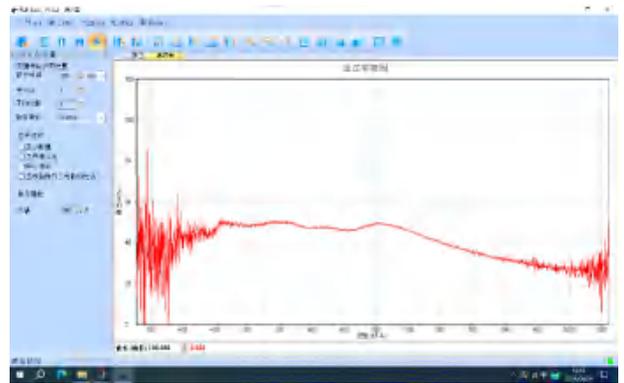
(b) 暗光谱

图8 卤钨灯参考光谱与暗光谱

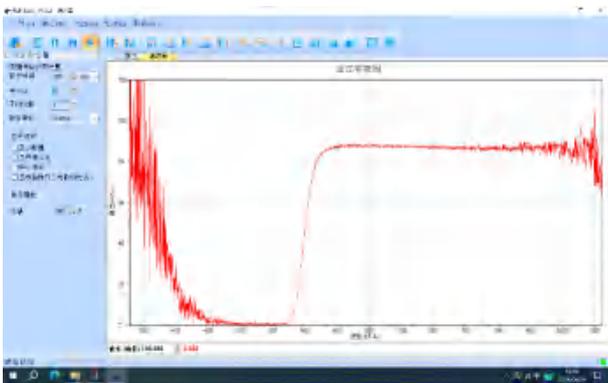
b. 多种不同颜色滤色片的透射光谱视图



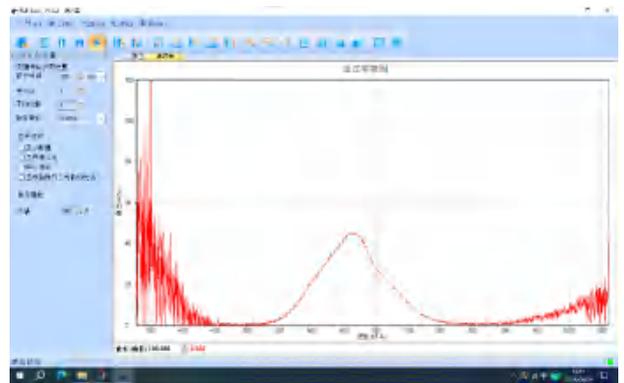
(a) 黑色



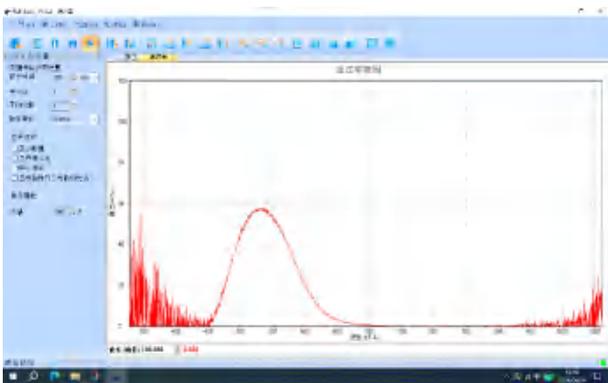
(b) 灰色



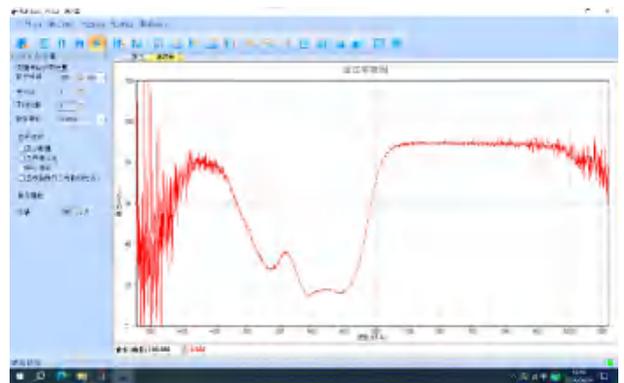
(c) 红色



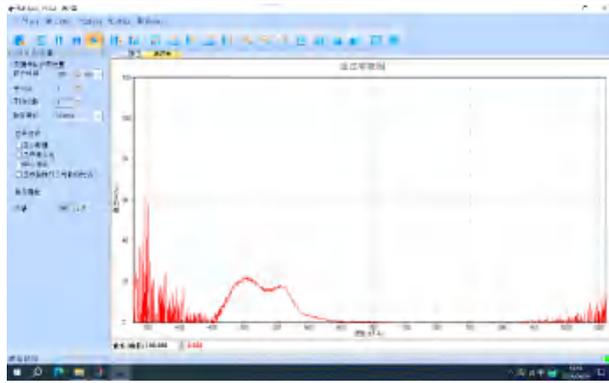
(d) 深红



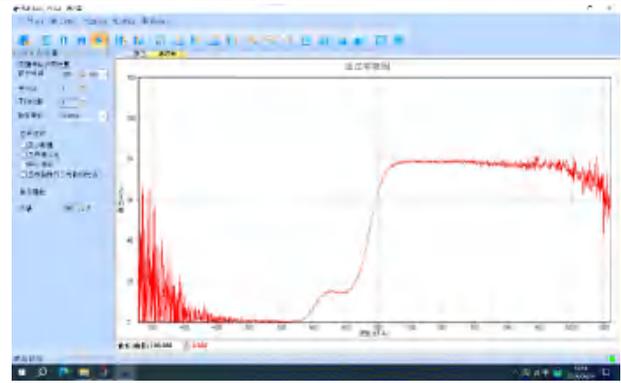
(e) 绿色



(f) 蓝色



(g) 蓝绿



(h) 红蓝

图9 多种不同颜色滤色片的透射光谱视图

c. 透射物体色坐标测量实验现象、结果、误差的简单分析

可以看出，黑色和灰色对整体透射率进行了调制，而深红色和绿色的调制类似于带通滤波片，蓝色和红色类属于长波通滤波片。

在实验中我们对多个滤色片叠加，进行测量，测量了蓝绿透射和红蓝透射，可以看出其就是两次透射率的叠加，蓝绿叠加最终只能透过绿色，而红蓝叠加最终只能保留红色部分。

4. 色差分析

a. 选择上述3类物体之一作为实验对象，对多个实验样品进行色度坐标测试。汇总数据如下表，其中平均色坐标由 x, y 坐标的测量值分别求平均值得到。

在0° /45° 式测量中，选取多个点进行了测量，得到其色坐标。

表 5 色差分析

样品	色坐标	平均色坐标	样品与平均色坐标的色差
黄色色卡	(0.5234,0.4380)	(0.5244,0.4393)	0.001620014
	(0.5247,0.4397)		0.000520683
	(0.5250,0.4402)		0.001100505
绿色色卡	(0.4014,0.5053)	(0.4024,0.5030)	0.002538591
	(0.4023,0.5026)		0.000380058
	(0.4035,0.5010)		0.002253393
蓝色色卡	(0.3007,0.3913)	(0.2985,0.3914)	0.002168973
	(0.2998,0.3933)		0.002283516
	(0.2951,0.3896)		0.003876568

b. 色差结果的简单分析

三个色卡颜色均位于对应的色区，绿色和蓝色略偏向于黄色，这是因为卤钨灯的显色指数并不完美导致的。对于不同区域的结果，其与平均值的色差均较小，说明测量结果十分精确。

与之前类似，色差出现的原因可能是杂散光导致的，光学实验中存在一定的波动是难免的。

[ 实验小结 ]

1. 实验概述与总结 (限500字)

在本次实验中，我们基于光谱和色坐标进行了色度学分析。

首先利用反射式、0/45°式和积分球式三种测量手段测量了三种色卡的反射率光谱和色坐标，对比可以发现反射式效果最好，0/45°式次之，而积分球有较大的偏差，实验整体效果较好，与预期基本一致。

接着测量了四种颜色的LED发光光谱，其单色性较好，误差极小。

最后对三种样品的色坐标利用0/45°式方法分别进行了三次测量，分析了测量结果与其平均值的色差，可以发现色差极小，说明此方案结果稳定可信。

## 2. 实验遇到的问题(若有)，以及解决方法；实验收获 (限500字)

### 问题：

①在反射率测量时，有时会发现白板样品反射率与100%有较大的误差，这可能是由于标定后移动仪器等原因导致的，此时须重新标定。而倘若白板样品的反射率接近100%，则结果还是较为可信的。

②实验中测量反射率时还发现，调节积分时间会导致反射率大于100%，这是因为测量中是以标准光谱为基准值进行的计算，倘若增大曝光时间会将光谱乘以系数放大，从而使得测量值/标准光谱值 $>1$ ，这说明在标定后不能再对积分时间进行调整。

③同时我们发现样品与接收器表面的距离对结果有较大的影响，距离较近时反射效果较强，在反射式测量时会得到大于1的反射率，而在0/45°式时则难以将光准确地反射到接收器，这说明标定高度与测量高度应尽量保证一致。

### 实验收获：

本实验加深了对色度学的理解，并对光谱的物理结果有着更加直观的理解和观测，我们不仅完成了报告要求的部分，还自主探究了滤色片叠加的结果等，观测和分析十分到位且吻合。

### [ 思考题 ]

(1) 在色度学测量中，主波长与峰值波长是否为同一个参数？

不是，二者定义和用途均有所区别：

**主波长：**是通过色度图确定的一种颜色的参数，代表该颜色在光谱中的位置，是与待测颜色相同或最接近的纯光谱色的波长。主波长可以通过在色度图上找到待测颜色和标准白光之间的连线，与光谱轨迹的交点确定。

**峰值波长：**峰值波长是光谱中强度最大处的波长，代表光源发射或反射的光在该波长处的强度最大。通过光谱仪直接测量光源的光谱，找到强度最大的波长点即为峰值波长。

**区别：**主波长是一个色度学参数，与颜色的视觉感知相关，峰值波长是一个光谱参数，与光源或反射物的实际光谱分布相关。两者的测量方式以及应用领域均有所差别，主波长一般用于色度学和颜色匹配，而峰值波长用于光源特性分析和光谱学研究。

(2) 影响一种颜色的饱和度的最关键因素是什么？

影响一种颜色饱和度的最关键因素是颜色的纯度或光谱纯度。饱和度描述了颜色的鲜艳程度或强度，与颜色中白色成分的比例有关，其定义为 $S = 1 - 3[\min(R, G, B)] / (R + G + B)$ ，即指颜色中不包含白光成分的程度，纯度越高，颜色越鲜艳和强烈，反之颜色越灰白或更淡。

(3) 进行色度学测量时，光纤与样品之间的距离是否会对测量结果，即色坐标产生明显的影响？为什么？

不同方法的影响结果不一样。

①反射式测量：不会有明显影响。此时距离会影响光谱整体强度，但并非会影响光谱整体形状，因此虽然反射率可能与实际不符，但色坐标并不会产生较大影响，除非距离太远导致光强较弱，背景光占据主导。

② $0/45^\circ$  式测量：会产生明显影响。 $0/45^\circ$  式测量只有在特定距离处才能将入射光反射至接收器，因此不同距离会导致反射光无法被捕捉，从而反射光强度较弱，背景光占据主导。此时距离不仅较大幅度地改变光谱形状，而且对色度测量产生较大的影响。

(4) 两个物体，若它们的光谱相同，那么它们的色坐标是否一定相同？两个物体，若它们的色坐标相同，那么它们的光谱是否一定相同？

首先，光谱是指物体反射或发射的光的强度随波长变化的分布，即光的波长分布。而色坐标则是在色彩空间中表示颜色的数值表示。

①若两个物体的光谱完全相同，则其色坐标一定相同。因为色坐标是由光谱通过标准观察者函数和照明体函数计算得到的，所以相同的光谱会产生相同的色坐标。

②两个物体的色坐标相同，其光谱可能不同。这是因为不同的光谱可能在视觉上呈现相同的颜色，这种现象称为色度匹配或等色异谱，即不同光谱能量分布的光可以在人眼中产生相同的颜色感知，这是因为颜色感知主要是由主波长决定的。

No.

Date.

H、V色度坐标的亮度V,饱和度s和色相角

$$V = \frac{R+G+B}{3}, \quad s = 1 - \frac{1}{CR+G+B} \left[ \min(R,G,B) \right]$$

$$\text{当 } G \geq B \text{ 时, } H \in [0^\circ, 60^\circ], \quad H = \arccos \left[ \frac{(R-G) + (R-B)}{2\sqrt{(R-G)^2 + (R-B)^2}} \right] \\ \text{反之 } G < B \text{ 时, 则 } H \in (180^\circ, 360^\circ], \quad H = 360^\circ - \arccos \left[ \frac{(R-G) + (R-B)}{2\sqrt{(R-G)^2 + (R-B)^2}} \right]$$

主波: 某一颜色的波长, 可以与参考光混合后面匹配颜色。

色纯度: 主波光的波长在样品光中所占的比例。

原理: 如果一个光源发射的颜色与某一波长下的单色光发射的颜色相同, 则单色光的绝对亮度值即该光源的色度。

显色指数: 在固定测试光源下物体色外观和参考照明条件下物体色外观的差别进行定量, 称为显色指数。

### 实验内容

#### 1. 反射物色坐标测量

①. 打开仪器预热, 搭建电路



②. 打开软件 ③. 调整仪器参数, 进行测量

#### 2. 发光物色坐标测量

#### 3. 透射物色坐标测量

#### 4. 色差分析

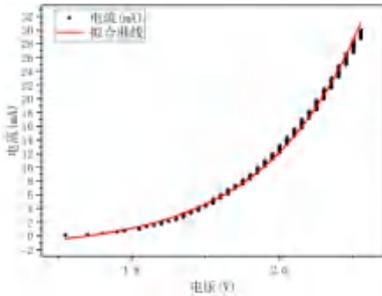
陈超  
2024.6.4



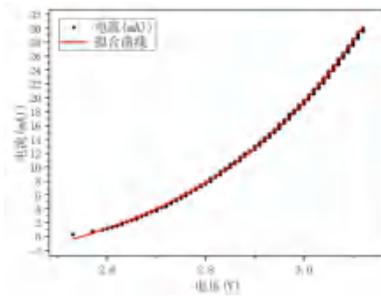


9.8	1.97	756.5	9.79	2.84	2424.8	9.79	2.77	11041.5
11.99	1.99	910.5	11.99	2.88	2843.2	11.98	2.85	12718.9
13.81	2.01	1034.3	13.81	2.92	3172.5	13.81	2.91	14006.5
15.78	2.03	1163.4	15.8	2.95	3513.5	15.78	2.97	15292.2
17.79	2.04	1289.2	17.8	2.98	3844.7	17.79	3.02	16491.4
19.98	2.06	1420	19.99	3.01	4190.5	19.98	3.07	17701.7
21.98	2.07	1532.5	22	3.03	4493.5	21.99	3.11	18726.2
23.99	2.08	1639	24.01	3.06	4785	24	3.15	19660.6
25.97	2.09	1737.2	25.99	3.08	5061.6	25.97	3.19	20510.3
27.98	2.1	1830.5	28	3.1	5534.5	27.98	3.22	21312.3
29.98	2.11	1916	30.01	3.12	5799.4	30	3.25	22062.7

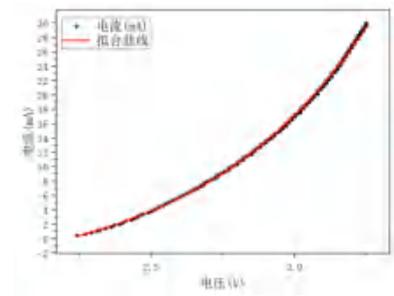
2.所测的3种颜色LED的I-V曲线



(a) 红色LED



(b) 蓝色LED



(c) 绿色LED

图1 3种颜色LED的I-V曲线

对于理想的PN结，应当有

$$I_D = I_S \left( e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right)$$

我们利用Origin自带的ExpGrow1进行拟合，拟合结果分别为

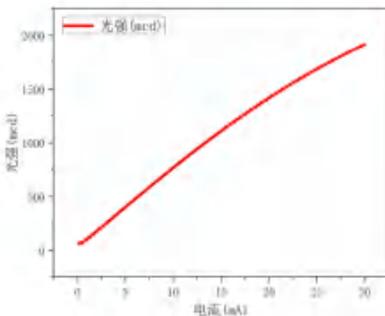
①红色:  $I_R = -1.90 + 1.78 \exp [(U - 1.73)/0.12]$ , R-Square = 1;

②蓝色:  $I_R = -7.34 + 6.49 \exp [(U - 2.50)/0.35]$ , R-Square = 1;

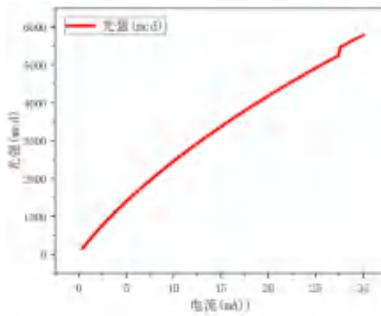
③绿色:  $I_R = -6.14 + 6.14 \exp [(U - 2.21)/0.59]$ , R-Square = 1。

可以看出，拟合效果均较好，注意这里我们使用的是正交距离回归的方法，用一般的L-M优化算法并不能得到收敛的结果，但这种方法计算的R-Square会偏大，这是无法避免的。

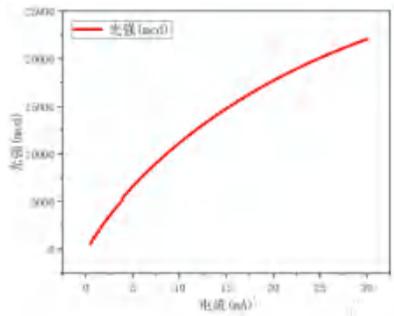
3.所测的3种颜色LED的发光强度-电流曲线



(a) 红色LED



(b) 蓝色LED



(c) 绿色LED

图2 3种颜色LED的发光强度-电流曲线



可以看出，随着电流的增大，三种LED的发光强度变化呈现出较为一致的结果，都不断增大，且趋于一个饱和趋势，说明此时测量范围均超过线性区，趋近于饱和。

同时我们发现蓝色LED的增长曲线出现了阶跃，猜测可能是由于超出仪器量程换挡导致的，不同挡位之间的连接计算出现偏差，因此出现了这种阶跃现象，但这对我们观测曲线的整体趋势并无影响。

#### 4.所测的红色LED的发光强度随时间变化曲线

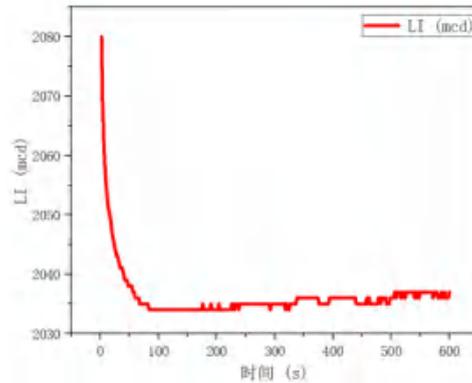


图3 红色LED的发光强度随时间变化曲线

实验中只测量了红色LED的发光强度随时间的变化关系，可以看出在前100s内，发光强度迅速衰减，符合理论。而100s之后，可以看出光强随着时间的变化缓慢增长，但增长幅度较小。这可能是由于仪器稳定性导致的，可能随着时间的增长仪器电流和电压会出现一定的偏移，产生了这种现象，但整体来讲实验结果与理论基本吻合。

#### 5.所测的3种LED的x(0°)、xy(45°)以及y(90°)三个方向上的配光曲线对应的数据

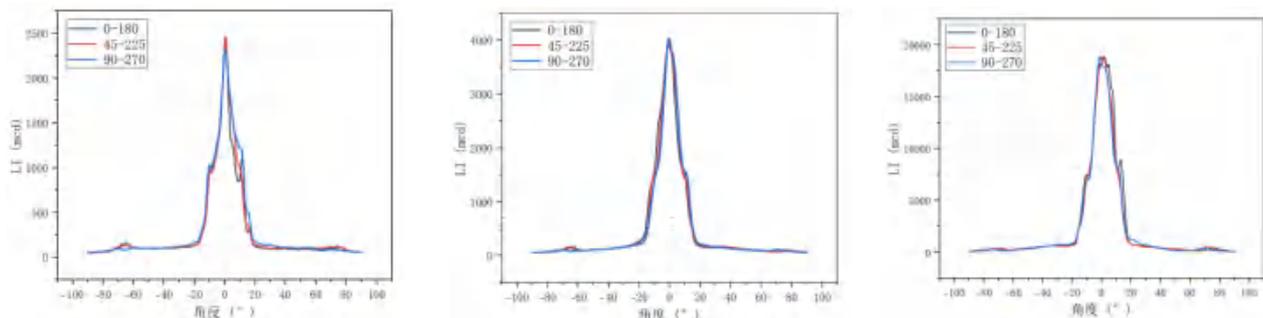
实验数据较多，难以直接展示，因此我们在此展示最大光强的对应角度，这可以考量LED法线方向与中心的偏离程度。

表3 3种颜色LED最大光强对应角度

最大光强对应角度/°	红色	蓝色	绿色
0° 方向	0.6	-0.8	1.4
45° 方向	0.6	-0.6	1.0
90° 方向	0.4	-0.6	-1.4
平均值	0.6	-0.6	0.6

可以看出，三者的偏移角度均较低，因此实验结果可信度较好，其法线偏离程度较低。

#### 6. 所测的3种LED的配光曲线(直角坐标和极坐标，见下图例)



(a) 红色LED

(b) 蓝色LED

(c) 绿色LED

图4 3种颜色LED的直角坐标配光曲线

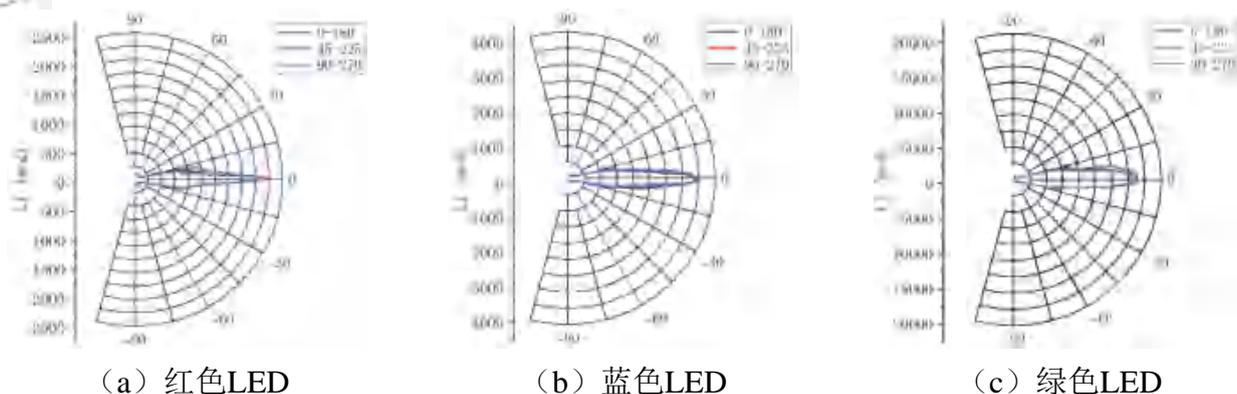


图5 3种颜色LED的极坐标配光曲线

可以看出，三种LED的配光曲线的大部分光强均位于中心，分布较窄，发散角较小。同时其法线方向基本位于中心位置，这保证了测量曲线的对称性。但我们可以看出，红色曲线的形状与角度的关系较大，可能是其自身分配问题导致的。

对于理想的LED，其分布应当与Gauss波包接近，因此我们利用Gauss曲线进行拟合，拟合结果如下图所示

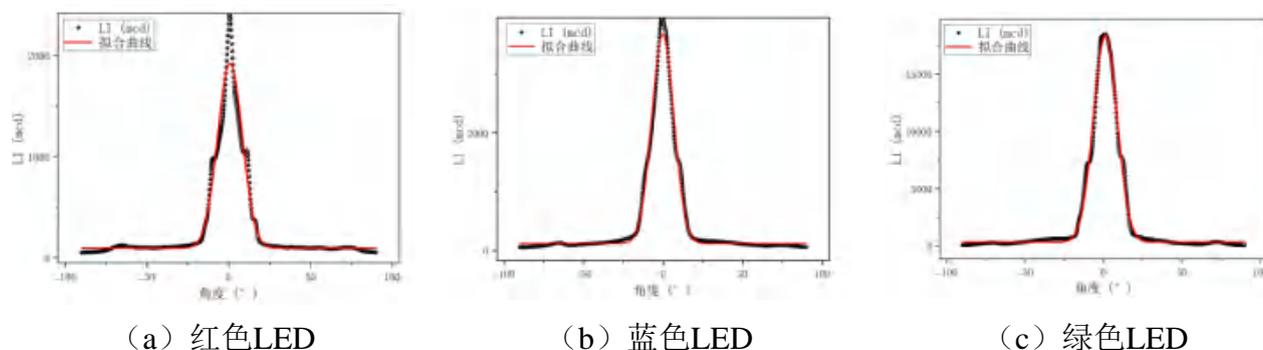


图6 3种颜色LED的直角坐标配光曲线Gauss拟合结果

三种拟合的R-Square分别为0.9714、0.99068、0.99313，除了红色的分布与Gauss分布差距较大，其余结果均吻合较好，这可能是由于红色LED的结构、工艺等原因导致的。

### 7. 所测的红色LED的照度随距离变化曲线

实验中测量各个距离的照度，得到LED的照度曲线，我们知道其在远时照度应当与距离满足平方反比关系，因此我们利用Origin自定义拟合曲线 $y = a/x$ 进行拟合可得

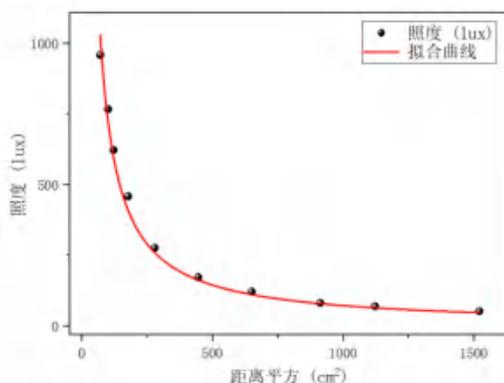


图7 红色LED反比例曲线拟合结果

拟合结果为



$$LI = 72584/x$$

其R-Square=0.98954，可见拟合优度较高，同时我们绘制出LI~d<sup>2</sup>曲线，其结果为

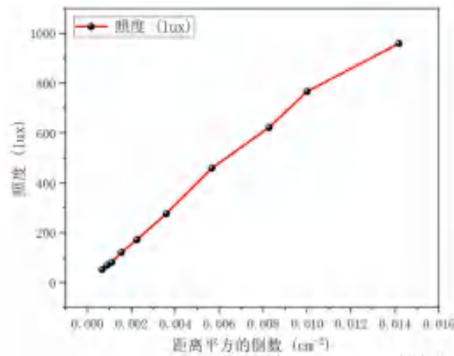


图8 红色LED的LI~d<sup>2</sup>曲线

可以看出，在距离较近时，其波动较大，且并非十分线性，而在距离较远时，其曲线基本符合线性，且线性度较高。

这是因为随着距离的增大，LED越来越可以近似为一个点光源，因此其更加满足与距离的平方反比关系，而距离较近时，其不仅对距离的偏差十分敏感，并且此时也无法将LED视为点光源。

### [实验小结]

#### 1. 实验现象概述、各现象简单对比分析与总结

在本次实验中，我们测量了LED的各种参数和工作曲线。

首先，我们测量了四种LED的基本参数，分析了其发光效率和显色指数的区别，其特性与LED的制作工艺和介质材料等应当有直接关系。

接着我们测量了其V-I曲线，可以看出其基本符合指数增长，拟合优度较高。同时也测量了P-I曲线，发现其呈正相关关系，并且有着明显的饱和趋势。

随后我们测量了LED的光衰曲线，可以发现其首先迅速衰减，接着随着时间缓慢增长，这可能是由于仪器输出的电流或电压波动导致的。

再后我们测量了三种LED的3个角度的配光曲线，其法线基本位于中心位置，且发散角较小；我们利用Gauss函数对平均值进行了拟合，可以发现除了红色LED，其余的配光曲线基本符合高斯分布。

最后我们测量了LED照度随距离的关系，并进行了理论拟合，拟合优度较高，且可以发现距离越远，与理论的吻合程度越高，实验效果较好。

#### 2. 实验遇到的问题，以及解决方法；实验收获

问题及解决方法：

①测量配光曲线时，LED的法线不一定位于测量中心，在实验中需要调整LED的方向，保证光强分布的对称性。

②测量照度随距离的关系时，保证光点正入射到接收器是十分有必要的，因此我们左右移动接收器，取光强最大的点进行记录。

实验收获：

本次实验对LED的各种特性进行了探究，对LED的基本原理以及特性有了更深刻的理解，并对光度学体系有了一定的深入认知。



### [ 思考题 ]

1、为什么LED的发光强度的测量值 (cd) 不能转换成光通量 (lm) ?

二者都是描述光源发光特性的重要参数,但它们描述的是不同的物理量,因此不能直接转换。

发光强度表示光源在给定方向上发射光的强度。1cd等于在给定方向上每单位立体角内的光通量。而光通量表示光源发出的总光量。1lm流明等于光源在所有方向上发出的光通量的总和。

一个具有方向性,而另一个考虑的是整个空间,因此无法进行换算。

2、有哪些方法可以提高LED的发光强度?

①提高注入电流:增加LED的驱动电流可以提高发光强度,但这也会增加功耗和热量,因此需要注意避免过热。

②提高内部量子效率:选择适当的掺杂元素和掺杂浓度,优化载流子复合效率。

③优化材料选择:选择高效的半导体材料。

④改进电极设计:优化电极形状和布局,研发具有更低发散角的LED。

3、影响配光曲线测量准确度的因素有哪些?为什么实际测量得到的LED配光曲线往往会发生角度平移(即对称轴不在0度的位置)?为什么实际测量得到的配光曲线往往不能关于对称轴严格对称?

影响因素:①仪器精度及系统偏差②背景光干扰③环境温度影响④LED安装位置和方向⑤偶然误差如测量值的波动。

原因1:因为光源都是人为安装,难以完全对准中心;并且LED内部电极分布可能不均匀,导致其发射方向偏离理想位置。

原因2:LED内部电极布局不对称,可能导致两侧的发光强度不一致;LED表面可能存在杂质,导致其某一侧光发生衍射或散射;LED散热不均,导致其不同方向的输出光强不对称。

4、为什么LED的照度测试结果并不能严格满足点光源球面波的光强平方反比率(即光强随距离的平方成反比)?

①LED并非理想的点光源,其具有一定的尺寸,发光区域并非一个点,并且其光强分布也不是均匀的。

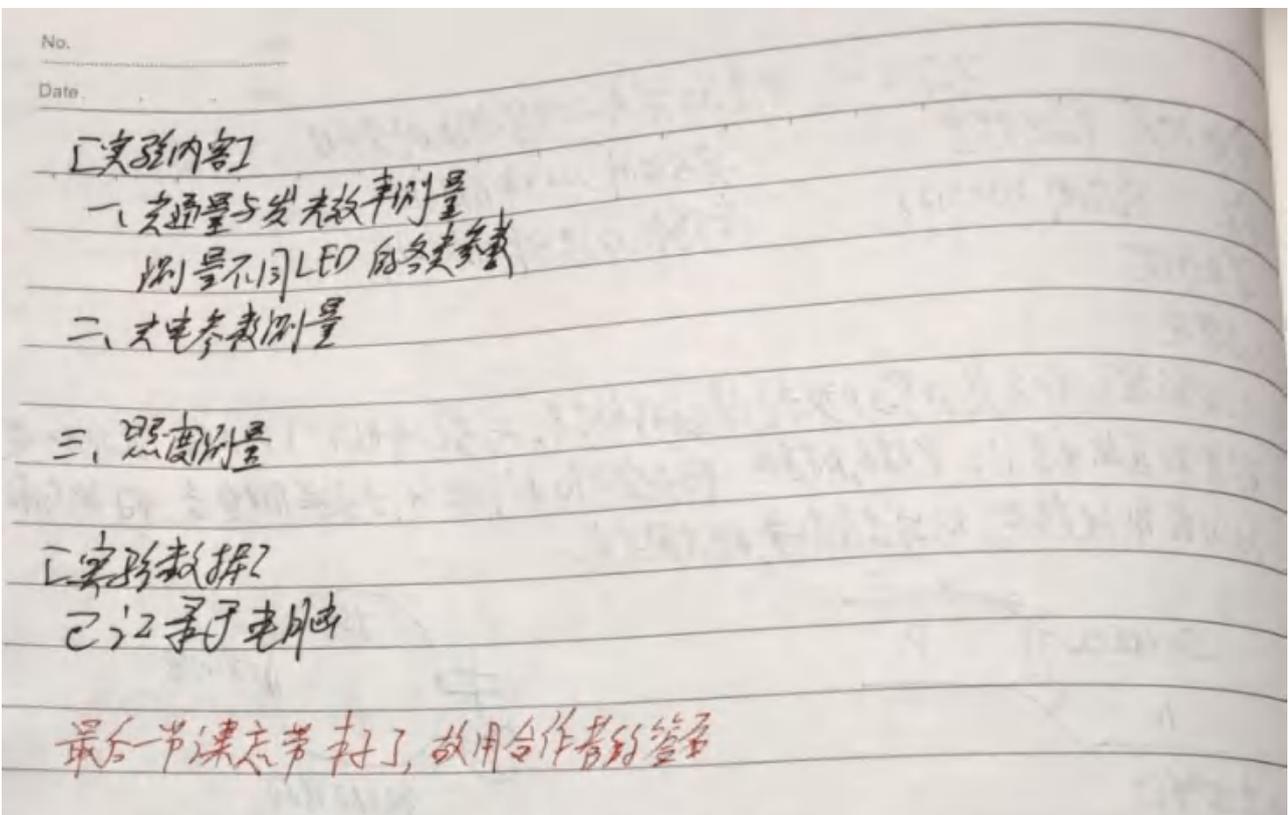
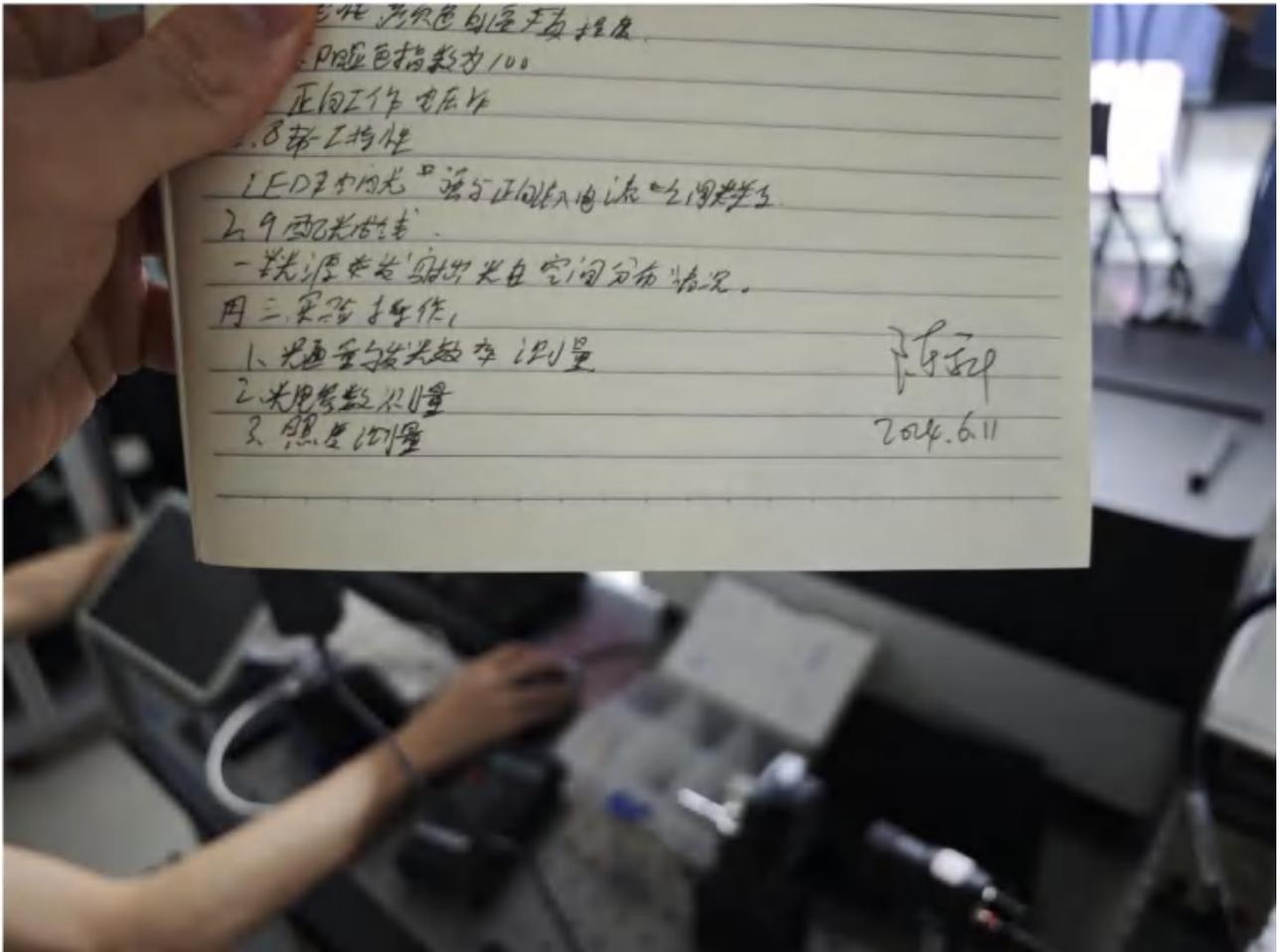
②空气中的灰尘会导致散射,一定程度上可能会影响实验结果。

③平方反比定律基于远场条件的假设,如果距离较近,几何扩散和非均匀发光区域的影响较大,使得测量结果偏离理论值。

④LED光路不准直,发光位置有偏移,导致结果产生一定的系统误差。



[ 签名页 ]





# 《光信息专业实验（I）》课程 实验报告

学院：物理学院

专业：物理学专业 年级：2021级

实验人姓名、学号：路尚润21305127

参加人姓名、学号：邓逸枫21305409

实验人签名：路尚润

组号：B3组

日期：2024年3月12日 星期二

上午[ ] 下午[] 晚上[ ]

室温：24°C

相对湿度：80%

指导教师：黄敏

## 2.1 氦氖激光原理实验

### 1. 实验目的

理解氦氖激光原理，掌握氦氖激光谐振腔的调节方法，测量氦氖激光的重要性能参数。

### 2. 简述实验原理

#### 2.1 激光原理概述

##### (1) 原子的自发辐射和受激吸收

处于高能级 $E_2$ 的一个原子自发地向 $E_1$ 跃迁，并发射一个能量为 $h\nu$ 的光子，称为自发跃迁，发出的光波称为自发辐射，如图1所示<sup>[1]</sup>。

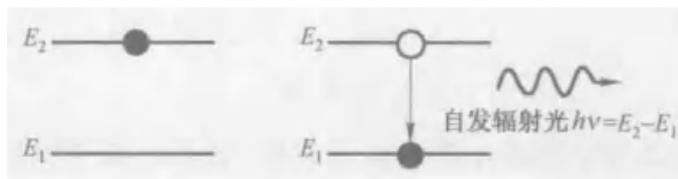


图1 原子的自发辐射

这个过程是随机过程，在热平衡态下，原子分布满足玻尔兹曼分布，即

$$\frac{N_2}{N_1} \propto \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right) \quad (1)$$

其中 $k$ 为玻尔兹曼常数， $T$ 为绝对温度，显然有 $N_2 < N_1$ 。

受激吸收是指处于低能态的物质受到外来的能量作用时，吸收外界能量而被激发的过程，如图2所示。

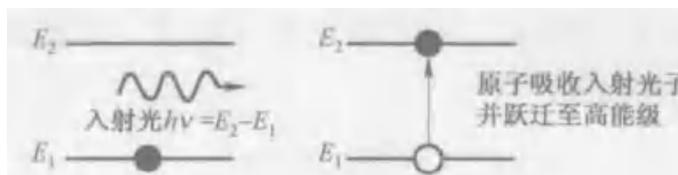


图2 原子的受激吸收



### (2) 受激辐射和光放大

受激辐射是指：原子处于高能级 $E_2$ ，当外来光子能量恰好为高能态到低能态的能级差 $E_2 - E_1$ 时，原子可以吸收这个光子并诱导跃迁，并且出射两个完全相同的光子，意味着入射光被放大，从而能够产生激光。

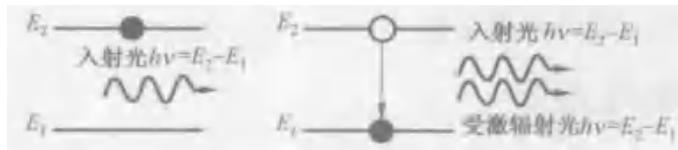


图3 原子的受激辐射

### (3) 粒子数反转

我们知道，多粒子在不同能级上的分布应当满足玻尔兹曼分布，故高能级的粒子数较少，难以实现长时间或者大幅度的受激辐射，因此需要粒子数反转才能使得高能态的占据数明显增大，从而实现较强的光放大，产生激光。

## 2.2 激光器的结构

### (1) 工作物质

激光的产生需要合适的工作物质，实现粒子数反转，对于亚稳态存在的物质，实现粒子数反转是有利的。

### (2) 泵浦源

为实现粒子数反转，必须利用一定的方法去泵浦原子，一般可以用电、光、化学等方式去激励工作物质。一般也可以称为抽运的过程，泵浦源应该不断地输出能量以维持上能级粒子数一直大于下能级粒子数。

### (3) 光学谐振腔

光学谐振腔是实现光放大以及起到选频作用的器件，即在激光器两端安装高反射镜，一块几乎全反射，另一块有少量透射作为出射镜。谐振腔中特定频率的光通过持续振荡被逐渐放大，最终产生强烈的激光。

## 2.3 激光束的重要参数

### (1) 光束的发散角

激光束在空间的传播如图4所示。

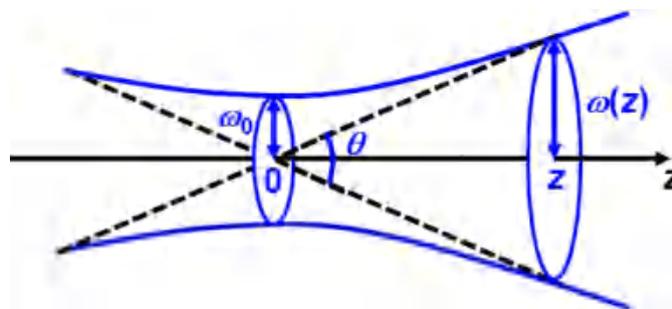


图4 激光束在空间中的传播

最细处称为束腰，将柱坐标选在束腰截面的中点， $z$ 是光束传播方向，束腰截面半径为 $\omega_0$ ，距束腰半径为 $z$ 处的光斑半径为 $\omega(z)$ ，三者关系为

$$\omega(z) = \omega_0 \left[ 1 + \left( \frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

其中 $\lambda$ 为激光波长，可以改写为双曲线方程



$$\left[\frac{\omega(z)}{\omega_0}\right]^2 - \left[\frac{z}{\pi\omega_0^2/\lambda}\right]^2 = 1 \tag{3}$$

定义渐近线的夹角 $\theta$ 为激光的发散角，则有

$$\theta = \frac{2\lambda}{\pi\omega_0} \approx \frac{2\omega(z)}{z} \text{ (} z \text{很大时)} \tag{4}$$

**(2) 激光束横向光场分布**

激光束的横向光场振幅随柱坐标 $r$ 的分布为Gauss分布，即

$$E(r) = E(z) \exp\left[-\frac{r^2}{\omega^2(z)}\right] \tag{5}$$

实际测量到的是光强分布，因此

$$I_{00}(r) = I(z) \exp\left[-\frac{2r^2}{\omega^2(z)}\right] \tag{6}$$

二者如图5所示。

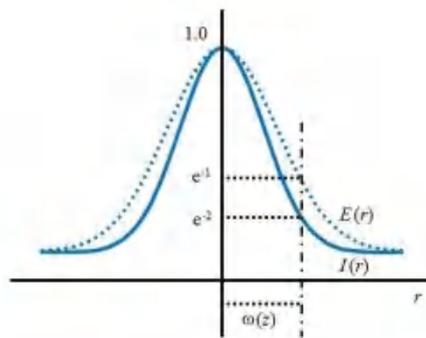


图5 激光束基膜横向振幅分布和光强分布

**(3) 光束半径和发散角的测量**

对于腔长为 $L$ ，输出波长为 $\lambda$ 、凹面曲率半径为 $R$ 的激光器，其束腰处的光斑半径为

$$\omega_0 = \left(\frac{L\lambda}{\pi}\right)^{1/2} \left(\frac{R}{L} - 1\right)^{1/4} \tag{7}$$

**3. 实验装置图**

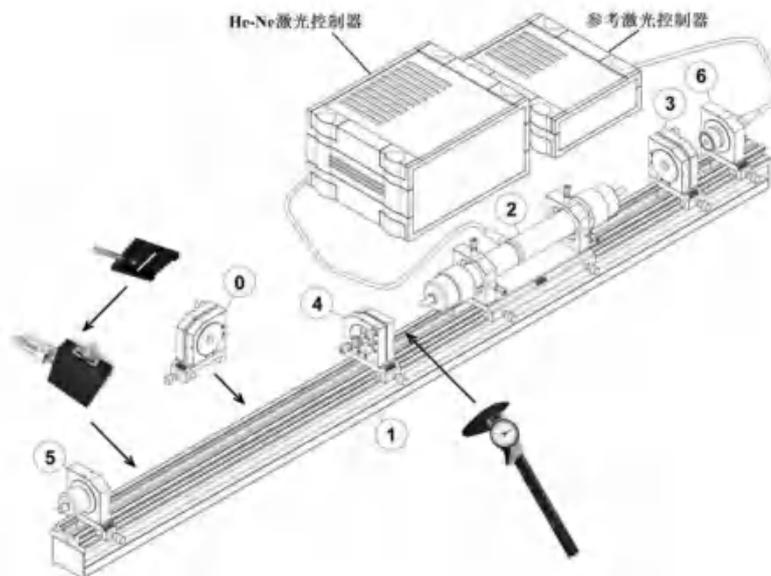


图6 氦氖激光器装置图

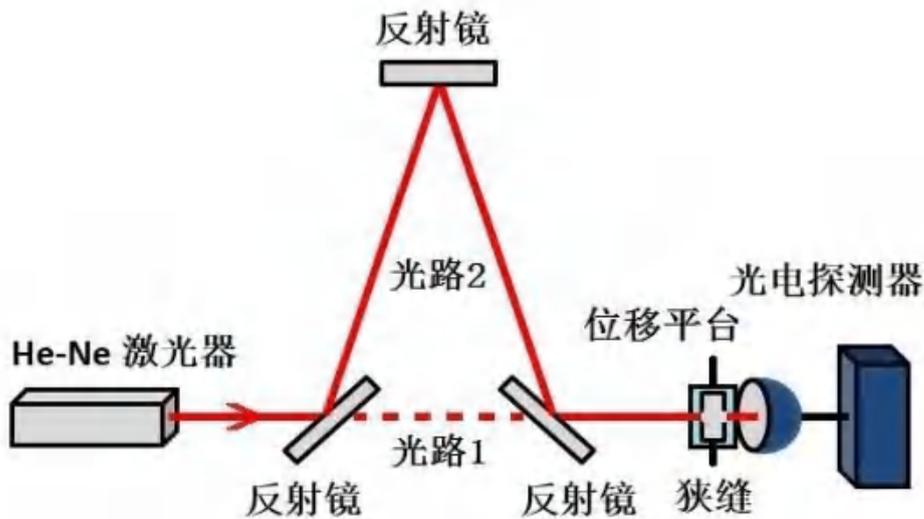


图7 激光束光斑测量和发散角测量实验装置

## 4. 实验步骤

### 4.1 调节氦氖激光器

①利用参考激光器调节光路，先调节平凹腔使得腔体光路准直(凹面腔镜与平面腔镜分别放于导轨10cm与60cm处)，即调节反射光与参考光为对准状态，再尽量使得干涉圆环条纹间距变大；然后取走平凹腔，放入He-Ne激光管，调节旋钮使得光电探测器示数为最大值，此时激光管已经准直。

②再重新放入平凹腔，关闭参考激光器，打开He-Ne激光器激励电源并设置电流为6.5mA，并微调水平方向旋钮，由于我们使用的是外腔式He-Ne激光器，因此需要抵消He-Ne激光器两侧的布儒斯特窗产生的微小偏移<sup>[2]</sup>，从而达到共振，输出激光。

③微调平凹腔和He-Ne激光管的8个旋钮，使得激光器输出功率达到最大值，拍摄He-Ne激光器运行状态。

### 4.2 测量He-Ne激光功率与激光管电流的关系

①调节激光管控制器的电流调节按键，使得激光电流从6.5mA逐渐降低到5.0mA，并且在输出示数稳定后记录对应的He-Ne激光输出功率(当光电二极管Amplifier Gain设置为5时，2.50示数对应1.00mW激光功率)

②再将电流值从5.0mA逐渐提升至6.5mA，取二者平均值消除激光器未达到稳态的系统偏置误差；作图后重点观察曲线趋势。

### 4.3 He-Ne激光腔内光束直径测量

基于游标卡尺刀口切割法，分别将游标卡尺置于凹面腔镜以及平面腔镜镜面之处，并且以0.05mm为间隔调节游标卡尺宽度，再将刀口分别贴合至腔镜表面，向四周晃动刀口方向，当仍有激光产生时减小刀口宽度，而未有激光产生时增大刀口宽度，以临界处未产生激光的刀口宽度作为腔内光束直径。

### 4.4 He-Ne激光腔外光束横模测量

①将刀口狭缝紧靠光电探测器放置刀口狭缝，记录狭缝在光学导轨的具体位置，计算其距离输出腔镜的距离，利用谐振腔的参数或几何近似方法计算刀口处的光束直径，取狭缝宽度为计算值的1/10。

②逐步旋转位移台上的螺旋测微头移动刀口狭缝，精密测量光电探测器前的光束光强横



向分布，也即激光基横模的高斯分布。基于测量曲线计算光束半径 $\omega(z)$ 以及发散角 $\theta$ ，并与理论比较。

③在刀口狭缝前放置反射镜，在远处白屏上呈现清晰的光束横模并拍摄，观察光束基横模光强分布。

## 5. 实验结果及处理分析

### 5.1 拍摄He-Ne激光运行照片

按照实验步骤调节实验仪器，使得He-Ne激光器输出达到峰值，最终激光器工作状态如图8所示。

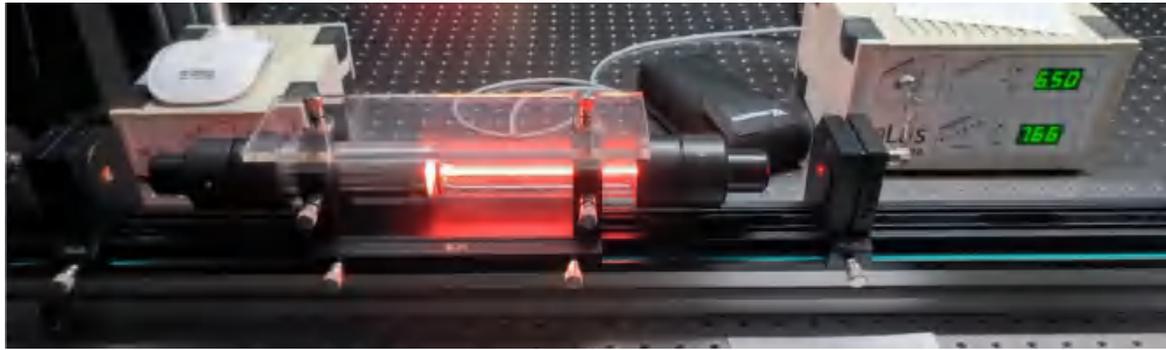
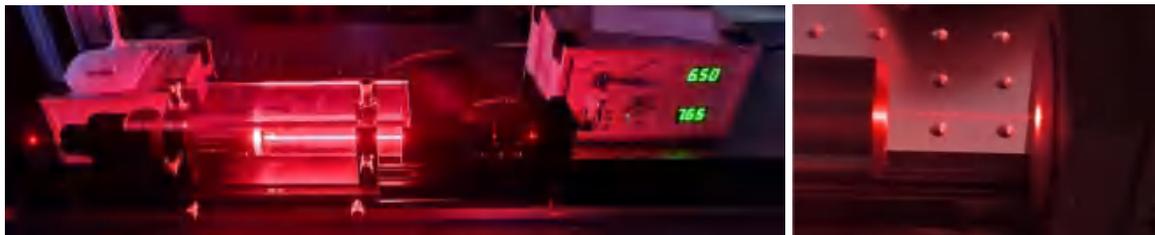


图8 He-Ne激光器工作状态

在实验中，通过不断调节旋钮，最终能够达到的功率峰值显示为7.66左右，对应激光功率为3.064mW，实验效果较好，我们也可以观测到明显的丁达尔效应，如图9所示。



(a)总览图

(b)细节图

图9 He-Ne激光器腔内的丁达尔效应

同时，由图9(a)可以看出在腔外是没有丁达尔效应的，这是因为输出腔镜的透过率为2.4%，对比腔内的光强有大幅度衰减，故难以观测到丁达尔效应。

#### 误差分析：

①实验中有多个旋钮可以进行调节，虽然我们进行了多轮重复调节，但最终光强输出也不一定能保证是最优模式，理论上每次调节都会距离饱和值更近，但微小的变动可能对激光器造成大幅度影响，因此难以调节到完全最优，难免会产生一定的误差。

②激光器工作是不稳定的，在实验中我们发现，激光器在工作中的输出功率会有大约0.1mW(0.25显示示数)的波动，可能与粒子数反转程度有关，因为泵浦是一直发生的，当粒子数反转到最强时，输出功率最大，因此激光强度必定与时间有关。

③实验中难以保证激光器工作是完全稳定的，可能有微小振动导致激光器输出不稳定，一定程度会影响激光输出的稳定性。

### 5.2 测量He-Ne激光功率与激光管电流关系

根据实验步骤，以0.1mA为间隔测量激光管P-I关系，并且正反向测量两次，最终实验数据如表1所示。



表1 He-Ne激光功率随激励电流变化关系

$I/\text{mA}$	示数(减小)	示数(增大)	示数(平均)	$P/\text{mW}$
6.5	7.62	7.46	7.54	3.016
6.4	7.57	7.43	7.50	3.000
6.3	7.51	7.40	7.46	2.982
6.2	7.46	7.39	7.43	2.970
6.1	7.41	7.33	7.37	2.948
6.0	7.36	7.27	7.32	2.926
5.9	7.33	7.25	7.29	2.916
5.8	7.28	7.20	7.24	2.896
5.7	7.23	7.14	7.19	2.874
5.6	7.16	7.08	7.12	2.848
5.5	7.06	7.02	7.04	2.816
5.4	6.99	6.95	6.97	2.788
5.3	6.92	6.91	6.92	2.766
5.2	6.86	6.86	6.86	2.744
5.1	6.81	6.78	6.80	2.718
5.0	6.71	6.71	6.71	2.684

首先我们将减小、增大电流时测得的示数与其平均值画出，观察三者差距，结果如图10所示。

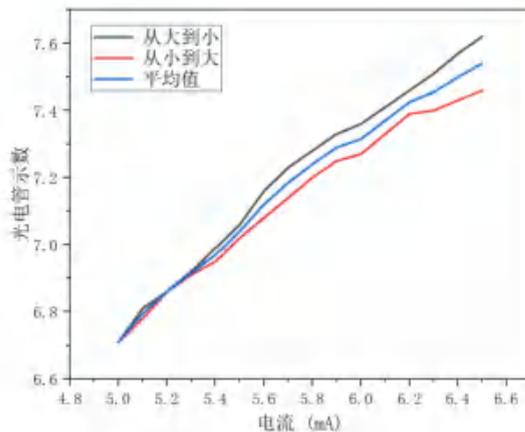


图10 不同方向测量时的示数与电流的关系曲线

可以看出，单次测量的示数变化起伏较大，并且显然从大到小的测量比从小到大的测量偏大，这就是我们在实验步骤中提出的偏置误差，因为在不断调节下，各能级分布的粒子数打乱，在较短时间内，激光器并非一定达到稳态，故从大到小调节时示数应当偏大，反之亦然，理论上若要测得稳定的曲线，应当等候一定时间保证激光器达到稳态。

因此我们取平均值进行换算，得到激光器功率并进行拟合分析，线性拟合以及e指数拟合如图11所示

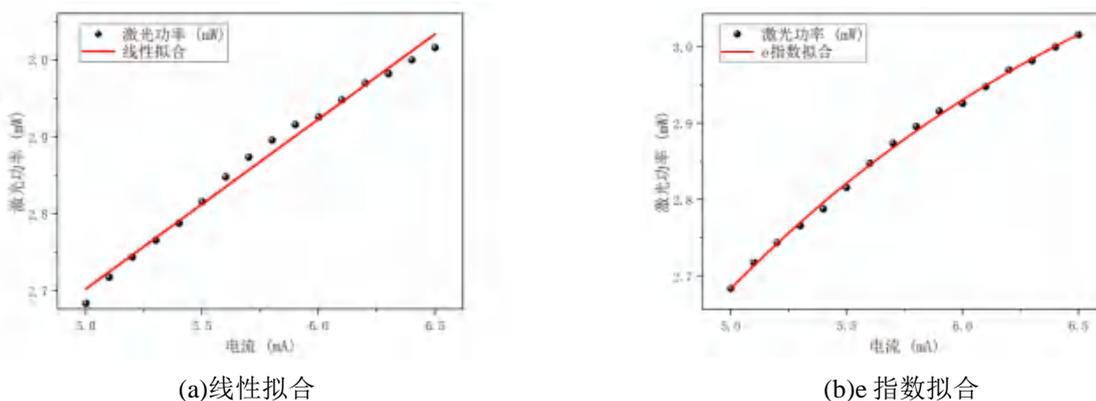


图11 激光功率与电流的拟合线



线性拟合结果为

$$P = 0.22I + 1.60(mW) \tag{8}$$

Pearson相关系数 = 0.9943, 拟合评分R-Square = 0.98863, 可见, 拟合效果一般, 并且由图可以明显看出, 点均匀地分布在直线两侧, 并呈现出两侧低于拟合直线, 中间高于拟合直线, 这显然出现了“饱和”现象, 因此我们用e指数进行拟合。

e指数拟合结果为

$$P = -7.15e^{-\frac{I}{2.08}} + 3.33(mW) \tag{9}$$

拟合评分R-Square = 0.99832, 拟合效果极好, 曲线与结果十分吻合, 最终可以得出饱和功率

$$P_{MAX} = 3.33mW \tag{10}$$

**结果分析:**

①曲线整体趋势为: 近似线性增长, 但随着激励电流的不断增大, 最终增长速率逐渐减小并趋于饱和, 与e指数曲线基本一致。

②激光功率大小取决于粒子数反转程度, 在激励电流的不断增大下, 与He原子碰撞的电子在电场的加速下动能增大, 使得更多的电子具备激发He的能力, 从而使得亚稳态的粒子占据数增大, 从而使得粒子数反转更强, 激光输出功率增大。

③饱和的现象应当源于He原子与Ne原子的碰撞, 只有将Ne原子激发才能辐射出激光, 而两种原子之间的碰撞概率并非100%, 具备激发的He原子会逐渐堆积, 限制了粒子数反转强度的增大, 从而激光功率会达到饱和。

通过查阅说明书, 其中仪器的P-I曲线如图12所示

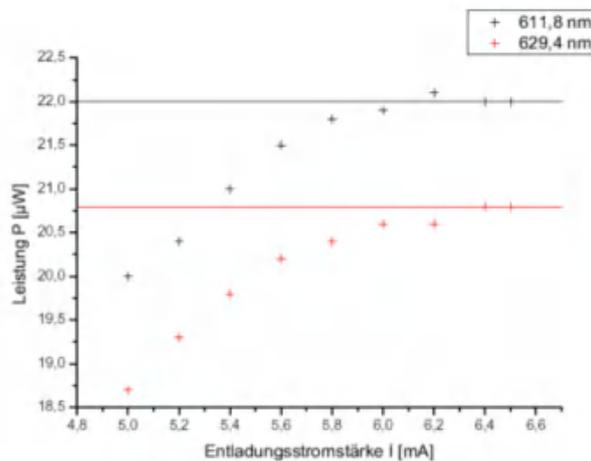


图12 说明书中仪器不同波长的P-I曲线

可见, 其与我们所测量的曲线基本一致, 实验效果较好。

**5.3 测量He-Ne激光腔内靠近输出腔镜及凹面腔镜两处的激光光束直径**

根据实验步骤, 利用游标卡尺进行测量, 测量结果如表2所示。

表2 激光光束直径测量结果

输出腔镜		凹面腔镜	
游标卡尺示数/mm	激光器状态	游标卡尺示数/mm	激光器状态
0.60	无光	0.90	无光
0.65	无光	0.95	无光
0.70	有光	1.00	有光
0.75	有光	1.05	有光



则输出腔镜的激光光束直径为0.65mm，凹面腔镜的激光光束直径为0.95mm。利用激光器参数，并代入公式(7)与公式(2)进行计算，可得理论值分别为：输出腔镜：0.635mm，凹面腔镜：0.900mm。可见二者差距较小，由于凹面腔镜是近似计算，但两者仅仅相距50cm，故近似值有较大差距是合理的；而输出腔镜处即为光束的Gauss束腰半径，测量值是十分精确的，误差仅有2.36%。

### 5.4 精密测量光电探测器前的光束光强横向分布

#### (1)狭缝宽度设置

实验过程中，需要首先确定狭缝大小，经过测量，狭缝距输出腔镜的距离为88cm，利用公式(2)计算得此处光束直径为1.285mm，则设置狭缝宽度为0.128mm。但实际上最佳选择应当是利用梯形近似，这在我们后面的相对误差计算中体现地十分明显。

#### (2)横向光强分布测量

以0.5mm为步长，缓慢横向移动并测量光强横向分布，实验结果如表3所示。

表3 光束横向光强分布

r/mm	探测器读数	P/mW	r/mm	探测器读数	P/mW
8.61	0.00	0.000	9.35	0.80	0.320
8.65	0.02	0.008	9.40	0.79	0.316
8.70	0.06	0.024	9.45	0.77	0.308
8.75	0.10	0.040	9.50	0.75	0.300
8.80	0.15	0.060	9.55	0.68	0.272
8.85	0.20	0.080	9.60	0.59	0.236
8.90	0.26	0.104	9.65	0.49	0.196
8.95	0.32	0.128	9.70	0.39	0.156
9.00	0.39	0.156	9.75	0.29	0.116
9.05	0.45	0.180	9.80	0.22	0.088
9.10	0.53	0.212	9.85	0.16	0.064
9.15	0.60	0.240	9.90	0.11	0.044
9.20	0.67	0.268	9.95	0.08	0.032
9.25	0.73	0.292	10.00	0.04	0.016
9.30	0.77	0.308	10.05	0.00	0.000
8.61	0.00	0.000	9.35	0.80	0.320
8.65	0.02	0.008	9.40	0.79	0.316
8.70	0.06	0.024	9.45	0.77	0.308

利用Origin进行Gauss函数拟合，并将z缩放到0-180°，进而绘制出极坐标形式，结果如图13所示

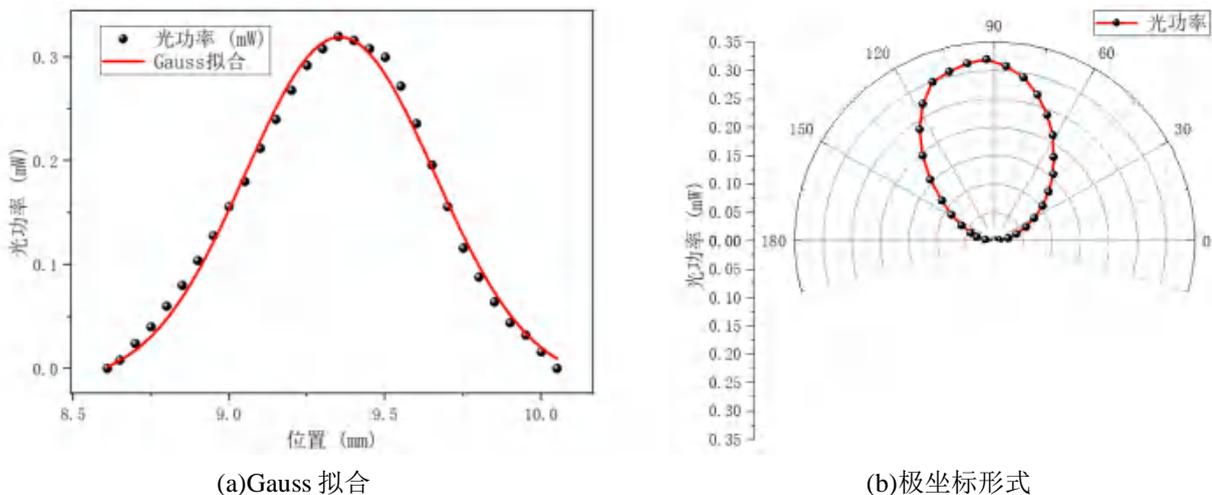


图13 光束横向光强分布

Gauss拟合结果为



$$P(r) = -0.01453 + 0.3338e^{-2\frac{(z-0.009355)^2}{0.000606^2}} \quad (11)$$

拟合评分R-Square = 0.99407, 拟合效果极好。并且对比公式(6)可知, 光束横向半径实验值 $\omega(z)_{ex} = 0.606mm$ 。

#### 误差分析:

方法①: 利用仪器参数的理论计算值为 $\omega(z)_{th1} = 0.642mm$ , 相对误差为

$$error_1 = 5.7\% \quad (12)$$

方法②: 我们也可以利用梯形近似方法算出此时的光束横向半径, 即

$$\omega(z)_{th2} = 0.589mm \quad (13)$$

相对误差为

$$error_2 = 2.9\% \quad (14)$$

可见, 由梯形近似算出的值更加接近实验值, 说明此时双曲线近似并非十分精确, 而梯形近似是较为满足的, 即光束类似直线传播。

同时, 由极坐标可以看出, Gauss分布的中心发生了位置偏移, 这是十分奇怪的, 可能是由于光强分布在横向并非完全的Gauss分布导致的, 基模的中心发生了偏移, 或者掺杂了其余模式。

总的来说, 拟合效果较好, 并且测量值较为精确, 实验较为成功。

### (3)发散角测量

#### ①理论值计算

根据公式(4)并结合之前对 $\omega_0$ 的理论值计算, 可得

$$\theta_{th} = \frac{2\lambda}{\pi\omega_0} = 0.00127rad \quad (15)$$

#### ②实验值计算

利用光电探测器前的光束横截面进行计算, 有

$$\theta_{ex1} = \frac{2\omega(z)}{z} = 0.00137rad \quad (16)$$

再利用凹面腔镜前的截面进行计算, 有

$$\theta_{ex2} = \frac{2\omega(z)}{z} = 0.00190rad \quad (17)$$

可见, 距离输出腔镜(束腰位置)越远, 双曲线近似所得到的发散角测量越精确。

#### ③结果分析

利用 $\theta_{ex1}$ 作为测量值, 计算可得相对误差为7.87%, 误差较大, 这也是由于光路较短导致的, 倘若重新增加反光镜延长光路, 可以得到更加精确的结果。

### 5.5 拍摄光束横模

我们装上高反镜, 并将光束反射至挡板, 利用相机进行拍摄得到光束横模如图14所示



图14 光束横模照片



为分析其横向模式，我们利用Python编程，读取三维图像并绘制光强图，再找到光强极大值点并截取横向坐标上的光强分布，利用Gauss函数进行拟合，代码已经放在附录。结果如图15所示

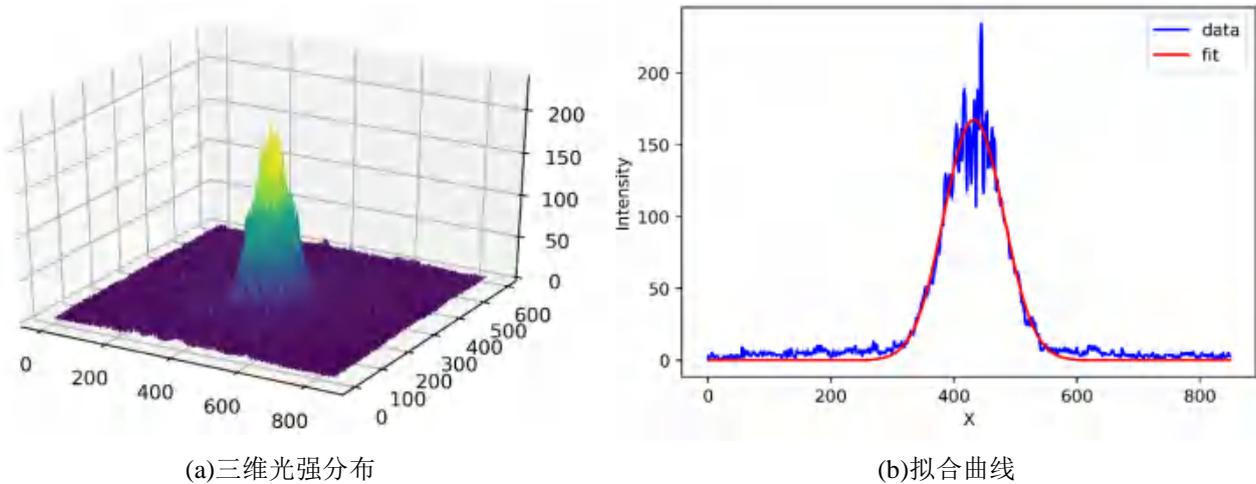


图15 照片横向光强分布

可以看出，光强呈现出很好的Gauss分布形式，中间凸两侧平，并且拟合曲线效果极好，再次证明了光束的横向模式为Gauss基模。

#### 误差分析：

①可以看出，在距离光束中心较远的位置仍然有光强值，造成这种现象的原因很多。首先环境存在环境光，并非是完全的黑暗状态，尽管我们利用挡板遮挡了一部分激光管的自发辐射，其仍然有一定的环境噪声；并且，我们在拍摄时利用了护目镜将光强进行了一部分衰减，而护目镜上难免会有杂质，从而对激光进行遮挡、散射以及衍射等，进而在其他位置出现一定的光强。

②同时，可以看到光强分布有许多的毛刺，这是由于激光散斑效应<sup>[3]</sup>，如图16所示。在拍摄时，激光照射到纸张表面，而纸张具有颗粒感，并非是完全平滑的，可以视为粗糙表面，从而其表面附近的光场会出现一种随机的颗粒状光场分布，这是用纸张城乡难以避免的。我们可以使用塑料白板等光滑表面成像，会对激光散斑的影响加以改善。



图16 像面散斑

总的来说，在一定误差的影响下，激光还是呈现出明显的Gauss基模形式，现象十分明显。

## 6. 实验总结

在本次实验中，我们研究了氦氖激光器的输出激光特性。

首先，我们在搭建好仪器后，通过不断优化，最终得到了较好的输出状态，激光的输出功率为3.064mW，并且观察到了明显的丁达尔效应，并对激光光束稳定性进行了分析。

接着，我们测量了激光器的P-I曲线，发现其呈近似线性增长，最终随着激励电流的增大



功率趋于饱和,符合e指数曲线趋势,利用拟合预测了激光器的饱和功率为3.33mW,拟合评分R-Square = 0.99832,并且分析了曲线成因,曲线趋势与说明书基本一致。

再后,我们利用游标卡尺测量了光束各个位置的光束直径,输出腔镜处的直径为0.65mm,凹面腔镜的直径为0.95mm,理论值分别为输出腔镜:0.635mm,凹面腔镜:0.900mm。误差较小,对束腰半径的测量是较为精确的。

并且,我们利用狭缝测量了光电探测器前的光束半径,利用仪器参数理论计算出此处的光束直径为1.285mm,因此设置狭缝为其1/10,进行测量绘制出曲线发现其基本满足Gauss分布,只是极大值点有偏移。最终拟合计算得到此处的光束半径为0.606mm,并且利用梯形近似计算了此处的光束半径,发现此方法比仪器参数计算所得更加精确。同时测量了激光的发散角为0.00137rad,接近理论值的0.00127rad,这是由于测量距离较短导致的,误差较小。

最后,我们利用高反镜将光束反射至白纸,并进行拍摄。利用Python读取了光强并用Gauss函数进行了拟合,效果较好,光斑呈现出极好的Gauss分布,但存在激光散斑效应等误差,整体效果较好。

总的来说,本次实验探究问题完整、误差分析完善、实验结果精确、计算方法多样,实验较为成功。

## 7. 思考题(每题限100字)

### 7.1 在本实验中,为什么氦氖激光腔内能看到激光传播路径,而腔外看不到?

这是由于腔内外激光功率差异导致的,输出腔镜透过率为2.4%,仅有一小部分能够透过腔镜并输出。而粉尘处于空气中构成胶体,会产生丁达尔效应,光强越大,胶体粒子对光的散射更强,路径更清晰明显。

### 7.2 在本实验中,为什么氦氖激光腔内靠近输出腔镜测得的光束直径比靠近凹面腔镜测得的小?

实验中输出腔镜处的激光束发生出射,故此时输出腔镜的位置即为激光的束腰处,为激光的束腰半径,而光束束腰处的光束直径最小,经过一段距离的传播后光束直径会扩大,因此如图4所示。

## [参考文献]

- [1] 周炳琨,高以智,陈倜嵘.激光原理(第7版)[M].北京:国防工业出版社,2014.
- [2] 周泓宇,樊智慧.浅谈布儒斯特角及其光学应用[J].科技资讯,2012,(18):222-223.
- [3] 赵建林.高等光学(第2版)[M].北京:国防工业出版社,2023.



## 附录:

## [Python代码]

读取照片光强并绘制光强图进行拟合

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import curve_fit
from PIL import Image
# 加载图片并转换为灰度图像
image = Image.open("照片.png").convert("L")
data = np.array(image)
height, width = data.shape
x = np.linspace(0, width - 1, width)
y = np.linspace(0, height - 1, height)
X, Y = np.meshgrid(x, y)
# 绘制光强图
fig = plt.figure(dpi = 400)
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
ax.plot_surface(X, Y, data, cmap='viridis')
# 找到光强极大值的位置
max_index = np.unravel_index(np.argmax(data), data.shape)
max_intensity = data[max_index]
# 提取横向光强分布
horizontal_intensity = data[max_index[0], :]
# 定义 Gauss 拟合函数
def gaussian(x, a, b, c):
    return a * np.exp(-(x - b)**2 / (2 * c**2))
# 拟合数据
popt, pcov = curve_fit(gaussian, x, horizontal_intensity)
# 绘制拟合曲线
plt.figure(dpi = 400)
plt.plot(x, horizontal_intensity, 'b-', label='data')
plt.plot(x, gaussian(x, *popt), 'r-', label='fit')
plt.xlabel('X')
plt.ylabel('Intensity')
plt.legend()
plt.show()
```



[签字页图片]

**[实验步骤]**

1. 了解 He-Ne 激光器装置以及组成部分及环境
2. 确定 He-Ne 激光波长：利用参考激光调节激光调腔
3. 输出腔镜镀膜面位置：调节输出腔镜架
4. 凹面镜镀膜面位置：调节凹面腔镜架，使参考激光经凹面镜反射后的大束直径
5. He-Ne 激光管位置：调节激光管位置使激光指示器达到最大
6. He-Ne 激光器出光：调节输出腔镜架控制出射角度的大小
7. He-Ne 激光功率优化：依次使 He-Ne 激光器功率提升最大值，并记录出射光
8. 测量 He-Ne 激光功率与激光管电压关系
9. He-Ne 激光管内径直径测量：基于游标卡尺切割法，测量。
10. He-Ne 激光腔镜镀膜面位置

**[实验数据]**

最大功率: 3.06mV (7.65 数据)

电压与功率近似线性关系, 且趋于饱和

输出端半径: 0.325 mm 凹面: 0.475 mm

具体数据已记录于表格

黄  
2024-3-12



## 《光信息专业实验 (I) 》课程 实验总结

学院：物理学院 专业：物理学专业 年级：2021级

实验人姓名、学号：路尚润21305127 参加人姓名、学号：邓逸枫21305409

实验人签名：路尚润 组号：B3组

日期：2024年3月19日 星期二 上午[ ] 下午[] 晚上[ ]

室温：25℃ 相对湿度：70% 指导教师：黄敏

### 2.2 半导体激光原理实验

#### 一、[实验目的]

1. 了解半导体激光原理，掌握半导体激光基本光束参数测量方法。
2. 学习半导体激光光束整形的基本方法，探索半导体激光发光波长温度依赖特性。

#### 二、[实验结果及分析]

##### 1. 测量 808nm 半导体激光的功率-激励电流特性

测量激光温度为25℃和15℃条件下808nm激光功率随激励电流的变化。

表 1 25℃和15℃条件下半导体激光器P-I特性测量数据

$I/\text{mA}$	$P(25^\circ\text{C})/\text{mW}$	$P(15^\circ\text{C})/\text{mW}$	$I/\text{mA}$	$P(25^\circ\text{C})/\text{mW}$	$P(15^\circ\text{C})/\text{mW}$
0	0.0	0.0	65	18.7	21.8
5	0.0	0.0	70	23.2	25.7
10	0.0	0.0	75	26.2	29.0
15	0.0	0.0	80	29.3	32.3
20	0.0	0.0	85	32.4	35.4
25	0.0	0.1	90	35.5	38.5
30	0.1	0.3	95	38.6	41.8
35	1.2	2.7	100	41.7	45.0
40	4.2	5.7	105	44.9	48.2
45	7.1	8.7	110	48.6	52.1
50	9.9	11.7	115	51.7	55.4
55	12.8	14.8	120	54.9	58.8
60	15.7	17.8			



基于表1中的数据，绘制25°C和15°C条件下半导体激光器P-I特性曲线如图1所示。

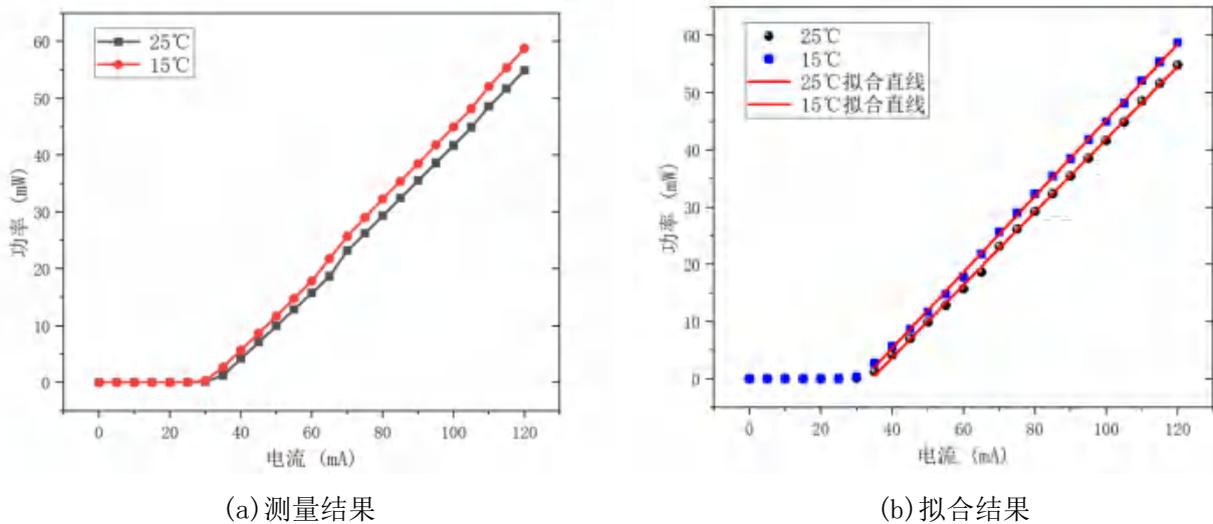


图 1 25°C和15°C条件下半导体激光器P-I特性曲线

**半导体激光器P-I特性分析（限150字）：**

① 阈值特性：激光器具有阈值电流 $I_{th}$ ， $I < I_{th}$ 时发出微弱荧光， $I > I_{th}$ 时发出激光。

② 在电流超过 $I_{th}$ 时，P-I近似线性增长。

③ 25°C下： $P = -21.74 + 0.64I(mW)$ ，R-Square=0.99941， $I_{th}=34.15^\circ C$ ；15°C下： $P = -21.22 + 0.66I(mW)$ ，R-Square=0.99953， $I_{th}=31.92^\circ C$ 。随温度降低， $I_{th}$ 减小，斜率增大，即量子效率增大。

④ 调节电流过程中出现按动两次按钮电流示数才会变化的情况，线性增长发生明显弯折，如图1(a)中电流为65mA时所示，产生误差。

**2. 半导体激光的远场分布-功率依赖特性**

1) 探头与半导体激光出光窗口间的距离： 30.00 cm。

2) 测量高、低两种激励电流条件下激光功率-转角依赖关系。

所选择的高、低两激励电流值分别为： 60.0 和 120.0 mA。

测量时本底电压为27mV，温度为25°C，增益为5。

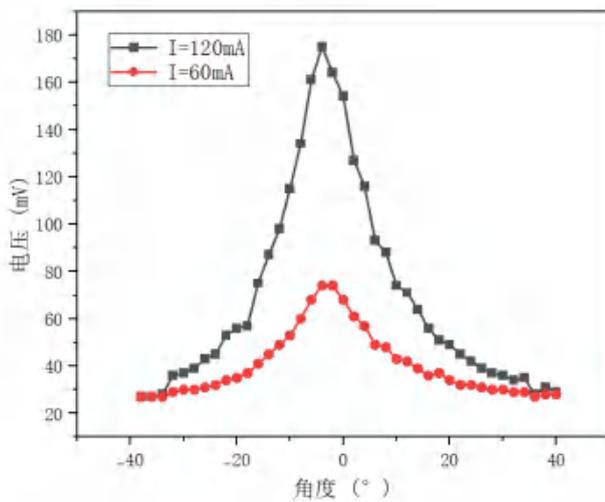
表 2 高、低两种激励电流条件下半导体激光功率-转角依赖关系测量数据

$\varphi/^\circ$	$U_H/mV$	$U_L/mV$	$\varphi/^\circ$	$U_H/mV$	$U_L/mV$
-38	27	27	2	127	61
-36	27	27	4	116	57
-34	28	27	6	93	49
-32	36	29	8	88	48
-30	37	30	10	74	43
-28	39	30	12	71	42
-26	43	31	14	64	39
-24	45	32	16	56	36

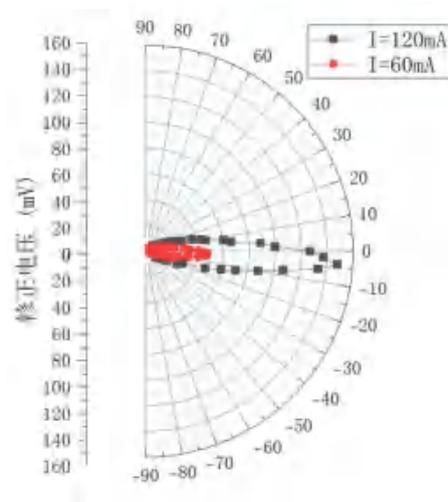


-22	53	34	18	51	37
-20	56	35	20	49	34
-18	57	37	22	45	32
-16	75	41	24	42	32
-14	87	45	26	39	31
-12	98	49	28	37	30
-10	115	53	30	36	30
-8	134	60	32	34	29
-6	161	68	34	35	29
-4	175	74	36	28	27
-2	164	74	38	31	28
0	154	68	40	29	28

基于表2的数据，绘制高、低两种激励电流条件下半导体激光功率-转角依赖关系曲线如图2。



(a) 直角坐标原始数据



(b) 极坐标修正数据(减本底)

图2 高、低两种激励电流条件下半导体激光功率-转角依赖关系曲线

**半导体激光发散角特性分析（限100字）：**

- ①曲线呈现明显的峰值以及对称分布，应当在直入射时功率最大，但峰值位置相对中心有偏移，可能是由于激光出射方向以及探头方向并非0度完全准直。
- ②功率大约集中在 $\pm 20^\circ$ 以内，随着I增大，光束展宽也增大。

**3. 半导体激光的光束形状测量**

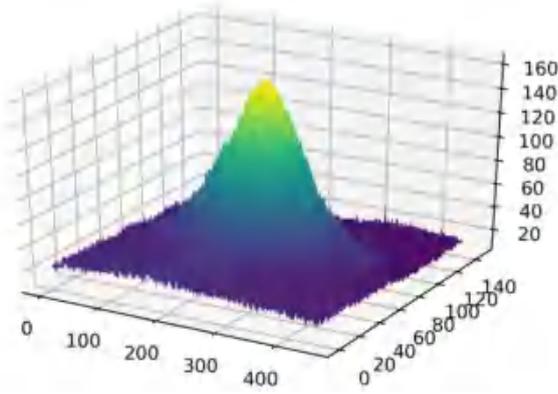
利用白屏在两个不同位置拍摄半导体激光光束形状。



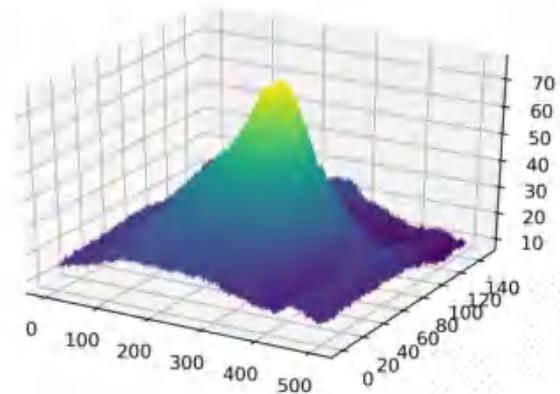
(a)  $d_1 = 5\text{cm}$



(b)  $d_1 = 15\text{cm}$



(c)  $d_1 = 5\text{cm}$  (光强分布)



(d)  $d_1 = 15\text{cm}$  (光强分布)

图3 两个不同位置所拍摄半导体激光光束形状

**半导体激光光束形状特性分析 (限100字) :**

- ① 光束横向近似呈椭圆分布，且发散角较大。
- ② 拍摄距离增大，光束展宽变大，光强(光功率密度)变小，环境光影响变大，出现更多的起伏，成像质量降低。
- ③ 出现明显的激光散斑效应，光强有毛刺现象。

**4. 半导体激光光束整形**

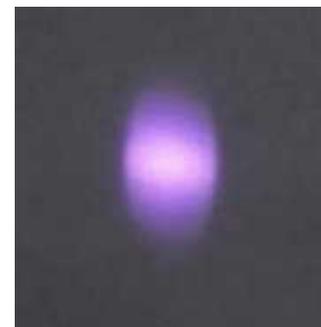
利用白屏在三个不同位置拍摄经柱面镜系统整形后的半导体激光光束形状。



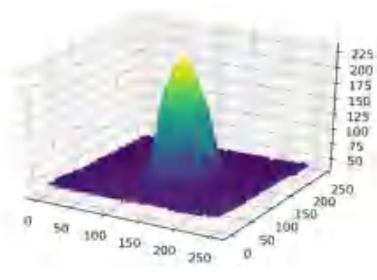
(a)  $d_1 = 5\text{cm}$



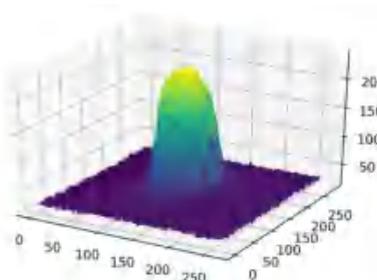
(b)  $d_1 = 10\text{cm}$



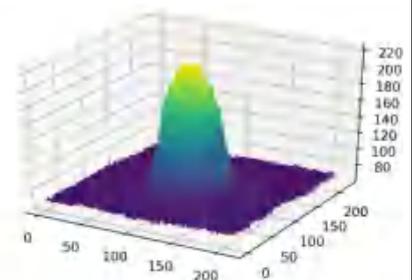
(b)  $d_1 = 20\text{cm}$



(c)  $d_1 = 5\text{cm}$  (光强分布)



(d)  $d_1 = 10\text{cm}$  (光强分布)



(d)  $d_1 = 20\text{cm}$  (光强分布)

图4 三个不同位置所拍摄的经柱面镜系统整形后的半导体激光光束形状



经柱面镜系统整形的半导体激光光束特性分析（限100字）：

- ①从侧面拍摄，光斑会受到影响。
- ②光斑形状基本一致，整形后近似平行。
- ③最佳整形发散角满足

$$\frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{f_1}{f_2} = \frac{1}{2}$$

出射并非为完美圆形，水平方向的原始光发散角比约为4：1，整形后近似为2:1椭圆。

5. 半导体激光的偏振特性

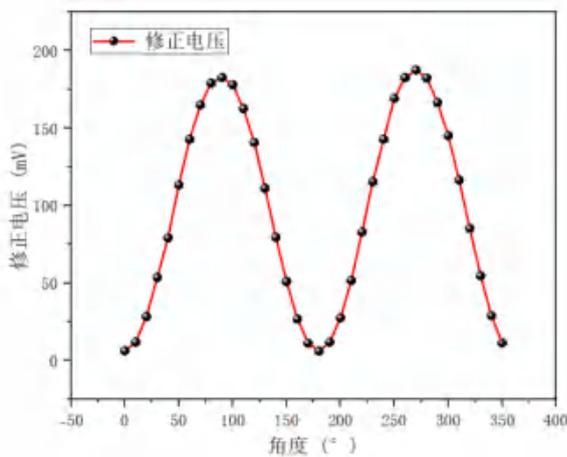
旋转偏振片 360°，测量半导体激光透射功率随偏振片转角的变化。

增益为 1，电流为 75mA，本底电压为 5，温度 25℃。

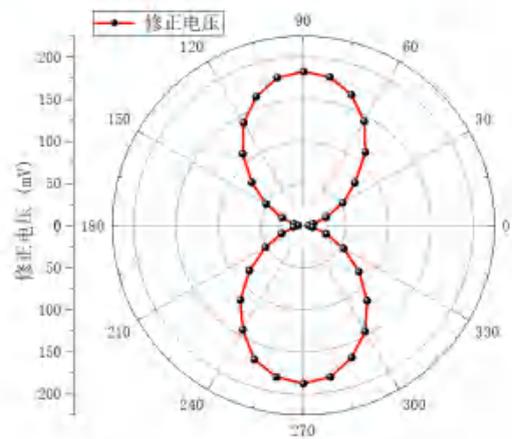
表3 半导体激光透射功率随偏振片转角变化测量数据

$\theta/^\circ$	$U/\text{mV}$	$\theta/^\circ$	$U/\text{mV}$	$\theta/^\circ$	$U/\text{mV}$
0	11.1	120	145.7	240	147.9
10	16.8	130	116.2	250	174.3
20	33.3	140	84.5	260	187.6
30	58.5	150	55.8	270	192.6
40	84.1	160	31.7	280	187.4
50	118.3	170	16.1	290	171.5
60	147.8	180	11.0	300	150.1
70	170.0	190	16.7	310	121.5
80	184.0	200	32.4	320	90.2
90	187.7	210	56.6	330	59.6
100	183.0	220	87.9	340	33.8
110	167.6	230	120.5	350	16.2

绘制激光透射功率随偏振片转角变化曲线如图5所示。



(a) 直角坐标



(b) 极坐标

图 5 半导体激光透射功率随偏振片转角变化曲线



**半导体激光器偏振特性分析（限100字）：**

- ①曲线近似正弦函数，实验中测得两个周期，90°与270°时透射功率最大，0°与180°透射几乎为0。
- ②由①可知，半导体激光器出射应为线偏光，偏振片90°与270°对应偏振方向。
- ③线偏振效果较好，偏振片垂直时透射较小。

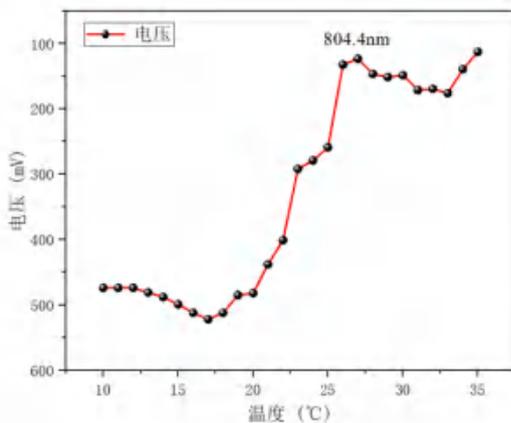
**6. 半导体激光发光波长的温度依赖特性**

调节半导体激光器的工作温度从 35°C 逐渐下降至 10°C，记录透过 Nd: YAG 晶体的激光功率值随温度的变化。

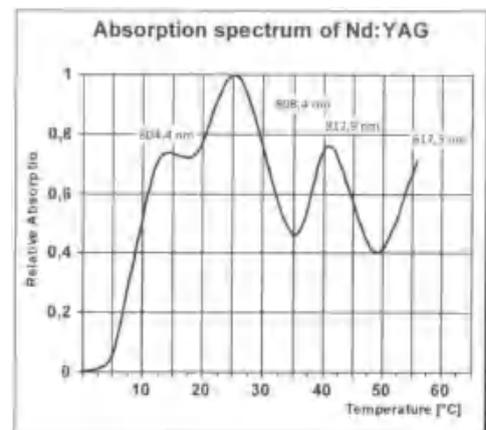
表4 透过Nd: YAG晶体激光功率随激光器工作温度变化测量数据

T/°C	U/mV	T/°C	U/mV	T/°C	U/mV
35	113	26	132	17	522
34	140	25	259	16	512
33	176	24	279	15	499
32	170	23	292	14	488
31	171	22	401	13	481
30	149	21	438	12	474
29	151	20	482	11	474
28	147	19	485	10	474
27	123	18	512		

基于表4，绘制透过Nd:YAG晶体的P-t关系曲线如图6所示，图中反转了纵轴，使得绘制曲线从表示透射变为表示吸收。



(a) 实验曲线



(b) 标准曲线

图 6 透过Nd: YAG晶体激光功率随激光器工作温度变化曲线（标定特征吸收波长对应位置）

**半导体激光发光波长的温度依赖特性分析（限100字）：**

- ①实验中测量曲线与标准值有15°C左右的偏差，10°C~35°C对应标准曲线的-5°C~20°C，可能是由于仪器基准不一致导致的。
- ②激光器温度影响输出激光波长，而Nd:YAG晶体对不同波长的吸收率不同，对比可知实验测得吸收峰27°C应对应804.4nm。



### 三、[实验总结]

**实验概述与总结、建议与意见(若有) (限 500 字)。**

本实验中，我们研究了半导体激光器的基本特性。

首先测量了半导体激光器的 P-I 曲线，利用 Origin 进行线性拟合，拟合优度高于 0.999；根据拟合参数发现随温度降低，阈值电流  $I_{th}$  减小，斜率增大，即量子效率增大。

接着测量了远场分布-功率依赖特性， $P - \phi$  曲线有明显峰值，且并非位于中心，功率基本集中在  $\pm 20^\circ$  以内，且激励电流增大时展宽会增大。

随后测量了整形前的光束形状，发现其横向近似椭圆分布，且随距离增大光功率密度降低；整形后光束达到准直要求，但横向依旧以 2: 1 椭圆分布，纵向变为 1: 2 椭圆分布，这是因为原始光束横纵比与柱透镜焦距比不一致导致的。

再后加入偏振片测量偏振特性，发现透射曲线与角度满足正弦函数，证明半导体激光为很好的线偏振光，线偏振方向为偏振片  $90^\circ$  或  $270^\circ$  的方向。

最后我们测量了不同温度下激光器输出的激光透过 Nd:YAG 晶体的透射比，从而对比标准曲线得到激光器输出对应的光波长，发现激光器输出特性与标准值有  $+15^\circ\text{C}$  的偏差， $10^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$  对应标准  $-5^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$ ， $27^\circ\text{C}$  时测量到 804.4nm 的吸收峰。

意见与建议：仪器温度调节有问题，有时按动两次才会增大示数，导致数据点重复或测量曲线弯折。激光器出射向下倾斜，应当进行修正，距离较大时会导致基本测量信号无法测量。

### 四、[思考题]

1. 本实验中的光束整形方案为什么无法得到圆形光斑？（限 100 字）

①横向调制的透镜焦距比与椭圆横纵比不一致，应满足

$$\frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{f_1}{f_2} = \frac{1}{2}$$

才能获得最佳调制效果，即圆形，而实际比例约为 4: 1，故调制后为 2: 1。

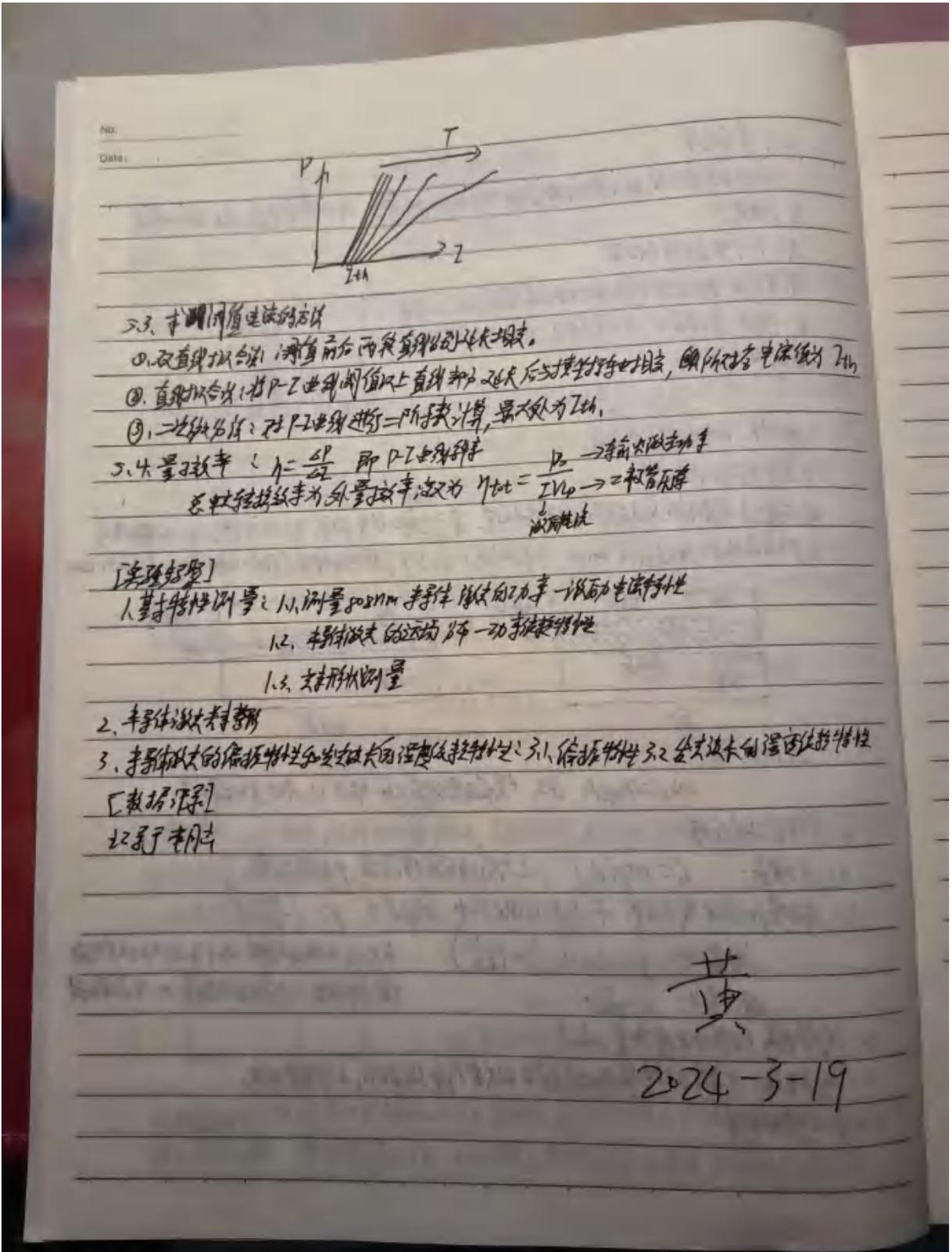
②准直物镜的透过孔径较小，整形前椭圆边界被切割，因此也不可能得到完美的圆形。

2. 为什么半导体激光器往往具有非常大的发散角？（限 100 字）

这是由于半导体激光器谐振腔结构导致的。半导体激光器体积小，谐振腔小，对光束的筛选作用比较弱，而且发光面积小，发出的光线会发生衍射，在空间中弥散从而具有较大的发散角，一般可达  $40^\circ$ 。



附录：[签字页图片]





## 《光信息专业实验 (I) 》课程 实验总结

学院：物理学院 专业：物理学专业 年级：2021级

实验人姓名、学号：路尚润21305127 参加人姓名、学号：邓逸枫21305409

实验人签名：路尚润 组号：B3组

日期：2024年3月26日 星期二 上午[ ] 下午[] 晚上[ ]

室温：25℃ 相对湿度：70% 指导教师：黄敏

### 2.3 半导体泵浦固体激光原理实验

#### 一、[实验目的]

1. 学习半导体泵浦固体激光的原理，掌握固体激光器激光谐振腔调节方法。
2. 学习激光倍频技术原理，掌握固体激光器腔内倍频的调节方法。

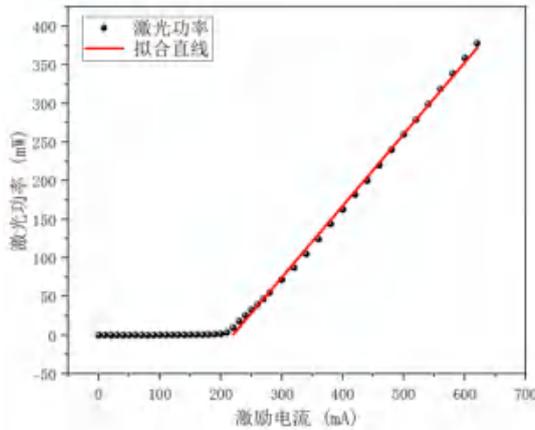
#### 二、[实验结果及分析]

##### 1. 测量 808nm 半导体激光的功率-激励电流特性

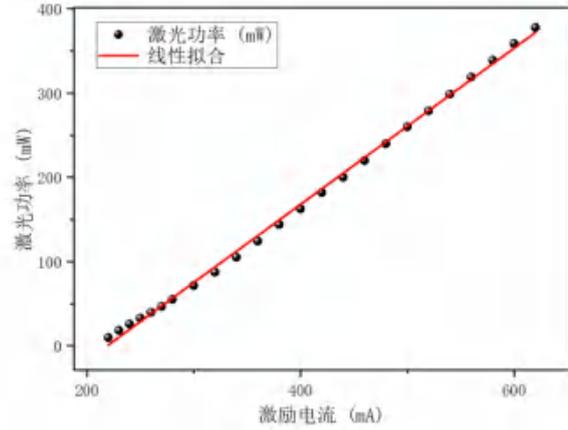
热电式激光功率计探头紧靠808nm半导体激光器输出窗口放置，测量808nm泵浦激光功率随激励电流的变化。

表 1 808nm泵浦激光功率随激励电流变化测量数据

激励电流 I/mA	功率 P/mW	激励电流 I/mA	功率 P/mW	激励电流 I/mA	功率 P/mW
0	0.0	160	0.7	360	124.3
10	0.0	170	0.8	380	143.9
20	0.0	180	1.0	400	162.7
30	0.0	190	1.2	420	182.1
40	0.1	200	1.6	440	200
50	0.1	210	3.5	460	220
60	0.1	220	9.8	480	240
70	0.1	230	18.3	500	260
80	0.2	240	25.8	520	279
90	0.2	250	33.0	540	299
100	0.2	260	39.8	560	319
110	0.3	270	46.8	580	339
120	0.3	280	55.3	600	359
130	0.4	300	71.6	620	378
140	0.5	320	87.4		
150	0.6	340	105.1		



(a) 变化曲线及拟合直线



(b) 高于阈值区域线性拟合

图 1 808nm 泵浦激光功率随激励电流变化曲线

**808nm 半导体激光特性分析 (限100字) :**

① 激光器具有阈值电流  $I_{th}$ ,  $I > I_{th}$  时发出激光。

② 阈值电流以上的数据线性拟合结果

$$P = 0.93I - 203.29(\text{mW})$$

拟合评分 R-Square=0.9983, Person's r=0.99915, 线性度极高, 经过估算阈值电流约为 219.14mA。

③ 在阈值电流附近, 曲线斜率持续增长, 出现一段弯曲, 可能与激光特性有关。

**2. 测量 1064nm 固体激光输出功率随 808nm 泵浦激光激励电流的变化**

1) 测量 RG1000 滤光片对 1064nm 光的透射率。

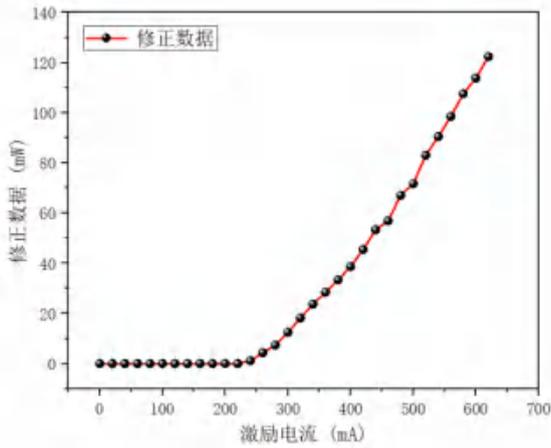
激励电流  $I=460\text{mA}$ , 测量两次, 单独放辅助片功率值  $P_1 = \underline{36.5(37.2)}$  mW; 放辅助片加待测片功率值  $P_2 = \underline{22.5(23.1)}$  mW。

计算待测 RG1000 滤光片透射率  $T_{RG} = \underline{0.62}$ 。

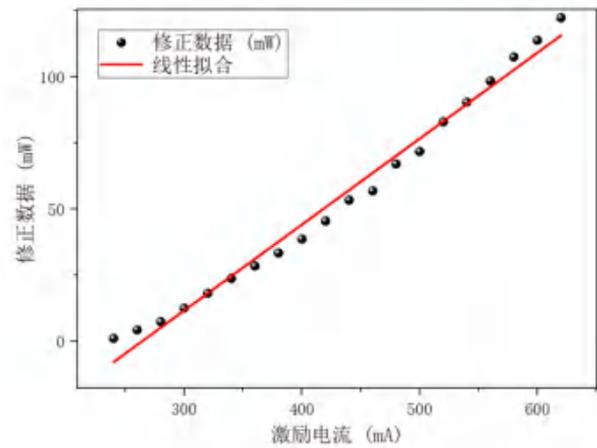
2) 测量 1064nm 激光输出功率随 808nm 激光激励电流的变化 (需利用  $T_{RG}$  修正数据)。

表 2 1064nm 激光功率随 808nm 激光激励电流变化的测量及修正数据

激励电流 I/mA	激光功率 P/mW 修正前	激光功率 P/mW 修正后	激励电流 I/mA	激光功率 P/mW 修正前	激光功率 P/mW 修正后	激励电流 I/mA	激光功率 P/mW 修正前	激光功率 P/mW 修正后
0	0.0	0.0	220	0.0	0.0	440	33.1	53.4
20	0.0	0.0	240	0.7	1.1	460	35.3	56.9
40	0.0	0.0	260	2.7	4.4	480	41.6	67.1
60	0.0	0.0	280	4.6	7.4	500	44.5	71.8
80	0.0	0.0	300	7.8	12.5	520	51.5	83.1
100	0.0	0.0	320	11.3	18.2	540	56.1	90.5
120	0.0	0.0	340	14.7	23.7	560	61.1	98.5
140	0.0	0.0	360	17.7	28.5	580	66.7	107.6
160	0.0	0.0	380	20.7	33.4	600	70.6	113.9
180	0.0	0.0	400	24.0	38.7	620	75.9	122.4
200	0.0	0.0	420	28.2	45.5			



(a) 变化曲线



(b) 高于阈值区域线性拟合

图 2 1064nm激光功率随808nm激光激励电流变化曲线（基于修正数据）

3) 计算 808nm 泵浦激光转化为 1064nm 激光的效率  $\eta_{808-1064}$ （需利用  $T_{RG}$  修正数据）。

表3 808nm-1064nm激光转化效率随泵浦光激励电流变化数据（基于修正数据）

激励电流 I/mA	转换效率 $\eta_{808-1064}/\%$	激励电流 I/mA	转换效率 $\eta_{808-1064}/\%$
0-200	0.0	420	25.0
220	0.2	440	26.7
240	4.3	460	25.9
260	10.9	480	28.0
280	13.4	500	27.6
300	17.5	520	29.8
320	20.8	540	30.3
340	22.6	560	30.9
360	22.9	580	31.7
380	23.2	600	31.7
400	23.8	620	32.4

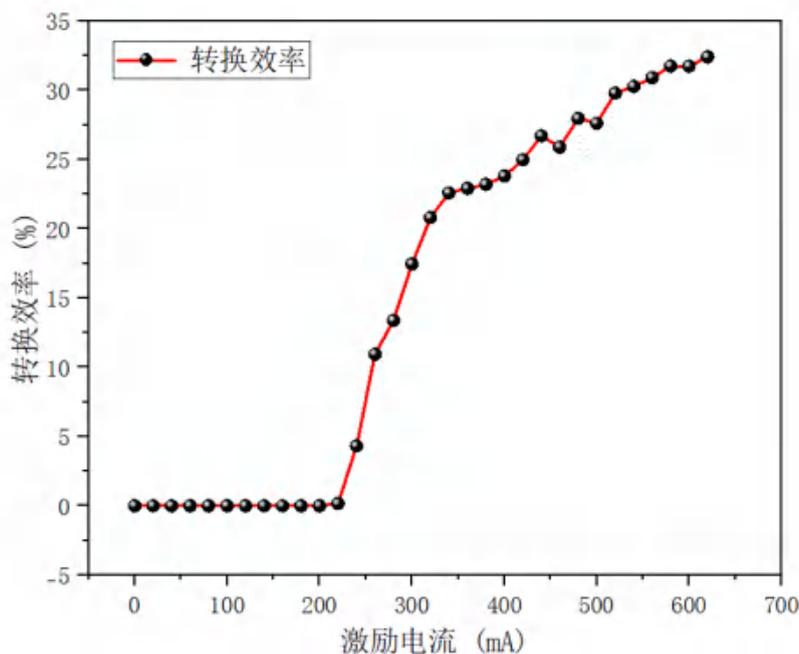


图 3 808nm-1064nm激光转化效率随泵浦光激励电流变化曲线（基于修正数据）



**1064nm固体激光特性分析（限200字）：**

①较低电流测量时由于环境光以及激光器内部波动会导致功率示数产生波动，但实际上此时并未产生激光，故示数记为0。

②阈值电流以上的功率数据线性拟合结果为

$$P = 0.325I - 85.919(mW)$$

拟合评分R-Square=0.98625，Person's r=0.9913，线性度较好，但已经呈现一定的非线性趋势。

③转换效率随电流的变化趋势大致可分为两端线性增长，分别为电流220mA-340mA和340mA以上，但两段增长斜率不同，可能与Nd:YAG晶体特性有关。

**3. 测量 532nm 倍频激光输出功率随 808nm 泵浦激光激励电流的变化**

1) 测量 BG39 滤光片对 532nm 光的透射率。

激励电流 I=620mA，单独放辅助片功率值  $P_1 = 5.22$  mW；放辅助片加待测片功率值  $P_2 = 4.15$  mW。计算待测 BG39 滤光片透射率  $T_{BG} = 0.80$ 。

2) 测量 532nm 激光输出功率随 808nm 激光激励电流的变化（需利用  $T_{BG}$  修正数据）。

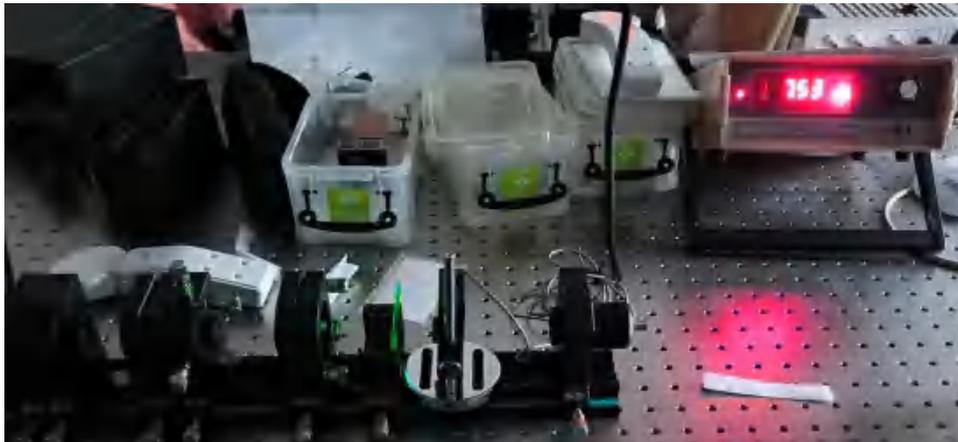
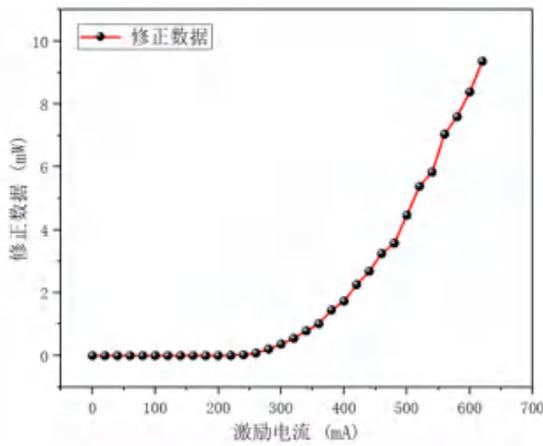


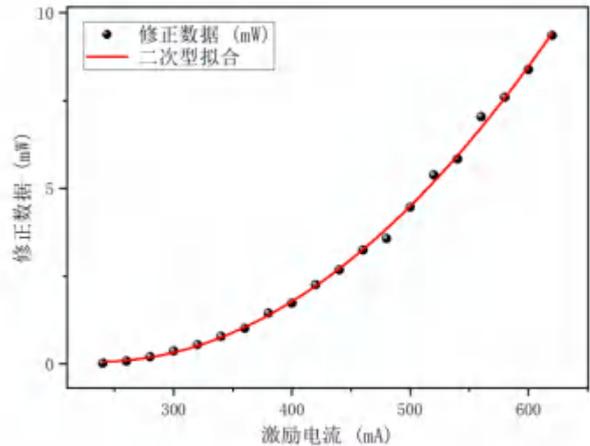
图4 620mA激励电流下的532nm激光输出工作状态

表 4 532nm激光功率随808nm激光激励电流变化的测量及修正数据

激励电流 I/mA	激光功率 P/mW 修正前	激光功率 P/mW 修正后	激励电流 I/mA	激光功率 P/mW 修正前	激光功率 P/mW 修正后	激励电 流 I/mA	激光功率 P/mW 修正前	激光功率 P/mW 修正后
0	0.00	0.00	220	0.00	0.00	440	2.13	2.68
20	0.00	0.00	240	0.02	0.02	460	2.58	3.25
40	0.00	0.00	260	0.06	0.08	480	2.84	3.57
60	0.00	0.00	280	0.16	0.21	500	3.55	4.47
80	0.00	0.00	300	0.29	0.37	520	4.28	5.38
100	0.00	0.00	320	0.44	0.55	540	4.64	5.84
120	0.00	0.00	340	0.63	0.79	560	5.60	7.04
140	0.00	0.00	360	0.81	1.02	580	6.04	7.60
160	0.00	0.00	380	1.15	1.45	600	6.67	8.39
180	0.00	0.00	400	1.38	1.73	620	7.44	9.36
200	0.00	0.00	420	1.80	2.26			



(a) 变化曲线



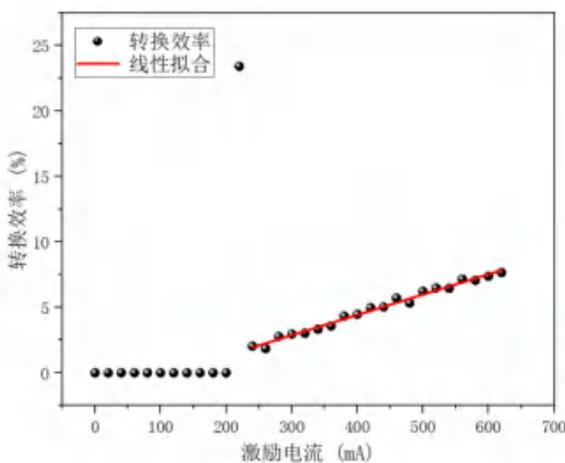
(b) 高于阈值区域二次拟合

图5 532nm激光功率随808nm激光激励电流变化曲线（基于修正数据）

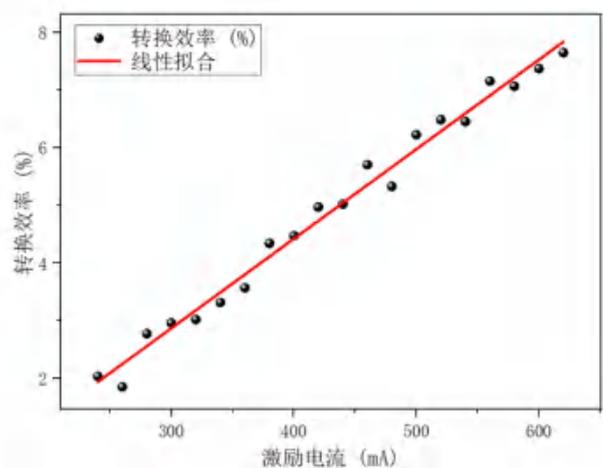
3) 计算 1064nm 激光倍频转化为 532nm 激光的效率  $\eta_{1064-532}$ （需利用  $T_{BG}$  修正数据）。

表5 1064nm-532nm倍频转化效率随泵浦光激励电流变化数据（基于修正数据）

激励电流 I/mA	转换效率 $\eta_{808-1064}/\%$	激励电流 I/mA	转换效率 $\eta_{808-1064}/\%$
0-200	0.0	420	5.0
220	23.4	440	5.0
240	2.0	460	5.7
260	1.8	480	5.3
280	2.8	500	6.2
300	3.0	520	6.5
320	3.0	540	6.5
340	3.3	560	7.1
360	3.6	580	7.1
380	4.3	600	7.4
400	4.5	620	7.6



(a) 变化曲线及拟合直线



(b) 高于阈值区域线性拟合

图 6 1064nm-532nm倍频转化效率随泵浦光激励电流变化曲线（基于修正数据）

注：I=220mA数据点由于此时环境波动相对于数据较大，记录时由于环境波动导致数据出现奇异点。

532nm倍频激光特性分析（限200字）：

①转换效率理论上满足



$$\eta_{1064-532} \propto \beta L^2 I_{1064} \frac{\sin^2(\Delta kl/2)}{\Delta kl/2}$$

应与 $I_{1064}(P_{1064})$ 呈正比，则 $I_{532}$ 应与 $I_{1064}$ 呈平方比，由先前的实验，可以近似认为阈值之上 $I_{1064}$ 与激励电流呈线性，故 $I_{532}(P_{532})$ 与激励电流呈二次关系，其拟合结果为

$$P = 3.55 - 0.03I + 0.00006I^2(mW)$$

拟合评分R-Square=0.99855，效果极好。

②转换效率-激励电流的线性拟合结果

$$\eta_{1064-532} = 0.0155I - 1.7889(mW)$$

拟合评分R-Square=0.98547，Person's r=0.99271，拟合优度极高，线性度极好。

③实际上应与 $P_{1064}$ 拟合

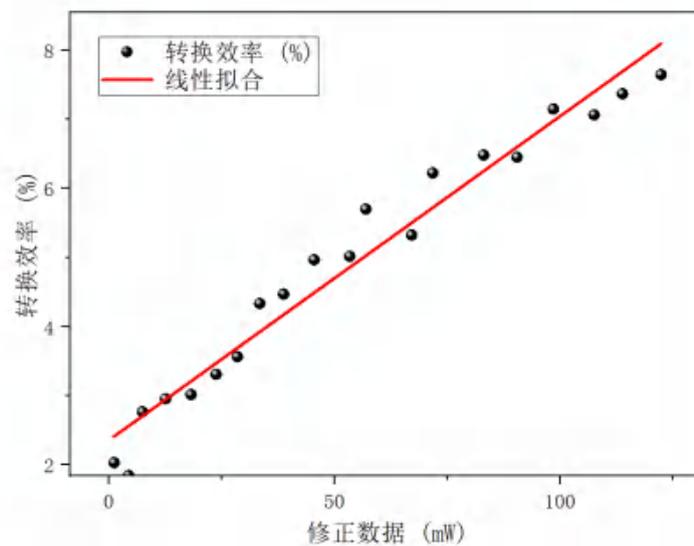
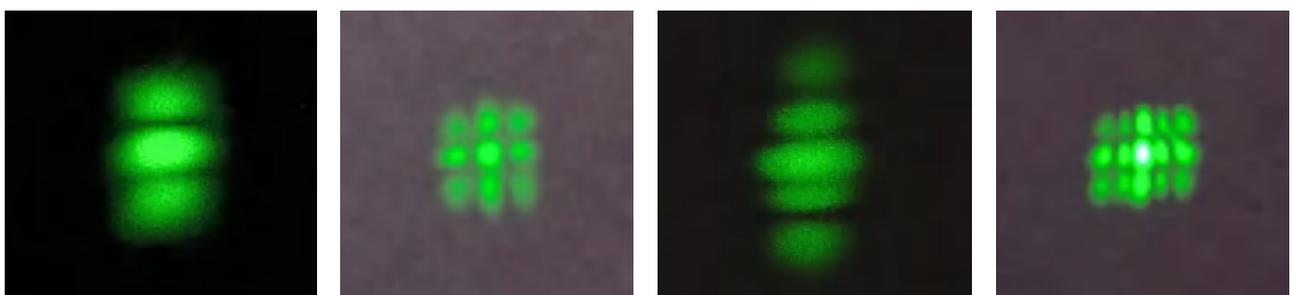


图 7 1064nm-532nm倍频转化效率随1064nm激光功率变化曲线（基于修正数据）

拟合评分R-Square=0.96139，相比之前较差，可能是由于更换反射镜导致1064nm激光功率变化导致的。

#### 4. 观察 532nm 激光横模

调节固体激光器输出镜观察 532nm 激光横模变化，记录 4 种典型激光横模并正确标记。



(a) TEM<sub>20</sub>

(b) TEM<sub>22</sub>

(c) TEM<sub>40</sub>

(d) TEM<sub>24</sub>

图8 实验观察到的532nm激光4种典型激光横模（标记对应模式）

注：Guass基模即圆点，并无太多可观测效果，因此并未记录。



### 三、[实验总结]

#### 实验概述与总结:

在本次实验中，我们研究了固体激光器的特性。

首先，我们测量了 808nm 半导体激光器的输出功率-激励电流的关系曲线，发现存在阈值特性，阈值之上呈线性增长，拟合结果为  $P = 0.93I - 203.29(mW)$ ，拟合评分 R-Square=0.9983，线性度极高，估算阈值电流约为 219.14mA。

接着，我们测量了 1064nm 激光器特性，在两次测量下，所用 RG1000 的透过率约为 62%，基于此进行修正，测量 1064nm 激光输出功率-激励电流变化曲线，阈值之上满足  $P = 0.325I - 85.919(mW)$ ，拟合评分 R-Square=0.98625。作出 808nm-1064nm 激光转换效率曲线，大致可划分为电流 220mA-340mA 和 340mA 以上两段斜率不同的线性增长，可能与晶体特性有关。

再后，我们研究了晶体倍频特性，利用 1064nm 激光产生 532nm 激光，所用 BG39 滤光片的透过率约为 80%。经理论分析，修正后的 532nm 激光功率应与激励电流近似呈二次型曲线，而 1064nm-532nm 激光转换效率与激励电流应近似呈线性关系，拟合结果为：  
①  $P = 3.55 - 0.03I + 0.00006I^2(mW)$ ，拟合评分 R-Square=0.99855；  
②  $\eta_{1064-532} = 0.0155I - 1.7889(mW)$ ，拟合评分 R-Square=0.98547。拟合优度较高。非近似条件下，转换效率应与 1064nm 激光功率呈线性关系，拟合评分 R-Square=0.96139，相比之前较差，可能是由于更换反射镜导致 1064nm 激光功率变化导致的。

最后，我们观察了四种光场模式，分别为 TEM<sub>20</sub>、TEM<sub>22</sub>、TEM<sub>40</sub>、TEM<sub>24</sub>，效果分明。Guass 基模即为圆点，因此并未记录。

#### 建议与意见:

仪器表面存在灰尘，滤光片表面污渍分布不均，不同点出射的透过率不同。

### 四、[思考题]

1. 为了获得更高的绿光倍频效率，为什么需把反射率为 98%的输出镜换为反射率为 99.9%的输出镜？（限 100 字）

激光在谐振腔内部多次往返后输出，提高输出镜反射率可以降低输出损耗，从而获得更高的激光功率。而倍频光的转换效率较低，因此需要提高基频光的功率以及倍频光自身功率，从而获得更高的功率输出。

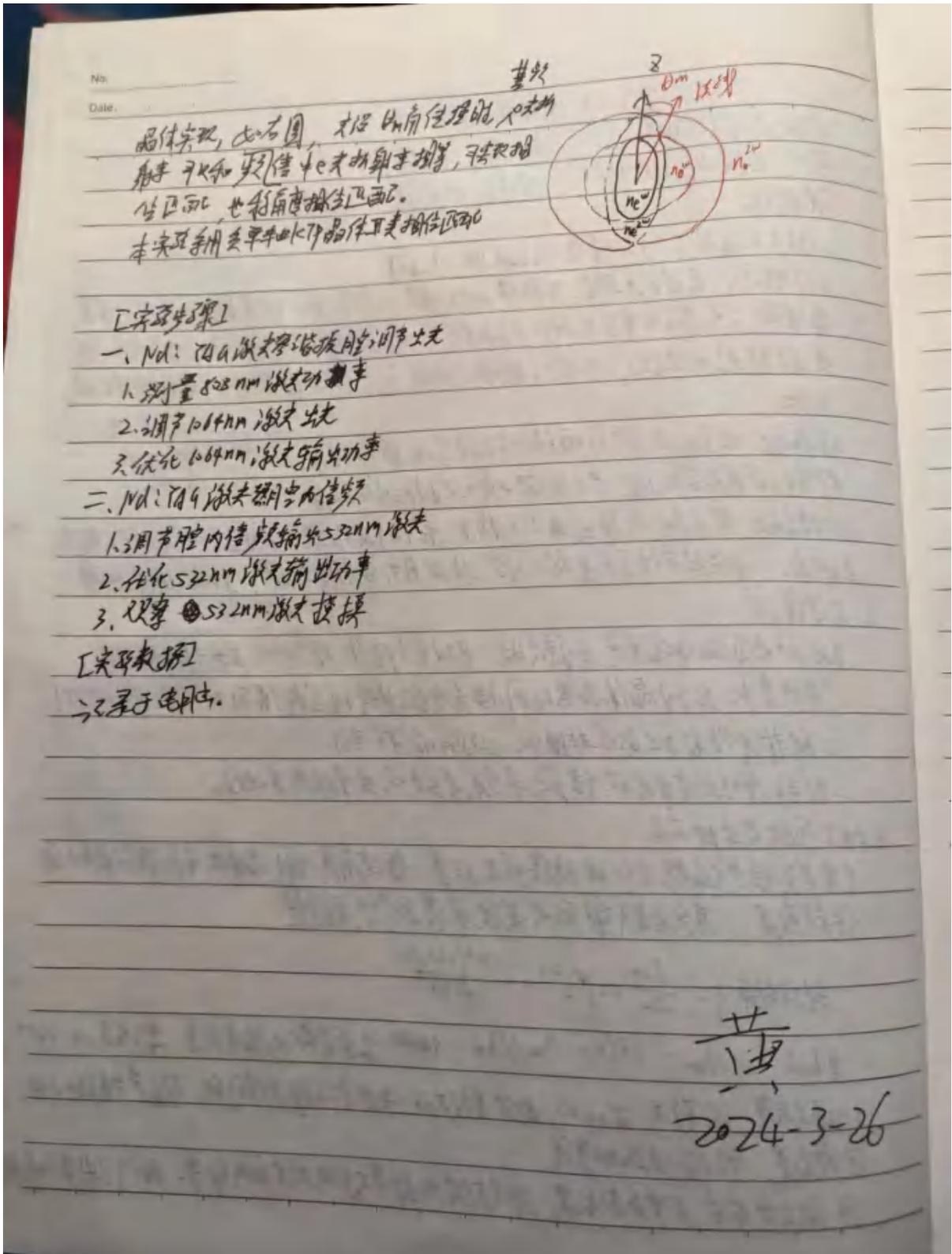


## 2. 为什么倍频光比基频光显得更不稳定？（限 100 字）

倍频光是利用晶体倍频效应产生的，转换效率较低并且受到参数影响极大，利用晶体双折射效应可以产生较大的输出，此时晶体角度等是很重要的参数，而参数是十分敏感的，因此外部微小扰动都会造成倍频光较大的变动。



附录：[签字页图片]







进行光放大，实现掺铒光纤放大器（EDFA）的功能。掺铒光纤放大器的增益介质是纤芯中掺杂铒离子（ $\text{Er}^{3+}$ ）的单模石英光纤。

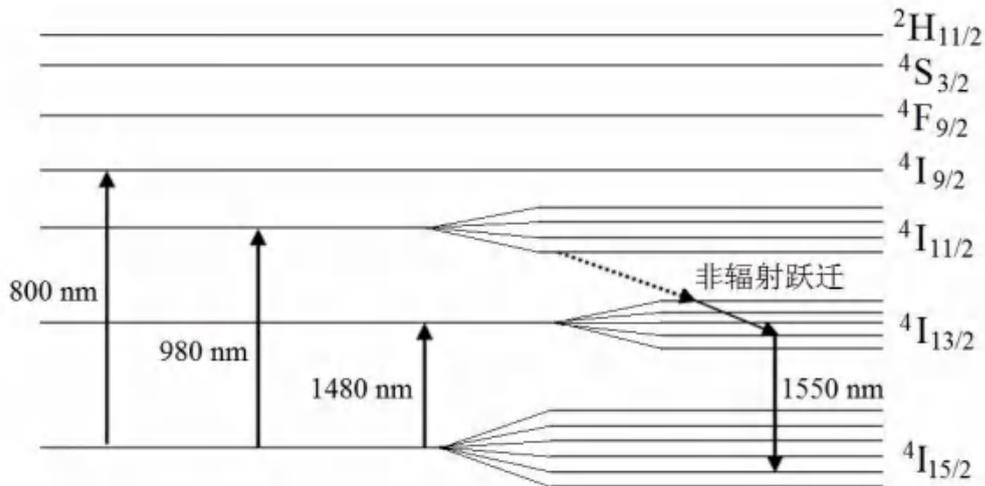


图2 掺铒光纤中铒离子能级系

铒离子有许多不同的能级，而且由于光纤基质的影响而产生分裂（Stark 分裂），形成准能带（如图2所示）。参与光放大的主要有三个能级，即基态能级  $4I_{15/2}$ ，亚稳态能级  $4I_{13/2}$ ，以及泵浦能级  $4I_{11/2}$ 。从而可以把掺铒光纤看成是一个三能级系统，在980 nm 泵浦光作用下，电子从基态激发到泵浦能级上，然后很快衰变到亚稳态能级上；衰变过程中，多余的能量以声子形式释放。同时，亚稳态能带中，电子移向能带底部，并发射荧光，持续时间较长，从而可以聚集很多粒子实现粒子数反转。

在信号光的激励下，亚稳态粒子会以受激发射的方式跃迁到基态，实现光放大，跃迁的能量宽度使得受激发射在1530-1560nm范围内。

### (3) 腔型结构

光纤激光器按腔型可以分为线性谐振腔和环形谐振腔。本实验采用线性腔，当腔长是激光半波长的整数倍时，反射波和入射波可以相干相长出现谐振，且光场经过干涉形成驻波。线性腔的典型是F-P腔，由一对平行的反射镜构成，如图3所示。实际上，对于光纤激光器，反射元件可以直接镀在光纤端面上，或者直接由光纤端面充当，或通过微纳加工技术制备在光纤内部。

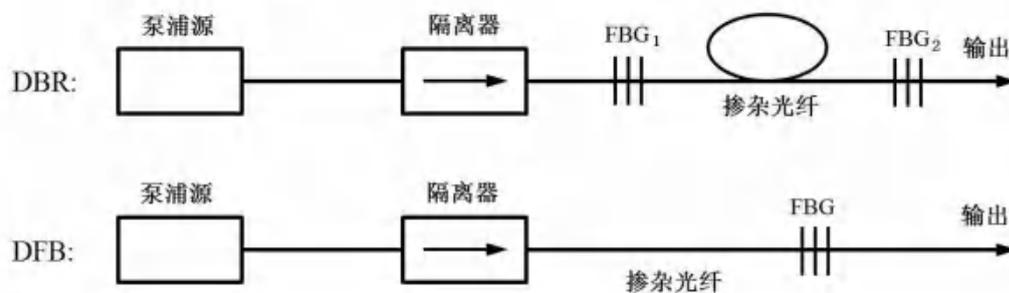


图3 DBR(布拉格反射)和DFB(分布反馈)光纤激光器示意图

### (4) 泵浦源

铒离子有多个吸收带：650nm、800nm、980nm和1480nm。理论上都可以来实现泵浦，但我们应当选取泵浦效率较高以及较好实现的泵浦波长，不能有激发态吸收(从高能级向更高的能级跃迁)等。实验证实，980nm泵浦效率最高，且没有明显的激发态吸收，本实验采用980nm半导体激光器输出泵浦光。



## 2.2 光纤激光器的动态特性

### (1) 泵浦光吸收动态特性

掺杂光纤在泵浦光抽运下除了具有增益介质特性，还具有类似可饱和吸收体的特性。具体地，泵浦光进行端面泵浦在掺杂光纤中传输时，由于稀土离子对泵浦光的受激吸收，泵浦光将出现吸收损耗，导致光强在掺杂光纤中呈指数衰减。在强光泵浦条件下，随着泵浦光抽运时间的增加，下能级与上能级的粒子数密度差将趋向零，导致掺杂光纤对泵浦光的吸收系数趋近于零，也即掺杂光纤对泵浦光的吸收趋向饱和，简称泵浦饱和。

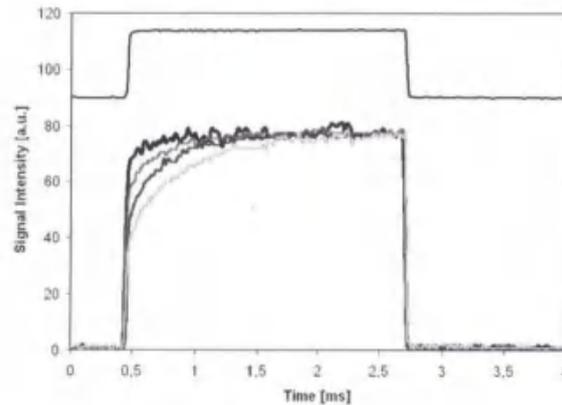


图4 泵浦光透过掺铒光纤的典型动态曲线

### (2) 荧光辐射动态特性

对于掺杂稀土元素的荧光光纤，如掺铒光纤，在合适波长泵浦光的激励下就会发射荧光。对于激发态自发辐射产生荧光的过程，荧光强度与能级的跃迁几率及上能级粒子数成正比。在强泵浦的条件下，随着泵浦过程的发展处于长寿命亚稳态的粒子数将会逐渐增加，最终几乎占据所有铒离子数而导致泵浦饱和。

掺铒光纤所产生的荧光强度随泵浦时间增加逐渐上升并趋向饱和，达到稳定状态，这时若关闭泵浦光，荧光强度将按指数形式衰减。荧光强度下降到 $1/e$ 强度的时间长度称为荧光寿命，反映了粒子从激发态跃迁到基态过程粒子在激发态滞留的平均时间，等同于激发态的能级寿命。

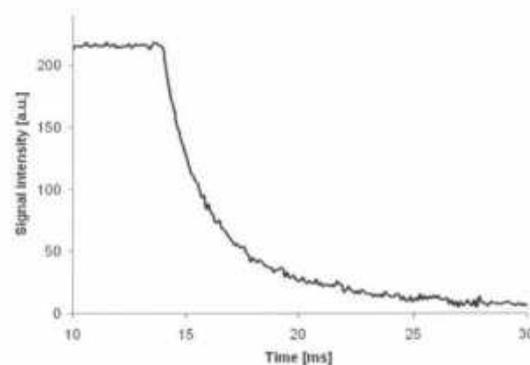


图5 掺铒光纤荧光衰减的典型动态曲线

### (3) 信号光放大动态特性

泵浦激光和信号激光同时输入掺铒光纤放大器中，通过泵浦激光抽运大量粒子到亚稳态实现粒子数反转，并通过信号激光诱导亚稳态粒子的受激辐射，可实现对信号光的显著放大。

一般地，增益随泵浦光强的提高而提高，并趋向饱和；增益随掺铒光纤长度增加先提高后下降，其极值为最佳增益点，所对应光纤长度为最大增益光纤长度。并且信号光的大小也



会对增益产生影响：小信号光输入时的增益大于大信号光输入时的增益。因为小信号光放大时上能级电子的消耗能从泵浦中得到充分补充，受激辐射增益能维持较高的水平，并不会出现尖峰；而大信号光放大的情形，上能级电子的消耗无法从泵浦中得到充分补充，受激辐射增益就会出现下降，在较低增益水平达到泵浦与辐射的平衡，会呈现尖峰下降的特性。

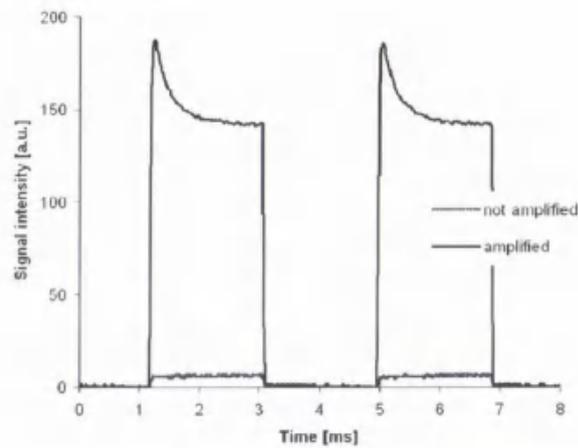


图6 掺铒光纤放大器对大信号光放大的的典型动态曲线

#### (4) 尖峰振荡和弛豫振荡

**激光尖峰振荡：**指激光器首次开启或稳态运行条件受到显著扰动时，激光器输出振幅很大且持续振荡的激光脉冲序列；

**激光弛豫振荡：**指激光器输出功率幅度变化中更常规的、往往呈指数衰减的振荡。弛豫振荡可发生在一个激光尖峰振荡脉冲序列演化过程中，或随激光系统的微小扰动而发生。

二者均发生在粒子数反转和腔内激光光强响应处于显著不同的时间尺度的条件下。

当泵浦光开启时，在上能级中的粒子数将从零增长稳态值，此时光子只由自发辐射产生。随着泵浦光不断的抽运，在某个时刻反转粒子数将达到激光振荡的阈值，但此时激光振荡尚未能发生，因在光子密度仍然比较低。随着泵浦的继续进行，反转粒子数进一步增加并远超阈值，而激光模式中的光子密度也通过受激辐射迅速增长，产生激光振荡，并消耗大量激光上能级粒子。最终，激光模式中的光子数密度提升到足够高，将上能级粒子数消耗至阈值以下，停止受激辐射。这种腔内光子数密度剧烈的增长和快速的下降对应着激光输出功率中的一个尖峰。

随着泵浦的进一步继续，上能级粒子数将重新增长，使上述尖峰产生的过程不断循环重复，形成激光尖峰振荡序列。在每个尖峰产生后，最终的上能级粒子数和光子数密度将逐渐趋向于其稳定值，尖峰的幅度将逐渐减小，最终湮灭于激光输出功率的稳态曲线中。

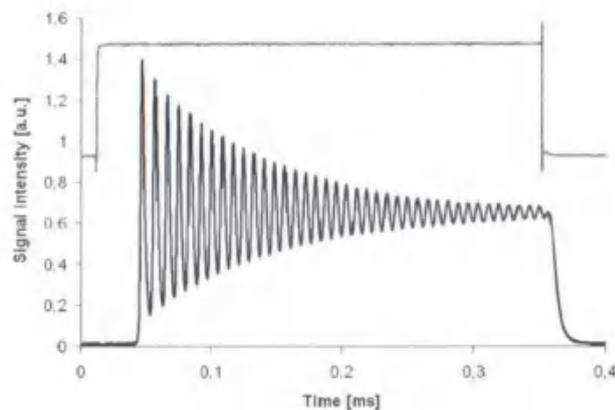


图7 掺铒光纤激光器的典型尖峰振荡动态曲线



## 2.3 光纤器件原理

### (1) 波长耦合器WDM

波长耦合器（WDM）在光通信领域常称为波分复用器，其可将不同光纤传输的不同波长光合并到同一条光纤传输，或者将同一条光纤上传输的许多波长光分离出来。在光纤激光器中，WDM可将泵浦光与信号光合束后一起通过掺铒光纤实现光放大，或将放大后的信号光与泵浦光分束，有光纤型和分立器件型两种形式。

分立型通过光反射镜、滤光片以及微透镜实现对泵浦光和信号光的复用与分离，其光损耗较大。光纤型对泵浦光和信号光的插入损耗基本相同，且温度、偏振及波长响应特性较好。

### (2) 光隔离器ISO

光隔离器（Optical isolator, ISO）又称为光二极管（Optical diode），作用是只允许光波往一个方向传输，阻止光波往反方向传输，是一种非互易光学器件。光隔离器可应用于激光器或光放大器的输出端，以避免反射光返回器件而影响器件的工作性能。

例如，在激光光源和光传输系统之间安装光隔离器，可消除反射光对激光光源的不利影响，提高激光光源工作稳定性；在EDFA中放置光隔离器可避免光路反射导致的自激振荡，以及有效降低放大噪声。

## 3. 实验设备光路图

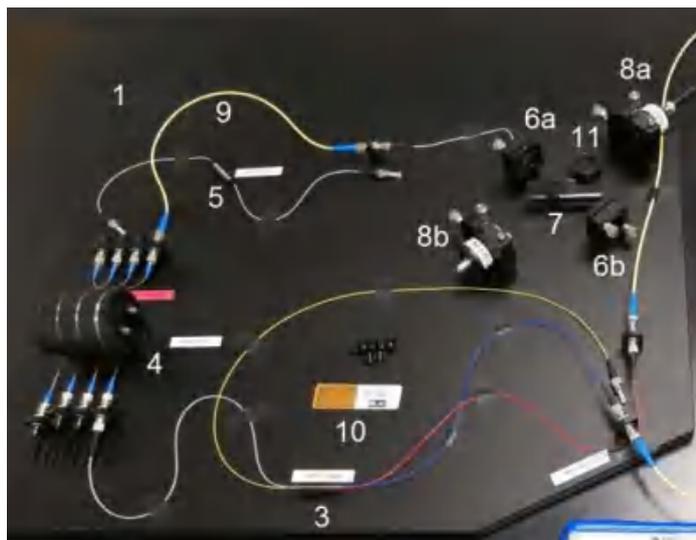


图8 光纤激光原理实验装置图

3波分复用器；4掺铒光纤放大器；5被替换的光纤；6a准直器；6b高反镜；7阶梯密度衰减片；8a铟镓砷光电探测器；8b硅光电探测器；9直通光纤跳线；10红外显示卡；11红外长波通滤光片

## 4. 实验步骤

### 4.1 测量980nm泵浦激光功率与激励电流的关系

- (1) 保持图8光路，使用铟镓砷光电探测器。
- (2) 铟镓砷光电探测器连接980nm控制器Input端，同时Output端连接数字万用表的电压测量。
- (3) 开启980nm半导体激光器电源，调节仪器使得输出达到峰值，测量980nm半导体激光器的P-I特性。(最大激励电流对应功率约为115mW)

### 4.2 光纤器件原理



- (1) 关闭980nm激光器，但不关闭电源，开启1550nm激光器，调节激励电流使得其大于阈值，并调节仪器旋钮使得输出达到极大，
- (2) 测量1550nm半导体激光器的P-I特性。

#### 4.3 测量透过掺铒光纤的980nm泵浦激光动态特性

- (1) 关闭1550nm激光器，开启980nm激光器，连接示波器。
- (2) 记录示波器上高、中、低3个电流值的980nm激光动态透射曲线，并比较其之间的变化关系。(保证3个激励电流值具有相近的周期)

#### 4.4 测量掺铒光纤对1550nm荧光动态特性的影响

- (1) 在铟镓砷光电探测器前安装滤光片，调节激励电流。
- (2) 记录示波器上高、中、低3个电流值的掺铒光纤增益介质荧光动态曲线并对比(保证3个激励电流值具有相近的周期)

#### 4.5 测量透过掺铒光纤的1550nm信号激光动态特性

- (1) 在980nm激光泵浦下，分别记录示波器上不同泵浦激光电流和信号激光电流的1550nm信号激光动态特性曲线(泵浦和信号激光电流各取2个值)。
- (2) 在无980nm泵浦下分别记录示波器上呈现的对应高低信号激光电流值的1550nm信号激光动态特性，对比异同。

#### 4.6 测量线性光纤激光器特性

- (1) 调节反射镜和ST接头，构建线性光纤激光器，记录1550nm激光的尖峰振荡特性。
- (2) 测量线性光纤激光器输出的1550nm激光功率与980nm泵浦激光激励电流的关系。

### 5. 实验结果及处理分析

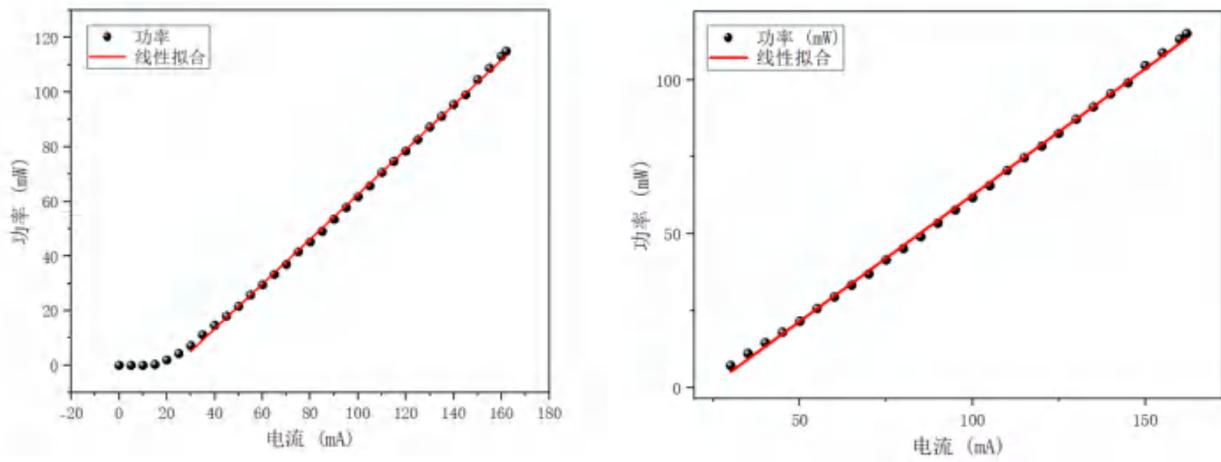
#### 5.1 测量980nm泵浦激光功率与激励电流关系

打开980nm泵浦激光，使用电压表，调节仪器使得电压表输出达到峰值。读取不同激励电流I下的对应电压U，在根据实验所给的校准关系(最大电流对应115mW功率)换算出此时的光功率值，在增益为5的实验条件下，实验结果如下表所示。

表1 980nm泵浦激光功率与激励电流关系

I/mA	U/mV	P/mW	I/mA	U/mV	P/mW
0	2	0.0	85	459	49.0
5	2	0.0	90	500	53.4
10	2	0.0	95	540	57.7
15	5	0.3	100	577	61.7
20	20	1.9	105	614	65.7
25	42	4.3	110	660	70.6
30	69	7.2	115	698	74.7
35	106	11.2	120	733	78.4
40	138	14.6	125	772	82.6
45	170	18.0	130	815	87.2
50	203	21.6	135	852	91.2
55	242	25.7	140	892	95.5
60	277	29.5	145	925	99.0
65	312	33.3	150	977	104.6
70	346	36.9	155	1016	108.8
75	389	41.5	160	1057	113.2
80	423	45.2	162	1074	115.0

其中换算时减去了2mV的本底电压，再利用Origin作图可得



(a)实验数据点及线性拟合

(b)局部线性拟合

图9 980nm激光功率与激励电流的关系

**分析:**

①呈现明显的阈值特性，在阈值电压以上近似线性增长。

②对阈值电压以上的拟合结果为

$$P = 0.82I - 19.42(mW)$$

拟合评分R-Square=0.99919, Pearson's r=0.99959, 拟合优度极高, 线性度极好, 计算得阈值电流为 $I_{th-980nm}=23.68mA$ 。

③在15mA-30mA区间内, 激光功率随电流并非线性增长, 斜率逐渐增大。

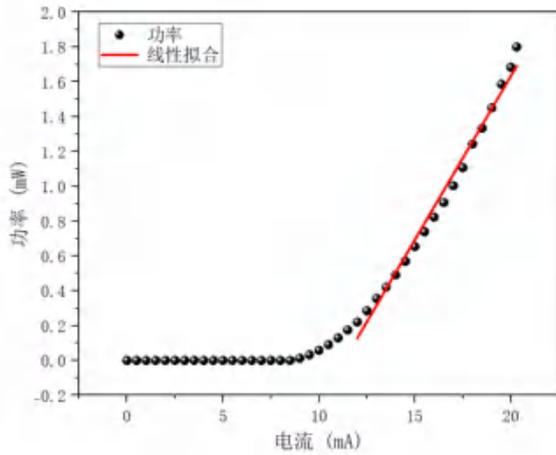
**5.2 测量1550nm信号激光功率与激励电流关系**

关闭980nm激光光源, 打开1550nm信号光。由于信号光输出功率较小, 增益设置为100, 同样进行校准(最大电流的光功率为1.8mW), 实验结果如下表所示。

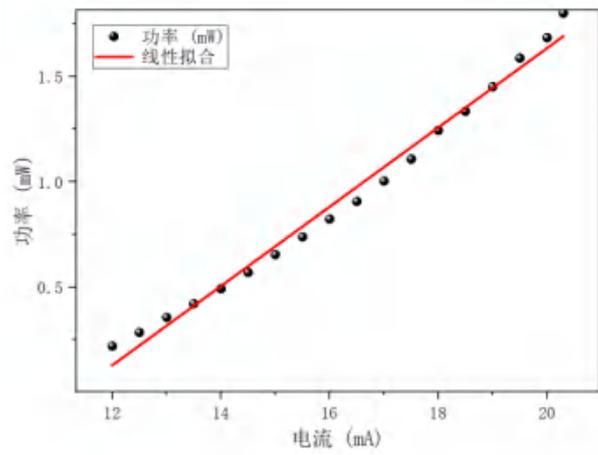
表2 1550nm信号激光功率与激励电流关系

I/mA	U/mV	P/mW	I/mA	U/mV	P/mW
0	2	0.00	10.5	16	0.09
0.5	2	0.00	11	22	0.13
1	2	0.00	11.5	29	0.17
1.5	2	0.00	12	36	0.22
2	2	0.00	12.5	46	0.28
2.5	2	0.00	13	57	0.36
3	2	0.00	13.5	67	0.42
3.5	2	0.00	14	78	0.49
4	2	0.00	14.5	90	0.57
4.5	2	0.00	15	103	0.65
5	2	0.00	15.5	116	0.74
5.5	2	0.00	16	129	0.82
6	2	0.00	16.5	142	0.91
6.5	2	0.00	17	157	1.00
7	2	0.00	17.5	173	1.11
7.5	2	0.00	18	194	1.24
8	2	0.00	18.5	208	1.33
8.5	2	0.00	19	226	1.45
9	4	0.01	19.5	247	1.59
9.5	7	0.03	20	262	1.68
10	11	0.06	20.3	280	1.80

根据实验数据进行拟合绘图得



(a)实验数据点及线性拟合



(b)局部线性拟合

图10 1550nm信号激光功率与激励电流的关系

**分析:**

①根据图像可以看出，激光阈值约为9mA，低于激光阈值时激光输出约为0。

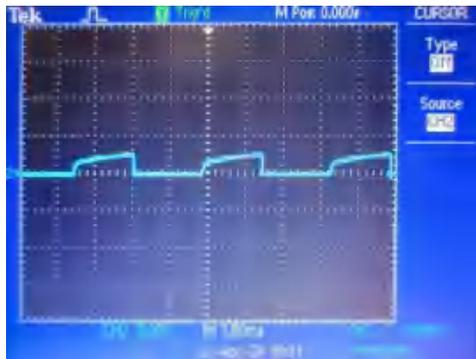
②可以看出，阈值之上，曲线增长呈近似线性，但实际上此时电流范围较小，所以激光一直在阈值附近，因此呈现出明显的斜率上升趋势，利用较为线性的区间进行线性拟合，结果为

$$P = 0.188I - 2.13(mW)$$

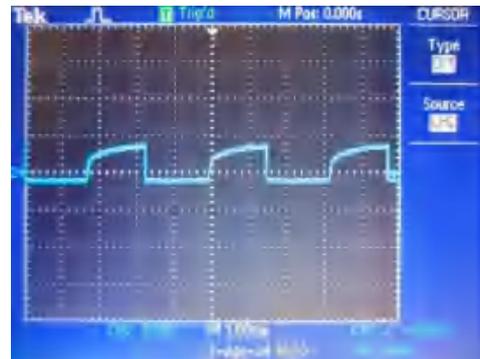
拟合评分R-Square=0.9879, Pearson's r=0.99393, 拟合优度较高。由于此时曲线都在阈值附近，故我们不再利用拟合进行计算激光阈值。

**5.3 记录980nm泵浦激光传输通过掺铒光纤的动态特性**

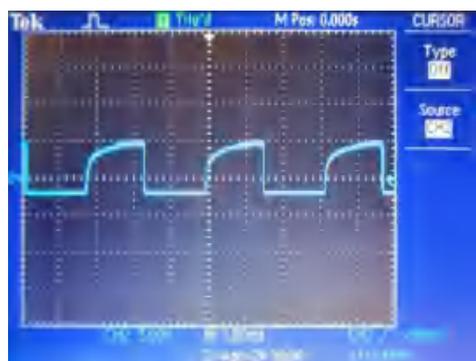
关闭1550nm激光器，开启方波调制，通过示波器测量四个不同激励电流下的激光动态透射曲线，结果如图11所示。



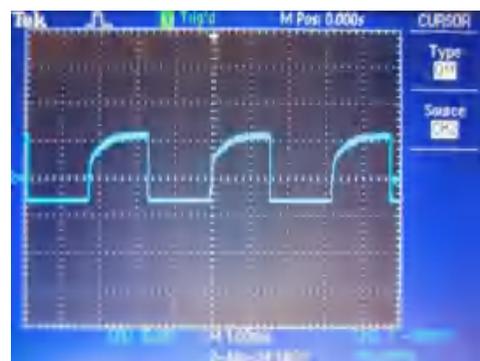
(a) 30mA



(b) 40mA



(c) 50mA



(d) 60mA

图11 不同激励电流下980nm泵浦激光通过掺铒光纤的动态特性

**分析:**

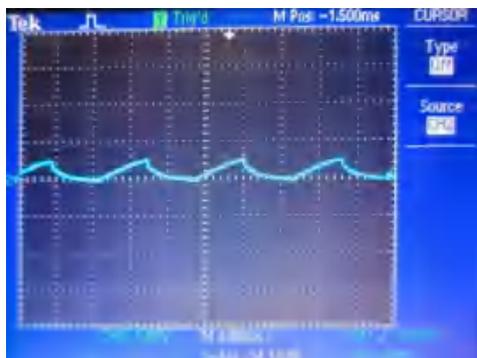
①不同激励电流下的动态曲线振幅不同，随着电流的增大，动态振幅也逐渐增大，说明激励电流越大，通过掺铒光纤的980nm泵浦光功率越大。

②同时，不同大小的激励电流下，输出波形也有着一定的差距，可以看出，较小电流时波形类似于锯齿波，而较大电流下其更加趋近于方波。

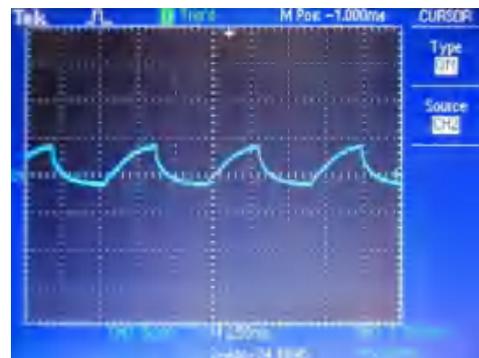
③波形的形成来源于掺铒光纤对泵浦光的吸收特性，一段时间后吸收系数变为0，达到泵浦饱和，从而输出平顶波形，而较小电流还未达到泵浦饱和即进入第二个周期，从而类似锯齿波。可以看出，实验结果与实验原理图基本一致。

**5.4 记录掺铒光纤增益介质1550nm荧光的动态特性**

在InGaAs探头前放置红外长波通滤波片，滤掉980nm激光，示波器观察1550nm荧光动态曲线，结果如图12所示。



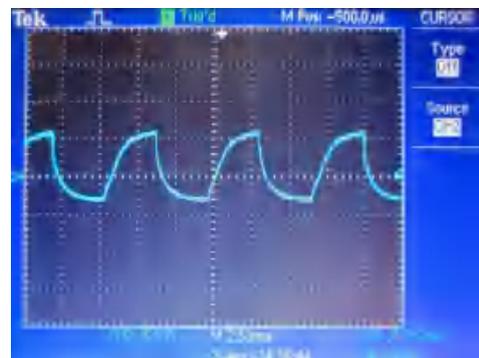
(a) 30mA



(b) 40mA



(c) 50mA



(d) 60mA

图12 不同激励电流下1550nm信号激光通过掺铒光纤的动态特性

**分析:**

①不同激励电流下的荧光动态曲线幅值大小不同，说明随着激励电流的增大，荧光强度也逐渐增大。

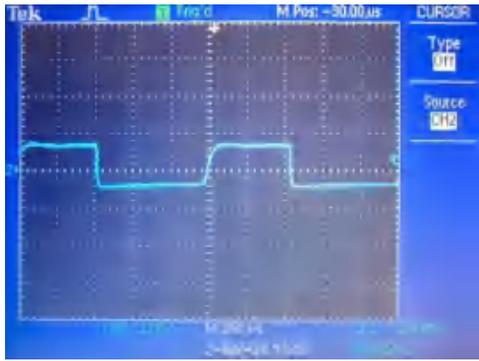
②不同激励电流下的波形也有着一定的差距，激励电流较小时动态曲线呈现三角波，而较大时逐渐趋于平滑。

③曲线呈现出明显地弛豫现象，本质上是粒子数的动态分布情况，最终达到弛豫动态和泵浦的稳定平衡。关闭后荧光逐渐衰减，反映了激发态粒子跃迁到基态的平均时间，等同于能级寿命。实验结果与原理图基本一致。

**5.5 记录掺铒光纤放大器对1550nm信号光放大的动态特性****(1) 980nm激光泵浦下的1550nm信号光动态曲线**



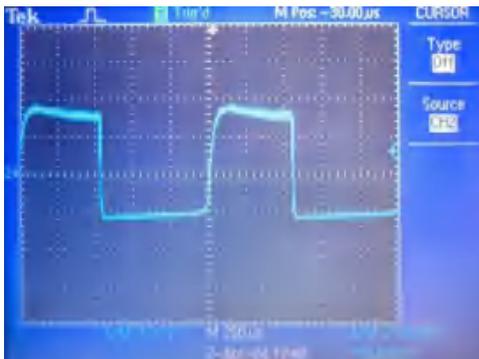
在980nm激光泵浦下，记录高低四个组合的1550nm激光动态曲线，选择增益为5，实验结果如图13所示。



(a)  $I_{980\text{nm}}=35\text{mA}$ ,  $I_{1550\text{nm}}=9\text{mA}$



(b)  $I_{980\text{nm}}=35\text{mA}$ ,  $I_{1550\text{nm}}=20\text{mA}$



(c)  $I_{980\text{nm}}=60\text{mA}$ ,  $I_{1550\text{nm}}=9\text{mA}$



(d)  $I_{980\text{nm}}=60\text{mA}$ ,  $I_{1550\text{nm}}=20\text{mA}$

图13 不同激励电流980nm激光泵浦下的1550nm信号光动态曲线

**分析：**此曲线是由5.3部分的输出激励下的1550nm激光输出，其有许多动态特性。

①泵浦光强越大，增益越高，因此可以看出 $I_{980\text{nm}}=60\text{mA}$ 的振幅比 $I_{980\text{nm}}=35\text{mA}$ 整体要大(注意格点对应的幅值大小)，信号光越大，幅值也有着明显的提升，但并没有泵浦光影响大。

②信号光对激光波形影响较大，可以看出，信号光电流越大，曲线的顶部尖峰越明显。这是因为小信号时，泵浦相对较强，而受激辐射较少，因此会快速达到泵浦和受激辐射稳定，从而波形趋于平缓，一直维持较高水平。对于大信号，其受激辐射较强，因此会较慢与泵浦达到平衡，且刚泵浦的粒子都被辐射，导致上能级无法泵浦较多粒子，从而增益慢慢降低，最终在较低的水平达到稳定。分析与实验结果和理论结果一致。

**(2) 无980nm激光泵浦下的1550nm信号光动态曲线**

关闭980nm激光泵浦，记录一高一低电流下的1550nm激光动态曲线，此时信号较小，选择增益为500，实验结果如图14所示。



(a)  $I_{980\text{nm}}=0$ ,  $I_{1550\text{nm}}=12\text{mA}$



(b)  $I_{980\text{nm}}=0$ ,  $I_{1550\text{nm}}=20\text{mA}$

图14无980nm激光泵浦下不同激励电流的1550nm信号光动态曲线



**分析:**

无泵浦激励下的1550nm激光动态特性波形类似于泵浦光吸收特性的上升段结合荧光特性的后半段，具体分析如下:

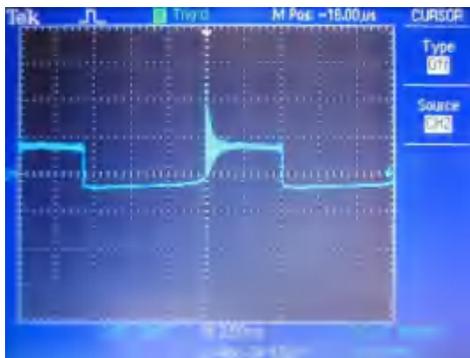
①前半段的缓慢上升可能与掺铒光纤的吸收特性有关，此时系统变为二能级系统，1550nm激光入射后被 $Er^{+3}$ 吸收，从而缓慢达到稳定平衡。

②在下降阶段，此时之前吸收跃迁的粒子逐渐从上能级跃迁到下能级，从而类似荧光特性，出现弛豫下降阶段，与弛豫时间能级寿命有关。

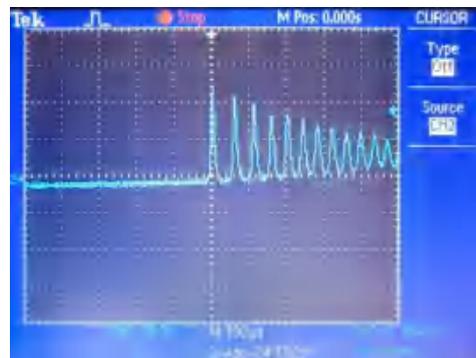
**5.6 测量线性光纤激光器特性**

**(1) 1550nm激光尖峰振荡特性测量**

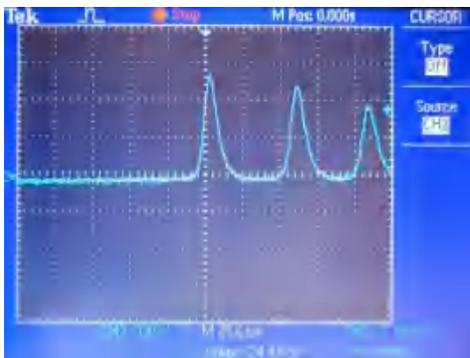
调节高反镜的角度，使得反射的980nm激光照射到光纤准直透镜中央，通过调节ST接头使得其产生一个空气隙，不断调节直到出现尖峰振荡，此时成功构成F-P腔。控制激励电流为60mA，实验结果如图15所示。



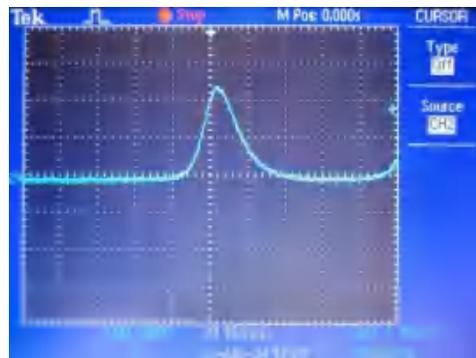
(a) 输出信号整体波形



(b) 部分尖峰



(c) 前三个尖峰



(d) 单个尖峰

图15 1550nm输出光尖峰振荡

**分析:**

①尖峰振荡出现在方波激励的上升沿，此时泵浦光迅速增大，使得铒离子跃迁到激发态，进而诱导粒子数反转，从而发出激光，出现尖峰振荡。

②尖峰振荡在连续泵浦下不断震荡，产生多个尖峰，这是因为释放激光而产生尖峰振荡会降低粒子数反转的程度，而反转程度低于阈值时激光停止发射，再被持续泵浦，进而不断循环往复，对应尖峰信号的产生与消失，持续出现尖峰振荡。

③尖峰振荡呈现出逐渐趋于稳定的趋势，这是因为不断震荡的过程中，粒子数反转被逐渐积累，从而趋于稳态。

**(2) 阈值电流测量**

根据尖峰振荡的特性，我们可以简单地测量激光的阈值电流，在较小电流时捕捉尖峰振



荡，在恰好出现尖峰振荡的信号位置即为阈值电流，实验结果如图16所示。

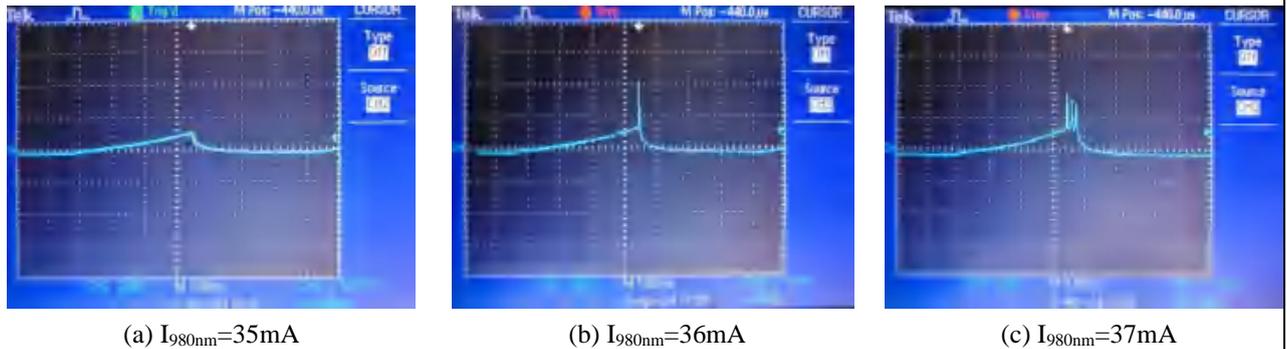


图16 激励电流阈值测量实验结果

分析：

①可以看出，在阈值电流附近，可以明显地看出荧光曲线，而尖峰振荡在荧光特性曲线之后出现。

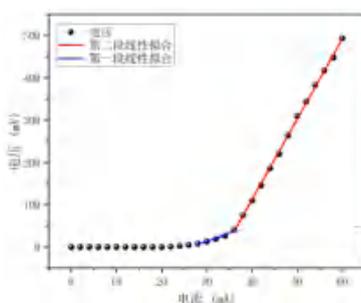
②在激励电流为36mA时，出现了尖峰震荡，说明此电流为其阈值电流，在下面的测量中我们也会进行分析。

### (3)1550nm输出信号随980nm泵浦激光激励电流的变化

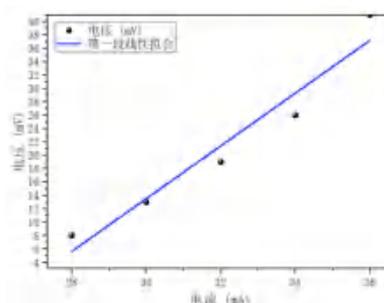
使用电压表，测量不同激励电流下的激光输出信号强度。增益为50的条件下，实验结果如所示。

表2 1550nm信号激光功率与激励电流关系

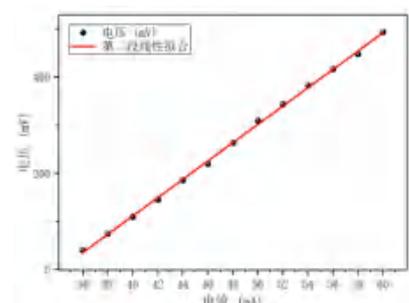
$I/mA$	$U/mV$	$I/mA$	$U/mV$
0	3	32	22
2	3	34	29
4	3	36	44
6	3	38	78
8	3	40	113
10	3	42	149
12	3	44	189
14	3	46	223
16	3	48	267
18	3	50	313
20	3	52	347
22	4	54	386
24	6	56	420
26	8	58	451
28	11	60	497
30	16		



(a) 实验数据及线性拟合



(b) 第一段线性拟合



(c) 第二段线性拟合

图17 激励电流阈值测量实验结果

分析：



①激光呈现明显的阈值特性，且两端线性区间。

②第一段在阈值电流以下，尖峰振荡不存在，为980nm荧光特性产生的，拟合结果为

$$U = 3.98I - 105(mV)$$

拟合评分R-Square=0.94389, Pearson's r=0.97154, 拟合优度较高。

③第二段线性在阈值电流之上，尖峰振荡存在，为1550nm激光特性曲线，拟合结果为

$$U = 19I - 649(mV)$$

拟合评分R-Square=0.99913, Pearson's r=0.99957, 拟合优度极高，线性度极好，可见线性激光器性能较好，拟合计算阈值电流为34mA，由于荧光特性的影响，此时利用截距计算误差较大。

## 6. 实验总结

在本次实验中，我们重点研究了基于980nm激光泵浦的1550nm光纤激光器。

首先，我们分别探究了980nm激光器和1550nm激光器自身的功率-激励电流关系曲线。对于980nm激光器，利用线性拟合阈值之上的曲线关系，结果为 $P = 0.82I - 19.42(mW)$ ，拟合评分R-Square=0.99919, Pearson's r=0.99959, 计算得阈值电流为 $I_{th-980nm}=23.68mA$ ；对于1550nm激光器，其输出位于阈值电流附近，输出功率较低，直接读取可知阈值电流约为9mA，此时线性度较差，拟合结果为 $P = 0.188I - 2.13(mW)$ ，拟合评分R-Square=0.9879, Pearson's r=0.99393。

接着我们测量了980nm泵浦光的动态特性和1550nm荧光特性。对于泵浦光，我们观察到了明显的吸收特性，而对于荧光，我们观察到了明显的弛豫现象，且二者幅值均基本与激励电流成正比。

再后我们观察了980nm激光泵浦下的1550nm输出特性，观察到明显的光放大，在撤去980nm激光后幅值大幅度下降；同时，我们分析了高低信号下的曲线特征，小信号下动态特性趋于方波，大信号出现尖峰并逐渐下降稳定，理论与实验结果一致，实验效果较好。

最后我们观察了1550nm激光器的尖峰振荡现象，发现尖峰振荡出现在方波的上升沿以及在泵浦的开始阶段持续发生。实际上这是铪离子逐渐建立粒子数反转的过程，不断震荡，粒子积累，最终达到稳定。同时我们利用尖峰振荡特性测量了阈值电流为36mA，并且测量了其激励电流-输出功率曲线特性，发现其出现三个区间，截止区和两端线性区，第一段小于阈值电流，实际上是由我们之前测量的1550nm荧光产生的，而第二段是真正的1550nm激光输出，第二段拟合结果为 $U = 19I - 649(mV)$ ，拟合评分R-Square=0.99913, Pearson's r=0.99957, 拟合优度极高，线性度极好，可见线性激光器性能较好。

总的来说，本次实验探究完整，现象明显，分析到位，实验较为成功。

## 7. 思考题（每题限100字）

**7.1 对980nm激光传输通过掺铪光纤的动态曲线而言，相同激励电流不同掺铪光纤长度的结果与不同激励电流相同掺铪光纤长度的结果之间是否具有一定程度上的对应关系？**

有。掺铪光纤的长度影响的是铪离子含量(增加增益)和光纤损耗(降低增益)，而不同激励电流主要是通过泵浦光强度影响增益大小，合适的光纤长度(最大增益)与较大的激励电流相都应对应较大的输出功率。

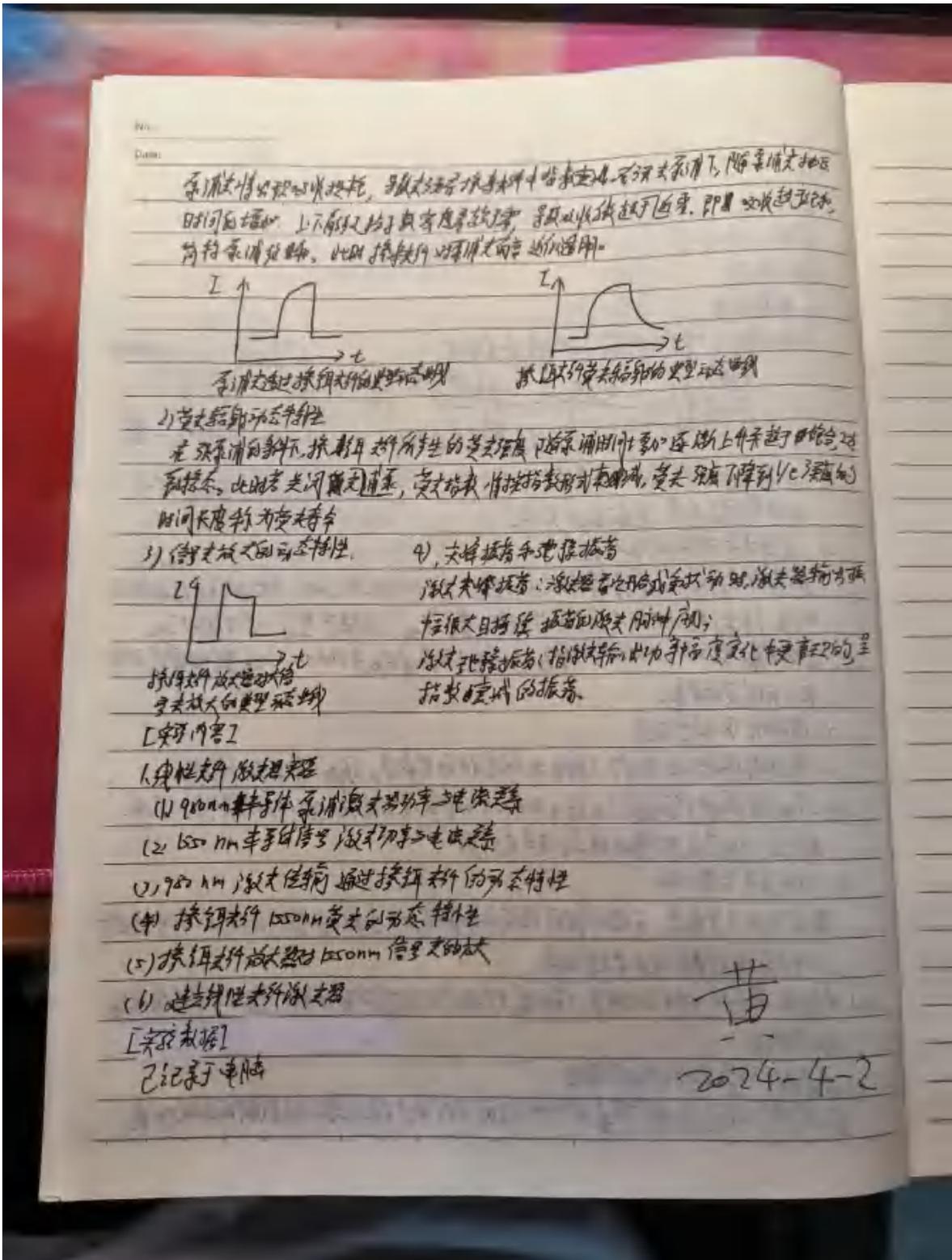


## 7.2 本实验中，高反镜是否是线性光纤激光器产生1550nm激光输出的必要条件？

可以称为充分条件，但并不必要。实验中利用高反镜和光纤端口空气隙构成谐振腔，实际上也可以把高反镜用其他事物替代，只需构成谐振腔即可。但显然没有高反镜(构不成谐振腔)的情况下是没有激光输出的(是荧光)。



附录：[签字页图片]



# 《光信息专业实验 (I) 》课程 实验总结

组号：B3组

年级专业：2021级物理学

实验人姓名、学号：路尚润21305127

参加人姓名、学号：邓逸枫21305409

日期：2024年4月16日 星期二

指导教师：周张凯

## 3.1 WDM耦合器性能测试

### [ 实验仪器及光路 ]

实验中使用的仪器包含：WDM耦合器、通信波段 1310/1550nm 稳定化光源、光功率计、光纤跳线（用于测量器件的输入功率）、适配器、三环偏振控制器、光纤端面放大器、镜头纸等。



### [ 实验数据 ]

#### 1. 正向分波性能

表1 正向分波时端口输入输出数据

测量次数	1		2		3	
	$\mu\text{W}$	dBm	$\mu\text{W}$	dBm	$\mu\text{W}$	dBm
$P_{\text{in-1310}}$	153.8	-8.10	150.2	-8.22	143.3	-8.46
$P_{\text{out1-1310}}$	144.8	-8.37	138.5	-8.64	129.3	-8.88
$P_{\text{out2-1310}}$	3.192	-24.96	3.125	-25.05	3.028	-25.22
$P_{\text{in-1550}}$	156.2	-8.04	153.3	-8.15	150.7	-8.22
$P_{\text{out1-1550}}$	10.09	-20.00	9.426	-20.23	9.589	-20.16
$P_{\text{out2-1550}}$	135.1	-8.70	134.0	-8.69	129.6	-8.86

表2 加入偏振控制器测量偏振相关损耗

测量次数	1		2	
	$\mu\text{W}$	dBm	$\mu\text{W}$	dBm
$P_{\text{out1-1310max}}$	102.6	-9.89	100.3	-9.97
$P_{\text{out1-1310min}}$	97.54	-10.13	96.27	-10.16
$P_{\text{out2-1550max}}$	106.3	-9.72	105.6	-9.76
$P_{\text{out2-1550 min}}$	100.1	-9.99	99.08	-10.04

计算过程（以第一组数据为例，详细写出计算过程，用 $\mu W$ 和 $dBm$ 单位数据分别计算、对比）

(1)插入损耗（ $\mu W$ 为单位计算）：

$$I.L. = -10 \lg \frac{P_{out}(\mu W)}{P_{in}(\mu W)}$$

根据实验数据，求平均值

$$\bar{P}_{in-1310} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 P_{in-1310-j} = 149.1 \mu W$$

$$\bar{P}_{out1-1310} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 P_{out-1310-j} = 137.5 \mu W$$

$$\bar{P}_{out2-1310} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 P_{out-1310-j} = 3.115 \mu W$$

$$\bar{P}_{in-1550} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 P_{in-1550-j} = 153.4 \mu W$$

$$\bar{P}_{out1-1550} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 P_{out-1550-j} = 9.702 \mu W$$

$$\bar{P}_{out2-1550} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 P_{out-1550-j} = 132.9 \mu W$$

则

$$\overline{I.L.}_{1310} = -10 \lg \frac{\bar{P}_{out-1310}}{\bar{P}_{in-1310}} = -10 \lg \frac{137.5}{149.1} = 0.35 \text{dB}$$

$$\overline{I.L.}_{1550} = -10 \lg \frac{\bar{P}_{out-1550}}{\bar{P}_{in-1550}} = -10 \lg \frac{132.9}{153.4} = 0.62 \text{dB}$$

插入损耗（ $dBm$ 为单位计算）：

$$I.L. = P_{in}(dBm) - P_{out}(dBm)$$

计算实验数据平均值

$$\bar{P}_{in-1310} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 P_{in-1310-j} = -8.26 \text{dBm}$$

$$\bar{P}_{out1-1310} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 P_{out-1310-j} = -8.63 \text{dBm}$$

$$\bar{P}_{out2-1310} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 P_{out-1310-j} = -25.08 \text{dBm}$$

$$\bar{P}_{in-1550} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 P_{in-1550-j} = -8.14\text{dBm}$$

$$\bar{P}_{out1-1550} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 P_{out-1550-j} = -20.13\text{dBm}$$

$$\bar{P}_{out2-1550} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 P_{out-1550-j} = -8.75\text{dBm}$$

则

$$\overline{I.L.}_{1310} = \bar{P}_{in-1310} - \bar{P}_{out-1310} = -8.26 + 8.63 = 0.37\text{dB}$$

$$\overline{I.L.}_{1550} = \bar{P}_{in-1550} - \bar{P}_{out-1550} = -8.14 + 8.75 = 0.61\text{dB}$$

(2) 隔离度/串扰 ( $\mu\text{W}$ 为单位计算) :

$$C_j(\lambda_i) = -10 \lg \frac{P_j(\lambda_i)(\mu\text{W})}{P_i(\lambda_i)(\mu\text{W})}$$

对1通道1550nm光的隔离度为

$$\bar{C}_1(1550\text{nm}) = -10 \lg \frac{P_1(1550\text{nm})}{P_2(1550\text{nm})} = -10 \lg \frac{9.702}{153.4} = 11.37\text{dB}$$

对2通道1310nm光的隔离度为

$$\bar{C}_2(1310\text{nm}) = -10 \lg \frac{P_2(1310\text{nm})}{P_1(1310\text{nm})} = -10 \lg \frac{3.115}{149.1} = 16.45\text{dB}$$

隔离度/串扰 (dBm为单位计算) :

$$C_j(\lambda_i) = P_i(\lambda_i)(\text{mdB}) - P_j(\lambda_i)(\text{dBm})$$

对1通道1550nm光的隔离度为

$$\bar{C}_1(1550\text{nm}) = P_2(1550\text{nm}) - P_1(1550\text{nm}) = -8.75 + 20.13 = 11.38\text{dB}$$

对2通道1310nm光的隔离度为

$$\bar{C}_2(1310\text{nm}) = P_1(1310\text{nm}) - P_2(1310\text{nm}) = -8.63 + 25.08 = 16.45\text{dB}$$

(3) 偏振相关损耗 ( $\mu\text{W}$ 为单位计算) :

$$P.D.L. = -10 \lg \frac{P_{min}(\mu\text{W})}{P_{max}(\mu\text{W})}$$

计算平均值

$$\bar{P}_{out1-1310max} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 P_{out1-1310max-j} = 101.45\mu\text{W}$$

$$\bar{P}_{out1-1310min} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 P_{out1-1310min-j} = 96.90\mu\text{W}$$

$$\bar{P}_{out2-1550max} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 P_{out2-1550max-j} = 105.95\mu\text{W}$$

$$\bar{P}_{out2-1550min} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 P_{out2-1550min-j} = 99.59\mu\text{W}$$

则

$$\overline{P.D.L.}_{1310} = -10 \lg \frac{\bar{P}_{out1-1310min}}{\bar{P}_{out1-1310max}} = -10 \lg \frac{96.90}{101.45} = 0.20\text{dB}$$

$$\overline{P.D.L.}_{1550} = -10 \lg \frac{\bar{P}_{out2-1550min}}{\bar{P}_{out2-1550max}} = -10 \lg \frac{99.59}{105.95} = 0.27\text{dB}$$

偏振相关损耗 (dBm为单位计算) :

$$P.D.L. = P_{max}(\text{dBm}) - P_{min}(\text{dBm})$$

计算平均值

$$\bar{P}_{out1-1310max} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 P_{out1-1310max-j} = -9.93\text{dBm}$$

$$\bar{P}_{out1-1310min} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 P_{out1-1310min-j} = -10.14\text{dBm}$$

$$\bar{P}_{out2-1550max} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 P_{out2-1550max-j} = -9.74\text{dBm}$$

$$\bar{P}_{out2-1550min} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 P_{out2-1550min-j} = -10.02\text{dBm}$$

则

$$\overline{P.D.L.}_{1310} = \bar{P}_{out1-1310max} - \bar{P}_{out1-1310min} = -9.93 + 10.14 = 0.21\text{dB}$$

$$\overline{P.D.L.}_{1550} = \bar{P}_{out2-1550max} - \bar{P}_{out2-1550min} = -9.74 + 10.02 = 0.28\text{dB}$$

表3 正向分波WDM耦合器参数性能计算结果

测量次数	1		2		3		平均值
	μW	dBm	μW	dBm	μW	dBm	
I.L. <sub>1310</sub> /dB	0.26	0.27	0.35	0.42	0.45	0.42	0.36
I.L. <sub>1550</sub> /dB	0.63	0.66	0.58	0.54	0.66	0.64	0.62
C. <sub>1310</sub> /dB	11.27	11.30	11.53	11.54	11.31	11.30	11.37
C. <sub>1550</sub> /dB	16.57	16.59	16.47	16.41	16.30	16.34	16.45
P.D.L. <sub>1310</sub> /dB	0.22	0.24	0.18	0.19	——	——	0.21
P.D.L. <sub>1550</sub> /dB	0.26	0.27	0.28	0.28	——	——	0.27

## 2. 反向合波性能

表4 反向合波时端口输入输出数据

测量次数	1		2		3	
	μW	dBm	μW	dBm	μW	dBm
P <sub>in-1310</sub>	134.8	-8.70	136.7	-8.62	134.3	-8.72
P <sub>out-1310</sub>	118.6	-9.26	115.5	-9.37	116.3	-9.37
P <sub>in-1550</sub>	140.3	-8.50	141.0	-8.50	140.2	-8.53
P <sub>out-1550</sub>	120.6	-9.17	121.9	-9.14	122.9	-9.11

表5 加入偏振控制器测量偏振相关损耗

测量次数	1		2	
功率单位	$\mu\text{W}$	dBm	$\mu\text{W}$	dBm
$P_{\text{out-1310max}}$	102.1	-9.91	102.7	-9.89
$P_{\text{out-1310min}}$	97.54	-10.11	98.07	-10.09
$P_{\text{out-1550max}}$	117.3	-9.30	117.0	-9.33
$P_{\text{out-1550min}}$	105.8	-9.75	105.3	-9.77

表6 反向合波WDM耦合器参数性能计算结果

测量次数	1		2		3		平均值
	$\mu\text{W}$	dBm	$\mu\text{W}$	dBm	$\mu\text{W}$	dBm	
I.L. <sub>1310</sub> /dB	0.56	0.56	0.73	0.75	0.65	0.65	0.65
I.L. <sub>1550</sub> /dB	0.66	0.67	0.63	0.64	0.57	0.58	0.63
P.D.L. <sub>1310</sub> /dB	0.20	0.20	0.20	0.20	——	——	0.20
P.D.L. <sub>1550</sub> /dB	0.45	0.45	0.46	0.44	——	——	0.45

[ 实验小结 ]

根据实验中所使用的仪器表面的出厂测试报告，结合实验结果可得其参数。

表8 WDM系统参数测试及理论结果

参数名称	测量通道(波长)	正向结果	反向结果	理论值
I.L./dB	1(1310nm)	0.36	0.65	——
	2(1550nm)	0.62	0.63	——
C./dB	1(1310nm)	11.37	——	25.7
	2(1550nm)	16.45	——	24.4
P.D.L./dB	1(1310nm)	0.21	0.20	$\leq 0.1$
	2(1550nm)	0.27	0.45	$\leq 0.1$

对比：

- ① **插入损耗I.L.:** 实验仪器并未给出插入损耗参数，经过查阅资料，一般的仪器插入损耗平均值在0.25dB左右，而实验中测量的插入损耗均大于这个数值，说明其性能较差，可能是由于长时间使用造成的，且1通道1310nm波长的反向插入损耗要比正向明显增大。
- ② **隔离度C.:** 实验中测量结果均为十几dB，而仪器要求是二十多dB，其显然小于出厂报告的参数，并未达到仪器要求，这证实了仪器在使用中出现了较大的变化。
- ③ **偏振相关损耗P.D.L.:** 可以看出，1310nm的P.D.L.正反向结果基本一致，而1550nm的反向测量结果比正向偏大，且二者均不满足出厂报告的要求。

误差分析：

首先对于整体系统，测量时用到了多个光纤端面，倘若有一个耦合不够精细，或者端面出现污渍等都会导致光损耗，同时光纤传输本身必定会存在一定的损耗，因此仪器难免出现参数较差的现象

仪器稳定性较差，光纤布局对实验测量结果有着约0.2dB的影响，同时外部的扰动也会对实验数据造成较大的波动，会造成读数误差。尤其对于偏振测量实验，其光纤较细，在我们改变偏振状态时，难免会导致仪器移动等，从而会导致数据一直浮动，此时我们并未记录数据，而是选取稳定的结果进行记录，从而保证实验数据的稳定性。

[ 思考题 ]

1、分光比为 1:1 的耦合器为什么又叫 3dB 耦合器？

dB和比例 $\eta$ 之间的换算关系为

$$\text{dB} = 10\lg(\eta)$$

则有

$$\eta = 10^{\text{dB}/10}$$

对于3dB，其换算结果恰好约为 $10^{3/10}=50\%$ ，即光的衰减比例为50%，即将光以等比例分光至两个输出端口，因此其分光比恰好为1: 1，即3dB耦合器与分光比为1: 1的耦合器等价，只是表达方式不同。

2、插入损耗和附加损耗的不同之处？

插入损耗是指光纤中两个固定点之间损耗的光的度量。可以理解为光通信系统的光纤链路中由于光无源器件的介入而引起的光功率损失，即**指定通道**的输入与输出端口之间的光功率之比。

而对于附加损耗，其代表的是整个器件的固有损耗，是**所有输出端口**的光功率总和与输入光功率的比值。

前者是某一通道通过的光功率比，是**单独对某一通道**来讲的，这个损耗包含其余端口的输出以及仪器的固有损耗；而后者是对于**仪器整体**来讲的，并不包含其余输出端口的损耗，而只包含仪器的固有损耗，如散射损耗、吸收损耗和因光纤结构不完善引起的损耗等。

3、标准跳线的作用和测量方案的关系。

标准跳线主要是用于测量光功率的输入强度的，因为其损耗较小，而光源本身的显示参数并不精准，所以我们需要用标准跳线和光功率计测量光源输出。

因此在测量方案中，对于需要输入端口光功率值的情况，我们需要首先利用标准跳线和光功率计测量光源输出，这是因为在实验中我们发现，不仅光功率计的显示值存在系统误差，并且其输出值也并非完全稳定，在测量中会在较长的周期内上下浮动影响测量结果，因此需要在每次测量前对光源进行测量，保证短时间内的测量结果可信。

4、单模光纤之间的横向耦合与多模光纤之间的横向耦合的差异？

①传播模式：

单模光纤只有一个传输模式，其只允许基模通过，而多模光纤可以有多个传播模式，包括基模和多个高阶纵模，其横向耦合可以有不同模式进行耦合。

②在传输中，单模光纤的横向耦合是多个基模之间的耦合，或者与衍射光进行耦合，而多模光纤除了以上之外还有不同模式之间的相互作用，从而可能导致色散以及信号失真等问题。

③由于以上两点，单模光纤更适合于长距离通信，其衰减较小，而多模光纤一般用于短距离通信，其长距离会难免出现信号失真等情况。

5、偏振控制器自身的插入损耗对 PDL 的测量影响有多大？

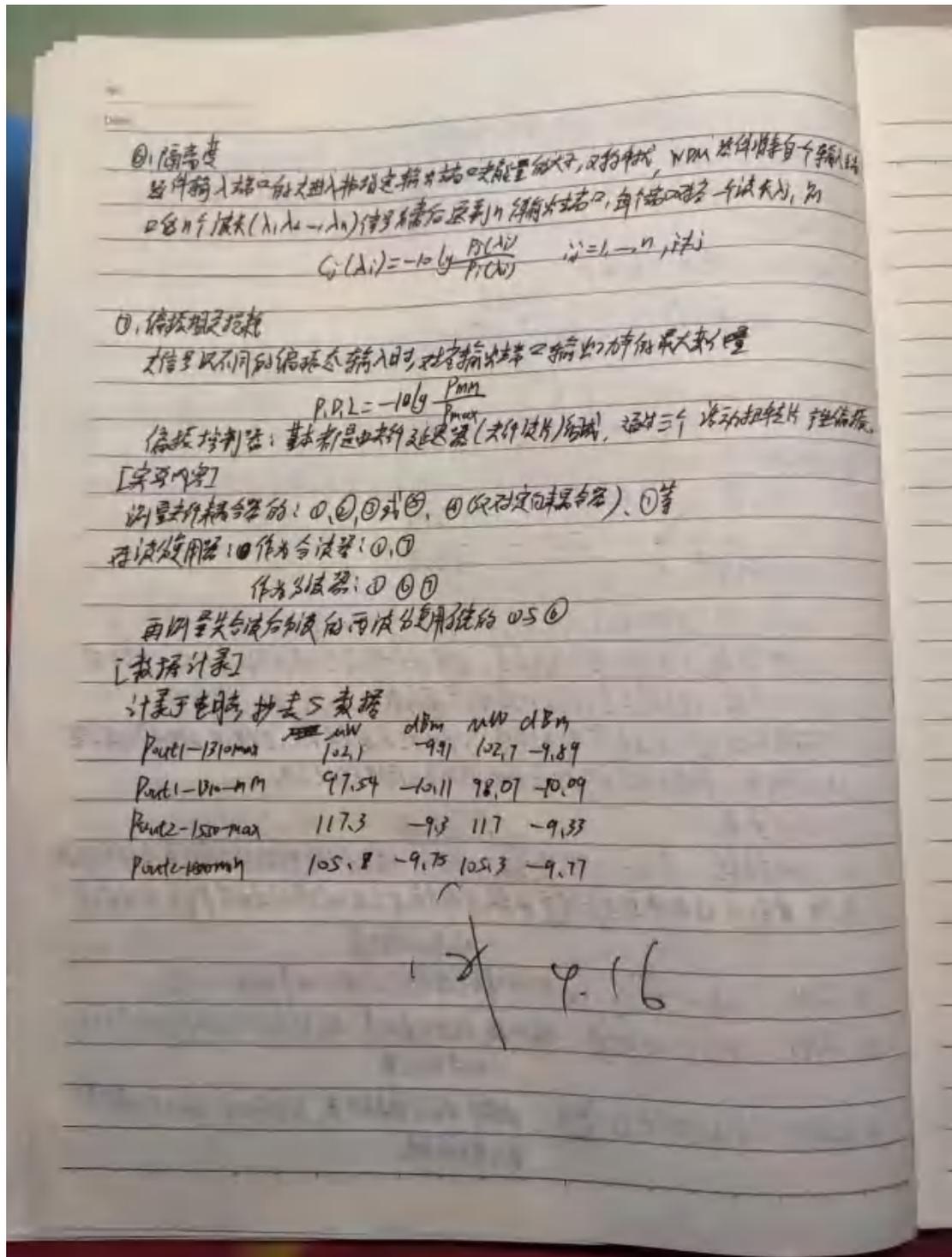
有一定程度的影响，但并不大。

①插入损耗会降低信号强度，从而干扰降低系统的信噪比，因此此时噪声相对增强，会一定程度上影响测量结果的精确性，但实际上的环境误差较小，因此影响程度

较小。

②同时，虽然我们都是在光路中包含三环偏振控制器时进行的测量，但插入损耗降低信号强度也会一定程度上影响最大值和最小值之间的比值，这取决于插入损耗对不同偏振态的影响，如果对不同偏振其损耗比例不同，则必定会对实验结果产生影响。但实际上偏振峰值和极小值之间差距较小，实验误差更多是由于光纤不稳定等造成的，因此插入损耗影响几乎可以忽略。

[附录]



# 《光信息专业实验 (I) 》课程 实验总结

组号：B3组

年级专业：2021级物理学

实验人姓名、学号：路尚润21305127

参加人姓名、学号：邓逸枫21305409

日期：2024年4月23日 星期二

指导教师：周张凯

## 3.2 光纤光学器件性能测试

### [ 实验仪器及光路 ]

#### 一、2×2耦合器

**实验仪器：**2×2耦合器(1550nm波段)、通信波段1310/1550nm稳定化光源、光功率计、光纤跳线（用于测量器件的输入功率）、适配器、三环偏振控制器、折射率匹配块、光纤端面放大器、镜头纸等。



图1 2×2耦合器实验光路图

#### 二、光隔离器

**实验仪器：**光隔离器(1550nm波段)、2×2耦合器、通信波段1310/1550nm稳定化光源、光功率计、光纤跳线（用于测量器件的输入功率）、适配器、三环偏振控制器、折射率匹配块、光纤端面放大器、镜头纸等。

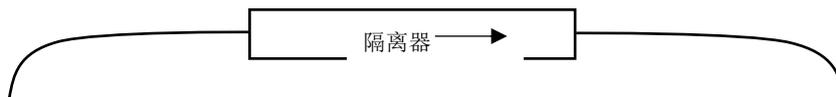


图2 光隔离器实验光路图

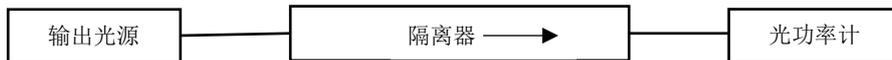


图3 光隔离器插入损耗及隔离度测量光路图



图4 光隔离器偏振相关损耗测量光路图

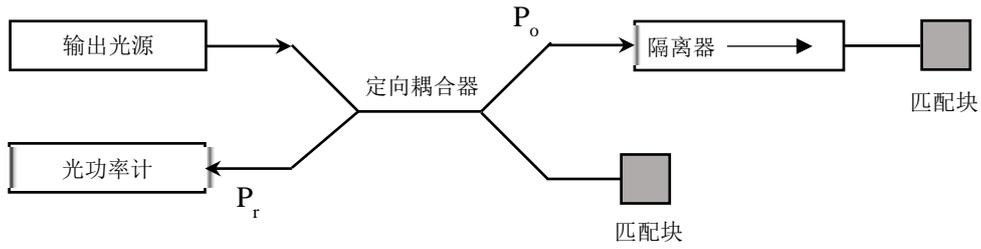


图5 光隔离器回波损耗测量光路图

[ 实验数据 ]

一、2×2耦合器

1、以IN1(白色线)为输入端时测得数据如表1:

注: 以白色线为输入1, 黑色线为输入2; 红色线为输出1, 黑色线为输出2。

表1 IN1输入时端口输入输出数据

测量次数	1		2		3	
功率单位	μW	dBm	μW	dBm	μW	dBm
P <sub>in1</sub>	3284	5.165	3356	5.258	3226	5.22
P <sub>out1</sub>	1661	2.206	1676	2.244	1695	2.291
P <sub>out2</sub>	1710	2.331	1706	2.321	1714	2.341
P <sub>r-in2</sub>	0.02120	-46.47	0.01479	-48.29	0.02316	-46.35

表2 加入偏振控制器测量偏振相关损耗

测量次数	1		2	
功率单位	μW	dBm	μW	dBm
P <sub>out1 max</sub>	1137	0.557	1135	0.546
P <sub>out1 min</sub>	1122	0.501	1120	0.494
P <sub>out2 max</sub>	1535	1.862	1642	2.155
P <sub>out2 min</sub>	1513	1.800	1614	2.079

计算过程 (以第一组数据为例, 详细写出计算过程, 用μW和dBm单位数据分别计算、对比)

(1)插入损耗 (μW为单位计算):

$$I.L. = -10 \lg \frac{P_{out}(\mu W)}{P_{in}(\mu W)}$$

根据实验数据, 求平均值

$$\bar{P}_{in1} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 P_{in1-j} = 3289 \mu W$$

$$\bar{P}_{out1} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 P_{out1-j} = 1677 \mu W$$

$$\bar{P}_{out2} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 P_{out2-j} = 1710 \mu W$$

$$\bar{P}_{rin2} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 P_{rin2-j} = 0.01972\mu W$$

则

$$\overline{I.L.}_{1-1} = -10 \lg \frac{\bar{P}_{out1}}{\bar{P}_{in1}} = 2.924\text{dB}$$

$$\overline{I.L.}_{1-2} = -10 \lg \frac{\bar{P}_{out2}}{\bar{P}_{in1}} = 2.840\text{dB}$$

插入损耗 (dBm为单位计算) :

$$I.L. = P_{in}(\text{dBm}) - P_{out}(\text{dBm})$$

计算实验数据平均值

$$\bar{P}_{in1} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 P_{in1-j} = 5.214\text{dBm}$$

$$\bar{P}_{out1} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 P_{out1-j} = 2.247\text{dBm}$$

$$\bar{P}_{out2} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 P_{out2-j} = 2.331\text{dBm}$$

$$\bar{P}_{rin2} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 P_{rin2-j} = -47.04\text{dBm}$$

则

$$\overline{I.L.}_{1-1} = \bar{P}_{in1} - \bar{P}_{out1} = 2.967\text{dB}$$

$$\overline{I.L.}_{1-2} = \bar{P}_{in1} - \bar{P}_{out2} = 2.883\text{dB}$$

(2)附加损耗 (只以 $\mu W$ 为单位计算) :

$$E.L. = -10 \lg \frac{\sum_j P_{jout}(\mu W)}{P_{in}(\mu W)}$$

有

$$\sum_j \bar{P}_{jout} = \bar{P}_{out1} + \bar{P}_{out2} = 3387\mu W$$

可得

$$\overline{E.L.} = -10 \lg \frac{\sum_j \bar{P}_{jout}}{\bar{P}_{in1}} = -0.129\text{dB}$$

(3)分光比 (只以 $\mu W$ 为单位计算) :

$$S.R. = \frac{P_{out1}(\mu W)}{P_{out2}(\mu W)}$$

根据实验测得数据, 可得

$$\overline{S.R.} = \frac{\bar{P}_{out1}}{\bar{P}_{out2}} = 0.9809$$

(4)方向性 ( $\mu W$ 为单位计算) :

$$D.L. = -10 \lg \frac{P_{rin2}(\mu W)}{P_{in1}(\mu W)}$$

可得

$$\overline{D.L.} = -10 \lg \frac{\bar{P}_{rin2}}{\bar{P}_{in1}} = 52.22\text{dB}$$

方向性 (dBm为单位计算) :

$$D.L. = -10 \lg \frac{P_{rin2}}{P_{in1}} = P_{in1}(\text{dBm}) - P_{rin2}(\text{dBm})$$

则

$$\overline{D.L.} = \bar{P}_{in1}(\text{dBm}) - \bar{P}_{rin2}(\text{dBm}) = 52.25\text{dB}$$

(5)偏振相关损耗 ( $\mu\text{W}$ 为单位计算) :

$$P.D.L. = -10 \lg \frac{P_{min}(\mu\text{W})}{P_{max}(\mu\text{W})}$$

计算平均值

$$\bar{P}_{out1-max} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 P_{out1-max-j} = 1136\mu\text{W}$$

$$\bar{P}_{out1-min} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 P_{out1-min-j} = 1121\mu\text{W}$$

$$\bar{P}_{out2-max} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 P_{out2-max-j} = 1589\mu\text{W}$$

$$\bar{P}_{out2-min} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 P_{out2-min-j} = 1564\mu\text{W}$$

则

$$\overline{P.D.L.}_{1-1} = -10 \lg \frac{\bar{P}_{out1-min}}{\bar{P}_{out1-max}} = 0.058\text{dB}$$

$$\overline{P.D.L.}_{1-2} = -10 \lg \frac{\bar{P}_{out2-min}}{\bar{P}_{out2-max}} = 0.054\text{dB}$$

偏振相关损耗 (dBm为单位计算) :

$$P.D.L. = P_{max}(\text{dBm}) - P_{min}(\text{dBm})$$

计算平均值

$$\bar{P}_{out1-max} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 P_{out1-max-j} = 0.552\text{dBm}$$

$$\bar{P}_{out1-min} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 P_{out1-min-j} = 0.498\text{dBm}$$

$$\bar{P}_{out2-max} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 P_{out2-max-j} = 2.009\text{dBm}$$

$$\bar{P}_{out2-min} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 P_{out2-min-j} = 1.940\text{dBm}$$

则

$$\overline{P.D.L.}_{1-1} = \bar{P}_{out1-max} - \bar{P}_{out1-min} = 0.054\text{dB}$$

$$\overline{P.D.L.}_{1-1} = \bar{P}_{out2-max} - \bar{P}_{out2-min} = 0.069\text{dB}$$

表3 耦合器参数性能计算结果

测量次数	1		2		3		平均值
	$\mu\text{W}$	dBm	$\mu\text{W}$	dBm	$\mu\text{W}$	dBm	
I.L. <sub>1-1</sub> /dB	2.960	2.959	3.015	3.014	2.795	2.929	2.945
I.L. <sub>1-2</sub> /dB	2.834	2.834	2.938	2.937	2.747	2.879	2.862
E.L./dB	-0.114	—	-0.034	—	-0.240	—	-0.129
S.R.	0.971	—	0.982	—	0.989	—	0.981
D.L/dB	51.90	51.64	53.56	53.55	51.44	51.57	52.28
P.D.L. <sub>1-1</sub> /dB	0.058	0.056	0.058	0.052	—	—	0.056
P.D.L. <sub>1-2</sub> /dB	0.063	0.062	0.075	0.076	—	—	0.069

2、以IN2(黑色线)为输入端时测得数据如表4:

表4 IN2输入时端口输入输出数据

测量次数	1		2		3	
	$\mu\text{W}$	dBm	$\mu\text{W}$	dBm	$\mu\text{W}$	dBm
P <sub>in2</sub>	3349	5.250	3361	5.265	3261	5.134
P <sub>out1</sub>	1665	2.214	1679	2.251	1679	2.250
P <sub>out2</sub>	1691	2.283	1687	2.271	1678	2.250
P <sub>r-in1</sub>	0.003933	-54.05	0.002034	-56.91	0.002176	-56.61

表5 加入偏振控制器测量偏振相关损耗

测量次数	1		2	
	$\mu\text{W}$	dBm	$\mu\text{W}$	dBm
P <sub>out1 max</sub>	1170	0.688	1182	0.727
P <sub>out1 min</sub>	1144	0.587	1152	0.615
P <sub>out2 max</sub>	1632	2.128	1633	2.131
P <sub>out2 min</sub>	1607	2.062	1609	2.066

表6 耦合器参数性能计算结果

测量次数	1		2		3		平均值
	$\mu\text{W}$	dBm	$\mu\text{W}$	dBm	$\mu\text{W}$	dBm	
I.L. <sub>2-1</sub> /dB	3.035	3.036	3.014	3.014	2.883	2.884	2.978
I.L. <sub>2-2</sub> /dB	2.968	2.967	2.994	2.994	2.886	2.884	2.949
E.L./dB	-0.009	—	-0.006	—	-0.126	—	-0.047
S.R.	0.985	—	0.995	—	1.001	—	0.993
D.L/dB	59.30	59.30	62.18	62.18	61.76	61.74	61.08
P.D.L. <sub>2-1</sub> /dB	0.098	0.101	0.112	0.112	—	—	0.106
P.D.L. <sub>2-2</sub> /dB	0.067	0.066	0.064	0.065	—	—	0.066

[ 分析 ]

可以看到，2通道输入时的分光比较为接近1，并且附加损耗较小，而1通道输入时的分光比较小，且插入损耗为负值，即输出光大于输出光功率，说明二通道的参数更优。

二、光隔离器

1、插入损耗和隔离度

表7 正、反向测量输出数据

测量次数	1		2		3	
功率单位	$\mu W$	dBm	$\mu W$	dBm	$\mu W$	dBm
$P_{in1310}$	2321	3.657	2418	3.835	2421	3.840
正向 $P_{out-1310}$	1297	1.130	1316	1.194	1311	1.177
反向 $P_{out-1310}$	45.47	-13.42	46.03	-13.36	45.88	-13.38
$P_{in1550}$	3281	5.161	3290	5.172	3311	5.200
正向 $P_{out-1550}$	3098	4.912	3043	4.833	3032	4.817
反向 $P_{out-1550}$	0.05421	-42.65	0.05588	-42.52	0.05568	-42.54

计算公式和过程（以第一组数据为例详细写出计算过程，用 $\mu W$ 和dBm单位数据分别计算、对比）

(1)插入损耗（ $\mu W$ 为单位计算）：

$$I.L. = -10 \lg \frac{P_{+out}(\mu W)}{P_{in}(\mu W)}$$

$$\bar{P}_{in1310} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^{j=3} P_{in1310-j} = 2387 \mu W$$

$$\bar{P}_{+out1310} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^{j=3} P_{+out1310-j} = 1308 \mu W$$

$$\bar{P}_{in1550} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^{j=3} P_{in1550-j} = 3294 \mu W$$

$$\bar{P}_{+out1550} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^{j=3} P_{+out1550-j} = 3058 \mu W$$

可得

$$\overline{I.L.}_{1310} = -10 \lg \frac{\bar{P}_{+out1310}}{\bar{P}_{in1310}} = 2.612 \text{dB}$$

$$\overline{I.L.}_{1550} = -10 \lg \frac{\bar{P}_{+out1550}}{\bar{P}_{in1550}} = 0.323 \text{dB}$$

插入损耗（dBm为单位计算）：

$$I.L. = P_{in}(\text{dBm}) - P_{+out}(\text{dBm})$$

$$\bar{P}_{in1310} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^{j=3} P_{in1310-j} = 3.777 \text{dBm}$$

$$\bar{P}_{+out1310} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^{j=3} P_{+out1310-j} = 1.167 \text{dBm}$$

$$\bar{P}_{in1550} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^{j=3} P_{in1550-j} = 5.177 \text{dBm}$$

$$\bar{P}_{+out1550} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^{j=3} P_{+out1550-j} = 4.854 \text{dBm}$$

因此可得

$$\begin{aligned} \overline{I.L.}_{1310} &= \bar{P}_{in1310} - \bar{P}_{+out1310} = 2.610\text{dB} \\ \overline{I.L.}_{1550} &= \bar{P}_{in1550} - \bar{P}_{+out1550} = 0.324\text{dB} \end{aligned}$$

(2)隔离度 ( $\mu\text{W}$ 为单位计算) :

$$\begin{aligned} I.S.O. &= -10 \lg \frac{P_{-out}(\mu\text{W})}{P_{in}(\mu\text{W})} \\ \bar{P}_{-out1310} &= \frac{1}{3} \sum_{j=1}^{j=3} P_{-out1310-j} = 45.79\mu\text{W} \\ \bar{P}_{-out1550} &= \frac{1}{3} \sum_{j=1}^{j=3} P_{-out1550-j} = 0.05525\mu\text{W} \end{aligned}$$

可得

$$\begin{aligned} \overline{I.S.O.}_{1310} &= -10 \lg \frac{\bar{P}_{-out1310}}{\bar{P}_{in1310}} = 17.17\text{dB} \\ \overline{I.S.O.}_{1550} &= -10 \lg \frac{\bar{P}_{-out1550}}{\bar{P}_{in1550}} = 47.75\text{dB} \end{aligned}$$

隔离度 ( $\text{dBm}$ 为单位计算) :

$$\begin{aligned} I.S.O. &= P_{in}(\text{dBm}) - P_{-out}(\text{dBm}) \\ \bar{P}_{-out1310} &= \frac{1}{3} \sum_{j=1}^{j=3} P_{-out1310-j} = -13.39\text{dBm} \\ \bar{P}_{-out1550} &= \frac{1}{3} \sum_{j=1}^{j=3} P_{-out1550-j} = -42.57\text{dBm} \end{aligned}$$

可得

$$\begin{aligned} \overline{I.S.O.}_{1310} &= \bar{P}_{in1310} - \bar{P}_{-out1310} = 17.16\text{dB} \\ \overline{I.S.O.}_{1550} &= \bar{P}_{in1550} - \bar{P}_{-out1550} = 47.75\text{dB} \end{aligned}$$

表8 插入损耗和隔离度计算结果

测量次数	1		2		3		平均值
	$\mu\text{W}$	$\text{dBm}$	$\mu\text{W}$	$\text{dBm}$	$\mu\text{W}$	$\text{dBm}$	
$I.L._{1310}/\text{dB}$	2.527	2.527	2.642	2.641	2.664	2.663	2.611
$I.L._{1550}/\text{dB}$	0.249	0.249	0.339	0.339	0.382	0.383	0.324
$ISO_{1310}/\text{dB}$	17.08	17.08	17.20	17.20	17.22	17.22	17.17
$ISO_{1550}/\text{dB}$	47.82	47.81	47.70	47.69	47.74	47.74	47.75

判断器件的工作波长是1310nm还是1550nm?

根据结果可知, 1550nm波长的插入损耗较小, 且隔离度约为50dB, 故其为工作波长, 以下实验均使用1550nm波长光进行测量。

## 2、偏振相关损耗

表9 加入偏振控制器测量偏振相关损耗 (只测正向、工作波长)

测量次数	1		2	
	$\mu\text{W}$	$\text{dBm}$	$\mu\text{W}$	$\text{dBm}$
$P_{out \max}$	2870	4.579	2873	4.584
$P_{out \min}$	2850	4.549	2852	4.552



图6 光隔离器偏振相关损耗测量光路图

计算公式和过程（以第一组数据为例详细写出计算过程，用 $\mu W$ 和 $dBm$ 单位数据分别计算、对比）

偏振相关损耗（ $\mu W$ 为单位计算）：

$$P.D.L. = -10 \lg \frac{P_{out-min}(\mu W)}{P_{out-max}(\mu W)}$$

$$\bar{P}_{out-max} = \sum_{j=1}^{j=3} P_{jout-max-j} = 2872\mu W$$

$$\bar{P}_{out-min} = \sum_{j=1}^{j=3} P_{jout-min-j} = 2851\mu W$$

可得

$$\overline{P.D.L.} = -10 \lg \frac{\bar{P}_{out-min}}{\bar{P}_{out-max}} = 0.031dB$$

偏振相关损耗（ $dBm$ 为单位计算）：

$$P.D.L. = -10 \lg \frac{P_{out-min}}{P_{out-max}} = P_{outmax}(dBm) - P_{outmin}(dBm)$$

$$\bar{P}_{out-max} = \sum_{j=1}^{j=3} P_{jout-max-j} = 4.582dBm$$

$$\bar{P}_{out-min} = \sum_{j=1}^{j=3} P_{jout-min-j} = 4.551dBm$$

可得

$$\overline{P.D.L.} = \bar{P}_{out-max} - \bar{P}_{out-min} = 0.031dB$$

表10 偏振相关损耗计算结果

测量次数	1		2		平均值
功率单位	$\mu W$	$dBm$	$\mu W$	$dBm$	
P.D.L./dB	0.030	0.030	0.032	0.032	0.031

### 3、回波损耗

表11 回波损耗端口输出数据（只测正向、工作波长）

测量次数	1		2	
功率单位	$\mu W$	$dBm$	$\mu W$	$dBm$
$P_{in}$	3201	5.052	3230	5.092
耦合器输出 $P_{out1}$	1675	2.240	1625	2.109
耦合器输出 $P_{out2}$	1686	2.269	1663	2.209
回波功率 $P_{r1}$ (两末端都不加匹配快)	31.98	-14.95	31.98	-14.95
回波功率 $P_{r2}$ (隔离器末端加匹配快)	33.5	-14.74	33.04	-14.80

回波功率 $P_{r3}$ (耦合器末端加匹配块)	0.01044	-49.80	0.01018	-49.92
回波功率 $P_{r4}$ (两末端都加匹配块)	0.008462	-50.72	0.00662	-51.79

注：此前我们测量了定向耦合器参数，发现2通道(黑色线)作为输入时效果较好，因此在此采用黑色线输入，同时用2端(蓝色线)作为输出连接隔离器。

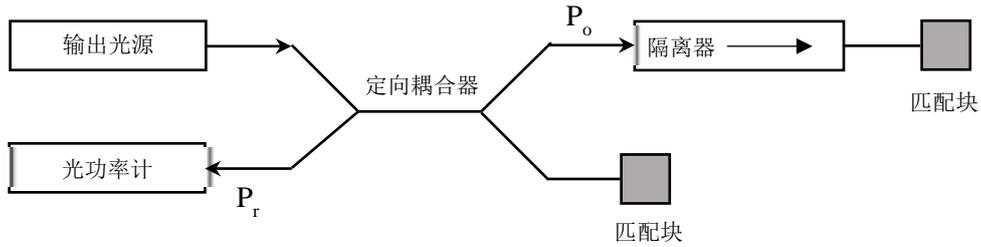


图7 光隔离器回波损耗测量光路图

计算公式和过程（以第一组数据为例详细写出计算过程，用 $\mu W$ 和 $dBm$ 单位数据分别计算、对比）

回波损耗（ $\mu W$ 为单位计算）：

$$R.L. = -10 \lg \frac{2P_{r4}(\mu W)}{P_{out2}(\mu W)}$$

$$\bar{P}_{out2} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{j=2} P_{out2-j} = 1674 \mu W$$

$$\bar{P}_{r4} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{j=2} P_{r4-j} = 0.005489 \mu W$$

可得

$$\overline{R.L.} = -10 \lg \frac{2\bar{P}_{r4}}{\bar{P}_{out2}} = 50.45 dB$$

回波损耗（ $dBm$ 为单位计算）：

$$R.L. = P_{out2}(dBm) - P_{r4}(dBm) - 10 \lg 2$$

$$\bar{P}_{out2} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{j=2} P_{out2-j} = -2.239 dBm$$

$$\bar{P}_{r4} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{j=2} P_{r4-j} = -52.25 dBm$$

带入可得

$$\overline{R.L.} = \bar{P}_{out2} - \bar{P}_r - 10 \lg 2 = 50.48 dB$$

表12 回波损耗计算结果

测量次数	1		2		平均值
	$\mu W$	$dBm$	$\mu W$	$dBm$	
R.L./dB	49.98	49.98	50.99	50.99	50.49

**[ 实验小结 ]**

根据实验中所使用的仪器表面的出厂测试报告，结合实验结果可得其参数。

表13 2×2耦合器参数测试结果

参数名称	平均值	理论值	参数名称	平均值	理论值
I.L. <sub>1-1</sub> /dB	2.945	3.32	I.L. <sub>2-1</sub> /dB	2.978	3.56
I.L. <sub>1-2</sub> /dB	2.862	3.40	I.L. <sub>2-2</sub> /dB	2.949	3.60
E.L./dB	-0.129	/	E.L./dB	-0.047	/
S.R.	0.981	1	S.R.	0.993	1
D.L./dB	52.28	≥50	D.L./dB	61.08	≥50
P.D.L. <sub>1-1</sub> /dB	0.056	0.07	P.D.L. <sub>2-1</sub> /dB	0.106	0.05
P.D.L. <sub>1-2</sub> /dB	0.069	0.02	P.D.L. <sub>2-2</sub> /dB	0.066	0.03

**分析1:**

可以看出各个参数的实验值与理论值较为接近，但插入损耗相比出厂时更优，并且接近于3dB，即1: 1分光，说明其仪器相比之前参数更加优异，并且偏振相关损耗也较小。

对比可以发现，2端口(黑色线)作为输入时的测试结果更好，因此在第二部分中的回波损耗测量我们使用2端口作为输入端。

表14 光隔离器参数测试结果

参数名称	平均值	规定值	出厂测试值
I.L. <sub>1310</sub> /dB	2.611	/	/
I.L. <sub>1550</sub> /dB	0.324	≤0.8	0.64
ISO <sub>1310</sub> /dB	17.17	/	/
ISO <sub>1550</sub> /dB	47.75	≥45	46
P.D.L./dB	0.031	≤0.10	0.02
R.L./dB	50.49	≥60	64

**分析2:**

通过测量两个波长的插入损耗和隔离度可知，此光隔离器的适用波长应为1550nm，从而我们测量1550nm波长的偏振相关损耗和回波损耗，发现除了回波损耗外均满足出场规定值，甚至有的优于出厂报告。

**误差分析:**

首先对于整体系统，测量时用到了多个光纤端面，倘若有一个耦合不够精细，或者端面出现污渍等都会导致光损耗，同时光纤传输本身必定会存在一定的损耗，因此仪器难免出现参数较差的现象，在实验中我们多次擦拭光纤端口，以确保消除这个维度的误差。

在测量回波损耗时，参数产生一定程度的浮动，因为两手握住光纤出口，并且并非能够完全消除菲尼尔反射，因为实验中发现光纤出口插在不同的匹配块位置也会影响数据的读取。

**[ 思考题 ]**

**1、法拉第磁光效应与克尔磁光效应的差异及其应用。**

法拉第磁光效应：是由于介质中的电子在外加磁场作用下发生洛伦兹力的影响，导致介质对光的折射率发生变化而引起的；偏振旋转角度与光的传播方向无关，取决于外加磁场的方向。可以用于制作光隔离器等。

克尔磁光效应：是由于介质中电子的磁矩在外加磁场下发生定向，从而改变了介质的光学性质，使光的传播速度和折射率发生变化；偏振角度与磁场方向和光的传播方向均有关。可以应用于制作显微镜等。

## 2、光隔离器工作原理。

①光从光纤准直器输出后，经过一个偏振片，只让某一方向的光能够通过，然后经过一个让光偏振旋转 $45^\circ$ 的法拉第旋转器，经过第二个偏振片，使得旋转后的光恰好通过。

②对于反射光，由于法拉第磁光效应的旋转角度与光的传播方向无关，因此光的偏振方向再次旋转 $45^\circ$ ，即旋转 $90^\circ$ ，因此恰好与第一个偏振片垂直，从而无法通过，即实现了光被隔离。

## 3、如果采用偏振无关的光隔离器，其PDL理论上应为多大？比较其与偏振相关光隔离器的差异。

对于偏振无关的光隔离器，其理论上的PDL应当为0或者极为接近0，这是显然的，因为其不会受到偏振的影响。

偏振相关的光隔离器主要是使用偏振片进行反向隔离，而偏振无关的光隔离器一般使用双折射晶体，其反射回来时，逆光路相当于经过一个渥拉斯顿棱镜，会将e光和o光分开一个大角度，从而不会被自聚焦透镜捕捉，达到反向隔离。

## 4、光环形器的结构和工作原理。

### 结构：

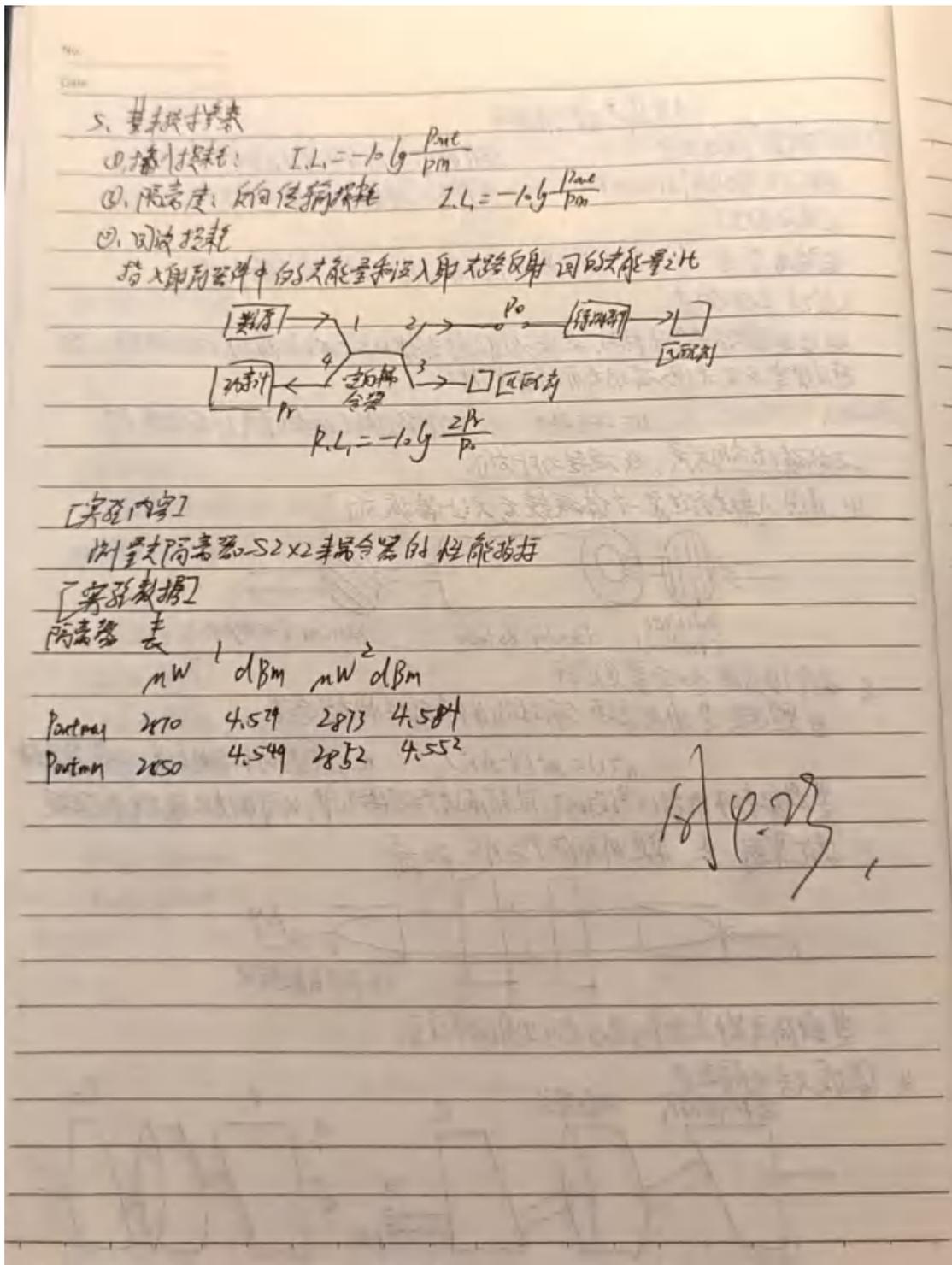
光环形器一般由波导、环形共振腔和耦合器件构成，波导用于引导光信号，类似于光纤准直器，而耦合器件用于将波导于环形共振腔耦合，引导挂个信号进入环形共振腔，环形共振腔是环形或者圆环状，光信号可以在内部形成闭合的光学回路进行传播，从而在特定位置输入而在另一位置输出。

### 工作原理：

首先光信号会被波导和耦合器输入环形共振腔，内部的光信号会形成共振，从而在内部传播，直到被耦合器耦合出去。

通过调节环形共振腔的参数和几何形状，即可利用共振条件实现一些相干增强或者相干相消，达到共振峰之类的效果，从而实现光信号的滤波、增强和调制等。

[ 附录 ]





# 《光信息专业实验（I）》课程 实验报告

学院：物理学院

专业：物理学专业 年级：2021级

实验人姓名、学号：路尚润21305127

参加人姓名、学号：邓逸枫21305409

组号：B3组

日期：2024年5月7、14日 星期二

上午[ ] 下午[√] 晚上[ ]

室温：24°C

相对湿度：80%

指导教师：周张凯

## 3.3 & 3.4 光纤数值孔径测量及光纤耦合实验

### 1. 实验目的

掌握光纤数值孔径的原理定义和实验测量方法。

### 2. 简述实验原理

#### 2.1 光线数值孔径测量

##### (1) 光纤结构参数

光纤的结构如图1所示，由半径为 $a$ 、折射率为 $n_{\text{core}}$ 的纤芯和外径为 $d$ 、折射率为 $n_{\text{cl}}$ 的包层构成。本实验中使用的光纤为石英光纤，纤芯直径为 $100\mu\text{m}$ ，包层外径为 $140\mu\text{m}$ ，厂商给出的光纤数值孔径为0.3。

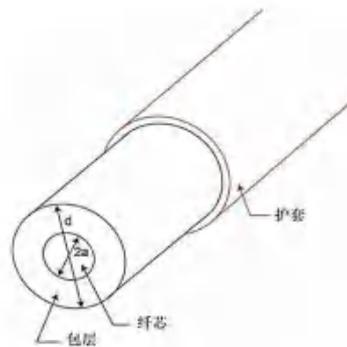


图1 光纤结构

##### (2) 光纤的数值孔径

数值孔径 $NA$ 是光学系统收集光的能力的度量标准，这个光学系统可能是光纤、显微镜物镜或摄影镜头等。数值孔径定义为入射介质的折射率和最大入射角正弦的乘积：

$$NA = n_i \sin\theta_{\text{max}}$$

##### (3) 光纤数值孔径的测量方法

图2是平面波发射/接收法测量光纤数值孔径的示意图。从激光器发出的光近似为沿 $Z$ 方



向传播的平面波，激光束的宽度约为 1mm，这比光纤芯径 100 $\mu\text{m}$  大很多。当平面波入射在光纤端面时，可以保证所有发射到光纤中的光有同样的入射角 $\theta_c$ 。如果光纤端面绕着图2中的 O 点旋转，我们可以测量到光纤所接收光的量随入射角 $\theta_c$ 的变化，接收到的光量降到特定值的点用于确定接收锥的最大入射角。

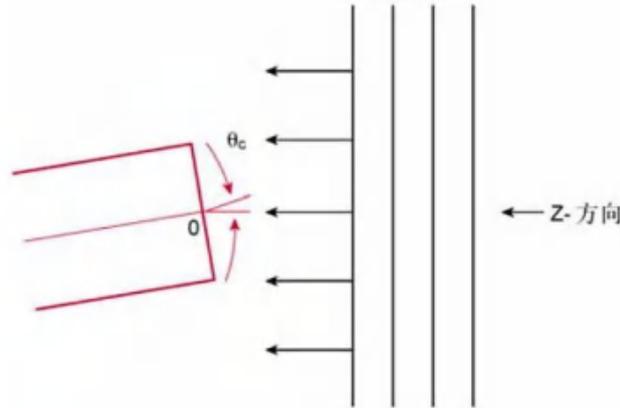


图2 平面波发射/接收法测量光纤数值孔径的示意图

美国电子工业协会所采用接收光功率降低到峰值功率的 5% 所对应的接收角作为实验上确定数值孔径的最大入射角，选定 5% 强度点是为降低用于鉴别背景噪声所需功率水平的折衷方法。数值孔径 NA 是由两个 5% 强度点之间全角的一半来确定的，这样可以消除平面波激光束准直即  $\theta_c = 0$  位置的定位偏差。

### 2.2 光纤模式传输理论

表征光纤波导传输特性的一个重要物理量是光纤的归一化截止频率 V

$$V = K_f \cdot a \cdot NA$$

其中， $K_f = 2\pi/\lambda_0$  是自由空间波数， $\lambda_0$  是自由空间光波长，a 是纤芯半径，NA 是光纤的数值孔径。V 数可用于判断哪些波导模式被允许在一个波导结构中传播。

光纤中的低阶线性模式存在的判断如图3所示。

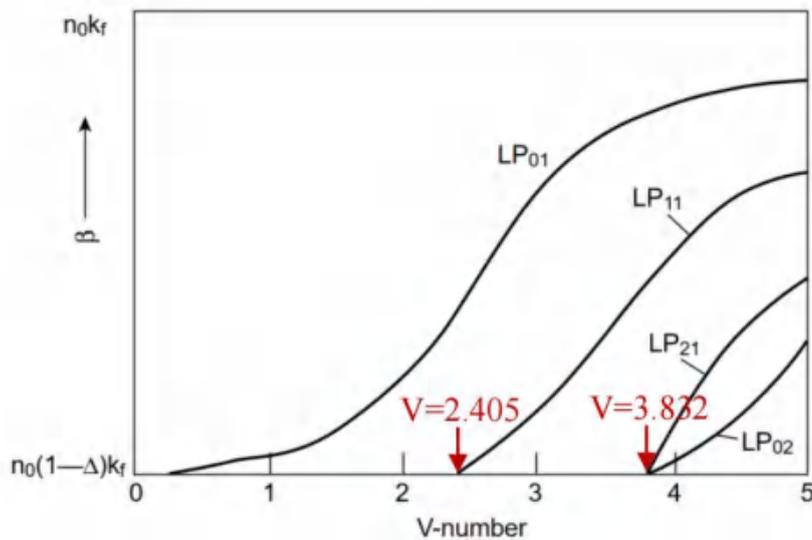


图3 光纤中的低阶线偏振模

当  $V < 2.405$ ，只有最低阶的基模即  $\text{HE}_{11}$  模或  $\text{LP}_{01}$  模可在波导中传播，这就是单模状态。 $V = 2.405$  时对应的波长，称为截止波长，此时下一个高阶模被截止。部分低阶模式的图案如图5所示。

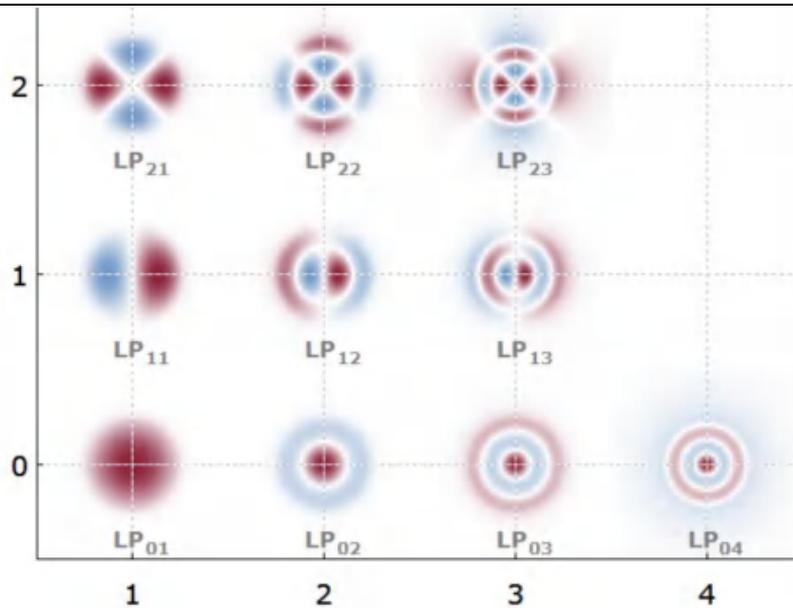


图4 光纤中的低阶线偏振模图案

大多数时候能观测到的为两个或多个模式以一定强度比例混合在一起的组合模。

### 2.3 激光聚焦耦合输入单模光纤

为使激光耦合进入光纤，除了需要让光纤与入射光束精确的准直，还需让入射电磁场分布和光纤传播的模场大小相匹配。单模光纤的模场直径  $W_0$  可用具有  $1/e^2$  空间半宽度的高斯分布近似，由下面的经验公式给出：

$$W_0 = a(0.65 + 1.619V^{-1.5} + 2.879V^{-6})$$

本实验中使用 20 倍显微物镜聚焦从激光器发射出来的光束，如图5所示。

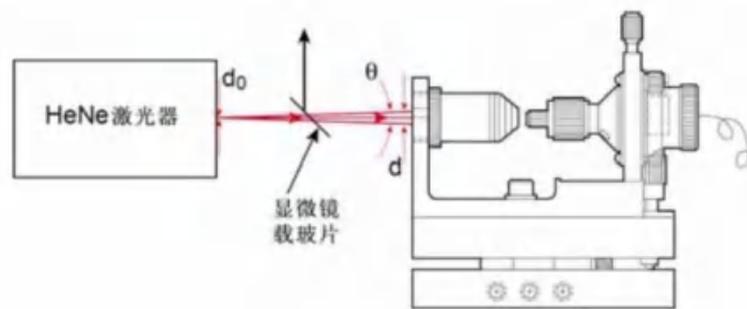


图5 光纤中的低阶线偏振模图案

聚焦后激光束腰的光斑直径  $d_1$  可用显微物镜的焦距  $f=8.3\text{mm}$  和在物镜后焦面激光束的直径  $d$ ，借助于以下公式来确定

$$d_1 = 4\lambda f / \pi d$$

而  $d$  满足

$$d = d_0 \sqrt{1 + (z\theta/d_0)^2}$$

$d_1=W_0$ 时即为最佳耦合距离  $z$ ，达到最佳耦合条件。

## 3. 实验装置图

### 3.1 光线数值孔径测量

实验仪器包含氦氖激光器及其支架、带刻度旋转台、光纤三维调节架和光纤夹具、光纤剥线钳、光纤切割刀、 $100\mu\text{m}$  多模光纤、 $8/125\mu\text{m}$  少模光纤(NA为0.12)、光功率计、接杆和杆座等。

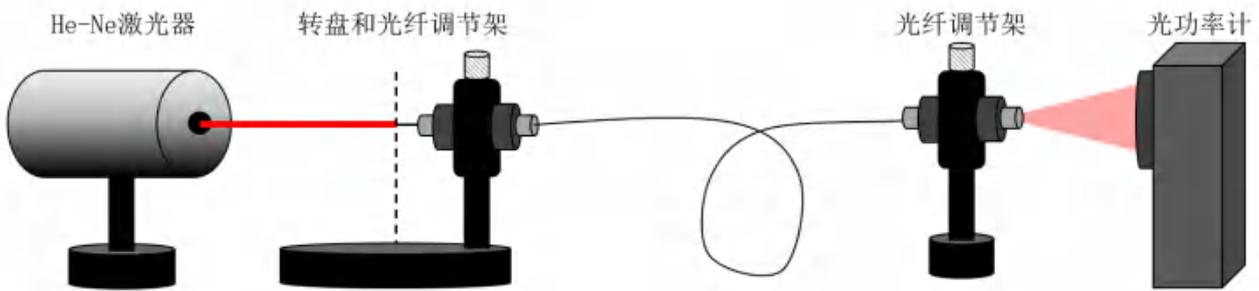


图6 光纤数值孔径测量装置光路图

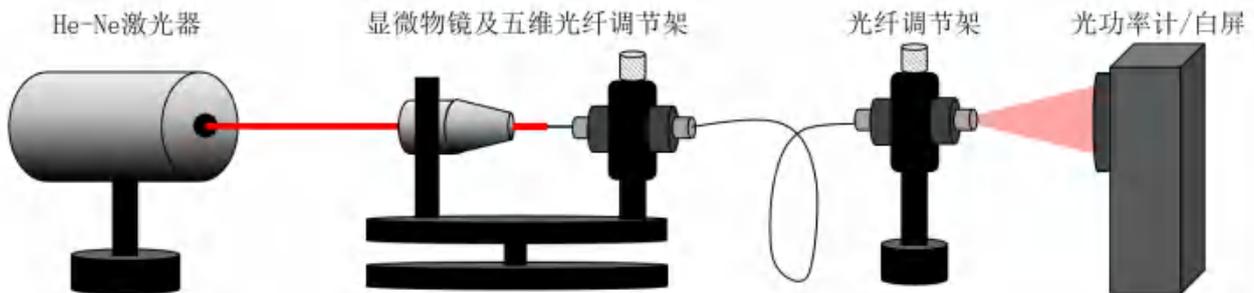


图7 光纤耦合测量装置光路图

## 4. 实验步骤

### 4.1 光纤数值孔径测量

#### (1) 制备光纤端面

用光纤剥线钳剥除裸光纤最外层的涂覆层，并清洁干净，用光纤切割刀切割光纤两头，制备出平整的光纤端面。

#### (2) 搭建测试系统

按照图5搭建实验光路，调节仪器整体准直且水平。

#### (3) 插入光纤，进行数值孔径测量

注意光纤末端要保持在转台中心，同时要保证转盘转动时，光线末端始终在激光中心，确保均有平面波射入光纤端面。出射端面要对准功率计，且读数前进行调零。

在实验中，我们保证接收激光的光纤末端始终在转台中心的方法是，首先调节激光方向，保证在正入射到光纤调节架处时，同时穿过转盘中心，此时再调节光纤调节架的角度，保证正入射(注意此时光纤不一定在转盘中心)。

接着旋转转盘，伸缩光纤长度，保证在一定角度时恰好光斑落在光纤端面(此时伸长光纤，光纤端面将没有光斑)，至此上下旋转转盘，观察是否对称，倘若上下旋转的状态基本一致且入射端面都有明显的光斑，则入射端面调节完毕。

### 4.2 光纤耦合及模场分布测量实验

#### (1) 搭建实验系统

按照图6搭建实验光路，调节仪器整体准直且水平。

#### (2) 耦合光纤，观测多模模式

通过调节五维调节架，将光耦合至长度为2m的通信光纤中，并不断调节各个调节维度，获得不同的波模传输，观察 $LP_{01}$ 、 $LP_{11}$ 、 $LP_{21}$ 、 $LP_{02}$ 的波模，并在基模时尽量获取较大的耦合效率。



## 5. 实验结果及处理分析

### 5.1 光纤数值孔径测量

#### (1) 光纤端面接收平面波情况

实验中按照实验步骤中的方法进行调节，保证光纤端面随转盘转动随时都有平面波入射，不同角度的激光接收情况如图8所示。



(a)向上大角度 (b)向上小角度 (c)正入射 (d)向下小角度 (e)向下大角度

图8 不同角度光纤接收情况

可以看到，在上下旋转转盘时，光纤接收激光状态完全一致，这保证了测量结果的对称性和准确性，因此可以确保结果的准确性。

#### (2) 测量结果

首先我们测量了激光输出功率，发现激光功率为

$$P = 1.751mW$$

但经过光纤传输后，其功率必然会衰减，因为光纤存在插入损耗。在实验中我们以2°为步长，测量结果如表1所示。

表1 不同光纤倾斜角度下的光功率大小

正向 1		反向		正向 2	
角度/°	功率/μW	角度/°	功率/μW	角度/°	功率/μW
20	3.739	20	3.743	20	3.751
22	4.356	22	4.324	22	4.754
24	16.84	24	17.13	24	18.67
26	32.33	26	32.59	26	33.36
28	42.56	28	38.57	28	42.12
30	52.66	30	48.78	30	51.88
32	61.89	32	59.57	32	60.12
34	72.66	34	70.17	34	69.11
36	81.44	36	78.91	36	79.95
38	89.37	38	84.71	38	87.29
40	94.21	40	93.69	40	92.90
42	88.39	42	92.94	42	89.53
44	77.82	44	87.43	44	80.14
46	64.88	46	73.36	46	66.48
48	55.64	48	59.15	48	55.60
50	43.88	50	51.05	50	46.54
52	33.95	52	39.07	52	35.11
54	22.73	54	26.95	54	24.24
56	11.09	56	14.76	56	12.44
58	4.111	58	4.119	58	4.355
60	3.724	60	4.042	60	3.784

我们进行了两次正向测量以及一次反向测量，消除一定的偶然误差。将结果用Origin进行绘图可得

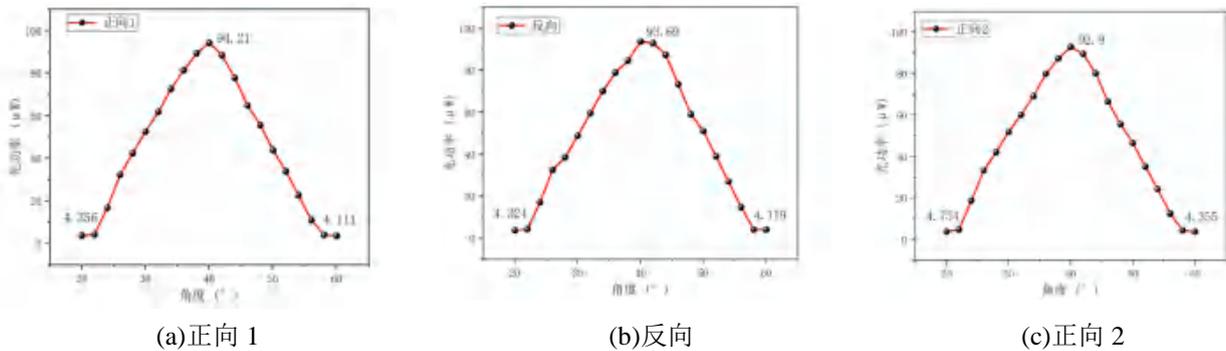


图9 不同光纤倾斜角度下的光功率绘图

而我们根据光功率衰减到5%的角度作为 $\theta_{max}$ ，可以发现实验测量结果有着很好的对称性，这是由于我们巧妙的调节方式保证的。

三次测量实验数据都可以读出 $\theta_{max} = 18^\circ$ ，而空气折射率为1，因此可知

$$NA = n_i \sin \theta_{max} = 0.309$$

可见，与厂商给出的0.3极为接近，测量相对误差为

$$eff = 3\%$$

可见相对误差为正值，这也是合理的，因为光功率为5%的数值约为 $4.7\mu W$ ，而读取点的光强已经略小于这个值，但由于转盘精度有限，最小刻度间隔为 $2^\circ$ ，因此无法精确测量，但实际上测量结果已经十分精确，误差较小且数据可信度高。

## 5.2 光纤耦合及模场分布测量实验

### (1) 最大耦合效率测量

经过计算，本仪器的最佳耦合距离约为63cm左右，结果如表2所示

表2 参数计算

参数名称	参数值
归一化截止频率 V	4.764
模场直径 $W_0$	$6.45\mu m$
物镜后焦面直径 d	1.04mm
最佳耦合距离 z	63.4cm

而试验台最大距离约90cm，因此我们只能尽量增大激光器与耦合端口的距离，缩小聚焦后的光束束腰半径，获得较好的耦合模式。

在实验中我们不断调节五维调节架，获得最高的输出功率，测量结果如下表

表3 光纤耦合测量结果

参数名称	参数值/mW
激光输出功率	1.848
耦合最大输出功率	1.553
最大耦合效率	84.04%

可以看出，光纤耦合效果极好。此时我们观察出射光斑，发现此时并非完全为高斯波包，这也是可以理解的，只有光纤中同时传输多个模式才能达到最大的耦合效率。

实验中拍摄的输出功率为



图10 光功率输出功率极值大小

### (2) 多模光场观测

实验中不断调节旋钮，获取了四种不同的低阶纯净光纤模式，实验结果如图11所示。

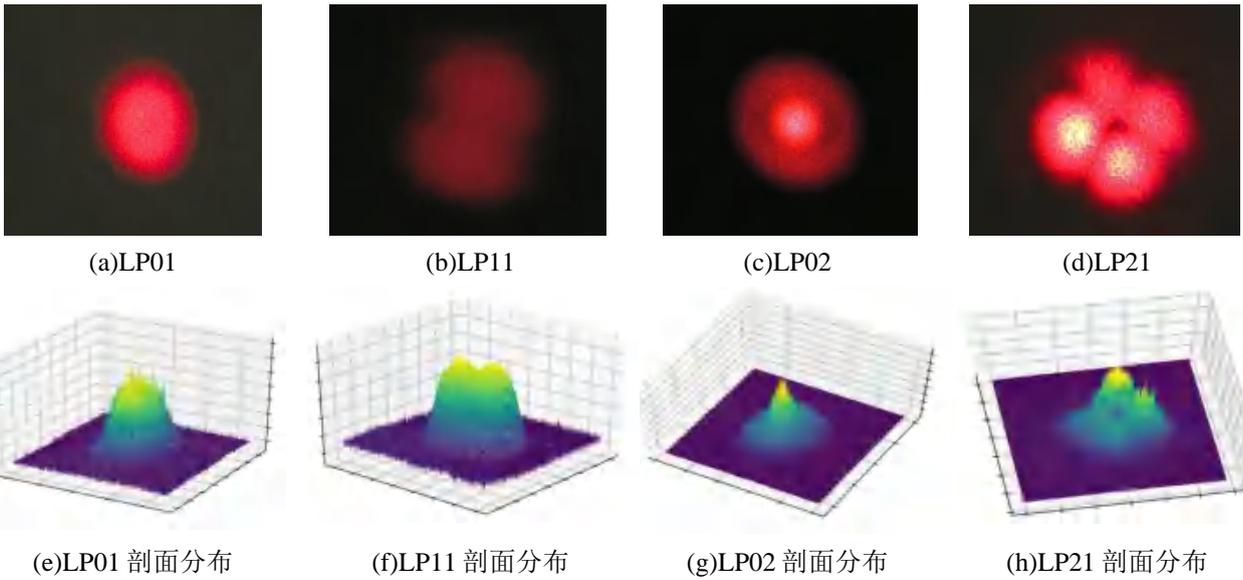


图11 纯净的四种低阶光纤模式及剖面分布曲线

除了四种纯净的模式，还观察到了三种组合模式，如图12所示

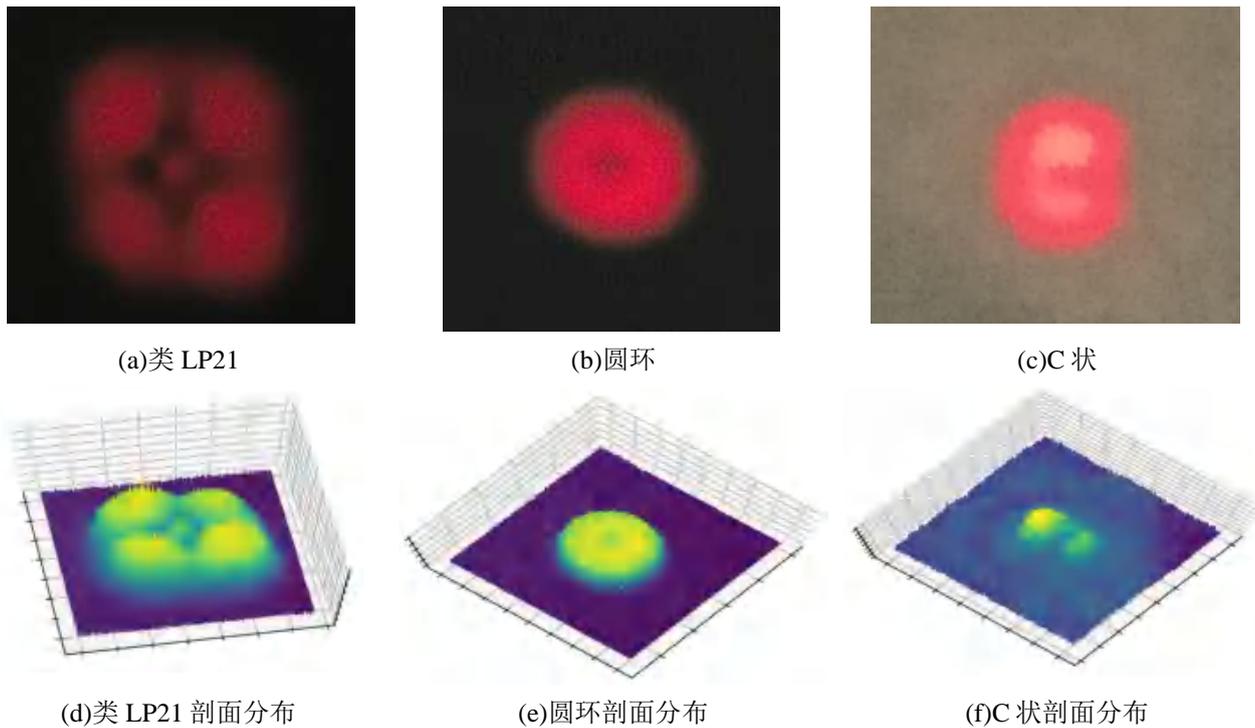


图12 三种组合模式



可以看出，在不同耦合状态下，光纤传输的模式也不同。我们观测到了明显的四种纯净光纤模式，通过光强三维图可以很明显地观测到其剖面分布曲线，与理论基本一致。但实际上有些亮斑如LP21出现了不对称性，这可能是耦合角度倾斜导致的，但在我们不断调节中，发现倘若对称则必定有一个中心亮点。

同时对于LP11和LP02，此时模式的极小值点并非完全为0，这可能是由于LP01模式存在导致的，从而增加了一个类似高斯波包的全范围分布。

对于组合模式，类LP21与LP21模式十分相似，并且十分对称，但此时中心有亮斑，所以必定不是纯净的LP21，可能是LP02与LP21的组合，从而出现了一个周围分布的圆环以及四个极强和中心极强，而右侧观察到的圆环可能是由于LP01和LP02模式组合形成的，从而形成了周边的一圈圆环以及中间的一点亮斑，而C状较为复杂。我们对其进行了仿真验证。

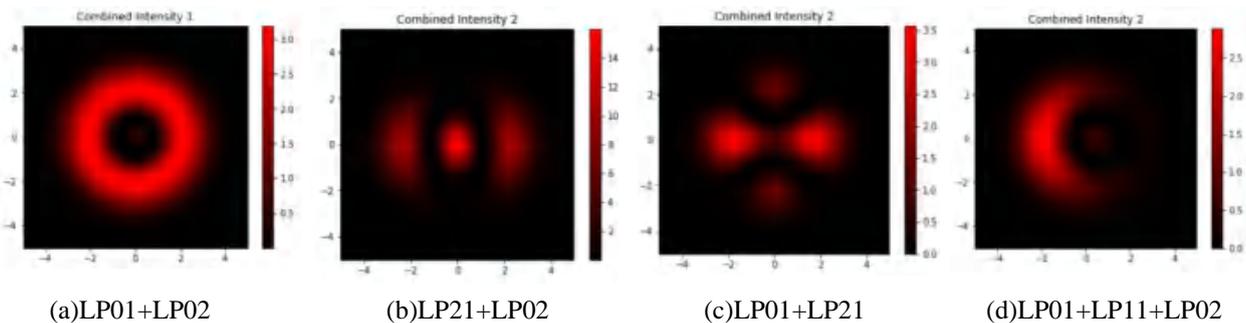


图13 组合模式仿真

可以看出，圆环与我们的猜测一致，而类LP21的形成模式可能与猜测并不一样，且C状有着十分复杂的组合模式。

#### 误差分析：

①实验中低激发模式的理论暗处并非完全无光，这可能是由于LP01模式的存在导致的，此时附加了一个较为均匀的中心亮斑，从而使得理论暗值并非完全无光。同时这也可能是由于散射导致的，因为接收面板为粗糙白屏，可能会产生散射，从而在周边出现散射光。

②可以看到光强分布有许多的毛刺，这是由于激光散斑效应，如图14所示。在拍摄时，激光照射到白屏表面，而白屏具有颗粒感，并非是完全平滑的，可以视为粗糙表面，从而其表面附近的光场会出现一种随机的颗粒状光场分布，这是用白屏成像难以避免的。我们可以使用更平滑的塑料白板等光滑表面成像，会对激光散斑的影响加以改善。

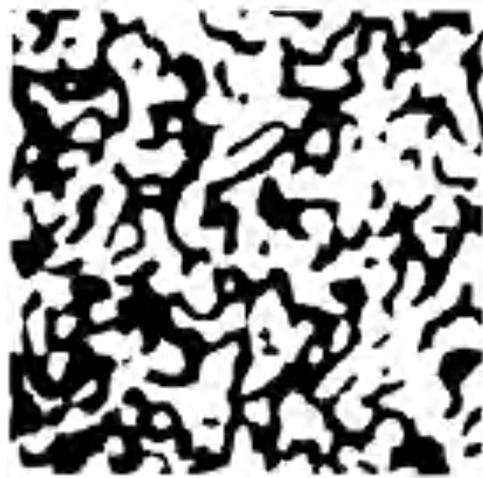


图14 像面散斑

总的来说，在一定误差的影响下，激光呈现出较为明显的低激发模式，实验效果较好。



## 6. 实验总结

本实验通过平面波发射/接收法测量了石英光纤的数值孔径。实验中巧妙地采用两维调节的方式，确保了光纤端口位于转盘中心，同时进行三次测量，均得出最大入射角度为 $18^\circ$ ，计算得到的数值孔径为0.309，对比厂商标准值0.300仅有3%的误差，测量十分精确，这得益于我们设计的调节方案。

接着，通过耦合2m长的光纤，在不同的耦合状态下观测了四种低激发模式以及三种组合模式，从拍摄图以及三维图均能分辨出明显的低阶模式，同时我们也对混合模式进行了猜测以及仿真验证，分析了可能包含的模式。

## 7. 思考题

### 7.1 实验中如何保证接收激光的光纤末端始终保持在转台的转动中心？

事实上我们已经在实验步骤中和实验结果中进行分析，在此进行重述。

#### ①调节方法：

首先调节激光方向，保证在正入射到光纤调节架处时，同时穿过转盘中心，此时再调节光纤调节架的角度，保证正入射(注意此时光纤不一定在转盘中心)，这一步保证了转轴与光纤相交。

接着旋转转盘，伸缩光纤长度，保证在一定角度时恰好光斑落在光纤端面。具体位置为在某非零角度时伸长光纤，光纤端面的光斑将消失，此时恰好为临界状态，这一步保证了光纤端口位于圆盘中心处。至此上下旋转转盘，观察是否对称，倘若上下旋转的状态基本一致且入射端面都有明显的光斑，则入射端面调节完毕。

#### ②调节结果：

根据图8的光纤接收情况的两侧对称性，以及图9实验数据的对称性，可知实验仪器状态较好，并且测量结果也十分精确，证明了我们调节方法的有效性。

### 7.2 对于芯径比较细的单模光纤的数值孔径可否用本实验的方法来测量，难点可能有哪些？

可以，但由于纤芯较细会遇到一些难点，如下：

①单模光纤主要传输基模（LP<sub>01</sub>模式），其光束发散角度较小。由于单模光纤的模式特性，光纤输出光束的角度非常窄，测量这个小角度需要高精度的角度分辨率和高灵敏度的探测器。

②光源的稳定性：平面波发射/接收法需要使用稳定的光源，以确保测量的准确性。对于芯径比较细的单模光纤，由于其对光源的要求较高，因此需要使用高精度、高稳定性的光源。

③平面波发射/接收法需要精确对准发射的平面波和接收光束，单模光纤的芯径非常细，因此任何微小的对准误差都会显著影响测量结果，难以确保光纤端面与检测系统完美对准。

④单模光纤的端面质量对测量影响很大，端面必须非常干净和平整，任何瑕疵或污垢都会导致散射光，干扰测量精度，需要保证较高质量的光纤端面。

### 7.3 调节激光聚焦耦合输入单模光纤时，移动激光器远离聚焦物镜，聚焦后激光束腰的光斑直径 $d_1$ 是增大还是减小，为什么？

减小。根据公式

$$d = d_0 \sqrt{1 + (z\theta/d_0)^2}$$

其中 $z$ 为激光器到物镜后焦面的距离，而聚焦后的光斑直径满足



$$d_1 = 4\lambda f / \pi d$$

因此显然在激光器原理物镜时， $z$ 增大，则 $d$ 增大，而 $d_1$ 与 $d$ 呈反比，因此聚焦后的激光束腰光斑直径 $d_1$ 减小。

这也是为什么在实验中想要保证距离较长，使得激光聚焦后能够耦合进入较细的光纤。

### 7.4 本实验所用的光纤对于通信波段1310/1550nm波长是否仍是单模光纤，模场直径为多少？

本实验使用的是少模光纤，内径为 $8\mu\text{m}$ ，半径为 $4\mu\text{m}$ ，NA为0.12，则计算可知对于1310与1550nm波长光，归一化截止频率为

$$V_{1310} = 2.302, V_{1550} = 1.946$$

均小于2.405，为单模光纤。而对于氦氖激光器，波长为633nm，其 $V_{633} = 4.764$ ，为多模。

模场直径分别为

$$W_{0-633} = 6.45\mu\text{m}, W_{0-1310} = 9.06\mu\text{m}, W_{0-1550} = 10.40\mu\text{m}$$

即计算结果。

### 7.5 本实验测量了单模光纤出射模场垂直于光传输方向的横向分布，请设计实验测量出射模场的三维分布。

#### 实验仪器：

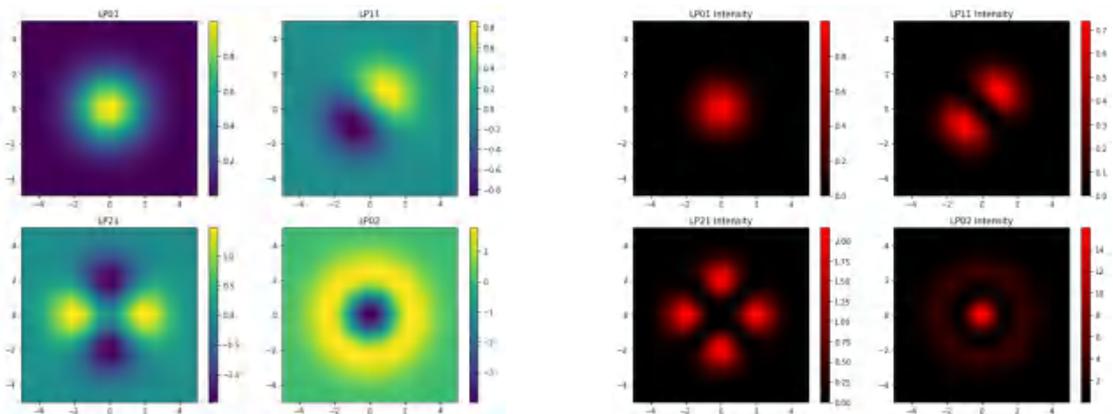
- ①单模光纤及光源：带有稳定、窄线宽的激光光源。
- ②三维精密移动平台：用于精确控制探测器在x、y、z三轴方向上的位置。
- ③探测器：高分辨率CCD或CMOS相机，获取高分辨率的光场强度分布。
- ④计算机和数据采集系统：用于控制移动平台和记录探测器输出信号。
- ⑤光纤夹具和耦合器：确保光纤端面固定，且光纤光束稳定输出。

#### 实验方案：

在固定好光纤后，进行二维扫描，通过移动平台在x-y平面上进行扫描，记录探测器在每个位置的强度分布。采集完成后，将探测器在z轴方向上移动一个小步长，重复x-y平面上的扫描和记录，直到覆盖所需的z轴范围。即利用多层二维扫描的方式进行记录，从而获得全空间的光场分布。

### 7.6 请尝试对LP01, LP11, LP21和LP02四种低阶线性偏振模式按不同权重比例两两组合叠加进行理论仿真模拟，并和实验中观察到的组合模进行对比分析。

我们利用python进行仿真，首先绘制出四种低阶模式的理论图



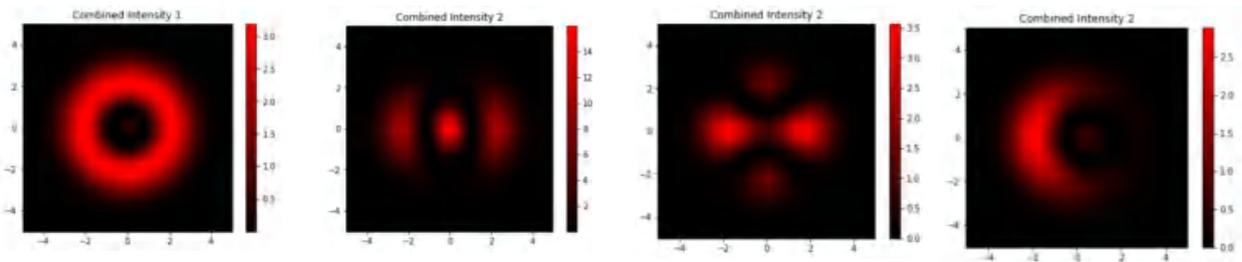
(a)电场分布

(b)光强分布

附图1 四种光纤低阶模式的理论仿真图



可以看出，其与实验拍摄图片基本一致，接着我们进行一些权重比叠加，绘制多种图像。



(a)LP01+LP02

(b)LP21+LP02

(c)LP01+LP21

(d)LP01+LP11+LP02

附图2 叠加模式

我们在实验报告中已经进行过分析，可以看出能够调节出两种与拍摄图案基本一致的传输模式，但有一种难以调出。

### 7.7 除了借助五维光纤调节架对光纤模式激发条件进行调整来改变光纤传输模式外，你还能想到其他方法调整和控制光纤输出模式吗？

- ①改变激光特性，如改变激光波长，或使用不同模式的激光，比如一些高阶模。
- ②使用不同的光纤，比如光纤参数、折射率分布或者不同构造的光纤获得不同的传输模式。
- ③改变光纤的外部环境，如折射率与温度有关，并且也可以用机械拉伸的方式造成小幅度应变，从而改变光纤模式(实验中我们使用过，这是可行的)。
- ④使用一些效应进行动态调控，比如声光效应和电光效应等。

**[Python代码]**

## 读取照片光强并绘制光强图

```
import numpy as np
from PIL import Image
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D

# 读取 PNG 图片
image_path = 'C:/Users/14716/Desktop/圆环.png' # 替换图片路径

# 转换为灰度图像
image = Image.open(image_path).convert('L')

# 转换为 NumPy 数组
image_array = np.array(image)

# 获取图像的尺寸
height, width = image_array.shape

# 创建网格
x = np.linspace(0, width - 1, width)
y = np.linspace(0, height - 1, height)
x, y = np.meshgrid(x, y)

# 绘制三维光强图
fig = plt.figure(dpi=200)
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
ax.plot_surface(x, y, image_array, cmap='viridis') # 使用彩色映射 'viridis'

# 删除坐标轴标签
ax.set_xticklabels([])
ax.set_yticklabels([])
ax.set_zticklabels([])

# 保留刻度线和背景
ax.tick_params(axis='x', which='both', bottom=False, top=False, labelbottom=False)
ax.tick_params(axis='y', which='both', left=False, right=False, labelleft=False)
ax.tick_params(axis='z', which='both', left=False, right=False, labelleft=False)

# 设置视角: 仰角 (elev) 和方位角 (azim)
ax.view_init(elev=80, azim=40) # elev 为仰角, azim 为方位角

# 显示图像
plt.show()
```



## Python 仿真传输模式

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.colors import LinearSegmentedColormap

# 创建黑到橙色的 colormap
colors = [(0, 0, 0), (1, 0, 0)]
n_bins = 100 # 用于插值的 bins 数
cmap_name = 'black_to_orange'
cm = LinearSegmentedColormap.from_list(cmap_name, colors, N=n_bins)

# 定义旋转函数
def rotate_coordinates(x, y, theta):
    x_rot = x * np.cos(theta) - y * np.sin(theta)
    y_rot = x * np.sin(theta) + y * np.cos(theta)
    return x_rot, y_rot

# 定义各模式的电场分布函数
def lp01(x, y, w, theta=0):
    x_rot, y_rot = rotate_coordinates(x, y, theta)
    return np.exp(-(x_rot**2 + y_rot**2) / w**2)

def lp11(x, y, w, theta=0):
    x_rot, y_rot = rotate_coordinates(x, y, theta)
    return x_rot * np.exp(-(x_rot**2 + y_rot**2) / w**2)

def lp21(x, y, w, theta=0):
    x_rot, y_rot = rotate_coordinates(x, y, theta)
    return (2 * x_rot * y_rot) * np.exp(-(x_rot**2 + y_rot**2) / w**2)

def lp02(x, y, w, theta=0):
    x_rot, y_rot = rotate_coordinates(x, y, theta)
    return (2 * (x_rot**2 + y_rot**2) - w**2) * np.exp(-(x_rot**2 + y_rot**2) / w**2)

# 设置网格
x = np.linspace(-5, 5, 400)
y = np.linspace(-5, 5, 400)
X, Y = np.meshgrid(x, y)

# 模式宽度参数
w = 2.0

# 旋转角度参数
theta = np.pi / 4 # 45 度

# 生成各模式的电场分布
E_LP01 = lp01(X, Y, w, theta)
E_LP11 = lp11(X, Y, w, 0)
E_LP21 = lp21(X, Y, w, theta)
E_LP02 = lp02(X, Y, w, theta)
```



```
# 可视化单个模式
plt.figure(figsize=(10, 8))

plt.subplot(221)
plt.title("LP01")
plt.imshow(E_LP01, extent=(-5, 5, -5, 5))
plt.colorbar()

plt.subplot(222)
plt.title("LP11")
plt.imshow(E_LP11, extent=(-5, 5, -5, 5))
plt.colorbar()

plt.subplot(223)
plt.title("LP21")
plt.imshow(E_LP21, extent=(-5, 5, -5, 5))
plt.colorbar()

plt.subplot(224)
plt.title("LP02")
plt.imshow(E_LP02, extent=(-5, 5, -5, 5))
plt.colorbar()

plt.tight_layout()
plt.show()

def combine_modes(weights, modes):
    combined_field = np.zeros_like(modes[0])
    for weight, mode in zip(weights, modes):
        combined_field += weight * mode
    return combined_field

# 定义权重比例
weights_1 = [2, 0, 0, 0.7]
weights_2 = [-1, 1, 0, -0.4]

# 生成组合模式的电场分布
combined_field_1 = combine_modes(weights_1, [E_LP01, E_LP11, E_LP21, E_LP02])
combined_field_2 = combine_modes(weights_2, [E_LP01, E_LP11, E_LP21, E_LP02])

# 可视化组合模式
plt.figure(figsize=(10, 4))

plt.subplot(121)
plt.title("Combined Field 1")
plt.imshow(combined_field_1, extent=(-5, 5, -5, 5))
plt.colorbar()

plt.subplot(122)
plt.title("Combined Field 2")
```



```
plt.imshow(combined_field_2, extent=(-5, 5, -5, 5))
plt.colorbar()

plt.tight_layout()
plt.show()

# 计算各模式的电场强度
I_LP01 = np.abs(E_LP01)**2
I_LP11 = np.abs(E_LP11)**2
I_LP21 = np.abs(E_LP21)**2
I_LP02 = np.abs(E_LP02)**2

# 可视化单个模式的电场强度
plt.figure(figsize=(10, 8))

plt.subplot(221)
plt.title("LP01 Intensity")
plt.imshow(I_LP01, extent=(-5, 5, -5, 5), cmap=cm)
plt.colorbar()

plt.subplot(222)
plt.title("LP11 Intensity")
plt.imshow(I_LP11, extent=(-5, 5, -5, 5), cmap=cm)
plt.colorbar()

plt.subplot(223)
plt.title("LP21 Intensity")
plt.imshow(I_LP21, extent=(-5, 5, -5, 5), cmap=cm)
plt.colorbar()

plt.subplot(224)
plt.title("LP02 Intensity")
plt.imshow(I_LP02, extent=(-5, 5, -5, 5), cmap=cm)
plt.colorbar()

plt.tight_layout()
plt.show()

# 生成组合模式的电场分布
combined_field_1 = combine_modes(weights_1, [E_LP01, E_LP11, E_LP21, E_LP02])
combined_field_2 = combine_modes(weights_2, [E_LP01, E_LP11, E_LP21, E_LP02])

# 计算组合模式的电场强度
combined_intensity_1 = np.abs(combined_field_1)**2
combined_intensity_2 = np.abs(combined_field_2)**2

# 可视化组合模式的电场强度
plt.figure(figsize=(10, 4))

plt.subplot(121)
```



```
plt.title("Combined Intensity 1")
plt.imshow(combined_intensity_1, extent=(-5, 5, -5, 5), cmap=cm)
plt.colorbar()

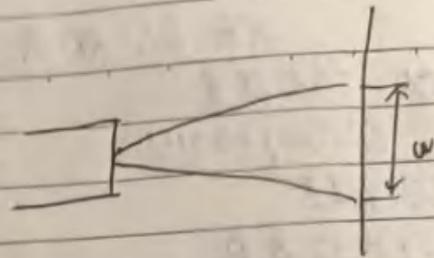
plt.subplot(122)
plt.title("Combined Intensity 2")
plt.imshow(combined_intensity_2, extent=(-5, 5, -5, 5), cmap=cm)
plt.colorbar()

plt.tight_layout()
plt.show()
```



[签字页图片]

②. 正向光束  
 测量光纤端面直径  $L$  后若卡片  
 上的大致直径  $w$ , 则光纤的直径  
 孔径近似为  $5M^{-1}(\frac{1}{2}w/L)$ , 可用此  
 孔径近似粗略测量光纤直径, 再  
 用平面波发射/接收法精确测量



[实验内容]

1. 制备光纤端面
2. 安装板卡并仪器配件, 搭建实验测试系统
3. 放置光纤到实验系统中, 进行光纤孔径测量

[实验数据]

正向 1: 角度/° 功率/ $\mu W$

20	3.739	42	88.39
22	4.356	44	77.82
24	10.84	46	64.88
26	32.33	48	55.64
28	42.56	50	43.80
30	61.89	52	33.95
32	72.66	54	22.73
34	81.47	56	11.09
36		58	4.111
38	89.37	60	3.724
40	94.21		

(2) 5.7



No.

Date

LP<sub>mn</sub> 中第一个字母m的或第二个字母n的或两个字母的极大值的个数，以极大值的个数和极小值的个数。  
 在本实验中，我们仅用He-Ne激光器在一段长度2米的通信单模光纤中传播，用不同的线性偏振模，并观察各个模式的分布

实验内容

1. 制备光纤端面
2. 调整器材架设配件，搭建激光器偏振耦合系统
3. 选择激光材料信号模式并拍时表测量模式分布
4. 测量单模光纤输出模式分布

12/5/19