

电学预科实验 激光和光学实验的基本操作

【目的要求】

- 1、了解与学习激光产生的基本原理以及传播和接收等基本特性。
- 2、观测激光传输、扩束等实验现象。
- 3、通过搭建马赫—曾德干涉仪掌握激光光路的基本调节方法。
- 4、通过检偏器学习激光偏振态的检验。
- 5、观察夫琅和费衍射和光栅衍射现象。

【实验简介】

Mach-Zehnder (M-Z)干涉仪是一种分振幅干涉仪，相比其他干涉仪如迈克尔逊干涉仪，M-Z干涉仪结构简单，但用途广泛。M-Z干涉仪的基本原理也是通过干涉条纹检测两路干涉臂的相位变化，而通过相位的变化可以检测气体压力，温度以及密度等等物理量的变化。

马吕斯于1809年就在实验上发现了光的偏振现象，确定了偏振光强度变化的规律（即马吕斯定律）。光具有偏振性和光的横波特性的发现，在科学上具有极其重要的意义。它不但丰富了光的波动说的内容，而且具有非常重要的应用价值。

衍射指的是波的传播遇到障碍物受到限制，发生偏离直线传播（并非拐反射和折射）的现象。衍射系统主要由光源、衍射屏和接收屏构成，一般用它们相互之间距离的远近将衍射分为两类：一类是衍射屏距光源和接收屏均为有限远（通常入射光为点光源），称为菲涅耳衍射；另一类是衍射屏距光源和接收屏均为无限远或者相当于无限远（通常入射光为平行光），被称之为夫琅和费衍射。这里演示的是夫琅和费衍射现象。

【实验仪器与用具】

氦氖激光器一台（波长：632.8nm），增强铝反射镜四套，无偏振分光棱镜两个，透镜组一套（焦距分别为-30mm和150mm，1:5的透镜组），起偏器一个，检偏器一个，光电池一个，万用表一台，激光防护镜两套，一维调节架，分划板（单缝，双缝，圆孔，光栅等）两种，光栅三种（100线/mm，300线/mm，600线/mm）。

【实验原理】

1、M-Z干涉仪的原理

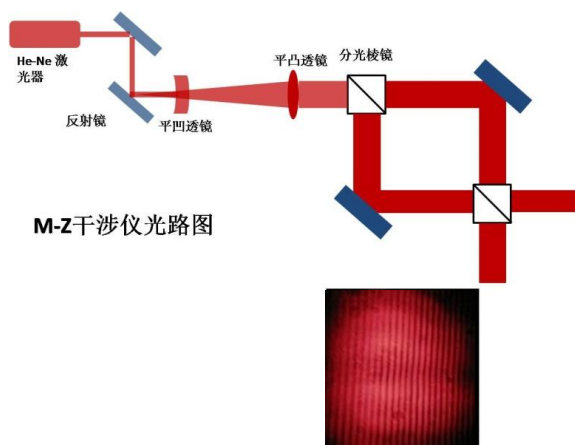


图 1 M-Z 干涉仪原理图及干涉条纹示意图

同一激光光源发出的相干光，被无偏振分光棱镜分为光强 1: 1 并且偏振相同两束光，分别称之为信号光和参考光，经过不同的光程后再重合，因为重合时不同点处两路光的相位差不同，即会产生干涉条纹。假设重合光斑某处两路光的电矢量分别为：

$$E_1(t) = E_0 e^{-i\omega t + \phi_1(t)}$$

$$E_2(t) = E_0 e^{-i\omega t + \phi_2(t)}$$

那么可以得到此处的光强为

$$I(t) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\phi$$

其中 $\Delta\phi = \phi_1(t) - \phi_2(t)$ ，为此处干涉臂的相位差。

2、马吕斯定律的原理：起偏和检偏

偏振片：在赛璐璐基片上蒸镀一层硫酸碘奎宁的晶粒，基片的应力可以使晶粒的光轴定向排列起来，使得振动电矢量与光轴平行的光可以通过，而与振动电矢量与光轴垂直的光不能通过。用偏振片可以做成各种偏振器，如起偏器和检偏器。

当一束激光照在起偏器上，透射光只在一个平面内偏振。如果这个偏振光入射到第二个检偏器上，入射光的偏振平面与检偏器透光轴垂直，则没有光可以透过检偏器；若起偏器和检偏器成一夹角，则有部分偏振光透过检偏器（如图 2 所示）。

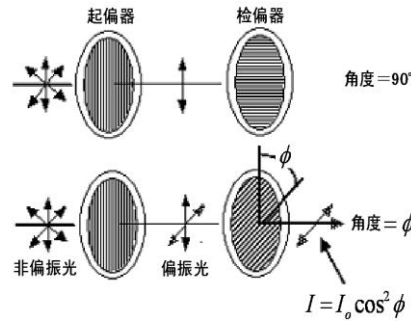


图 2 偏振光的检测示意图

偏振光电场 E_0 的该分量 E ，可由下式得出：

$$E = E_0 \cos \phi$$

因为光强度随电场的平方而变化，所以透过检偏器的光强就可由下式得出，即马吕斯定律：

$$I = I_0 \cos^2 \phi$$

这里， I_0 是透过起偏器的光强， ϕ 是两个偏振器的偏振轴之间的夹角。考虑两种极端的情况：如果 ϕ 等于零，检偏器与起偏器光轴平行， $\cos^2 \phi$ 的值等于 1，则透过检偏器的光强等于透过起偏器的光强度。这种情况下，透射光的强度达到最大值。如果 $\phi = 90^\circ$ ，检偏器与起偏器的光轴垂直， $\cos^2(90^\circ)$ 的值等于 0，则没有光透过第二个偏振器。这种情况下，透射光的强度达

到最小值。当 ϕ 为其它值时，透射光强介于 $0 \sim I_0$ 之间。

3、夫琅和费衍射原理

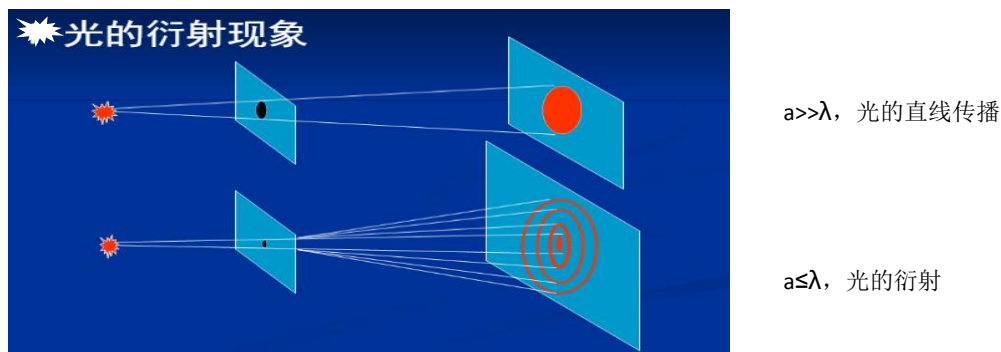


图 3 光的直线传播与衍射

光的衍射具有三个鲜明特点：

- 1). 衍射光在障碍物边缘附近出现了明暗相间的条纹（说明与干涉效应有关）。
- 2). 限制越强，扩展越大。
- 3). 衍射效应强弱取决于障碍物尺寸和光波长之比：
 若大于 10^3 ，衍射效应不明显；
 若介于 10 与 10^3 之间，衍射效应明显；
 若小于等于 1 ，向散射过渡。

（1）夫琅和费单缝衍射

用散射角极小准直性很好的激光做光源，照在一个宽度可调的竖直单缝上，在离狭缝较远的距离放置一接收屏，转动手轮收缩缝宽可以在屏上观察到一组衍射图样，从（a）到（d）对应狭缝的宽度由大到小收缩变化，中心亮条纹由小到大向左右两侧水平展开，同时出现一系列明暗相间的结构，（如图所示），这就是夫琅和费衍射条纹。

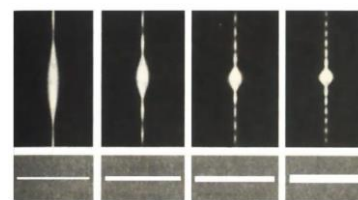


图 4 不同宽度单缝的衍射图样

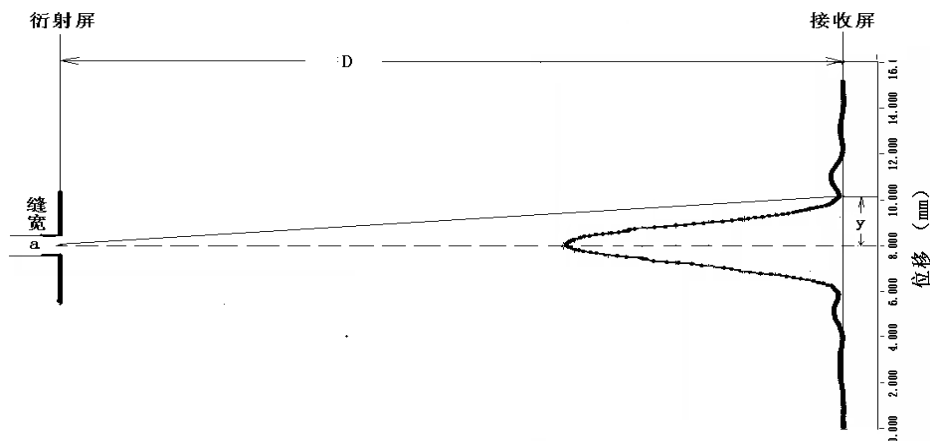


图 5 实验观察到的单缝衍射的光强分布图

当光通过一狭缝时会产生衍射光，衍射图样中的极小值对应的角度由下式给出：

$$a \sin \theta = m\lambda \quad (m = 1, 2, 3, \dots)$$

这里 a 表示缝宽， θ 表示图样中心到第 m 级极小间的夹角， λ 表示光的波长， m 表示级次。

(2) 夫琅和费双缝衍射

激光通过双缝衍射屏时，每一条狭缝都会各自产生一套单缝衍射的图样，单缝衍射的图样如图 6(a)所示，由于两条狭缝宽度相同，且相互平行，故两条狭缝衍射的光强分布完全相同。因为狭缝都是同一单色光源照明，所以从两条狭缝射出的光波的叠加是相干叠加，他们之间还要产生干涉，双缝衍射图样如图 6(b)所示。

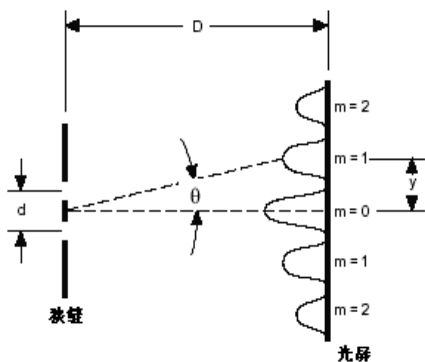
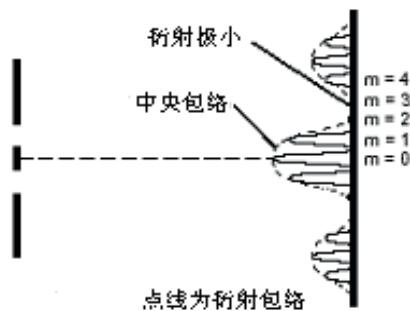


图 6 (a) 单缝衍射图样



(b) 双缝衍射图样

干涉条纹中的极大（亮条纹）对应的角度可由下式给出：

$$d \sin \theta = \frac{\delta \lambda}{2\pi} = m\lambda \quad (m = 1, 2, 3, \dots)$$

这里 d 表示狭缝中心间距 ($d = a + b$ a 是狭缝的宽度， b 是两狭缝最近邻边的距离)。 θ 表示从干涉图样中心到第 m 级极大之间的夹角， λ 表示光的波长， m 表示级次（从中心向外计数，0 对应中央极大，1 对应第一级极大，2 对应第二级极大，...）。

(3) 夫琅和费多缝衍射（光栅衍射）

光栅的衍射即为夫琅和费多缝衍射，与双缝衍射类似，它包含了单缝衍射和多缝干涉两个方面，体现了典型的分波阵面多光束干涉的特性（如图7所示）。

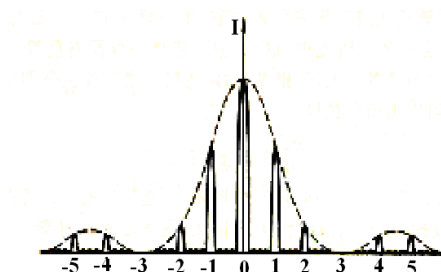


图 7 多缝衍射图样的光强分布

光栅方程：

$$d \sin \theta = m\lambda \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

这里，光栅常数 d 为相邻两缝的中心距离，即光栅每毫米刻缝数的倒数， θ 表示从干涉图样中心到第 m 级主极大之间的夹角， λ 表示光的波长， m 表示级次。

当狭缝数 N (大约为： $10^2 - 10^3$ 条) 非常大时主极大非常细，这是多光束干涉的重要特征。

缺级：

当缝间干涉的第 p 级主极大与单缝衍射的第 q 级极小相重合时，在这里没有光，称为缺级，缺少干涉的 p 级主极大。缺级发生在缝间距 d 与缝宽 a 成简单整数比时。设 $d = \frac{p}{q}a$ ，则 p 级缺级，而且 $\pm p, \pm 2p, \pm 3p, \dots$ 都缺级。

N 缝衍射 N 的判断：看两个相邻主极大之间有 $N-2$ 个次极大，有 $N-1$ 个极小值。

d/a 关系的判断：看缺级。

(4) 夫琅和费圆孔衍射

夫琅和费圆孔衍射图样是一组明暗相间的同心圆环，如图 8 所示，中央亮斑被称为爱里斑，其光强占整个入射光强的 84%，爱里斑的角宽度为：

$$\Delta\theta \approx \sin \theta = 0.61 \frac{\lambda}{r} = 1.22 \frac{\lambda}{d}$$

式中 d 为圆孔的直径，与单缝衍射中央极大的角半宽相比，除了反映几何形状的因子 1.22 外，其物理实质是一致的，孔径 d 越小，衍射效应就越大。

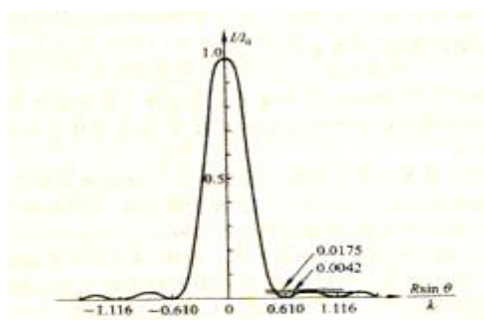
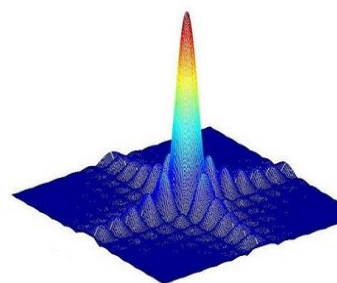


图 8 夫琅和费圆孔衍射的光强分布

(5) 夫琅禾费矩孔衍射



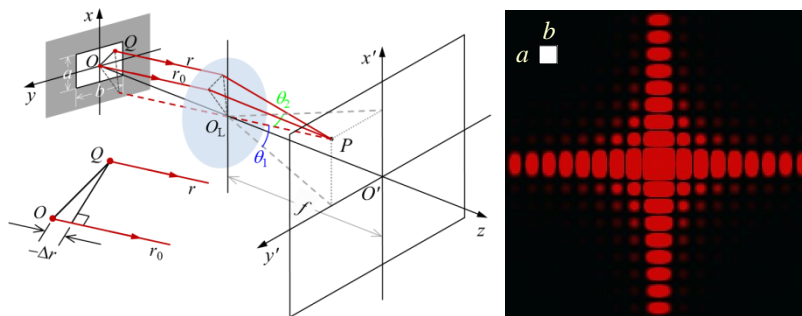


图 9 夫琅禾费矩孔衍射的光强分布

【实验内容】

- 1、观察激光的传输、及基本光路的搭建；
- 2、搭建 M-Z 干涉仪，并观察干涉条纹；
- 3、利用检偏器检验马吕斯定律；
- 4、夫琅和费衍射演示实验。
- 5、光栅衍射演示实验。

【实验步骤】

- 1、粗略规划光路安排，摆放各个器件位置，尽量保持光路沿着平台上的孔线。
- 2、确定光路整体高度。一般以激光器出口位置作为参考，各个器件如反射镜，分束器等安装时保持镜面中心高度与激光器出口高度大致相同。光阑的高度可以通过将光阑置于靠近激光出口位置，调整光阑让激光能够穿过小孔中心即可。
- 3、从激光器开始搭建光路。将 He-Ne 激光器沿光学平台上某一条孔线摆放固定，打开激光器电源，可看到细小的激光束出射。
- 4、准直光路。利用两个光阑定标，然后利用两面反射镜将光路准直到一条直线上。这是光路调节最重要的一步，其要领可概括为“远调近，近调远”。将两个已标定高度的光阑 a 和 b 固定于之前规划的光路上，在空间允许的情况下越远越好，粗略的放置反射镜 A 和 B 的位置，调整 A 和 B 的位置使光大致能同时穿过光阑 a 和 b，固定反射镜。将光阑 a 缩到最小，调节反射镜 A 的螺母，使得激光穿过光阑 a，然后放开光阑 a，将光阑 b 缩到最小，调节反射镜 B 的螺母，使得激光穿过光阑 b，此时激光可能又偏离了光阑 a，那么再缩小光阑 a，调节反射镜 A，使激光穿过 a，如此反复几个周期，即调节 A 使激光穿过 a，调节 B 使激光穿过 b，几个周期之后即能将激光准直到 a 和 b 确定的直线上。

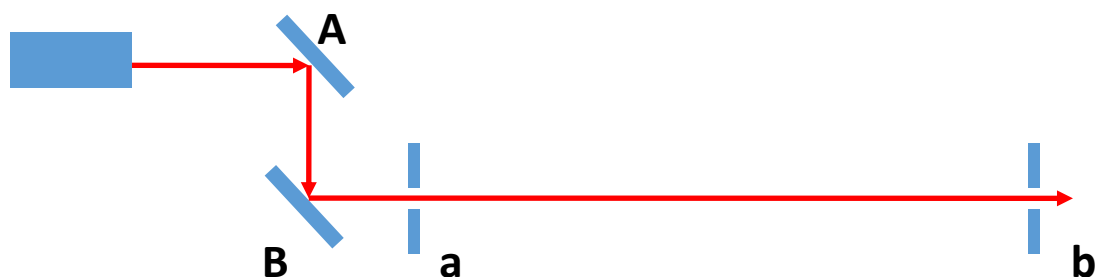


图 10 光路准直原理图

5、扩束。因为激光器出射的激光光斑很小，为了得到清晰的干涉条纹，需要进行扩束。为节省空间，我们选用短焦平凹和长焦平凸的透镜组合。首先根据扩束比在合适位固定凸透镜，并以扩束后的光斑是否经过光阑 b 作为判断标准（先放置平凹的话光束在很短距离内就会发散），固定好平凸之后，再根据同样的判断标准放置平凹。假设需要将激光光斑扩大 5 倍，如选取焦距 3cm 的平凹和 15cm 的平凸，那么平凹应该放置在距离平凸约 12cm 的位置。注意：在使用平凸和平凹透镜的时候，一般要求平的面对准平行光，这样可以减小球差。

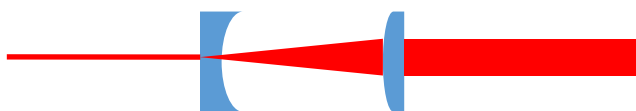


图 11 扩束原理图

6、分束。在平凸透镜之后放置分束棱镜，使其反射一路光大致经过沿着孔线；放置反射镜 3，再在预设的路径上一远一近固定两个光阑，采取同步骤 4 一样的操作，使分束镜反射的一路光同时经过光阑。

7、合束。放置反射镜 4，使分束镜透射的一路光经反射镜 4 反射后大致沿着孔线；在两路光交叉的放置合束 BS，同样采用步骤 4 的操作，调节反射镜 4 和合束 BS，使两路光在远近重合。

8、观察干涉条纹。当两路光在远近都重合的很好时，能够在白屏上看到有明显的干涉条纹出现，挡住其中一路光，则干涉条纹消失。且干涉条纹的粗细和间隔会随光斑重合的好坏发生变化。假设两路光未完全重合，而有微小的夹角 α ，如下图所示，

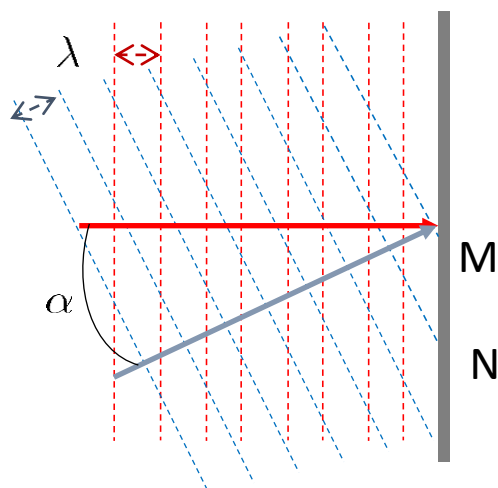


图 12 干涉条纹间距与两路光束夹角的关系

假设两干涉臂的光夹角为 α ，红色和蓝色虚线分别为两路光的等相位面，间隔为波长 λ ，对于我们所用的 He-Ne 激光器，波长为 632.8nm。M 点两路光相位相同，即干涉最强，那么与 M 点相邻的干涉最强点 N 与 M 的间距为

$$d = \frac{\lambda}{\sin \alpha} \approx \frac{\lambda}{\alpha}$$

9、激光偏振态的检验。将偏振片置于光路中，旋转偏振片的角度，利用光电池检测光电流随偏振片角度的变化，检验马吕斯定律。

(1) 将激光器、起偏器、检偏器、光电池按顺序安装，点亮激光器，调节各器件使等高共轴；将光电池与万用表连接起来。

(2) 旋转起偏器 P_1 ，使光电池接收到较大光强（一般选择 mA 或 μA 档），此时起偏器与激光偏振方向一致，旋转检偏器 P_2 ，使光电池光强最大，此时起偏器与检偏器偏振方向夹角 0° 位置；将检偏器 P_2 转至 90° 位置，转动起偏器 P_1 到消光位置，此时光电池读数最小，固定 P_1 （后续所有实验起偏器均固定不变）。实验时，注意杂散光线对实验结果的影响。

(3) 将 P_2 转到 0° （此时光强为最大值）开始测量，每转 15° 测量一次光电流的数值 I ，将测量结果记入数据表 1。

表 1 马吕斯定律测量数据表							
				$I_{\max} =$		$I_{\min} =$	
θ	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
I							
$\cos^2 \theta$							
$I - I_{\min}$							

(4) 以 $I - I_{\min}$ 为纵坐标， $\cos^2 \theta$ 为横坐标作图。如果图线为通过坐标原点的直线，则表明马吕斯定律已被验证。

10、夫琅和费衍射演示实验。

将分划板放入光路中，看衍射图样的变化，根据所学判断衍射图样与分划板参数是否一致。

缝的衍射与孔的衍射图样的区别；
缝与丝、孔与屏的衍射图样的区别；
单缝、双缝与多缝衍射图样的区别；
单缝与多缝衍射如何判断；
一维光栅和二维光栅衍射图样的区别。

分划板参数如下：

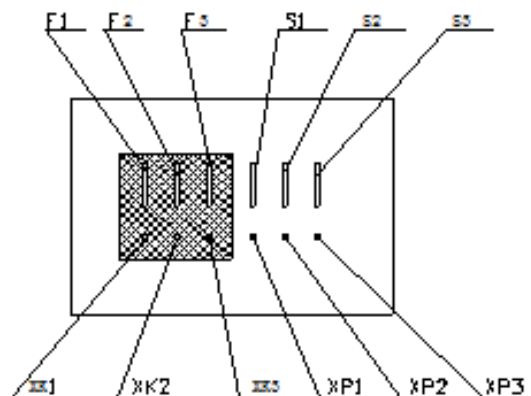


图 13 分划板 1

单缝：	F1: $a=0.1$	F2: $a=0.2$	F3: $a=0.3$
单丝：	S1: $a=0.1$	S2: $a=0.2$	S3: $a=0.3$
小孔：	XK1: $\phi=0.2$	XK2: $\phi=0.3$	XK3: $\phi=0.4$
小屏：	XP1: $\phi=0.2$	XP2: $\phi=0.3$	XP3: $\phi=0.4$

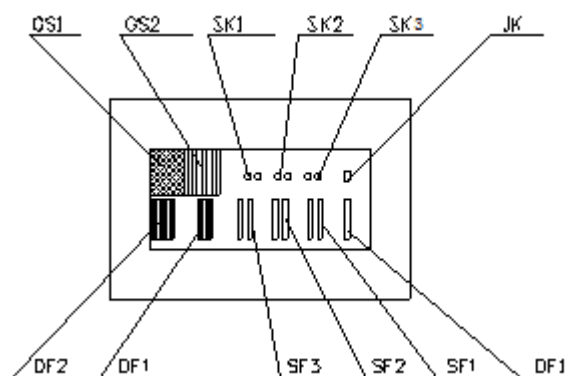


图 14 分划板 2

光栅： GS1: 纵横均为 50 条/mm； GS2: 纵向 50 条/mm；
双孔 ($\phi=0.2$)： SK1: $d=0.25$ SK2: $d=0.32$ SK3: $d=0.4$
矩孔： JK $a=0.12, b=0.2$
单缝： DF1: $a=0.08$ (右下 1)
双缝： SF1: $a=0.08, d=0.16$ ； SF2: $a=0.08, d=0.20$ ； SF3: $a=0.06, d=0.10$ ；
多缝： DF1: 4 缝 $a=0.06, d=0.1 \times 4$ ； DF2: 9 缝 $a=0.06, d=0.1 \times 9$ ；

11、光栅衍射演示实验。

将光栅放入光路中，看衍射光斑图样，根据光栅方程算出光栅常数 d ，看与已知光栅刻缝数是否一致。

光栅方程： $d \sin \theta = m\lambda$ $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

这里，光栅常数 d 为相邻两缝的中心距离，即光栅每毫米刻缝数的倒数， θ 表示从干涉图样中心到第 m 级极大之间的夹角， λ 表示光的波长， m 表示级次。

【注意事项】

- 1、严禁直视激光。
- 2、严禁将激光照向他人。
- 3、严禁手触摸光学器件的光学面。

【思考题】

- 1、调研不同类型的干涉仪的原理及优缺点。
- 2、调研干涉仪在不同领域的应用，举例：引力波干涉仪的原理。
- 3、图 1 中是否可以形成圆形干涉条纹（环）？形成条件差别在哪？
- 4、测光强可以用电压测量模式吗？

【参考文献】

[1] 吕斯骅，段家祗。新编基础物理实验，北京：高等教育出版社，2006。

【附录一】马赫—曾德干涉仪 原理图

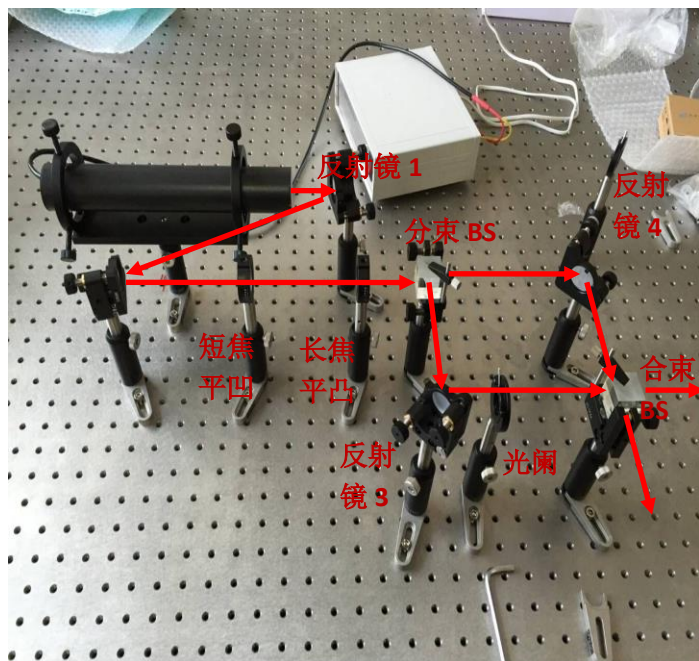


图 15 M-Z 干涉仪实物图

【附录二】He-Ne 激光器的原理

激光器的基本组成：工作物质，泵浦源，谐振腔。产生激光的基本条件：粒子数翻转。

He-Ne 激光器的组成：He-Ne 激光器中 He 是辅助物质，Ne 是工作物质，He 与 Ne 之比为 5 : 1 ~ 10 : 1。谐振腔由两个反射镜组成，根据谐振腔和放电管位置的不同又分为内腔、外腔和半内腔式。放电管中央为毛细管，毛细管的增益系数与其长度成正比，与直径成反比。毛细管周围是储气管，这里不发生放电，用以补偿因慢漏气及管内元件放气或吸附气体造成 He、Ne 气体比例及总气压发生的变化，延长器件的寿命，并且起到连接毛细管和反射镜的作用。储气管的两端是电极，为了增加电子发射面积和减小阴极溅射，一般都把阴极做成圆筒状，然后用钨棒引到管外。采用直流电源激励产生激光。

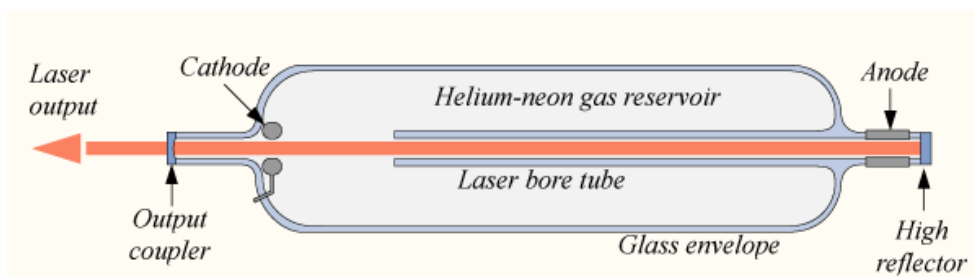


图 16 内腔式 He-Ne 激光器结构 (from wiki)

He-Ne 激光器原理：

由于电子的碰撞,基态 He 原子被激发到 2^3S 和 2^1S 能级(通过电子碰撞直接激发 Ne 原子的几率比较低), He 的 2^3S , 2^1S 这两个能级都是亚稳态,集聚了较多的原子。而 Ne 原子 $5S$ 和 $4S$ 态与 He 原子 2^1S 和 2^3S 的能量相近,激发态 He 原子与基态 Ne 原子碰撞时容易产生能量的“共振转移”,即 Ne 原子被激发到 $5S$ 或 $4S$ 态而 He 原子则由激发态回到基态。而 Ne 原子的 $5S$, $4S$ 也是亚稳态,下能级 $4P$, $3P$ 的寿命比上能级 $5S$, $4S$ 要短得多,从而可以形成粒子数的反转。

放电管做得比较细(毛细管),可使原子与管壁碰撞频繁。借助这种碰撞, $3S$ 态的 Ne 原子可以将能量交给管壁发生“无辐射跃迁”而回到基态。这样可及时减少 $3S$ 态的 Ne 原子数,有利于 Ne 原子的下能级 $4P$ 与 $3P$ 态的“抽空”。

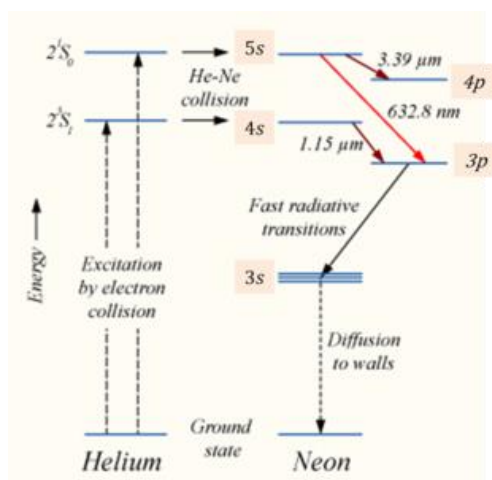


图 17 He-Ne 激光器激发图 (from wiki)

【附录三】光电池原理

光伏效应：当光照射在半导体 pn 结上时，由光子所产生的电子与空穴将分别向 n 区和 p 区集结，使 pn 结两端产生光生电动势，这一现象称为光伏效应。利用半导体 pn 结光伏效应可制成光伏探测器，常用的光伏探测器有光电池、光电二极管和光电三极管等。

光电池是根据光伏效应制成的 pn 结光电器件，不需要加偏压就可以把光能转化为电能。当光照射光电池时，将产生一个由 n 区到 p 区的光生电流 I_L ，同时，由于 pn 结二极管的特性，存在正向二极管电流 I_D ，此电流方向从 p 区到 n 区，与光生电流相反，因此，实际获得的电流为：

$$I = I_L - I_D = I_{ph} - I_0(e^{\frac{qV_D}{nk_B T}} - 1)$$

式中 V_D 为结电压， I_0 为二极管的反向饱和电流， I_{ph} 为光生电流， n 为理想系数，是表示 pn 结特性的参数，通常在 1~2 之间， q 为电子电荷量， k_B 为玻尔兹曼常数， T 为结温（单位为K）， I 为总电流。光生电流 I_{ph} 与光照有关，随光照的增大而增大，呈线性关系，其比例系数由光电池的结构和材料的特性决定的。

光电池的用途：一用做探测器；二用做太阳能电池，将太阳能转化为电能。光电池的结构示意图及基本应用电路如下图：

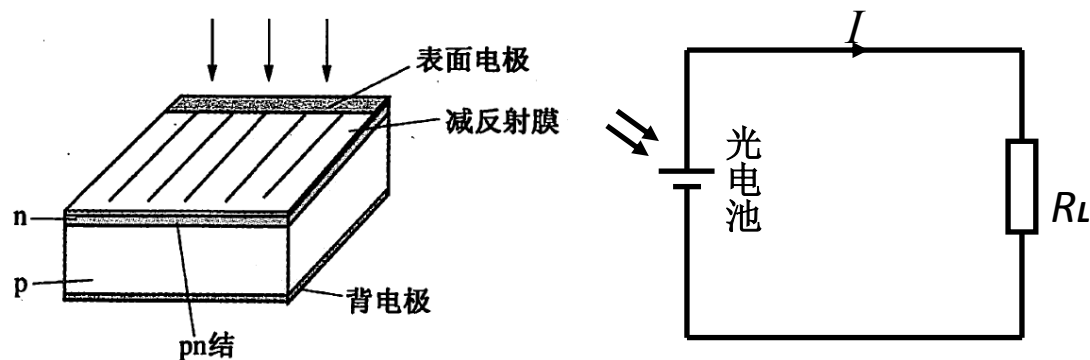


图 18 光电池的结构示意图及基本应用电路

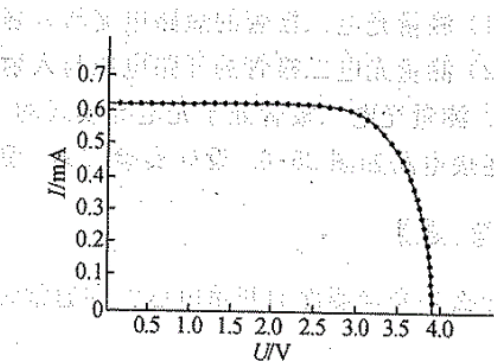


图 19 某种材料的光电池的伏安特性曲线

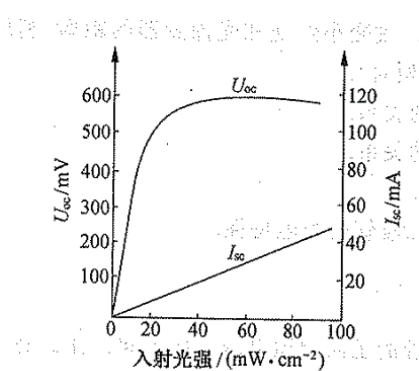


图 20 光电池的开路电压、短路电流与入射光强的关系

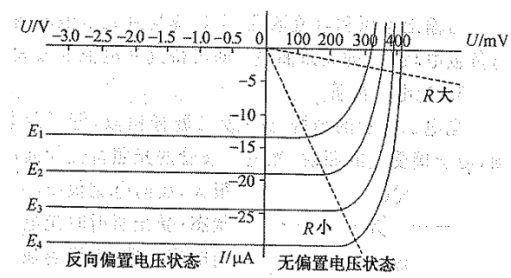


图 25-3 光伏探测器的伏安特性曲线

图 21 光伏探测器（光电池）在无偏置和施加反向偏置电压的伏安特性曲线

注：理解反向偏置电压下的伏安特性曲线，需要提前了解二极管在施加正反向电压时的特性。