



21世纪全国本科院校电气信息类**创新型**应用人才培养规划教材

激光技术 与光纤通信实验

周建华 兰 岚 主编



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材

激光技术与光纤通信实验

主 编 周建华 兰 岚



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书由“激光原理与技术实验”和“光纤通信实验”两部分组成。实验内容与“激光原理与技术”“光纤通信”等课程的教学大纲和要求保持一致。第一篇为激光原理与技术实验，内容包含 He-Ne 激光器的增益系数、模式分析、光束质量分析实验，Nd:YAG 激光器的电光调 Q 、声光调 Q 、被动调 Q 技术实验，声光锁模技术实验，此外还有激光技术应用方面的实验，如激光相位测距实验、四象限探测器及光电定向实验、单光子计数实验等。第二篇为光纤通信实验，内容涵盖光纤的结构、损耗和色散、半导体光源、半导体光电探测器、光无源器件、光波分复用技术、光纤通信系统等内容。每个实验项目内容包含了对相关的基础理论和原理以及重要仪器的介绍。电子科技大学光电信息学院的光电信息科学与工程专业已经对这些实验进行了多年的教学实践，使其具有一定的参考价值。

本书适合作为光电信息科学与工程、光电子技术、电子与通信工程等专业的激光原理与技术和光纤通信实验相关的教学用书，也可作为从事相关方向的工程技术人员的快速入门的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

激光技术与光纤通信实验/周建华，兰岚主编. —北京：北京大学出版社，2015.12

(21世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-26609-0

I. ①激… II. ①周…②兰… III. ①激光技术—实验—高等学校—教材②光纤通信—实验—高等学校—教材 IV. ①TN2-33②TN929.11-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 293415 号

- | | |
|-------|--|
| 书 名 | 激光技术与光纤通信实验
Jiguang Jishu yu Guangxian Tongxin Shiyān |
| 著作责任者 | 周建华 兰 岚 主编 |
| 责任编辑 | 郑 双 |
| 标准书号 | ISBN 978-7-301-26609-0 |
| 出版发行 | 北京大学出版社 |
| 地 址 | 北京市海淀区成府路 205 号 100871 |
| 网 址 | http://www.pup.cn 新浪微博：@北京大学出版社 |
| 电子信箱 | pup_6@163.com |
| 电 话 | 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 |
| 印 刷 者 | 北京溢漾印刷有限公司 |
| 经 销 者 | 新华书店 |
| 定 价 | 787 毫米×1092 毫米 16 开本 11.75 印张 269 千字
2015 年 12 月第 1 版 2015 年 12 月第 1 次印刷
28.00 元 |

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究

举报电话：010-62752024 电子信箱：fd@pup.pku.edu.cn

图书如有印装质量问题，请与出版部联系，电话：010-62756370

前 言

本书是电子科技大学新编特色教材和专业教材之一，是基于对专业实验教学大纲的多次修订和在多年教学实践中的实际教学经验积累的基础上编写而成的。

激光是 20 世纪的重大发明之一，由于激光器具有方向性好、亮度高、单色性和相干性好等优点，它在工业、军事、通信、医学和科学研究等方面都发挥了独特作用。而光纤通信技术自 20 世纪 80 年代以来在全世界得到广泛应用，具有低损耗和高带宽的特点，可实现信息化需要的海量信息高速传输，成为了推动信息社会进步的重要技术力量。随着激光与光纤通信技术相关信息产业的迅猛发展，在科学研究和人才需求的牵引下很多高校开设了“激光原理与技术”和“光纤通信”等专业核心课程。学生在理论学习的同时，必须通过实验来进一步掌握基本原理、概念和技术，培养学生的实验技能和综合科学研究能力，满足 21 世纪社会对人才创新能力的需要。

本书力求通过主要概念和关键性实验技术来阐述激光与光纤通信技术的基本原理和应用技能。从教学角度出发，本书将重点放在关键性基础理论和原理内容上，每个实验项目都提供了相关的理论背景和基础原理的介绍，基本涵盖了激光与光纤通信技术的重要知识点。通过对本书的学习，学生一方面能掌握基础理论知识，另一方面能通过实验掌握激光与光纤通信技术的实践知识和技能。

为了方便学生了解实验具体情况，本书大部分实验配备了视频讲解，可以通过微信扫一扫对应的二维码进行观看。

本书由电子科技大学周建华和兰岚共同编写。编写过程中，参考了相关教材、书籍和资料，在此表示感谢。此外，感谢电子科技大学相关领导和老师的支持与帮助。

由于时间和编者水平有限，书中难免会存在一些不足之处，恳请广大读者批评指正。

编 者
2015 年 3 月

目 录

第一篇 激光原理与技术实验

实验 1	He-Ne 激光器的组装调试及其增益系数的测量	1
实验 2	He-Ne 激光器的模式分析	10
实验 3	He-Ne 激光束质量分析与参数测量	16
实验 4	声光锁模与腔内选频单纵模激光实验	26
实验 5	Nd:YAG 电光调 Q 激光的参数测量	44
实验 6	Nd:YAG 倍频声光调 Q 激光参数测量	59
实验 7	半导体激光二极管泵浦固体激光器实验	64
实验 8	单光子计数实验	72
实验 9	四象限探测器及光电定向实验	80
实验 10	激光相位测距实验	90

第二篇 光纤通信实验

实验 1	光纤切割与焊接技术实验	99
实验 2	插入法测光纤的平均损耗系数	106
实验 3	光时域反射计测量光纤链路特性	114
实验 4	单模光纤的色散测量	120
实验 5	光无源器件性能参数的测试	125
实验 6	半导体激光器输出特性测量	139
实验 7	数字光纤通信系统误码率的测量	150
实验 8	信号眼图的测试	154
实验 9	光波分复用系统的特性测量	159
实验 10	掺铒光纤放大器结构设计及性能测试	169
参考文献	177

第一篇 激光原理与技术实验

实验 1

He-Ne 激光器的组装调试 及其增益系数的测量

一、实验目的

- (1) 掌握 He-Ne 激光器的结构、特性和工作原理。
- (2) 掌握激光谐振腔理论。
- (3) 了解半内腔 He-Ne 激光器光路调整的原理和技巧。
- (4) 了解激光增益系数的测量方法。



二、实验内容

- (1) 组装调试半内腔 He-Ne 激光器, 调整光路, 使半内腔 He-Ne 激光器的谐振腔(全反镜和半反镜)满足激光起振条件, 产生激光。
- (2) 微调半内腔 He-Ne 激光器的半反镜的方位, 使激光输出最强。
- (3) 测量激光器在不同腔长时的最大输出功率, 从而测出激光输出与腔长的关系。
- (4) 测量半内腔 He-Ne 激光器的增益系数。

三、实验原理

(一) He-Ne(氦氖)激光器结构与工作原理

He-Ne 激光器是最早研究成功的气体激光器之一。He-Ne 激光以它的模式好、相干性好、结构简单、体积小、价格低廉、使用方便等优点, 使它在准直、定位、全息照相、测量等方面得到了广泛使用。He-Ne 激光器是原子气体激光器(此外还有分子气体激光器如二氧化碳 CO_2 激光器, 离子气体激光器如氩离子 Ar^+ 激光器)。

从 He-Ne 激光器结构上看, 主要由放电管、电极和光学谐振腔组成。主要有内腔式、半内腔式和外腔式激光器, 其结构示意图如图 1-1.1 所示。

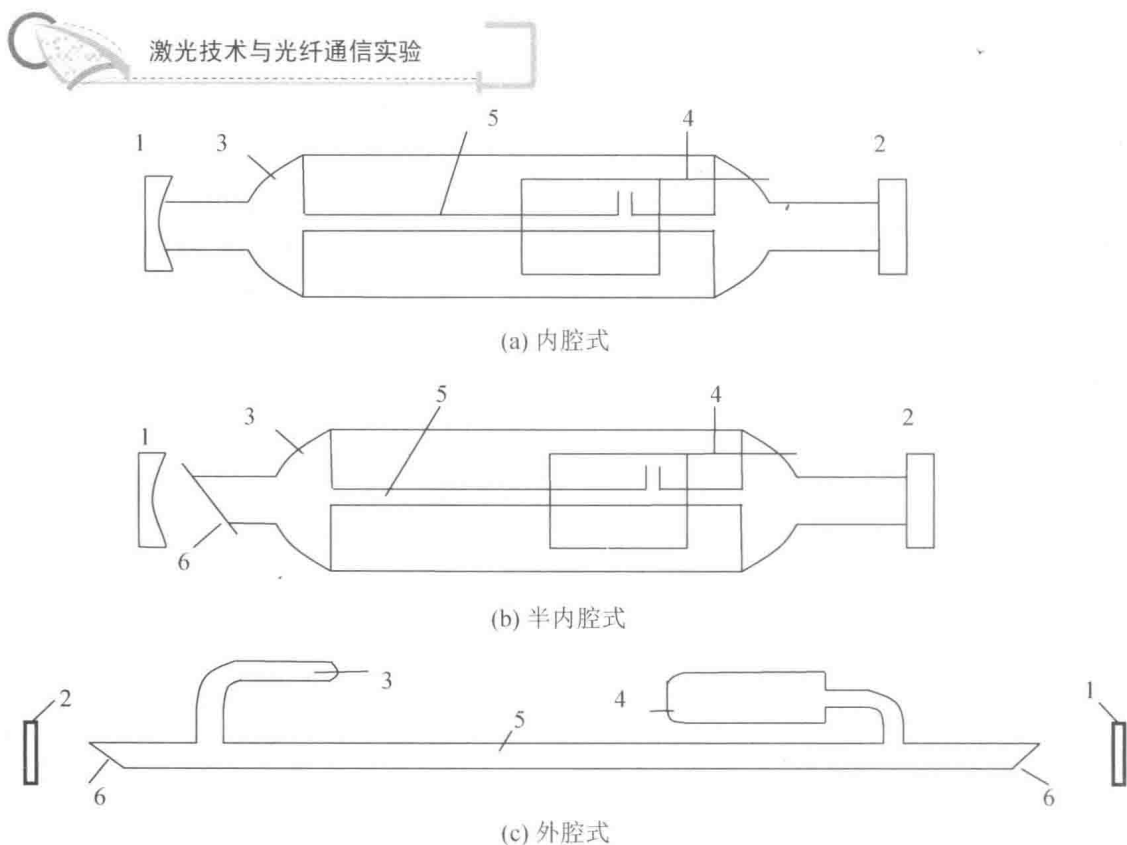


图 1-1.1 He-Ne 激光器结构示意图

1—全反镜；2—输出镜；3—阳极；4—阴极；5—放电管；6—布儒斯特窗

- (1) 内腔式：谐振腔的反射镜与放电管连在一起。
- (2) 半内腔式：谐振腔的一个反射镜与放电管连在一起，另一个反射镜与放电管分开。
- (3) 外腔式：谐振腔的反射镜与放电管分离。

本实验采用的是半内腔式 He-Ne 激光器。

外腔式和半内腔式激光器中，放电管的两端或一端用光学玻璃封接，窗片的法线与放电管管轴的夹角 θ 满足

$$\tan \theta = n_c \quad (1-1.1)$$

该窗片称为布儒斯特窗(n_c 为窗片的折射率)，它的作用除了对放电管工作气体起密封作用外，还使激光输出为线偏振光，并减少光束在腔内来回传播过程中在窗玻璃上发生的反射损失。

放电管通常用热膨胀系数小的玻璃做成，如石英玻璃，放电管中心的毛细管就是激光振荡的激活区，放电管的较大外套管主要是为了储气以延长激光的寿命，同时作为毛细管的支撑。电极分阳极和阴极，一般而言，阳极用钨棒制成，阴极为尺寸较大的圆筒，用电子发射率高而溅射率小的铝及其合金薄片制成，然后由钨棒引到管外。He-Ne 激光器的单程增益很低，谐振腔通常为平凹腔，凹面镜为全反镜，平面镜为输出镜，其反射率取 98.5%~99.5% 为宜。

He-Ne 激光器的工作气体为 He 气和 Ne 气。产生激光跃迁的是 Ne 气，在可见及红外区域可产生许多条谱线，其中最重要的是 0.6328 μm 、1.15 μm 和 3.39 μm 3 条谱线，它们所



对应的能级跃迁分别如下。

$$0.6328\mu\text{m} (3S_2 \rightarrow 2P_4)$$

$$1.15\mu\text{m} (2S_2 \rightarrow 2P_4)$$

$$3.39\mu\text{m} (3S_2 \rightarrow 3P_4)$$

He 气在 He-Ne 激光器中是辅助气体, 主要用以提高 Ne 原子的抽运效率。在一定的放电条件下, 阴极发散电子向阳极运动并被电场加速, 快速电子与基态的 He 原子发生非弹性碰撞, 使 He 原子被激发到激发态 2^1S_0 上而自身减速, 由于 He 原子的激发态能级 2^1S_0 与 Ne 原子的激发态能级 $3S$ 很接近, He 原子的激发态能级 2^3S_1 与 Ne 原子的激发态能级 $2S$ 也很接近, 因此处于激发的 He 原子通过碰撞将能量传给基态 Ne 原子, 使之达到激光上能级, 而 He 原子则回到基态, 这种激发方式是 Ne 原子获得粒子数反转的主要激发机制, 而 Ne 原子的直接电子碰撞激发只起很小的作用, 如图 1-1.2 所示。

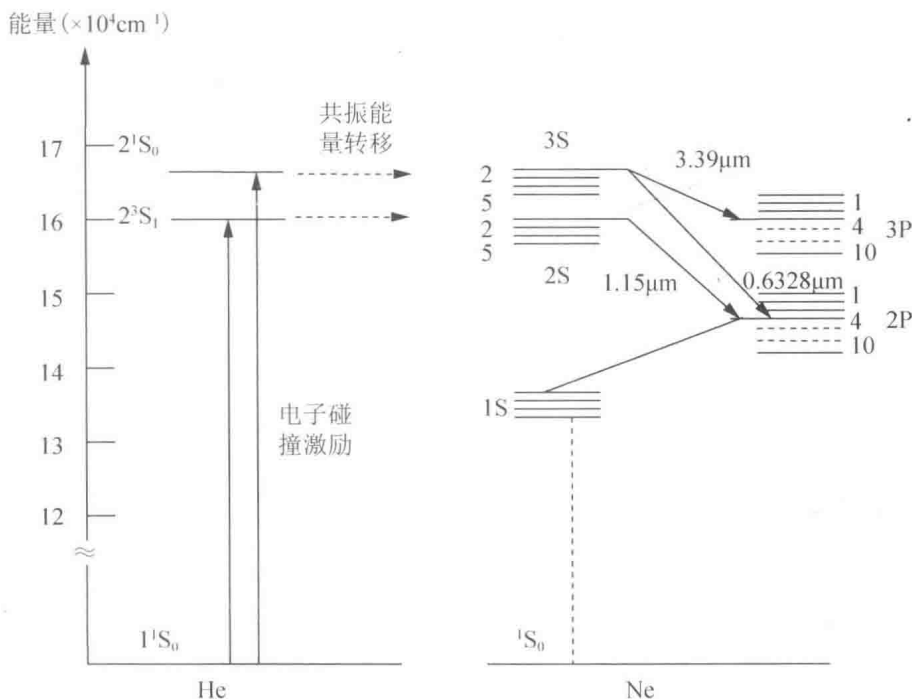


图 1-1.2 He 原子和 Ne 原子的能级图

要产生 He-Ne 激光, 除了要有工作物质以外, 还需要稳定的光学谐振腔, 即全反镜和半反镜的中心法线必须与毛细管重合。此外, 光学谐振腔的长度会影响激光输出功率的大小。

(二) 可变输出镜法测量 He-Ne 激光器增益系数的原理

在激光器中, 小信号增益系数 g_0 , 饱和光强 I_s , 腔内损耗 α 和输出率 T 等是决定着激光器工作特性的重要参数。所谓小信号增益系数 g_0 , 是指在腔内光强很弱的情况下, 光通过增益介质单位距离后光强增长的百分数。它的大小与激励强弱及介质性质有关。随着腔内光强的增大, 增益系数会逐渐减小, 这就是饱和效应。饱和效应使腔内光强最终达到一

个稳定值, 而该值与饱和光强 I_s 有直接的联系。腔内损耗 α 定义光在腔内往返一次的光学损耗率, 它与激光谐振腔的结构参数等有关。当激光器的工作参数确定以后, 输出反射镜应选取最佳输出率 T_{opt} , 此时有最大的激光输出。

理论分析表明: 当 He-Ne 激光管较长时, 纵模间隔的宽度会小于由于碰撞加宽等因素引起的均匀加宽宽度, 此时其增益饱和可以用均匀加宽方法近似处理, 其激光输出功率由式(1-1.2)描述:

$$P_{\text{out}} = P_s T \left(\frac{2g_0 L}{\alpha + T} - 1 \right) \quad (1-1.2)$$

式中: L 为激活介质的长度; T 为输出率; g_0 为中心频率的小信号增益系数; P_{out} 为激光输出功率; P_s 为饱和功率。

饱和光强 I_s 与饱和功率 P_s 的关系为

$$I_s = \frac{1.26P_s}{\pi\omega_0^2} \quad (1-1.3)$$

式中: ω_0 为高斯光束的束腰半径。

由式(1-1.2)可以看出, 当其他参数不变, 改变 T 时, P_{out} 会随之改变。当 T 为最佳输出率 T_{opt} 时, P_{out} 最大。由 $\frac{dP_{\text{out}}}{dT} = 0$ 得

$$T_{\text{opt}} = \sqrt{2g_0 L \alpha} - \alpha \quad (1-1.4)$$

1. 图解法求激光增益

可采用图解法求得腔内损耗、激光增益系数及饱和光强 I_s 等。由式(1-1.2)得

$$T^2 - \left(2g_0 L - \alpha - \frac{P_{\text{out}}}{P_s} \right) T + \frac{P_{\text{out}} \cdot \alpha}{P_s} = 0 \quad (1-1.5)$$

这是一个关于 T 的一元二次方程, 可解得两根 T_1 和 T_2 。由根与系数的关系可得

$$T_1 + T_2 = 2g_0 L - \alpha - \frac{P_{\text{out}}}{P_s} \quad (1-1.6)$$

$$T_1 \cdot T_2 = \frac{P_{\text{out}} \cdot \alpha}{P_s} \quad (1-1.7)$$

再由式(1-1.6)和式(1-1.7)连解, 得

$$T_1 \cdot T_2 + \alpha(T_1 + T_2) - \alpha(2g_0 L - \alpha) = 0 \quad (1-1.8a)$$

或

$$(T_1 + T_2) + \frac{1}{\alpha} T_1 \cdot T_2 - (2g_0 L - \alpha) = 0 \quad (1-1.8b)$$

可以看出, 式(1-1.8)是关于 $(T_1 + T_2)$ 与 $(T_1 \cdot T_2)$ 的直线方程。因此用 $(T_1 + T_2)$ 对 $(T_1 \cdot T_2)$ 作图(图 1-1.3), 从直线斜率可决定损耗 α , 由直线截距可以求出增益系数 g_0 。

如图 1-1.3 所示, 设 $(T_1 + T_2) \sim (T_1 \cdot T_2)$ 直线的横坐标、纵坐标截距分别是 A_1 、 B_1 , 则

$$\alpha = A_1 / B_1 \quad (1-1.9)$$



令 $T_1 \cdot T_2 = 0$, 得 $(T_1 + T_2)$ 轴上的截距为 $(2g_0L - \alpha) = B_1$, 则

$$g_0 = \frac{1}{2L} \left(B_1 + \frac{A_1}{B_1} \right) \quad (1-1.10)$$

从式(1-1.7)还可得到:

$$P_{\text{out}} = \left(\frac{P_s}{\alpha} \right) T_1 \cdot T_2 \quad (1-1.11)$$

用 P_{out} 对 $(T_1 \cdot T_2)$ 作图, 从直线斜率可得到饱和功率 P_s , 设 $P_{\text{out}} \sim (T_1 \cdot T_2)$ 直线的斜率为 K , 则

$$P_s = \alpha \cdot K = \frac{A_1}{B_1} K \quad (1-1.12)$$

再根据式(1-1.3)便可得到饱和光强 I_s 。

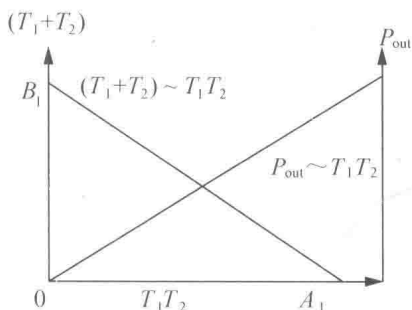


图 1-1.3 $(T_1 + T_2)$ 与 P_{out} 对 $(T_1 \cdot T_2)$ 的关系

2. 可变输出率法求激光增益

在半内腔式 He-Ne 激光器内放一玻璃平板分光片 PS, 如图 1-1.4 所示。该分光片与谐振腔轴线成某交角 ϕ 。在满足振荡条件时, 分光片两边有一定功率的激光输出。

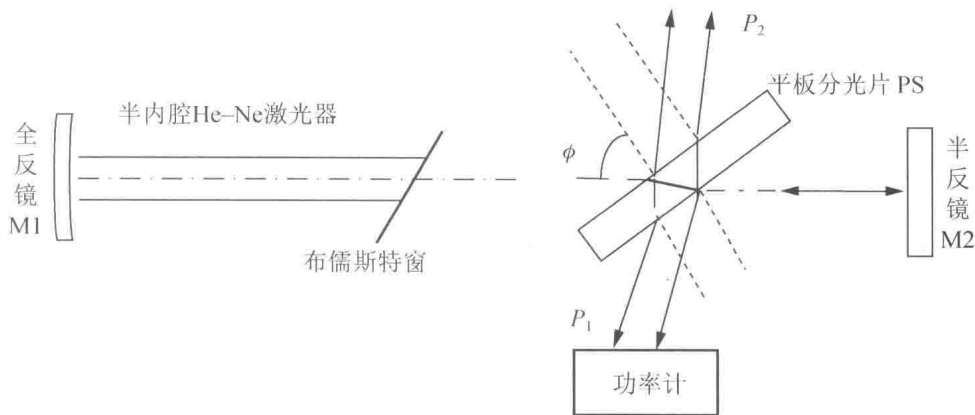


图 1-1.4 可变输出镜法测量 He-Ne 激光器增益系数的原理图

分光片单个表面对光的反射率 R_0 是入射角 ϕ 的函数。由菲涅尔公式得到

$$R_{\phi} = \frac{\tan^2 \left[\phi - \arcsin \left(\frac{\sin \phi}{n} \right) \right]}{\tan^2 \left[\phi + \arcsin \left(\frac{\sin \phi}{n} \right) \right]} \quad (1-1.13)$$

实验中所用的平板分光片材料为 K_1 玻璃，对激光的折射率 $n=1.52$ 。

不考虑分光片本身的吸收和散射，且在较大入射角的斜入情况下，平行平面玻璃两个面之间将产生激光的多次反射和透射，如图 1-1.5 所示，总反射系数为

$$\begin{aligned} R_{\text{Total}} &= R_{\phi} + R_{\phi}(1-R_{\phi})^2 + R_{\phi}^3(1-R_{\phi})^2 + R_{\phi}^5(1-R_{\phi})^2 + R_{\phi}^7(1-R_{\phi})^2 + \dots \\ &= 2R_{\phi}(1-R_{\phi} + R_{\phi}^2 - R_{\phi}^3 + R_{\phi}^4 + \dots) \\ &= \frac{2R_{\phi}}{1+R_{\phi}} \end{aligned} \quad (1-1.14)$$

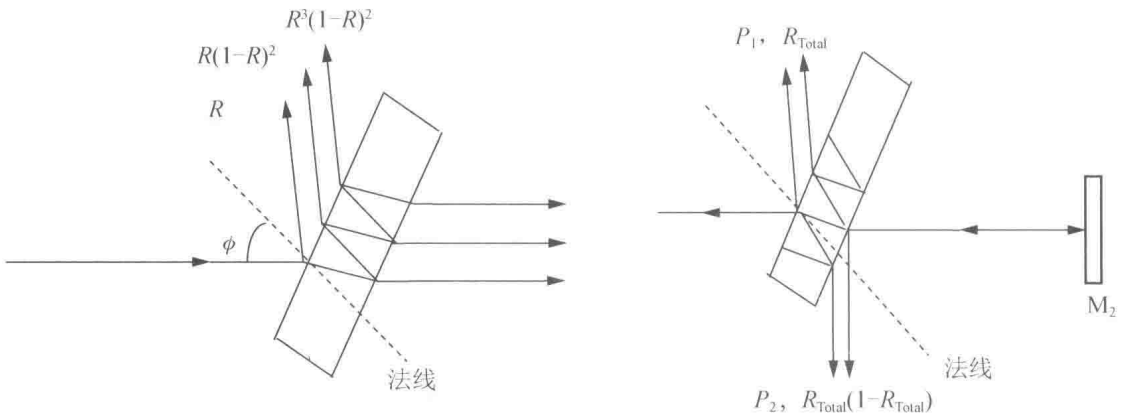


图 1-1.5 激光束在分光片两表面发生的多次反射与折射

激光在腔内往返一次，在分光片两表面反射的光强与入射光强之比称为分光片的输出率 T_{ϕ} ，即

$$\begin{aligned} T_{\phi} &= \left| R_{\text{Total}} + R_{\text{Total}}(1-R_{\text{Total}}) \right| \\ &= \frac{4R_{\phi}}{(1+R_{\phi})^2} \\ &= 1 - \left(\frac{1-R_{\phi}}{1+R_{\phi}} \right)^2 \end{aligned} \quad (1-1.15)$$

若旋转平板分光片，使入射角 ϕ 连续地变化，从而平板分光片对激光的输出率也连续变化，因此该分光片将起一个反射率可变的平面耦合输出镜的作用。

旋转分光片，改变输出率 T ，使腔内总损耗 $(\alpha + T)$ 增加。定义当激光功率刚刚变为 0 时的输出率为阈值输出率 T_g 。由式(1-1.2)得

$$T_g \cdot P_s \left(\frac{2g_0L}{\alpha + T_g} - 1 \right) = 0 \quad (1-1.16)$$



即

$$2g_0L = \alpha + T_g \quad (1-1.17)$$

联解式(1-1.4)和式(1-1.17), 得

$$\alpha = \frac{T_{\text{opt}}^2}{T_g - 2T_{\text{opt}}} \quad (1-1.18)$$

$$2g_0L = \frac{(T_g - T_{\text{opt}})^2}{T_g - 2T_{\text{opt}}} \quad (1-1.19)$$

旋转平面分光片, 即可在不同的入射条件下, 测量分光片的输出功率值, 记录输出功率最大时的入射角, 求出最佳输出率 T_{opt} 。再测得阈值输出率 T_g , 由式(1-1.19)可得到该激光器的增益 $2g_0L$ 。

四、实验仪器设备

光学实验导轨
激光管调整架
二维反射镜架

半内腔 He-Ne 激光管
小孔光阑
激光功率指示计

LD 激光准直光源
激光电源
分光片

五、实验步骤

1. 半内腔式 He-Ne 激光器的组装与调试

实验装置如图 1-1.6 所示, He-Ne 激光器的一个全反镜与毛细管、储气套等做成一体, 并将全反镜与毛细管调至垂直, 放置在激光器调整架上, 而另一个半反镜则被安装在一个精密二维调整架上, 可灵活移动。设备的调试主要是调整 He-Ne 激光器与半反镜的相对位置关系, 只有当谐振腔的两个反射镜与激光器毛细管接近垂直时, 激光才有可能产生。本实验采用半导体激光器 LD 作为基准, 用自准直的方法使激光谐振腔达到谐振条件, 产生 He-Ne 激光, 其调整过程如下。

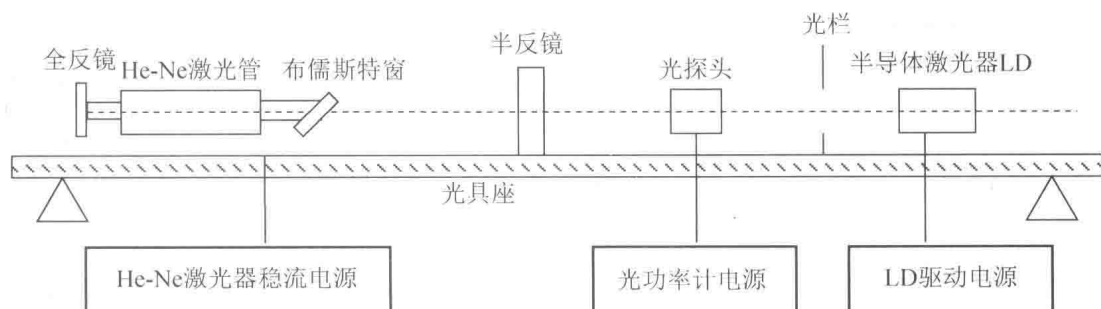


图 1-1.6 实验装置示意图

- (1) 打开半导体激光器电源, LD 发出激光。
- (2) 松开 He-Ne 激光管调整架上的调整螺钉, 使激光管处于自由悬挂状态。
- (3) 将小孔光阑靠近 He-Ne 激光器的布儒斯特角, 调整小孔光阑的高度, 使小孔与布



儒斯特角的中心等高。

(4) 将小孔光阑靠近 LD 激光器, 调整 LD 激光的高度和方向, 使小孔在 LD 光斑的中心。将小孔光阑在光具座上远离 LD 激光器, 调整 LD 的调整架上的两个精密螺钉, 改变 LD 激光束的俯仰角和方位角, 使小孔光阑在靠近 LD 和远离 LD 处时, 其小孔都处在 LD 光斑的中心。此时认为 LD 光平行于光具座, 此 LD 光作为基准光, 在实验过程中这个基准不再变动。

(5) 调整布儒斯特窗这端的二维调整架, 使 LD 光束进入毛细管, 这时应在小孔屏上看见从 He-Ne 激光器的另一个反射镜反射回来的光, 一般为圆环形。尽量使之明亮。

(6) 调整 He-Ne 激光器全反镜的二维调整架, 使小孔屏上的反射光的强度和形状随之变化, (配合调整布儒斯特窗这端的二维调整架) 尽量使这个环形光斑变小、变强并成为一亮点。

(7) 反复调整 He-Ne 激光器前后的两个二维调整架, 使反射到小孔屏的那个亮点尽可能对称、明亮并重合于小孔。此时可认为毛细管基本与 LD 激光束(基准光)相重合, 全反镜与 LD 激光束垂直。

(8) 将 He-Ne 激光器的半反镜连同二维精密调整架放置在 He-Ne 激光器前的滑块上(离布儒斯特窗 10cm 左右), 调整半反镜的高度使激光大致打在半反镜的中心位置上, 锁紧半反镜架。

(9) 反复调整半反镜的两个精密螺钉, 使小孔光阑靠近和远离半反镜时, 半反镜反射回小孔屏上的光斑落在小孔中心, 此时认为半反镜与基准光垂直。

(10) 用脱脂棉和丙酮擦拭布儒斯特窗。

(11) 打开 He-Ne 激光电源, 调整电流到 5.5mA 左右, 这时应有 He-Ne 激光输出(有一束很细的红光从布儒斯特窗打在半反镜上)。如果没有, 请仔细调整半反镜上的两个螺钉, 直到有 He-Ne 激光输出为止。

(12) 将功率计探头放入光路, 测量 He-Ne 激光器的输出功率, 反复仔细调整半反镜上的两个精密调整螺钉, 以使输出激光功率达到最大。

2. 腔长与激光功率、横模、束腰、发散角的关系

(1) 用功率指示计测量其最大功率。用显示屏在离输出镜端一定距离处(2~3m)观察光斑的大小和形状。光斑的大小反映了发散角的大小, 光斑的形状反映激光的横模。观察半反射镜上的光斑(束腰)大小。

(2) 松开半反射镜架滑块上的螺钉, 移动反射镜, 以改变谐振腔的腔长和腔型。重复 1 中(9)~(12)中的步骤, 重复 2 中的实验和观察, 以了解、掌握这些参数的变化规律。

3. 激光增益的测量

利用本实验装置和分光片旋转到阈值输出和最佳输出时所对应的两个输出率 T_{g} 和 T_{opt} , 计算出相关参数。

(1) 将半反射镜放在布儒斯特窗前 10cm 处, 调出激光, 使得激光功率输出最大, 记录此时光功率值 P_1 。

(2) 将分光片表面擦净, 并把放在旋转平台上的镜片架插入腔内光路, 仔细调整激光



谐振腔和分光片,使分光片转轴与激光束和布氏窗法线相垂直,仔细调整旋转台,使激光正好消失(呈忽明忽暗)。此时损耗与激光增益相等,即 $2g_0L = \alpha + T_g$ 。

(3) 连同滑块一起(即保持分光片相对滑块角度位置不变)取下分光片,放置在腔外光路中,测出此时透过分光片激光功率 P_2 。

根据 $T_g = (P_1 - P_2) / P_1$, 得到阈值输出率 T_g 。

(4) 在激光谐振腔内旋转平面分光片,测量分光片的输出功率值,记录输出功率最大时的入射角,此时为最佳输出率 T_{opt} ,连同滑块一起(即保持分光片相对滑块角度位置不变)取下分光片,放置在腔外光路中,测出此时透过分光片激光功率 P_3 。

根据 $T_{opt} = (P_1 - P_3) / P_1$, 得到最佳输出率 T_{opt} 。

再由式(1-1.19)算出激光增益 $2g_0L$ 。

六、注意事项

- (1) He-Ne 激光器的驱动电流不能超过允许的最大值(6mA),否则会损坏激光器和电源。
- (2) 绝对避免激光束直射人眼,只能从侧面观察激光散斑。
- (3) He-Ne 激光器阳极电压有几千伏,注意不要碰到电极。
- (4) 半反镜膜片是非常易损的光学元件,绝对避免用手触、摸、刮。
- (5) 布儒斯特窗可用酒精或丙酮擦拭。

七、实验数据与分析(表 1-1.1 和表 1-1.2)

表 1-1.1 不同腔长时测得的最大输出功率

腔长/mm					
输出功率/ μW					

表 1-1.2 激光增益测量数据(输出功率单位: μW)

P_1	P_2	T_g	P_3	T_{opt}	$2g_0L$

八、思考题

(1) 用实验中的方法测量激光器增益会带来哪方面的不准确性或者误差(从激光器的损耗来考虑)?若实验条件允许,可以用什么方法改进实验来进一步减小误差?

(2) 将分光片旋转至与激光束相垂直的位置上,并读出转台的角度读数。此时反射镜入射角 $\phi = 0$ 。注意观察在入射角等于或接近于零时激光强度有什么变化?思考一下为什么会发生这种变化?怎样确定分光片与激光束相垂直的确切位置?

(3) 讨论在垂直入射和近于垂直入射时所观察到的现象并解释之。

(4) 当旋转分光片改变入射角为布氏角 ϕ_b 时,为什么腔内振荡最强,而分光片反射输出接近于零?但又为什么不为零?什么情况下它等于零?

实验 2

He-Ne 激光器的模式分析

一、实验目的

- (1) 观察激光器的跳模现象，了解其影响因素。
- (2) 观察 He-Ne 激光器的输出频谱。
- (3) 掌握共焦球面干涉仪的原理及测量 He-Ne 激光器纵横模的方法。

二、实验内容

- (1) 测量并计算 F-P 扫描干涉仪的腔长、自由光谱区以及精细常数。
- (2) 用 F-P 扫描干涉仪对 He-Ne 激光器进行模式分析，测量纵模间距和横模间距。

三、实验原理

(一) He-Ne 激光器的模式结构

激光器谐振腔具有不同的谐振模式，即，具有不同的光场分布。激光模式可以分为纵模和横模，它们分别代表纵向光场分布和横向光场分布。通常用模指数 (m, n, q) 表示不同的模式， m 、 n 为横模指数，当 $m = n = 0$ 时为基横模，否则，为高阶横模。 q 为纵模指数。

激光器谐振腔具有无数个固有的、分立的谐振频率。由无源谐振腔理论得到 (m, n, q) 模式的频率为

$$\nu_{mnq} = \frac{c}{2\mu L} \left\{ q + \frac{1}{\pi} (m + n + 1) \arccos \sqrt{\left(1 - \frac{L}{R_1}\right) \left(1 - \frac{L}{R_2}\right)} \right\} \quad (1-2.1)$$

式中： μ 为介质折射率； c 为真空光速； L 为腔长； R_1 和 R_2 分别为谐振腔两反射镜的曲率半径。不同阶横模 (m, n 不同) 对应有不同的横向 (垂直于谐振腔轴线方向) 光强和频率分布，从光斑图样可以了解不同阶横模之间强度分布的差异，如图 1-2.1 所示，但不同阶横模所对应的振荡频率亦有差异，正是利用它来分析横模结构。

不同纵模 (即 q 值不同)，虽对应不同的纵向 (沿腔轴线方向) 光强分布，但由于不同纵模光强分布差异极小，从光斑图样无法分辨，只能根据不同纵模对应不同频率来分析激光束的纵模结构。

由式(1-2.1)可知，当 m, n 相同时，即对于同一阶横模，相邻纵模间隔是等间距的，其频率差为

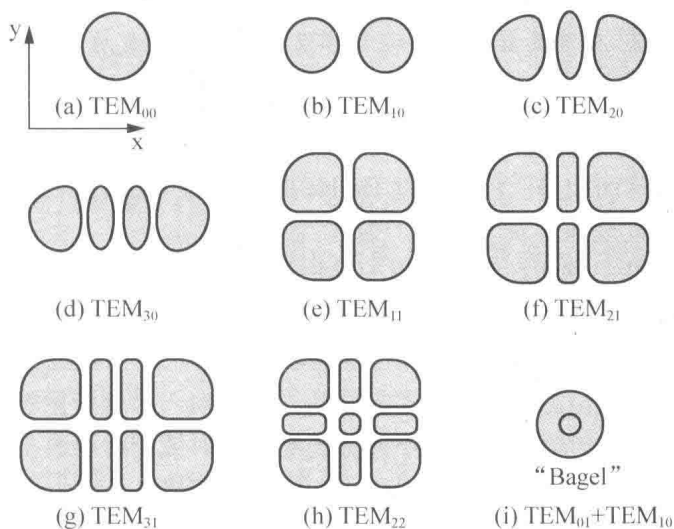


图 1-2.1 横模光斑图

$$\nu_{mn(q+1)} - \nu_{mnq} = \frac{c}{2\mu L} \quad (1-2.2)$$

对于纵模阶次相同的模式，横模模式阶次越高，谐振频率越高，不同阶横模间的频率间隔为

$$\nu_{m'n'q} - \nu_{mnq} = \frac{c}{2\mu L} \left\{ (\Delta m + \Delta n) \frac{1}{\pi} \arccos \left[\left(1 - \frac{L}{R_1} \right) \left(1 - \frac{L}{R_2} \right) \right] \right\} \quad (1-2.3)$$

式中： $\Delta m = m' - m$ ， $\Delta n = n' - n$ 。

在激光器内，由于谐振腔的作用，使受激辐射光在腔内来回反射，多次通过激活介质而不断加强。如果单程增益大于单程损耗，即满足激光振荡的阈值条件时，则有稳定的激光输出。由于各种因素可能使谱线加宽，使激光介质的增益系数有一频率分布，如图 1-2.2(a) 所示，该曲线称为增益曲线。只有频率落在工作物质增益曲线范围内且满足激光器阈值条件的那些模式才能形成激光，如图 1-2.2(b) 所示。如果不采取选模措施，一般情况下，He-Ne 激光器以多模方式工作。例如 300mm 的 He-Ne 激光器的输出光中可以出现 3 个频率(ν_{q-1} , ν_q , ν_{q+1})。

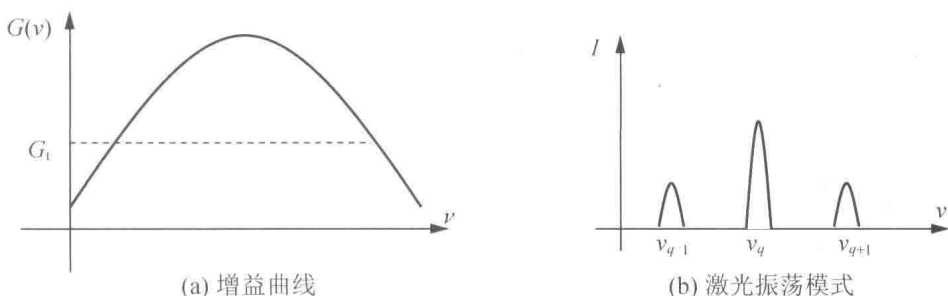


图 1-2.2 He-Ne 激光器的振荡模式示意图

(二) 用 F-P 法布里-珀罗共焦球面扫描干涉仪测量激光模式原理

由谐振腔理论知,不同模式(横模或纵模)各自有不同的频率谱,因此可通过分析激光器的频谱结构来判断激光器的振荡模式。

本实验采用共焦球面扫描干涉仪测量 He-Ne 激光器的频谱,但是只能测出激光器各谱线的频率差,并不能直接测出 m 、 n 、 q 的值。

F-P 法布里-珀罗共焦球面扫描干涉仪的结构如图 1-2.3 所示。它主要由两片曲率半径相等的反射镜、一个压电陶瓷和一台锯齿波驱动器组成。这两片反射镜相对放置,间距 L 等于反射镜的半径 R ,从而形成共焦谐振球面腔,其中一块反射镜固定不动,另一块反射镜固定在压电陶瓷上。被检测光束沿着谐振腔的光轴方向入射到谐振腔内,在此谐振腔内往返传播多次,每次被反射时,都有一小部分光经过出射镜透射而逸出谐振腔,多次逸出的光发生多光干涉,只有波长满足 $k\lambda = 4\mu L$ (k 为整数)的激光从谐振腔出射时,多束光才能发生相长干涉,即透过此谐振腔,在光电二极管上形成大的电信号,送到示波器的 y 轴输入端,改变加在压电陶瓷上的电压,可改变压电陶瓷的长度(约波长量级),改变谐振腔的腔长,从而使得被测光束中的每一个不同频率的光先后透过干涉仪,在示波器上显示的波形就代表被测光束的光谱。如果用锯齿波电压信号加在压电陶瓷上,则干涉仪的腔长将在原腔长 L 的基础上做连续的周期性变化,透射光波长也将产生相应的连续变化,在示波器上周期性地显示频谱的相关波形。

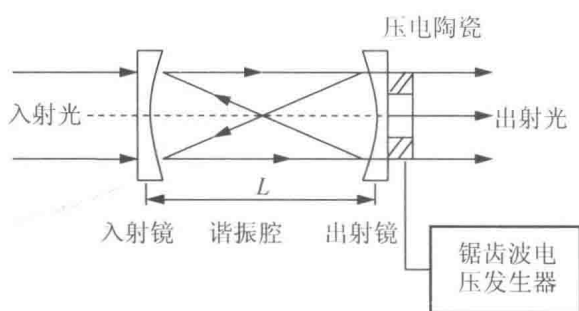


图 1-2.3 F-P 共焦球面扫描干涉仪

F-P 共焦球面扫描干涉仪有以下性能指标。

1. 自由光谱区 $\Delta\nu_F$

由 $4\mu L = k\lambda$ (介质是空气, $\mu=1$) 可知,当腔长变化 $\lambda/4$ 时,波长 λ 的模可再次透过干涉仪。通常把腔长改变 $\lambda/4$ 所对应的频率变化量 $\Delta\nu_F = c/4L$ ($\Delta\lambda = \lambda^2/4L$) 称为干涉仪的自由光谱区。

或者说,它表示扫描干涉仪的腔长变化 $1/4$ 相邻透射峰的波长差时所对应的透射波长或频率的变化量。它决定了扫描干涉仪能够测量的不发生干涉级次重叠的最大频率差。

$$\Delta\nu_F = \frac{c}{4\mu L} \quad \text{或} \quad \Delta\lambda_F = \frac{\lambda^2}{4\mu L} \quad (1-2.4)$$

注:本实验中,扫描干涉仪自由光谱区范围已标定: $\Delta\nu_F = 3\text{GHz}$ 。