

绪 论

光电子技术是由光子技术和电子技术相互融合而成的新技术,涉及光电显示、光电存储、光电探测与通信等领域,是光电信息产业的关键技术。光电子技术主要围绕光电信号的产生、传输、处理和接收,涵盖了新材料、新型微器件、微加工、微机电、封装和系统集成等一系列技术。光电子技术科学是光电信息产业的支柱与基础,涉及光电子学、光学、电子学、计算机技术等前沿学科理论,是多学科相互渗透、相互交叉而形成的高新技术学科。

光电子技术学科具有应用性强、交叉性强的特点。每一个光电子技术的应用都离不开大量的实验,光电子技术实验是培养光电子技术人才的必要环节。无论是光电子技术的发现,还是光电子技术的应用都离不开验证实验和应用开发实验。光电子技术实验能够加深学生对理论知识的理解巩固,同时又能培养学生的实践动手能力。

0.1 课程的目的和任务

光电子技术实验是对学生进行专业科学实验的实践能力的培养,在前期普通物理实验的基础上,结合专业特色和培养方向开设的专业实验,既体现专业共性的典型实验,又体现专业特色。光电子技术实验是光电信息科学与工程专业学生专业实验技能训练的一门专业实验课程,它是一门必修的实践操作专业实验课程,培养学生的实践能力和动手操作能力,为后续深造、技术开发、科学研究奠定实践基础。光电子技术实验的课程任务是:

- (1) 通过对光电子技术的实验验证及应用测量,培养学生的观察问题、分析问题和解决实际问题的能力,巩固对光电子技术基本理论知识的理解,提高专业知识和专业技能。
- (2) 使学生熟练掌握常用光电子器件及仪器的操作方法。
- (3) 使学生理解实验方案的设计思想,掌握仪器操作、处理数据、分析实验结果的能力。
- (4) 培养学生科学、严谨、实事求是的工作态度。

0.2 课程内容和教学环节

本书以光电系统构成为主线,依次讨论光电系统常用光源实验、光电探测器件实验、光纤传感与通信实验、光调制实验和光谱测量实验。全书共5章:绪论部分主要概述本课程的目的、任务、主要内容和教学环节。第1章是光电系统常见光源实验,从不同角度,以精炼的内容涵盖各种光电系统光源,包括相干光源和非相干光源。其中,相干光源介绍固体激光器、气体激光器和光纤激光器,非相干光源介绍光纤光源和LED光源,这五种光源在光电系统中具有广泛的应用。第2章是光电探测器件实验,主要包括光电导器件、结型器件、真空器件和红外探测器件。光电导器件主要为光敏电阻的特性测量实验,结型器件主要包括光电二极管、光电三极管、太阳能光伏实验、象限探测器实验、PSD位置探测实验、光电耦合实验,真空器件主要为光电倍增管实验,红外探测实验主要为光电报警及语音提示实验。第3

章是光纤通信和光纤传感实验，光纤传感实验包括光纤技术基础实验、单模光纤色散测量实验、光纤无源器件测量实验、光纤强度传感综合实验、光纤光栅波长传感实验以及光纤相位传感原理实验，光纤通信实验主要为铒光纤放大器原理实验、数字信号光纤传输实验、模拟信号光纤传输实验。第4章是光调制实验，主要包括磁光调制实验、电光调制实验、声光调制实验、相位延迟实验、磁光共振实验和椭圆偏振实验。第5章为光谱测量实验，主要包括光源光谱综合测量实验、激光拉曼光谱测量实验、光纤光栅光谱测量实验、光栅单色光谱测量实验、开放式光栅摄谱仪实验和红外光分度计测量实验。

本书的读者主要为物理学、电子科学与技术等相关本科专业的学生。本书在内容上注重相关专业的共性实验项目，其次，既体现光电子技术实验的基本实验内容，又体现特色实验项目，尽量突出教材的普遍性、稳定性和新颖性。全书包含38个实验项目，根据课程特点和专业特色，可选择适当的学时、项目开展光电子技术实验。这些实验中既包含典型的光电子技术实验，又融合了部分科研成果，建议结合学时需要和专业理论课程内容，选配相关实验项目。

光电子技术实验的教学环节包括课前预习、实验操作和撰写实验报告三个环节。

课前认真预习实验教材和参考资料，掌握实验理论基础、实验设计思想、主要仪器操作方法、实验主要步骤和注意事项等，撰写预习报告。

实验操作要求学生进入实验室后，先认真观察实验仪器系统构成，了解仪器的操作方法、旋钮功能，并认真学习注意事项的内容，做到注意事项提前注意。实验过程中，要遵守实验室的规章制度，按照实验老师的提示和要求开展实验，并思考实验思想、设计方案、测量方法等问题。做到带着问题去实验，并大胆提出自己的想法，改进意见。实验完成后，将仪器复位归整后，经老师同意后方能离开实验室。

实验报告是对整个实验的总结和再思考。通过撰写实验报告，可以培养学生对于实验材料的撰写能力、总结能力和解决问题的能力。特别是实验结论的撰写能够体现学生对实验理解程度，体现学生的综合水平。实验报告要求实验目的明确、原理清楚、步骤清晰、图表正确，结论和结果评价能够正确反映实验效果。

光电系统常见光源实验

光电系统是使用电子学的方法对光学信息进行处理与控制的系统，它是一种用于接收来自目标反射或自身辐射的光辐射，通过变换、处理、控制等环节，获得所需要的信息，并进行必要处理的光电装置。它的基本功能就是将接收到的光信号转换为电信号，并实现测量、控制的目的。光源作为光电系统中重要的组成单元，对光电系统的可靠性和稳定性起着举足轻重的作用。

光电系统常见光源包括热辐射光源、气体放电光源、激光器和发光二极管。热辐射光源是由于内部原子、分子的热运动而产生辐射的光源，辐射光谱是连续光谱。理想的热辐射源是绝对黑体，一般为理想模型。常见的热辐射源有白炽灯与卤钨灯。气体放电光源的发光机理是金属离子或惰性气体在阴阳极构成的电场下加速度、碰撞产生辐射发光，具有发光效率高、电极牢固紧凑、寿命长和光谱可调等优点。激光器是基于谐振腔、增益物质和泵浦构成的特殊结构，实现受激辐射光放大的相干光，具有高亮度、高方向性、高单色性和高相干性。激光器根据工作物质分为气体激光器、固体激光器、染料激光器，根据腔的位置形式分为内腔式和外腔式激光器，根据腔的形式又分为半导体激光器和光纤激光器，其中光纤激光器又分为诸多种类。发光二极管简称为LED，是一种常用的发光器件，通过电子与空穴复合释放能量发光，它在照明领域应用广泛。发光二极管可高效地将电能转化为光能，在诸多领域具有重要的应用，如照明领域、平板显示领域、医疗器件领域等。光源的特性参数一般包括辐射效率、发光效率、光谱功率、空间光强分布、光源的颜色和光源的色温等。

光电系统常见光源从时间相干性来划分，主要分为相干光源和非相干光源。非相干光源种类众多，应用广泛，其中典型的有发光二极管和光纤荧光光源；相干光源主要包括各种激光光源，其中典型的有氦氖激光器、半导体固体激光器和光纤激光器，在医疗、工业加工、军事领域具有重要的应用。光纤荧光光源和光纤激光器在光传感和光通信领域具有不可替代的地位。

本章针对光电系统常见光源，并结合光电子技术理论背景和实验教学实际情况，讨论光电检测系统中常见光源，主要内容包括固体激光器原理与技术实验、气体激光器原理与技术实验、光纤激光器原理与技术实验、光纤宽带荧光光源特性实验、发光二极管原理与特性实验。激光器实验针对激光形成机理、激光器结构、激光器的搭建方法等几个重点内容来开展实验，目的是巩固激光原理基本知识，锻炼实验操作能力。光纤光源实验主要针对宽带荧光光纤光源和光纤激光光源内容开展实验，加强对光纤技术及应用的深入理解，并培养学生的动手能力，既能巩固相关知识的基本理论，又能提高和拓宽光纤技术及其应用的知识面，同

时也能激发学生的学习兴趣。

实验 1 固体激光器原理与技术实验

【实验背景】

半导体激光器又称激光二极管 (Laser Diode , LD)。20 世纪 60 年代初期的半导体激光器是同质结型激光器, 是一种只能以脉冲形式工作的半导体激光器。随着技术的不断发展, 研究人员又提出异质结构半导体激光器。从 20 世纪 70 年代末开始, 半导体激光器的研究集中在两个方向, 一个是信息型激光器, 以信息传递为目的, 另一个是功率型激光器, 以提高光功率为目的。以 LD 作为泵浦源的固态激光技术 (Diode Pump Solid State Laser , DPSL) 在这两大研究方向均有广泛的应用。固体激光半导体泵浦激光器与传统的固体激光器不同之处在于泵浦不同, 传统固体激光器的泵浦是利用闪光灯来实现对激光晶体进行泵浦, 而半导体泵浦激光器是以 LD 对激光晶体进行泵浦的固体激光器, 具有效率高、寿命长、光束质量高、稳定性好和结构紧凑等优点, 在光通信、大气研究、环境科学、激光雷达、医疗机械、光学图像处理、激光打印、激光加工、激光武器等高科技领域有广泛的应用前景。本实验主要讨论半导体泵浦固体激光器的工作原理、调 Q 技术与原理、倍频激光技术与原理, 熟悉搭建谐振腔和调试输出激光的方法。

【实验目的】

- (1) 掌握半导体泵浦固体激光器的工作原理和调试方法。
- (2) 掌握固体激光器被动调 Q 的工作原理, 测量调 Q 脉冲的参数。
- (3) 掌握固体激光器倍频原理和调试方法。

【实验原理】

1. 半导体泵浦源

由于 LD 技术的快速发展, LD 的功率和效率得以大幅度提高, 也极大地促进了 DPSL 技术的发展。与传统闪光灯泵浦的固体激光器相比, DPSL 的效率大大提高, 体积大大减小。由于泵浦源 LD 的光束发散角较大, 为使其聚焦在增益介质上, 必须对泵浦光束进行光束变换和耦合。泵浦耦合方式主要有端面泵浦和侧面泵浦两种。端面泵浦方式适用于中小功率固体激光器, 具有体积小、结构简单、空间模式匹配好等优点。侧面泵浦方式适用于大功率激光器。端面泵浦耦合通常有直接耦合和间接耦合两种方式, 如图 1-1 所示。图 1-1 (a) 为直接耦合, 图 1-1 (b) (c) (d) 均为间接耦合, 间接耦合可采用组合透镜、自聚焦透镜和光纤耦合等方式。直接耦合是将半导体激光器的发光面紧贴增益介质, 使泵浦光束在尚未发散

之前便被增益介质吸收，泵浦源和增益介质之间无光学系统。直接耦合方式的优点是结构紧凑，缺点是容易对 LD 造成损伤，且实现比较困难。间接耦合是先将半导体激光器输出的光束进行准直和整形，然后再进行端面泵浦。本实验采用端面间接耦合方式，先用光纤柱透镜对激光进行快轴准直、压缩发散角，然后利用组合透镜对泵浦光束进行整形变换，为了提高耦合效率，各透镜表面均镀有增透膜。本实验采用的间接耦合系统如图 1-2 所示。

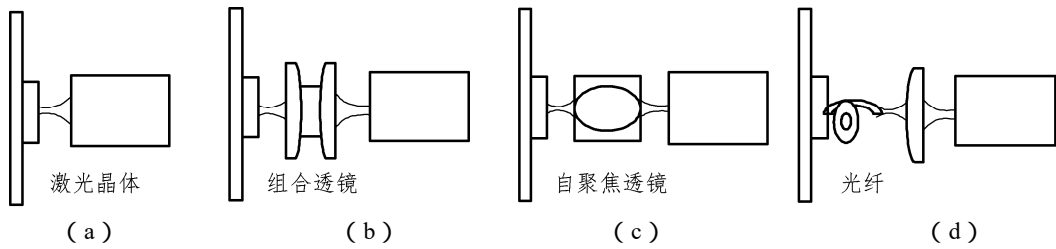


图 1-1 LD 固体激光器的常用耦合方式示意图

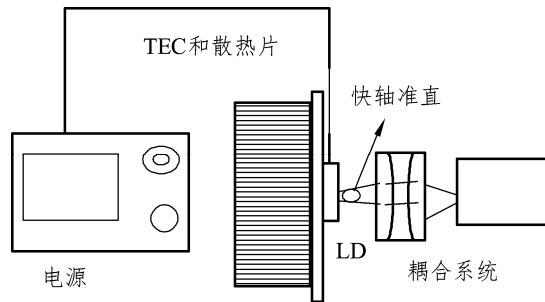


图 1-2 间接耦合系统示意图

2. 激光晶体

激光晶体作为增益介质，是固体激光半导体泵浦器的工作物质，影响激光器的输出性能。要获得高效率的激光输出，选择合适的激光晶体尤为重要。目前作为增益介质用于产生连续波和脉冲激光的晶体达上百种，以钕离子 (Nd^{3+}) 作为激活粒子的钕激光器是使用最广泛的激光器。其中，掺钕钇铝石榴石 ($\text{Nd}:\text{YAG}$) 具有量子效率高、受激辐射截面大、光学质量好、热导率高、容易生长等优点，是一种较为理想激光晶体。掺钕钇铝石榴石晶体的吸收光谱在 807.5 nm 处有一个强吸收峰，如果选择波长与之匹配的 LD 作为泵浦源，就可获得高的输出功率和泵浦效率，可以实现光谱匹配。但是，LD 的输出激光波长受温度的影响，温度变化时，输出激光波长会产生漂移，输出功率也会发生变化。因此，为了获得稳定的波长，LD 电源需要具备温控功能，设置合适的温度，使 LD 工作时的波长与掺钕钇铝石榴石的吸收峰匹配。除此之外，选择激光晶体时还要考虑掺杂浓度、上能级寿命、热导率、发射截面、吸收截面、吸收带宽等多种因素。

3. 端面泵浦固体激光器的模式匹配技术

平凹腔容易形成稳定的输出模，同时具有较高的光光转换效率，但在设计时必须解决模式匹配问题，典型的平凹腔型结构如图 1-3 所示。激光晶体的一面镀泵浦光增透膜和输出激光全反膜，作为输入镜。凹面镜作为输出镜，具有确定的透过率。

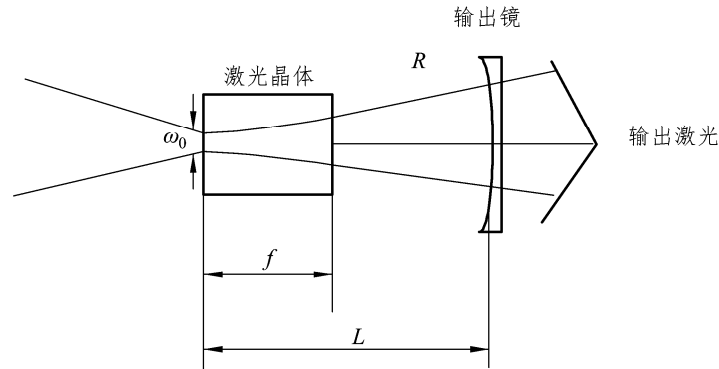


图 1-3 端面泵浦的激光谐振腔结构

根据激光原理可知，平凹腔的 g 参数分别表示为

$$g_1 = 1 - \frac{L}{R_1} = 1 \quad g_2 = 1 - \frac{L}{R_2} \quad (1-1)$$

依据激光腔的稳定性条件知， $0 < g_1 g_2 < 1$ 时腔为稳定腔，故当 $L < R_2$ 时腔稳定，同时容易算出其束腰位置在晶体的输入平面上，该处的光斑尺寸为

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{[L(R_2 - L)]^{\frac{1}{2}} \lambda}{\pi}} \quad (1-2)$$

实验中， R 为平面， $R_2 = 200 \text{ mm}$ ， $L = 80 \text{ mm}$ ， $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ，则由式 (1-2) 可以算出 $\omega_0 = 0.182 \text{ } \mu\text{m}$ ，使泵浦光在激光晶体输入面上的光斑半径小于这个理论值，就可使泵浦光与基模相匹配，从而获得基模输出。

4. 半导体泵浦固体激光器的被动调 Q 技术

目前常用的调 Q 方法有电光调 Q 、声光调 Q 和被动式可饱和吸收调 Q 。电光调 Q 调制是基于泡克尔斯效应实现的，光经过偏振片后成为线偏振光，如果在电光晶体上外加 $\lambda/4$ 电压，由于泡克尔斯效应，使往返通过晶体的线偏振光的振动方向改变 $\pi/2$ 。如果电光晶体上未加电压，往返通过晶体的线偏振光的振动方向不变。所以当晶体上有电压时，光束不能在谐振腔中通过，谐振腔处于低 Q 状态。由于外界激励作用，上能级粒子数迅速增加。当晶体上的电压突然除去时，光束可自由通过谐振腔，此时谐振腔处于高 Q 值状态，从而产生激光巨脉冲。电光调 Q 的速率快，可以在 10^{-8} s 时间内完成一次开关，使激光的峰值功率达到千兆瓦量级。声光调 Q 技术是利用声光器件的布拉格衍射原理实现调 Q ，当声光器件工作时产生很高的衍射损耗，腔内有很低的 Q 值， Q 开关处于关的状态，在某个特定时间，撤去超声，光速则顺利通过声光介质，此时 Q 开关处于开的状态。 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 是可饱和吸收调 Q 的一种材料，具有稳定性高、可靠性高、寿命长和抗损伤的优点。它是一种理想的被动 Q 开关材料，可获得小脉宽、大峰值的巨脉冲激光。当 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 作为激光增益介质时，它的透过率会随着腔内的光强而改变。在激光振荡的初始阶段， $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 的初始透过率较低，随着泵浦作用增益介质的反转粒子数不断增加，当谐振腔增益等于谐振腔损耗时，反转粒子数达到最大值，此时可饱和吸收体的透过率仍为初始值。随着泵浦的进一步作用，腔内光子数不断

增加，可饱和吸收体的透过率也逐渐变大，并最终达到饱和。此时， $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的透过率突然增大，光子数密度迅速增加，激光振荡形成。腔内光子数密度达到最大值时，激光为最大输出，此后，由于反转粒子的减少，光子数密度也开始减小，则可饱和吸收体 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的透过率也开始降低。当光子数密度降到初始值时， $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的透过率也恢复到初始值，调 Q 脉冲结束。

5. 半导体泵浦固体激光器的倍频技术

激光倍频技术也称为二次谐波技术，是最先在实验上发现的非线性光学效应。1961年由 Franken 等人进行的红宝石激光倍频实验，是非线性光学实验和理论研究的开端。只有特定偏振方向的线偏振光，以某一特定角度入射晶体时，才能获得良好的倍频效果，即满足相位匹配条件实现基频光和倍频光的折射率相等，从而实现良好的倍频效果；而以其他角度入射时，则倍频效果很差，甚至不产生倍频。入射光以一定角度入射晶体，通过晶体的双折射，由折射率的变化来补偿正常色散而实现相位匹配，这称为角度相位匹配。角度相位匹配可分为两类。第一类是入射同一种线偏振光，负单轴晶体将两个 o 光光子转变为一个倍频的 e 光光子。第二类是入射光中同时含有 o 光和 e 光两种线偏振光，负单轴晶体将两个不同的光子变为倍频的 e 光光子，正单轴晶体变为一个倍频的 o 光光子。由于光波电磁场与非磁性透明电介质相互作用时，光波电场会出现极化现象，且光波电磁场比较强时，会产生非线性效应，因此，当强激光产生后，激光与晶体作用时会表现出高阶非线性效应。本实验中的倍频就是通过倍频晶体实现对 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 输出 1064 nm 红外光倍频成 532 nm 绿光。 KTP 晶体在 1064 nm 光附近有高的有效非线性系数，导热性良好，非常适合用于 YAG 激光的倍频。倍频技术通常有腔内倍频和腔外倍频两种，腔内倍频是指将倍频晶体放置在激光谐振腔之内，适合于连续运转的固体激光器；腔外倍频是指将倍频晶体放置在激光谐振腔之外，适合于脉冲运转的固体激光器。

【实验系统与装置】

本实验仪器主要包括激光器实验箱、 100M 数字示波器、高速光电探测器、激光晶体、倍频晶体、耦合棱镜、输出腔镜（透过率分别为 3% 和 8% ）、五维调整架、防护眼镜、 650 nm 指示激光器和红外显示卡片。

【实验内容与步骤】

本实验内容主要包括半导体泵浦光源的 $I-P$ 曲线测量、 1064 nm 固体激光谐振腔搭建与调整、 1064 nm 固体激光模式观测及调整、 1064 nm 固体激光输出功率和转换效率测量、固体激光倍频效应观察和固体激光被动调 Q 测量。

1. 808 nm 半导体泵浦光源的 $I-P$ 曲线测量

将 808 nm 半导体泵浦光源固定于谐振腔光路导轨座的右端，将功率计探头放置于其前端出光口处并靠近，调节其工作电流从零到最大，依次记录对应的电源电流示数 I 和功率计读取值 P ，填入表 1-1，做出泵浦电流和功率的 $I-P$ 曲线，并分析泵浦阈值。

表 1-1 泵浦电流与泵浦功率的关系数据记录表

泵浦电流/mA	泵浦功率/mW	泵浦电流/mA	泵浦功率/mW

2. 1 064 nm 固体激光谐振腔搭建与调整

(1) 将 808 nm 半导体泵浦光源固定于谐振腔光路导轨座的右端，650 nm 指示激光器及调节架固定于导轨最左侧，调节二维平移旋钮，使 650 nm 指示激光束居中，调节二维俯仰旋钮，使 650 nm 指示激光束照射到右端泵浦光源的中心。

(2) 将输入耦合镜组及调节架放置于半导体泵浦光源前，并慢慢靠近，调节二维平移旋钮，使指示激光束照射到耦合镜组的中心，再调节二维俯仰旋钮，使指示激光束经耦合镜组中心，并将反射回的红色光点移回到指示激光器出光口内。

(3) 将激光晶体及调节架放置于耦合镜组前，调节激光晶体的前后位置，使 808 nm 泵浦光源的汇聚点能够落于激光晶体的前后中心，再调节晶体的二维平移旋钮，使 650 nm 指示激光束照射到晶体的中心，最后调节二维俯仰旋钮，使反射的指示激光点返回出光口内。

(4) 将 1 064 nm 的激光输出镜及调节架放置于激光晶体前，输出镜的镀膜面朝向激光晶体，中间预留出 50 mm 左右的距离，以备后面实验安装其他器件。

(5) 调节输出镜的二维俯仰旋钮，使其反射的 650 nm 指示激光束光点返回到指示激光出光口内。

(6) 将半导体泵浦光源的电源旋钮调节到 800 mA，取出红外显示卡片放置到输出镜的前端并轻微晃动，检查是否可以看到 1 064 nm 的激光点，如果没有，微调输出镜的二维俯仰旋钮，使 650 nm 指示激光在其出光口附近微扫描，直至 1 064 nm 激光出光，关闭指示激光。

3. 1 064 nm 固体激光模式观测及调整

1 064 nm 激光出光后，在红外显示卡上仔细观察光斑形状，根据光斑分瓣形状及分斑方向讨论激光的模式。缓慢调整激光输出镜的俯仰旋钮，仔细观察模式的变化，松开激光输出镜最下端的导轨滑块的旋钮，调整输出镜沿导轨方向的位置，观察激光谐振腔长改变对激光模式的影响。更换不同透过率的输出镜对比分析激光模式的变化。

4. 1 064 nm 固体激光输出功率和转换效率测量

选择一种激光输出镜，固定腔长，调节出光，通过激光功率计来监测激光功率。按照功率计监测示数最大为目标，依次微调输出镜二维俯仰旋钮，激光晶体四维调整旋钮，耦合镜组四维调整旋钮，激光晶体沿导轨方向位置微调，以达到功率计示数最高，确保激光谐振腔处于相对最佳的输出状态。测量激光输出功率与泵浦光源的关系数据，填入表 1-2。

表 1-2 泵浦电流、泵浦功率与输出功率的关系数据记录表

输出镜透过率：		腔长：		mm
序号	泵浦电流/mA	泵浦功率/mW	输出功率/mW	
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

5. 固体激光倍频效应观察研究

在调整好的 1 064 nm 固体激光谐振腔内插入倍频晶体及五维调整架，通过微调平移、俯仰、面内旋转调整架，观察出射 532 nm 绿光亮度的变化，直至最亮。

4. 固体激光被动调 Q 测量

(1) 将倍频实验中的倍频晶体更换为被动调 Q 晶体，将半导体泵浦光源的电源旋钮调节到 1 mA 左右，微调晶体平移、俯仰四维旋钮，直至在激光输出镜前的红外显示卡片上看到 1 064 nm 的激光点。测量 1 064 nm 固体激光的调 Q 输出功率与泵浦光源、基础激光的关系数据，填入表 1-3。

表 1-3 泵浦电流、泵浦功率与输出功率、调 Q 输出功率的关系数据记录表

输出镜透过率：		腔长：		mm
序号	泵浦电流/mA	泵浦功率/mW	输出功率/mW	调 Q 输出功率/mW
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

(2) 改变输出镜透过率和激光腔长，分析对测量结果的影响。

(3) 将快速探测器固定于激光输出镜前，接收调 Q 输出光，从示波器读取调 Q 脉冲信号的脉宽及重频参数，填入表 1-4。

表 1-4 泵浦电流与调 Q 输出信号功率、脉宽以及重频的关系数据记录表

输出镜透过率：	腔长：							mm
物理量	1	2	3	4	5	6	7	8
泵浦电流/mA								
泵浦功率/mW								
输出功率/mW								
调 Q 输出功率/mW								
调 Q 脉宽/ns								
调 Q 重频/kHz								

【实验注意事项】

- (1) 实验完成后，应及时盖上仪器罩，以免光学镜面以及半导体泵浦沾染灰尘。
- (2) 输入耦合棱镜和激光晶体调整好以后不要随意变动，以免影响实验使用。
- (3) 实验过程中，避免激光泵浦长时间大电流工作，降低对泵浦管寿命和功率的影响。
- (4) 准直好光路后需用遮挡物挡住准直器，避免准直器被输出的红外激光打坏。
- (5) 防止红外卡片将激光反射到眼睛中。
- (6) 实验过程必须带上激光防护镜操作。

【问题思考和拓展】

- (1) 什么是半导体泵浦固体激光器中的光谱匹配和模式匹配？
- (2) 可饱和吸收调 Q 中的激光脉宽、重复频率随泵浦功率如何变化？请分析原因。
- (3) 把倍频晶体放在激光谐振腔内对提高倍频效率有何好处？
- (4) 查阅相关资料，作为可饱和吸收体的材料有哪些？产生的激光各有什么特点？

【参考文献】

- [1] 戴锋，黄国君. 一种新型半导体激光器[J]. 激光杂志，2005，26(1): 26-27.
- [2] 董孝义. 光波电子学[M]. 天津：南开大学出版社，1987.
- [3] 沈小燕. 半导体激光器调 Q 技术研究[D]. 天津：天津大学，2010.

实验 2 气体激光器原理与技术实验

【实验背景】

早在 1917 年爱因斯坦就预言了受激辐射的存在,但一直未能在实验中观察到实验现象,原因是在热平衡条件下,物质的受激吸收淹没了受激辐射。直到 1960 年,第一台红宝石激光器诞生,从此激光技术得到了长足的发展。激光器由光学谐振腔、工作物质、泵浦系统构成,输出的激光束在横截面上的光强分布函数满足高斯函数,所以也称作高斯光束。气体激光器与固体激光器的显著区别是工作物质为气体或掺杂气体,气体激光器分为原子气体激光器、离子气体激光器、分子气体激光器和准分子激光器。它们工作在很宽的波长范围,从紫外到远红外,既可以连续方式工作,也可以脉冲方式工作。常见的气体激光器有 CO₂ 激光器、氩离子激光器和氦氖激光器。相对固体激光器,气体激光器结构简单、造价低廉、操作方便。由于上述优点,气体激光器在工农业、医学、精密测量、全息技术等领域具有广泛的应用。本实验主要讨论氦氖激光器的构成、工作原理、调试方法以及气体激光器的主要参数的测量。

【实验目的】

- (1) 理解氦氖激光器的工作原理,掌握其搭建方法。
- (2) 掌握激光传播特性参数的测量方法。
- (3) 了解 F-P 扫描干涉仪的原理及调节方法。
- (4) 理解激光模式的概念、纵模正交偏振理论、模式竞争理论和偏振测量方法。

【实验原理】

1. 氦氖激光器的结构与原理

氦氖(He-Ne)激光器由光学谐振腔(输出镜与全反镜)、工作物质(密封在玻璃管里的氦气和氖气)、泵浦系统(激光电源)构成,根据腔镜的封装位置分为外腔式氦氖激光器和内腔式氦氖激光器。内腔式氦氖激光器的腔镜封装在激光管两端,而外腔式氦氖激光器的激光管、输出镜及全反镜是安装在调节支架上的。内腔式气体激光器结构如图 2-1 所示,在激光管的阴极、阳极上串接着镇流电阻,防止激光管在放电时出现闪烁现象。激光器激励系统采用开关电路的直流电源,具有体积小、质量小、可靠性高等优点,可长时间运行。

输出镜与全反镜构成氦氖激光器的谐振腔,谐振腔的长度满足驻波条件,输出镜与全反镜能满足腔的稳定条件。腔的损耗必须小于介质的增益,增益介质是在毛细管内的氦、氖气

体，该混合气体的气压和比例是一定的。当电流激励氦、氖混合气体时，与某些谱线对应的上下能级的粒子数发生反转，使介质具有增益，介质增益与毛细管长度、内径粗细、两种气体的比例、混合气体的气压以及放电电流等因素有关。调节腔镜的支架能调节输出镜与全反镜之间平行度，使激光器工作时处于输出镜与全反镜相互平行且与放电管垂直的状态。满足以上条件时，产生激光振荡，输出激光。

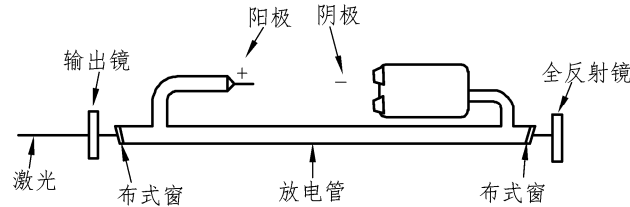


图 2-1 内腔式 He-Ne 激光器结构图

2. 激光器模的形成机理

激光器由增益介质、谐振腔和激励能源三部分构成。如果用某种激励方式，将介质的某一对能级间形成粒子数反转分布，由于自发辐射和受激辐射的作用，将有一定频率的光波产生，在腔内传播，并被增益介质逐渐增强，实现放大。理论上光波不是单一频率的，因为能级都具有一定的宽度，且粒子在谐振腔内运动受多种因素的影响，光波具有一定的带宽。实际激光器输出的光谱宽度是由自然增宽、碰撞增宽和多普勒增宽三种效应的叠加而形成的。不同类型的激光器，工作条件不同，影响激光输出的主要因素也不尽一样。仅有单程放大，不足以产生激光，还需要谐振腔对它进行光学反馈，使光在多次往返传播增益后形成相对稳定连续的振荡，才有可能产生激光输出。光程差满足波长的整数倍时，光才能获得极大增强，其他不满足该条件的波长则相互抵消。因此，形成连续振荡的条件为

$$2nL = q\lambda_q \quad (2-1)$$

式(2-1)中 n 为折射率， L 为腔长， q 为纵模序数，每一个 q 对应纵向一种稳定的电磁场分布 λ_q ，称为一个纵模。 q 是正整数，是一个比较大的数，不需要知道它的具体数值，关心的是有几个不同的 q 值满足上式，即激光器有几个不同的纵模。由式(2-1)可知，腔内的纵模是以驻波形式存在的， q 值反映的是驻波波腹的数目，纵模频率 ν_q 可表示为

$$\nu_q = q \frac{c}{2nL} \quad (2-2)$$

同样，我们不关心它的具体值，关注的是相邻两个纵模的频率间隔，可表示为

$$\Delta\nu_{q+1} = \frac{c}{2nL} \quad (2-3)$$

从式(2-3)中看出，相邻纵模频率间隔和激光器的腔长成反比，说明谐振腔越长， $\Delta\nu_{纵}$ 越小，满足振荡条件的纵模个数越多，谐振腔越短， $\Delta\nu_{纵}$ 越大，在同样的增宽曲线范围内，纵模个数就减少。因而，缩短腔长是获得单纵模运行激光器的一个思路。根据以上分析，可知相邻纵模频率间隔相等，且对应同一横模的一组纵模，它们强度的顶点构成了多普勒线型的轮廓线。

根据激光器的工作原理可知，光波在腔内往返振荡时，不仅有增益，同时还存在多种损耗。增益使光不断增强，各种损耗使光能减弱，如介质的吸收损耗、散射损耗、镜面透射损耗和放电毛细管的衍射损耗等都会使光减弱。要产生激光输出，不仅要满足谐振条件，而且还要满足增益大于各种损耗的总和。如图 2-2 所示，增益线宽内虽有五个纵模满足谐振条件，但只有三个增益大于损耗的纵模有激光输出。对于纵模的观测，由于 q 值很大，相邻纵模频率差异很小，眼睛不能分辨，必须借助检测仪器才能观测到。

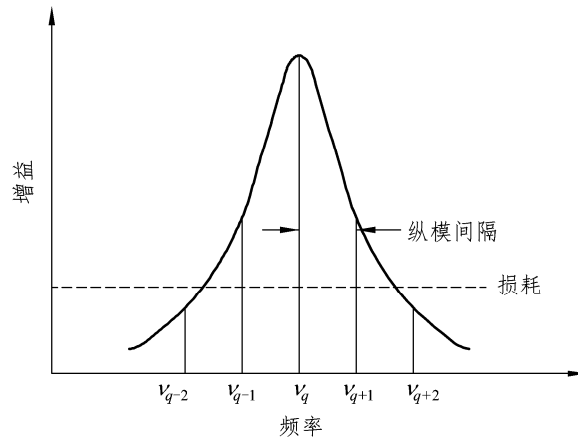


图 2-2 激光增益与纵模频率关系示意图

根据前面的分析知谐振腔对光多次反馈，在纵向形成不同的场分布，那么对横向的影响如何呢？光每经过放电毛细管反馈一次，就相当于一次衍射，经过多次反复衍射，就在横向的同一波腹处形成一个或多个稳定的干涉光斑，即在横向也形成不同的场分布。每一个衍射光斑对应一种稳定的横向电磁场分布，称为一个横模。我们在实验中看到的复杂光斑就是这些横向基本光斑的叠加，图 2-3 是几种常见的基本横模光斑图样。

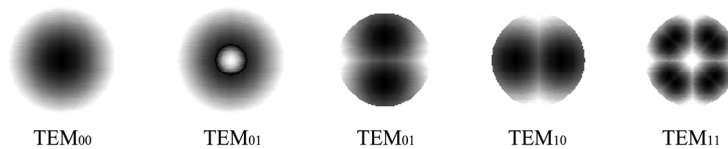


图 2-3 基本横模光斑图样

所以，纵模是对纵向方向的观测结果，横模是对横向方向的观测结果。一个模由三个量子数来表示，通常写作 TEM_{mnq} ， q 是纵模标记， m 和 n 是横模标记， m 是沿 x 轴场强为零的节点数， n 是沿 y 轴场强为零的节点数。不同的纵模对应不同的频率，那么同一纵模序数内的不同横模又如何呢？同样，不同横模也对应不同的频率，横模序数越大，频率越高。一般不关心具体横模频率，关心的是具有几个不同的横模及不同横模间的频率差，可表示为

$$\Delta\nu_{\Delta q=1} = \frac{c}{2nL} \left\{ \frac{1}{\pi} \arccos \left[\left(1 - \frac{L}{R_1} \right) \left(1 - \frac{L}{R_2} \right) \right]^{1/2} \right\} \quad (2-4)$$

式 (2-4) 中， $\Delta q = \Delta m + \Delta n$ ， Δm 、 Δn 分别表示 x 、 y 方向上横模的模序数差， R_1 、 R_2 为谐振腔的两个反射镜的曲率半径，则相邻横模频率间隔为

$$\Delta \nu_{\Delta m + \Delta n = 1} = \Delta \nu_{\Delta q = 1} \left\{ \frac{1}{\pi} \arccos \left[\left(1 - \frac{L}{R_1} \right) \left(1 - \frac{L}{R_2} \right) \right]^{1/2} \right\} \quad (2-5)$$

从式(2-5)和式(2-3)可知,相邻的横模频率间隔与纵模频率间隔的比值是一个分数,这个比值由腔的长度和曲率半径决定。腔的长度与曲率半径的比值越大,分数值越大。当腔的长度等于曲率半径时,为共焦腔,分数值达到极大,即相邻两个横模的横模间隔是纵模间隔的1/2,横模序数相差为2的谱线频率正好与纵模序数相差为1的谱线频率简并。

前面我们已经知道横模个数与增益有关,同时还与放电毛细管的半径、内部损耗等因素有关。一般来说,放电管半径越大,可能出现的横模个数越多。横模序数越高的,衍射损耗越大,形成振荡越困难。但激光器输出光中横模的强弱决由多种因素共同决定的,不能仅从光的强弱来判断横模阶数的高低,光最强的谱线不一定是基横模,而应根据高阶横模具有高频率来确定。

横模频率间隔的测量同纵模间隔一样,需借助展现的频谱图进行相关计算,但阶数 m 和 n 的数值仅从频谱图上是不能确定的,频谱图上能看到有几个不同的 $(m+n)$ 值,也可以测出它们间的差值 Δq ,然而不同的 m 或 n 可对应相同的 $(m+n)$ 值,相同的 $(m+n)$ 在频谱图上又处在相同的位置,因此要确定 m 和 n 各是多少,还需结合激光输出的光斑图形加以判断才行。当我们对光斑进行观察时,看到的光斑实际是图2-3中一个或几个单一态图形的组合的迭加图。当只有一个横模时,很易辨认,如果横模个数比较多,或基横模很强,掩盖了其他横模,或某高阶模太弱,都会给分辨带来一定的难度。依据频谱图,可以得到横模的个数和相对强度大小,进而缩小取值范围,最终准确确定 m 和 n 值。

3. 高斯光束的基本性质

Maxwell方程是描述电磁场的宏观规律有效手段,利用标量场近似条件,稳态传输光频电磁场可以用赫姆霍兹方程描述,高斯光束是赫姆霍兹方程在缓变振幅近似下的一个特解,它可以准确处理高斯光束在腔内、外的传输变换问题。假设振幅是缓变的,通过求解赫姆霍兹方程可以得到高斯光束的一般表达式:

$$A(r, z) = \frac{A_0 \omega_0}{\omega(z)} e^{-\frac{r^2}{\omega^2(z)}} \cdot e^{-i \left[\frac{kr^2}{2R(z)} - \psi \right]} \quad (2-6)$$

式(2-6)中, A_0 为振幅常数, ω_0 为场振幅减小到最大值的1/e的 r 值,称为腰斑,它是高斯光束光斑半径的最小值, $\omega(z)$ 、 $R(z)$ 、 ψ 分别表示了高斯光束的光斑半径、等相面曲率半径和相位因子,是描述高斯光束的三个重要参数,其表达式分别为

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2} \quad (2-7)$$

$$R(z) = z_0 \left(\frac{z}{z_0} + \frac{z_0}{z} \right) \quad (2-8)$$

$$\psi = \arctan \frac{z}{z_0} \quad (2-9)$$

式(2-9)中, $z_0 = \pi\omega_0^2/\lambda$, 称为瑞利长度或共焦参数。高斯光束在 $z = \text{const}$ 的面内, 场振幅以高斯函数的形式从中心向外平滑的减小, 因而光斑半径 $\omega(z)$ 随坐标 z 满足双曲线函数:

$$\frac{\omega^2(z)}{\omega_0^2} - \frac{z}{z_0} = 1 \quad (2-10)$$

图2-4为半径 $\omega(z)$ 扩展示意图。在式(2-10)中, 令相位部分等于常数, 并略去 $\psi(z)$ 项, 可以得到高斯光束的等相面方程:

$$\frac{r^2}{2R(z)} + z = \text{const} \quad (2-11)$$

因而, 可以认为高斯光束的等相面为球面。

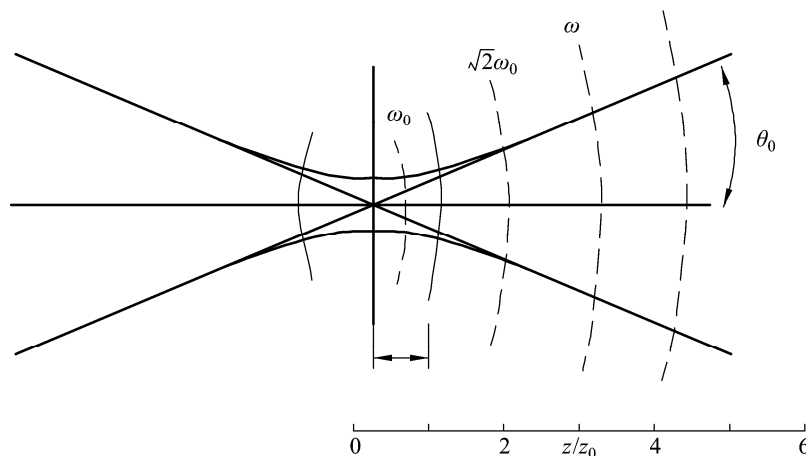


图2-4 高斯光束示意图

根据瑞利长度的物理意义可知: 当 $|z| = z_0$ 时, $\omega(z_0) = \sqrt{2}\omega_0$, 在实际应用中通常取 $(-z_0, z_0)$ 为高斯光束的准直范围。所以, 瑞利长度越长, 高斯光束的准直范围越大, 反之亦然。高斯光束远场发散角 θ_0 的一般定义为当 $z \rightarrow \infty$ 时, 高斯光束振幅减小到中心最大值 $1/e$ 处与 z 轴的交角, 定义式为

$$\theta_0 = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{\omega(z)}{z} = \frac{\lambda}{\pi\omega_0} \quad (2-12)$$

4. 共焦球面扫描干涉仪结构与工作原理

共焦球面扫描干涉仪是一种分辨率很高的分光仪器, 是分析激光特性的必要设备, 实验中所有纵模、横模展现成频谱图来进行观测的, 可以将彼此频率差异在几百兆赫兹甚至几十兆赫兹的信号分开。共焦球面扫描干涉仪是一个无源谐振腔, 由两块球形凹面反射镜构成共焦腔, 即两块镜的曲率半径和腔长相等, 反射镜镀有高反射膜, 两块镜中的一块是固定不变的, 另一块固定在可随外加电压而变化的压电陶瓷上。如图2-5所示, 为低膨胀系数制成的间隔圈, 用以保持两球形凹面反射镜 R_1 和 R_2 总是处在共焦状态。为压电陶瓷环, 其特性是若在环的内外壁上加一定数值的电压, 环的长度将随之发生变化, 而且长度的变化量

与外加电压的幅度呈线性关系。由于长度的变化量很小，仅为波长数量级，它不足以改变腔的共焦状态，但是当线性关系不好时，会给测量带来一定的误差。

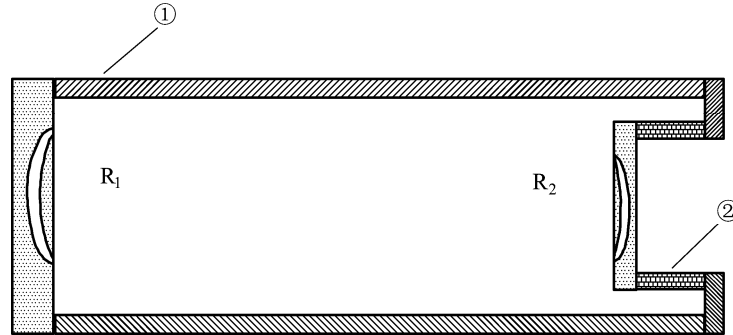


图 2-5 共焦球面扫描干涉仪结构示意图

当一束激光以近光轴方向射入干涉仪后，在共焦腔中径四次反射呈 X 形路径，光程近似为 $4L$ ，如图 2-6 所示，光在腔内每走一个周期都会有部分光从镜面透射出去。如在 A' 、 B' 两点，形成一束束透射光 $1, 2, 3, \dots$ 和 $1', 2', 3', \dots$ ，这时我们在压电陶瓷上加一线性扫描电压，当外加电压使谐振腔长变化到某一长度 L_a ，正好使相邻两次透射光束的光程差是入射光中模的波长为 λ_a 的这条谱线的整数倍，即

$$4L_a = k\lambda_a \quad (2-13)$$

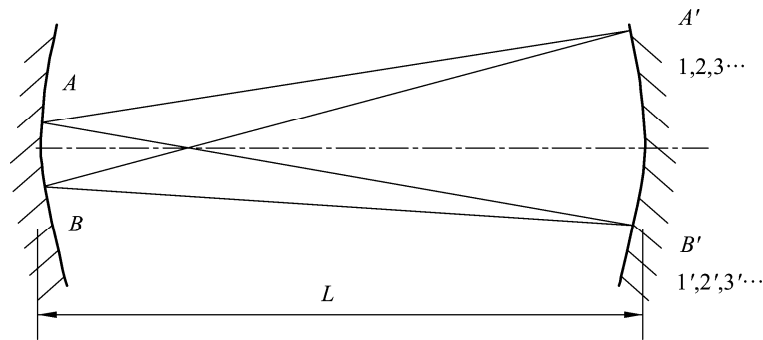


图 2-6 干涉扫描仪光路示意图

式 (2-13) 中， k 为扫描干涉仪的干涉序数，是一个整数，模 λ_a 将产生相干极大透射，而其他波长的模则相互抵消。同理，外加电压又可使腔的长度变化到 L_b ，使模 λ_b 符合谐振条件，极大透射，而 λ_a 等其他模又相互抵消。因此，透射极大的波长值和腔长值有一一对应关系。只要有一定幅度的电压来改变腔长，就可以使激光器全部不同波长的模依次产生相干极大透过，形成扫描。若入射光波长范围超过某一定限时，外加电压虽可使腔的长度线性变化，但一个确定的腔长有可能使几个不同波长的模同时产生相干极大，造成重序。当腔的长度变化到可使 λ_b 极大时， λ_a 会再次出现极大，有

$$4L_d = k\lambda_d = (k+1)\lambda_a \quad (2-14)$$

即 k 序中的 λ_d 和 $k+1$ 序中的 λ_a 同时满足极大条件，两种不同的模被同时扫出，叠加在一起，

因此扫描干涉仪本身存在一个不重序的波长范围限制。所以，自由光谱范围是指扫描干涉仪所能扫出的不重序的最大波长差或频率差，用 $\Delta\lambda_{\text{SR}}$ 或者 $\Delta\nu_{\text{SR}}$ 表示。假如上式(2-14)中 L_d 为重序的起点，则干涉仪的自由光谱范围值为

$$\lambda_d - \lambda_a = \frac{\lambda_d \lambda_a}{4L} \quad (2-15)$$

由于 λ_d 与 λ_a 间相差很小， $\lambda_d = \lambda_a \approx \lambda$ ，自由光谱范围用波长和频率分别表示为

$$\Delta\lambda_{\text{SR}} = \frac{\lambda^2}{4L} \quad (2-16)$$

$$\Delta\nu_{\text{SR}} = \frac{c}{4L} \quad (2-17)$$

在模式分析实验中，为避免出现式(2-12)中的重序现象，故选用扫描干涉仪时，必须首先知道它的 $\Delta\nu_{\text{SR}}$ 和需要分析的激光器的频率范围 $\Delta\nu$ ，并使 $\Delta\nu_{\text{SR}} > \Delta\nu$ ，才能保证在频谱面上不重序，即腔的长度和模对应的波长或频率是一一对应关系。自由光谱范围还可用腔的长度变化量来描述，即腔的长度变化量为 $\lambda/4$ 时所对应的扫描范围。因为光路在共焦腔内呈 X 形，四倍路程的光程差正好等于 λ ，干涉序数改变 1。当满足 $\Delta\nu_{\text{SR}} > \Delta\nu$ 后，如果外加电压足够大，可使腔的长度的变化量是 $\lambda/4$ 的 i 倍时，那么将会扫描出 i 个干涉序，激光器将周期性地重复出现在干涉序 $k, k+1, \dots, k+i$ 中。

精细常数 F 是用来表征扫描干涉仪分辨本领的参数，定义为自由光谱范围与最小分辨率极限宽度之比，即在自由光谱范围内能分辨的最多的谱线数目， F 的理论表达式为

$$F = \frac{\pi R}{1-R} \quad (2-18)$$

式(2-18)中， R 为凹面镜的反射率， F 只与镜片的反射率有关，实际上 F 还与共焦腔的调整精度、镜片加工精度、干涉仪的入射和出射光孔的大小、使用时的准直精度等因素有关，因此精细常数的实际值一般由实验来测定，根据精细常数含义， F 可表达为

$$F = \frac{\Delta\lambda_{\text{SR}}}{\delta\lambda} \quad (2-19)$$

显然， $\delta\lambda$ 就是干涉仪所能分辨出的最小波长差，可用仪器的半宽度 $\Delta\lambda$ 代替，是一个模的半值宽度，从展开的频谱图中就可以测定出精细常数 F 的值。

【实验系统与装置】

本实验仪器主要包括半外腔 He-Ne 激光器、导轨、滑块若干、共焦球面扫描干涉仪、CCD 采集分析系统、调节支座若干、激光功率指示计、平凹透镜、平凸透镜、柱面镜及镜架、透镜/反射镜架。

【实验内容与步骤】

本实验主要包括激光器的调整、He-Ne 激光器模式分析、He-Ne 激光器发散角测量、外腔 He-Ne 激光器偏振态验证四部分内容。

1. 激光器的调整

(1) 打开激光器电源，运行稳定后看有无激光输出，如没有激光输出说明输出镜与全反镜平行度偏离较大，在反复调整直至有激光输出。

(2) 用白炽灯照十字叉丝板，在放电管处在工作状态时，用眼睛在十字叉丝板背后通过小孔观察放电管，可看到放电管内的亮白点，校准观察角度，使亮白点与出光孔同心。

(3) 保持十字叉丝板固定，调节谐振腔镜架螺纹使十字叉丝中心与亮白点出光孔同心，便有激光输出。

2. He-Ne 激光器模式测量

(1) 点燃激光器，待出光稳定，调整扫描干涉仪光路，将光电探测放大器的接收孔对准从共焦腔后出射孔的光点。

(2) 改变锯齿波输出电压的峰值，确定示波器上的干涉序个数，根据干涉序个数和频谱的周期性，确定哪些模属于同一个 k 序。

(3) 根据自由光谱范围的定义，确定它所对应两条谱线频率间隔 $\Delta\nu_{SR}$ ，测出与 $\Delta\nu_{SR}$ 相对应的标尺长度，计算出两者比值。

(4) 在同一干涉序 k 内观测，依据纵模定义对照频谱特征，确定纵模的个数，并推测出纵模频率间隔， $\Delta\nu_{\Delta q=1}$ 与理论值比较，检查辨认和测量的值是否正确。

(5) 根据横模的频谱特征，辨认在同一 q 纵模序内有几个不同的横模，并测出不同的横模频率间隔 $\Delta\nu_{\Delta m+\Delta n=1}$ ，与理论值比较。

(6) 确定横模频率增加的方向，并进一步确定纵模序内的高阶横模和低阶横模，并确定它们间的强度关系。

(7) 从激光器输出的反方向观察光斑形状，确定每个横模的模序 m 和 n 值，根据定义，测量扫描干涉序的精细常数 F 。

3. He-Ne 激光器发散角测量

(1) 调整并确定激光束的出射方向。

(2) 在光源前方 L_1 处垂直入射 CCD 靶面，通过软件测量出相应位置光斑直径 D_1 。

(3) 在后方 L_2 处用同样方法测出光斑直径 D_2 。

(4) 利用公式 $2\theta = (D_2 - D_1)/(L_2 - L_1)$ 近似计算出全发散角 2θ 。

4. 外腔 He-Ne 激光器偏振态验证

(1) 调整半外腔 He-Ne 激光器稳定出光。

(2) 将偏振片垂直放入光路中，再放置激光功率指示计。

(3) 旋转偏振片，观察功率指示计的示数变化，验证激光输出光的偏振态。

【实验注意事项】

(1) 不要用手触摸光学镜面，该电源负载为压电陶瓷类的高阻元件，不适用低阻负载。

(2) 偏压调节操作应缓慢，使电压缓慢加载到压电陶瓷上，否则容易破坏压电陶瓷。

(3) 信号输出切勿短路，否则损坏电路。

【问题思考和拓展】

- (1) 在扩束测量实验中，为什么在束腰的位置附近放置扩束镜片？
- (2) 简述激光器的构成和气体激光器的工作原理。
- (3) 气体激光器的设计思路什么？给出关键技术指标参数。

【参考文献】

- [1] 周炳琨，高以智，陈倜嵘，等. 激光原理[M]. 北京：国防工业出版社，2009.
- [2] 郭永康. 光学教程[M]. 成都：四川大学出版社，1992.
- [3] 吕百达. 强激光的传输与控制[M]. 北京：国防工业出版社，1999.

实验 3 光纤激光器原理与技术实验

【实验背景】

自 20 世纪 60 年代光纤激光器的诞生，光纤激光器经历了五十余年的发展，在光纤通信、光纤传感、工业领域以及国防领域具有广泛的应用前景。光纤激光器以掺杂光纤为增益介质，结合光学器件和泵浦激励实现激光输出，与传统的固体和气体激光器相比，具有如下优点：(1) 在光纤内部腔内损耗低，容易实现较大的总增益，泵浦阈值低、能量转换效率高；(2) 由于光纤本身的尺度结构特点，不需要复杂的冷却系统；(3) 光纤本身作为一种波导，模式容易控制，相对传统的激光器较容易实现高质量的激光。激光器的研究引起国内外学者的广泛关注和重视，随着激光器的快速发展，目前在 10 W ~ 10 kW 功率范围内的激光器已实现工业应用，在高速大容量通信、光纤传感、激光武器等领域具有重要的应用前景和潜在的经济价值。本实验介绍光纤激光器的基本原理、结构、搭建方法、调试方法以及主要特性参数的测量。

【实验目的】

- (1) 熟悉光纤激光器的结构和特点。
- (2) 掌握光纤器激光产生的机理。
- (3) 掌握光纤激光器的搭建方法和激光特性测试方法。

【实验原理】

光纤激光器的构成与传统的激光器一样，由谐振腔、增益物质和激励泵浦构成，只不过谐振腔是在光纤波导内，增益物质为掺杂光纤，泵浦源为半导体激光器，一般功率比较高。增益介质为各种不同掺杂的光纤或非线性光纤，谐振腔的构成形式比较多，结合光纤无源器件，可以由光学反馈或光纤反射型器件构成线性腔和环形腔，也可以由光纤反射型器件构成。泵浦光经光纤光学系统耦合进入增益光纤，增益光纤在吸收泵浦光后在腔内形成粒子数反转，形成激光输出，或者非线性增益产生的自发辐射光经受激放大，结合谐振腔的选模形成稳定激光输出。图 3-1 为典型的激光器结构示意图。

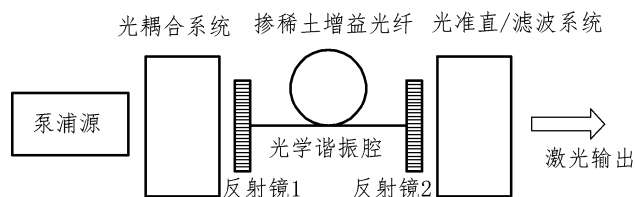


图 3-1 激光器结构示意图

光纤激光器的结构分类方法比较多，可以依据增益介质、谐振腔的结构、光纤的结构、输出激光类型和输出激光波长分类。(1) 依据增益介质可分为不同稀土离子掺杂光纤激光器，在稀土元素中常用的掺杂离子有 Nd^{3+} 、 Yb^{3+} 、 Er^{3+} 、 Tm^{3+} 和 Ho 等，掺杂离子不同输出的激光波长也不相同；(2) 依据非线性效应激光器可分为光纤受激布里渊散射型和受激拉曼散射型波长可调谐的激光；(3) 依据谐振腔结构不同可以分为 F-P 腔、环形腔、环路反射器光纤谐振腔、“8”字形腔、分布反射 (DBR) 光纤激光器和分布反馈 (DFB) 光纤激光器等；(4) 依据光纤结构可分为单包层光纤激光器、双包层光纤激光器、光子晶体光纤激光器和特种光纤激光器；(5) 依据输出激光是否连续可分为连续光纤激光器和脉冲光纤激光器；(6) 依据输出激光波长分为 S 波段 (1 460 ~ 1 530 nm) 激光器、C 波段 (1 530 ~ 1 565 nm) 激光器和 L 波段 (1 565 ~ 1 610 nm) 激光器。

1. 激光工作物质

由光纤光学理论可知光纤光导纤维的中间部分为折射率较大的纤芯，纤芯以外的部分是较低折射率的包层，包层的外面还有一层起保护作用的涂覆层。单模光纤的包层直径是 125 μm ，其纤芯直径为 8 ~ 12 μm ，光纤具有传输容量大、低损耗、不受电磁场干扰等优点。光纤激光器通常是以掺稀土元素光纤作为增益介质。掺 Er^{3+} 光纤激光器的输出波长对应 1.5 μm 光纤通信的主要窗口，是目前应用最广泛和技术最成熟的光纤激光器之一。掺 Yb^{3+} 光纤激光器的吸收带在 800 ~ 1 000 nm，相对较宽，激射带为 1 030 ~ 1 150 nm。该激光器具有量子效率高、增益带宽大以及无激发态吸收和无浓度猝灭等优点，可以采用波长位于 915 nm 或 980 nm 附近的多模大功率半导体激光器泵浦，在 1.06 μm 波段获得斜效率 80% 以上的激光输出，并在宽达 100 nm 以上的范围内连续调谐。

2. 激光谐振腔

与一般的激光器一样，光纤激光器的谐振腔的种类主要有线形腔结构和环形腔结构，由于光纤波导自身的特点，这两类谐振腔又包括多种构成方式，每种构成方式都有独特的特性。

线形腔是指谐振腔为直线结构的 F-P，又简称 F-P 腔，根据构成 F-P 腔的两个光学面所采用的反馈元件的不同，它又可以分为多种类型，常见的有反射镜型 F-P 腔、光纤光栅型腔和光纤环形镜型腔等。反射镜型 F-P 腔如图 3-2 (a) 所示，通过在掺杂增益光纤的两端配置二向色反射镜来构成谐振腔。其中位于泵浦注入端的二向色反射镜，对泵浦光高透射而对激光高反射；位于输出端的二向色反射镜，对泵浦光高反射，而对激光有适当的透过率。采用二向色反射镜作为腔镜在技术上容易实现，但是谐振腔的调整精度要求比较高，且精确选择激光器的输出波长比较困难，激光器的单色性较差，使得该类型激光器的实用性受到一定限制。光纤光栅型 F-P 腔如图 3-2 (b)，在掺稀土光纤两端熔接或直接刻写光纤光栅作为反馈元件。光纤光栅是透过紫外光诱导在光纤纤芯内形成折射率周期性变化结构的反射型波长光纤器件，具有非常好的波长选择性，且反射率可控，它对腔内激光相当于高反射镜或部分反射镜，而对于泵浦光则基本上是完全透明的。这种结构的腔克服了腔镜与光纤之间的耦合损耗，实现了激光器的全光纤集成，而且可以在掺稀土光纤增益谱内的任意波长处获得窄线宽的激光输出，且可望借助光纤光栅的可调谐性实现激光波长的调谐，是一种具有潜在发展前景

景的器件。

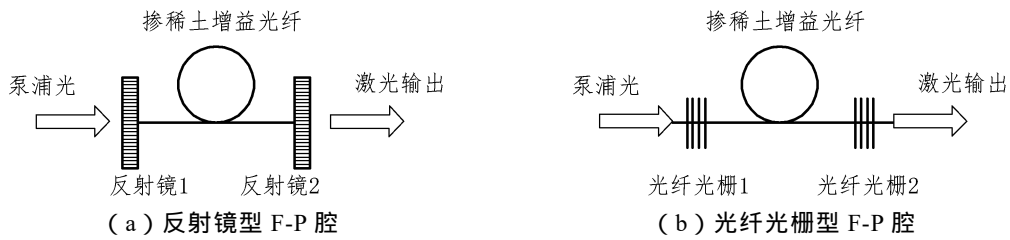


图 3-2 线形腔光纤激光器结构示意图

环形腔也是光纤激光器中经常采用的一种谐振腔结构形式。环形腔通常为行波腔，可以避免激光增益的“空间烧孔”效应，有利于获得单色性很好的激光输出，也有助于激光的稳定性。在环形腔里可以不用反射镜，借助波分复用耦合器和稀土掺杂光纤构成一个环形结构。为防止光纤器件的端面反射对产生激光的影响，保证激光的单向运行，通常在环形腔内串入一个隔离器，结构如图 3-3 所示。此外，如果光纤为非保偏光纤，还需引入偏振控制器来消除偏振模竞争。

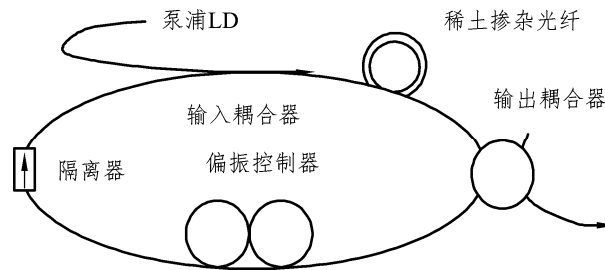


图 3-3 环形腔光纤激光器结构示意图

目前光纤激光器的种类比较多，根据具体的应用需求，谐振腔结构和输出激光的特性也不尽相同。但由于收到泵浦耦合和其他接入损耗的影响，结构复杂的光纤激光器的输出功率很难提高，在高功率光纤激光器中使用最多的还是基于 F-P 型的激光器。

3. 光纤激光器的泵浦

光纤激光器的泵浦源通常为带有输出尾纤的温控大功率半导体激光器或半导体激光器阵列。泵浦源与掺稀土光纤之间的耦合方式可以分为两大类：端面泵浦和侧面泵浦。光纤激光器最简单的泵浦耦合方式为端面泵浦，它包括两类情况：一种是用于反射镜型 F-P 腔，泵浦光经聚焦后通过二色镜直接入射到掺稀土光纤端面；另一种是用于泵浦光纤光栅型的光纤激光器，把半导体激光器的输出尾纤与掺稀土光纤的入射端面直接熔接起来，这种端面泵浦方式结构简单紧凑、稳定性好，实现了激光器的全光纤化。侧面泵浦是通过 V 形槽、棱镜或“树枝形”多模光纤等结构使泵浦光从掺稀土增益光纤的侧面耦合进入，它既适用于线形腔结构也可用于环形腔结构。这种泵浦耦合方式避免了在注入端加波长选择光元件，从而可以使掺杂光纤直接和其他光纤熔接，并且可以在掺稀土光纤的全长度上进行多点泵浦。

依据增益光纤中泵浦光的传输方向相对于激光的输出方向，通常将泵浦源的基本配置方式分为三类：前向泵浦（泵浦光和激光输出同向）、后向泵浦（泵浦光和激光输出反向）和双

向泵浦（前向泵浦与后向泵浦结合）。前向泵浦可使泵浦光注入端与激光输出端相分离，因此在端面泵浦耦合结构中最方便。但光纤中的光功率分布及增益分布都很不均匀，在大功率泵浦的情况下容易造成注入端的光纤熔融。后向泵浦容易获得较高的激光输出，增益分布也较为平坦，但同前向抽运一样存在抽运光分布不均的问题。两端泵浦耦合结构复杂一些，但可以大大降低注入端的功率密度，并且光纤内的功率密度及增益分布都较为均匀，因此适合于泵浦高功率光纤激光器。

4. 掺镱双包层光纤激光器

在早期的光纤激光器中，泵浦光需要直接注入直径通常只有 $5 \sim 8 \mu\text{m}$ 的掺稀土光纤芯内，如图 3-4 (a) 所示，由于受纤芯尺寸和数值孔径的制约，泵浦光耦合进增益区的效率很低。20 世纪 80 年代后期，国外研究机构陆续研制出了一种双包层光纤，如图 3-4 (b) 所示，它在原光纤内包层外面增加了一个具有更低折射率的外包层，形成了双包层结构。在这种双包层结构的光纤中，泵浦光不是直接进入纤芯中，而是先进入包围纤芯的内包层中。内包层的作用一方面是限制振荡激光在纤芯中传播，保证输出激光的光束质量高；另一方面是构成泵浦光的传播通道，在整个光纤长度上传输的过程中，泵浦光从多模的内包层耦合到单模的纤芯中，从而延长了泵浦长度以使泵浦光被充分吸收。同时内包层的直径（一般大于 $100 \mu\text{m}$ ）和数值孔径均远大于纤芯，使得聚焦后的泵浦光可以高效地耦合进内包层。而普通单模光纤激光器要获得单模输出，泵浦光也必须是单模的，但单模泵浦源功率一般很低。双包层光纤可使光纤激光器的斜率效率达到 80% 以上，输出功率提高了 5~6 个量级。

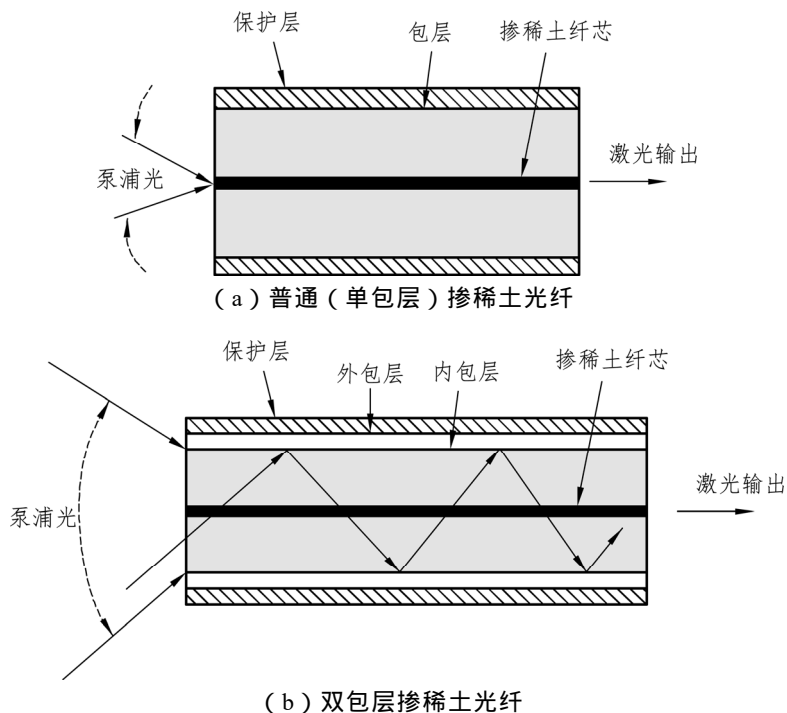


图 3-4 双包层掺稀土光纤与普通掺稀土光纤结构比较示意图

内包层的形状和与纤芯的配置方式是双包层光纤设计的关键技术之一，圆形同心结构的

双包层光纤制作最为简单，但研究表明，泵浦光在这种光纤中会产生大量的螺旋光，它们传播时不经过纤芯，不能被吸收利用。为了消除螺旋光提高泵浦效率，人们研制出各种具有不同内包层形状的双包层光纤，如离心圆形、矩形、D形、正六角形、正八角形、花形和椭圆等，几种典型双包层光纤的横截面结构如图 3-5 所示。

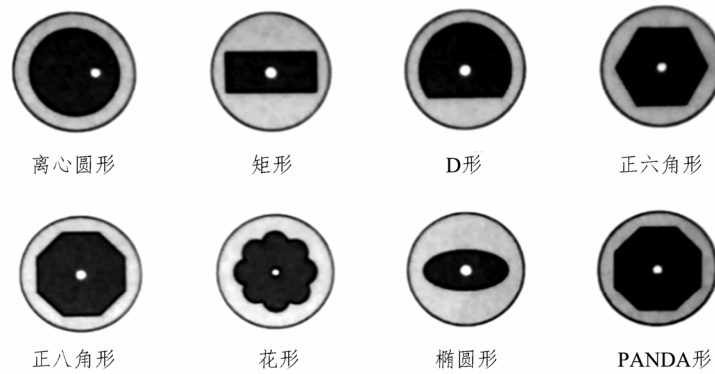
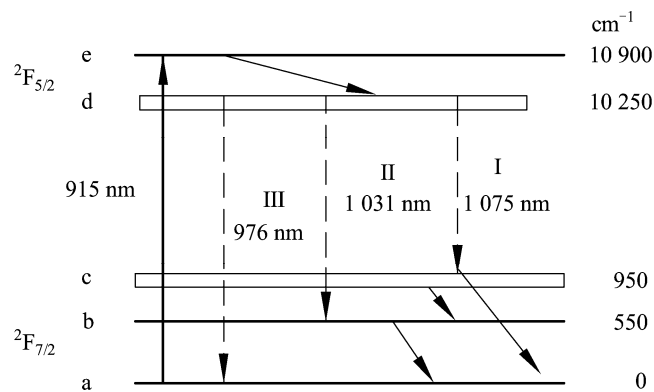


图 3-5 双包层掺稀土光纤的内包层截面形状示意图

与其他稀土离子相比， Yb^{3+} 能级结构较简单，与激光跃迁相关的能级只有两个多重态能级 $^2F_{5/2}$ 和 $^2F_{7/2}$ 。由于 Yb^{3+} 的能级结构中没有其他上能级存在，因此在泵浦光波长和激光波长处都不存在激发态吸收。同时，两能级间隔比较大，有利于消除多声子非辐射弛豫和浓度猝灭效应，因此掺 Yb^{3+} 玻璃基质的激光辐射一般具有很高的量子效率。

在室温条件下，由于光纤基质的作用 $^2F_{5/2}$ 分裂为 2 个斯塔克子能级， $^2F_{7/2}$ 分裂为 3 个斯塔克子能级， Yb^{3+} 激光跃迁就发生在这些斯塔克子能级之间。激光跃迁过程和泵浦源的波长有关，当泵浦光位于短波长区（如 915 nm）时，存在三种可能的激光跃迁过程，如图 3-6 (a) 所示。过程 I 对应的跃迁为 d → c，发射的中心波长为 1 075 nm；过程 II 对应的跃迁为 d → b，发射中心波长为 1 031 nm；过程 III 对应的跃迁为 d → a，发射中心波长为 976 nm。其中过程 I 的激光下能级为基态，因此为三能级系统；过程 II 和 III 的激光下能级（b 或 c）均为斯塔克分裂产生的、处于基态子能级之上的子能级，具有四能级系统的特点，但是由于子能级 b 或 c 距离基态很近，在泵浦不充分的情况下，能级 b 或 c 上仍可能存留较多的粒子，因此严格说来它们应属于“准四能级”系统。



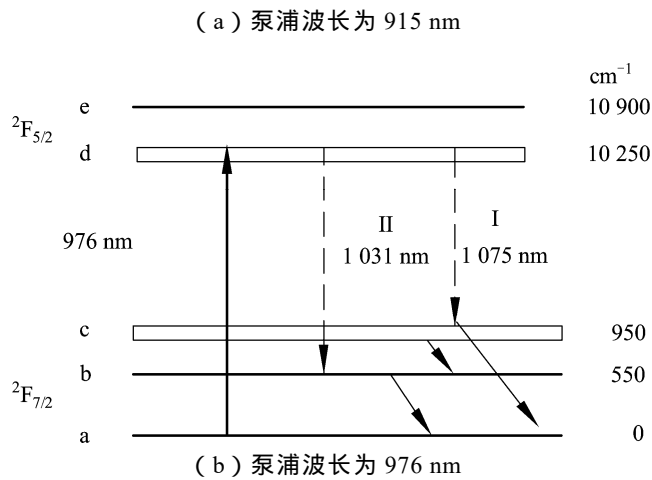


图 3-6 室温下石英光纤中 Yb^{3+} 激光跃迁机制示意图

当泵浦光波长为 976 nm 时，存在两种可能的激光跃迁过程，如图 3-6 (b) 所示。过程 I 对应的跃迁为 $d \rightarrow c$ ，发射的中心波长为 1 075 nm；过程 II 对应的跃迁为 $d \rightarrow b$ ，发射中心波长为 1 031 nm。这两个过程的下能级也都是斯塔克分裂产生的，且为处于基态之上的子能级。虽然在室温下能级 d 不能分辨出两个清晰的子能级，但它仍然是由斯塔克子能级构成的多重态展宽的能级，因此过程 I 和 II 的激光跃迁也具有准四能级系统的特点。

根据上面的分析知，斯塔克分裂的宽度由光纤基质的材料、杂质成分、 Yb^{3+} 掺杂的浓度、光纤的均匀程度以及光纤制造工艺等多个因素决定，且光谱特性由能级结构决定。因此，不同厂家、不同批号的石英光纤中 Yb^{3+} 离子的 $^2\text{F}_{5/2}$ 和 $^2\text{F}_{7/2}$ 能级斯塔克分裂形成的各子能级之间的宽度也各不相同。 Yb^{3+} 离子在 915 nm 和 976 nm 有两个吸收峰，其中 915 nm 处的吸收峰约为 50 nm，但是吸收截面较小；976 nm 处的吸收峰很窄，但是其吸收截面很大，约是前者的 4 倍。发射截面曲线中在 976 nm 和 1 030 nm 处各有一个发射峰，其中 976 nm 处发射峰与吸收曲线的吸收峰基本重合，显示了明显的二能级特点；峰值位于 1 030 nm 的发射截面较小，但是覆盖很宽的光谱范围，这是掺 Yb^{3+} 光纤激光器能够实现宽达 100 nm 以上波长调谐的内因。

根据掺镜光纤的吸收谱可知，掺镜光纤激光器最适宜的泵浦波长分别为 915 nm 和 976 nm。其中第一个泵浦波长位于一个较宽的吸收带内，它吸收系数较低，适合于采用大线宽的泵浦源，而且对泵浦光的波长特性要求不严格；第二个泵浦波长位于 976 nm 吸收峰的中心，它具有较高的吸收系数，但由于这个吸收峰很窄，因此要求泵浦源输出波长的线宽小于 4 nm，并且对泵浦波长的稳定性也有较高要求。

【实验系统与装置】

本实验系统装置如图 3-7 所示。本实验系统主要包括带温控半导体激光器系统 (976 nm, 5 W)、(1+1) × 1 多模泵浦耦合器、SMA905 型光纤连接器、掺镜双包层光纤、高反射镜 (1 030 ~ 1 100 波段反射率大于 99%)、光纤准直镜、高速脉冲探测器 (响应波长 400 ~ 1 100 nm, 10 ns 响应速度)、示波器、台式激光功率计 (量程 0 ~ 2 W, 分辨率

0.1 mW)、半导体红光激光器(650 nm, 5 mW)、多维精密调整架、红外激光观测片、激光防护镜等。

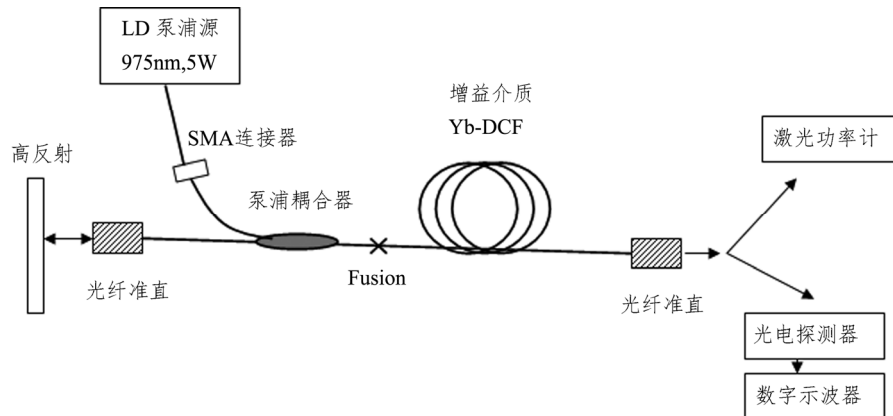


图 3-7 掺镜双包层光纤激光器实验系统结构示意图

【实验内容与步骤】

本实验内容主要包括半导体激光器泵源 $P-I$ 特性曲线测量实验、前向泵浦光纤激光器搭建与调试实验、光纤激光器输出功率特性曲线测量实验、光纤激光器自调 Q 与自锁模实验。

1. 光纤激光器搭建与调试

(1) 将半导体激光器尾纤输出端 (SMA905 光纤接头) 连接到带 SMA 法兰的专用调整架上, 通过调节调整架的高度和左右位置, 使探测器与半导体激光器输出端对准。

(2) 打开激光功率计电源开关, 准备测量。

(3) 打开半导体激光器控温系统电源开关, 调节温度设定旋钮至 -10 , 打开半导体激光器电源, 拨动 “Laser Enable” 开关使 “Active” 灯亮起, 激光器进入发射状态。

(4) 缓慢调节前面板上的 “Adjust” 电流调节旋钮, 增大半导体激光器的驱动电流 I , 从激光功率计读取对应的输出功率 P , 将读取的 I 、 P 值依次填入表 3-1 中的前两列。

(5) 由表 3-1 数据作出半导体激光器的 $P-I$ 曲线, 通过 $P-I$ 曲线的线性部分作直线与横坐标相交, 交点处的电流值, 即为半导体激光器的阈值电流 I_{th} 。

(6) 实验完成后, 先将电流调节旋钮逆时针旋到最小, 其次拨动 “Laser Enable” 开关使 “Active” 灯熄灭, 使系统充分冷却 15 min 后, 最后关闭电源。

2. 前向泵浦光纤激光器搭建与调试实验

(1) 依照实验系统图 3-7, 将半导体激光器与增益光纤通过泵浦耦合器连接起来, 泵浦耦合器信号注入端和掺镜双包层光纤输出端的光纤准直镜分别固定在四维光学调整架上。

(2) 将带有光学调整架的高反射镜置于泵浦耦合器信号注入端一侧, 保持二者相距大于 10 cm, 使镜面中心尽量与光纤准直镜主光轴重合, 镜面与主光轴垂直, 在反射镜与准直镜之间加入一面带有小孔的白屏。

(3) 将红光半导体激光器输出窗口对准掺镜双包层光纤输出端的光纤准直镜，打开电源发出红色激光，仔细调节红光半导体激光器与光纤准直镜的相对位置，使红色激光进入掺镜双包层光纤，并从另一端的光纤准直镜出射，在上述白屏上形成一个直径约 2~3 mm 清晰的红色光点。

(4) 调节白屏的位置，使红色光点恰好从屏上的小孔通过，照射到屏后的反射镜上，这时在反射镜一侧的屏上会看到一个红色的反光点，调节反射镜的位置和倾角，使反光点恰好从小孔返回。

(5) 拿掉白屏，移去红光半导体激光器，将功率计探测器对准光纤准直器，打开泵浦激光器，逐渐增大驱动电流直到从功率计观察激光器有一定的输出功率为止。

(6) 用屏遮挡一下反射镜和准直镜之间的光路，如果发现功率变小，则说明反射镜起到了反馈作用，如果功率无明显变化，则说明反射镜没起作用，需要重复以上(2)~(6)中的有关操作步骤。

(7) 当从(6)确定反射镜起到反馈作用后，适当增大泵浦激光器电流，使输出功率在 50 mW 以上，仔细调节反射镜及光纤准直镜，使输出激光功率达到最大为止，固定好有关活动调节螺丝，完成整个调节工作。

3. 光纤激光器输出功率特性曲线测量实验

(1) 在光纤激光器搭建与调试实验基础上，利用激光功率计测量不同泵浦水平下的激光输出功率 P_{out} ，填入表 3-1 中。

(2) 利用表 3-1 中数据作出激光器输出功率 P_{out} 与泵浦光功率 P 的对应关系曲线。

(3) 分析 P_{out} - P 关系曲线，求出光纤激光器的阈值泵浦功率、斜效率和光-光转换效率。

4. 光纤激光器自调 Q 与自锁模实验

(1) 逆时针旋转“Adjust”旋钮使电流调至最小(0 A)，然后关闭“Laser Enable”开关，使 LD 系统处于待机状态。

(2) 移走光纤激光器输出端的功率计，放入由光电探测器和示波器组成的高速脉冲探测系统，记录不同泵浦电流下的光纤激光器输出波形。

(3) 在一定的泵浦范围内将观察到微秒级宽度的小脉冲序列，即出现“自调 Q”。自调 Q 脉冲的强度、宽度和间隔存在较大的随机性、自发性，但总的趋势是随着泵浦电流增大，自脉冲间隔变小，脉冲数目增加，当泵浦电流足够大时，自调 Q 将减弱，乃至消失。

(4) 通过调节示波器量程，使上述“自调 Q”脉冲在显示屏上展开，能够观察到在每个“自调 Q”脉冲包络内都存在一系列时间间隔 Δt 相等的更短脉冲，测出 Δt 。

表 3-1 P - I 特性与光纤激光器输出特性实验数据记录表

I/mA	P/mW	P_{out}/mW	I/mA	P/mW	P_{out}/mW

--	--	--	--	--	--

【实验注意事项】

- (1) 不要用手直接触摸光学镜面。
- (2) 不要眼睛直视输出激光，必须佩戴防护眼镜。
- (3) 实验完毕要把光纤及光纤器件的保护帽复位。
- (4) 不要让激光器大电流高功率长期工作，以免影响泵浦源的寿命。
- (5) 实验过程中，避免大曲率半径弯曲光纤，以免损坏光纤或增大光纤损耗。

【问题思考和拓展】

- (1) 与传统的固体激光器相比，光纤激光器有何特点？
- (2) 双包层光纤激光器与单包层光纤激光器相比，有哪些优点？
- (3) 选择半导体激光器作为光纤激光器的泵浦源应注意哪些问题？
- (4) 光纤激光器为何会出现自调 Q 和自锁模？
- (5) 本实验系统有哪些需要改进之处？如何改进？

【参考文献】

- [1] 周炳琨，高以智，陈侗嵘，等. 激光原理[M]. 北京：国防工业出版社，2009.
- [2] 郭永康. 光学教程[M]. 成都：四川大学出版社，1992.
- [3] 吕百达. 激光光学：激光束的传输变换和光束质量控制[M]. 成都：四川大学出版社，1992.
- [4] 杨石泉，赵春柳，蒙红云，等. 工作在 L-波段的可调谐环形腔掺铒光纤激光[J]. 中国激光，2002，29(8)：677-679.

实验 4 光纤宽带荧光光源特性实验

【实验背景】

超荧光光源就是利用放大自发辐射以及无谐振腔的掺杂光纤光源，在光纤中加入不同的离子可以实现多波段的超荧光光谱。由于铒离子 Er^{3+} 的发光频带刚好与玻璃光纤的低损耗窗口重合，因此在光纤通信、光纤光源、有源光学器件等领域具有广泛的应用。宽带荧光光纤光源是光纤传感系统的重要组成部分，掺铒放大自发辐射具有很好的温度稳定性，其荧光光谱宽可达数十纳米，从 C 波段（1 520 ~ 1 570 nm）延伸到 L 波段（1 570 ~ 1 620 nm），可以减少系统的相干噪声、光纤瑞利散射引起的位相噪声以及光克尔效应引起的位相漂移。与发光二极管和超辐射发光二极管相比，稀土掺杂光纤宽带荧光光源具有输出光谱稳定、受环境影响小、易与单模光纤传感系统耦合等优点。目前，国内外对掺铒超荧光光源的研究，主要集中在中心波长稳定、带宽较大的超荧光光源、光谱平坦的高功率光源的研究。本实验主要研究宽带荧光光纤光源的机理、结构、搭建方法和主要特性测试方法。

【实验目的】

- （1）理解光纤宽带荧光光源的机理。
- （2）掌握光纤宽带荧光光源的构成和搭建方法。
- （3）掌握光纤宽带荧光光源的主要特性参数及测试方法。

【实验原理】

超荧光是介于激光与荧光之间的一种激发状态，即放大的自发辐射放大自发辐射，利用泵浦光泵浦容易失去电子的离子，常用的有铒离子（ Er^{3+} ）、镱离子（ Yb^{3+} ）、镱离子（ Tm^{3+} ）等。初始状态时，离子大多数处于基态能级，少数离子处在激发态能级离子数正常分布，系统中高能级离子向低能级的跃迁，自发辐射释放带有能量的光子。当外界释放给离子能量时，通常用泵浦激光器进行泵浦，掺杂这些离子的光纤被泵浦，泵浦功率提高，上能级粒子数逐渐增多，自发辐射加强，粒子相互作用。当泵浦功率达到一定值时，自发辐射的光子受激放大急剧增加，由于集居反转粒子数量未达到震荡阈值，故激光振荡还没有形成。但与自发辐射的情况不同，由于铒离子斯塔克能级分裂具有一定的频率宽度，并且在光源的结构中没有像激光器一样的谐振腔，所以输出的超荧光不规则分布，具有一定的谱宽，但比荧光光谱窄。

当掺铒光纤被抽运时，随着抽运光功率的变化，掺铒光纤可处于三种不同的状态：
（1）当抽运功率较低时， $n_2 < n_1$ ，粒子数正常分布，掺杂光纤中只存在自发辐射荧光，其中 n_1 为基态能级粒子数， n_2 为激发态能级粒子数；
（2）随着抽运功率的增强， n_2 逐渐增加，自发辐射的粒子数逐渐增加，它们之间的相互作用也逐渐加强。当 $n_2 > n_1$ 以后，粒子数呈反转分

布，在极强的相互作用下，粒子发光的“个性化”特征逐渐向相关一致的“共性”转化，单个粒子独立的自发辐射逐渐变为多个粒子协调一致的受激辐射，这种由于掺杂光纤对自发辐射的放大所产生的辐射称为“放大的自发辐射”。当抽运光足够强，在掺杂光纤中特定方向上的“放大的自发辐射”将大大加强，这种加强了辐射称为超荧光。光纤宽带荧光光源是基于光纤中放大的自发辐射过程，因而具有输出功率高、温度稳定性好、有一定的相干性和较宽的光谱线宽等诸多优点。

可用等效的三能级系统来描述其物理过程，如图 4-1 所示。从铟离子能级中分析可得，掺铟光纤中 C 波段与 L 波段的放大自发辐射的形成原理一样，都是由能级 $4I_{13/2}$ - $4I_{15/2}$ 的跃迁产生的。C 波段放大自发辐射是由 $4I_{13/2}$ 和 $4I_{15/2}$ 主能级的斯塔克分裂能级的高能级之间跃迁产生，与 C 波段放大自发辐射不同的是，L 波段的放大自发辐射是由 $4I_{13/2}$ 和 $4I_{15/2}$ 主能级的斯塔克分裂能级的低能级之间的跃迁产生的。图 4-2 是 L 波段放大自发辐射形成的原理示意图，铟离子吸收 980 nm 或 1480 nm 等波长抽运光后首先在铟光纤的近端产生 C 波段的放大自发辐射，产生的 C 波段的放大自发辐射作为二次抽运源被后端铟光纤中离子再次吸收，从而形成 L 波段的放大自发辐射谱。由于 L 波段放大自发辐射用到的是铟离子增益带的尾部，其发射和吸收系数都是 C 波段 $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{3}$ 。因此，为了获得较大功率的 L 波段放大自发辐射，需要较长的掺铟光纤，带来很多不利的影响，同时出现各种非线性现象。因此，用于 L 波段的掺铟光纤通常是选用高掺杂、低损耗的铟光纤。图 4-3 表示粒子由密度较大的上能级向粒子数密度较小的下能级跃迁的过程，左边的跃迁是自发的称为自发辐射过程，与此同时产生光子，该光子沿增益光纤向前运动，在运动过程与另一个粒子相遇，从而诱发受激辐射。这样就会产生一个与原来光子具有相同的传播方向、相同频率和相同相位的全同光子，因此自发辐射就被放大，此过程就是放大的自发辐射过程。

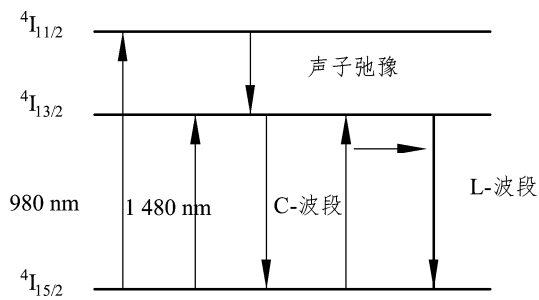


图 4-1 铟离子能级图

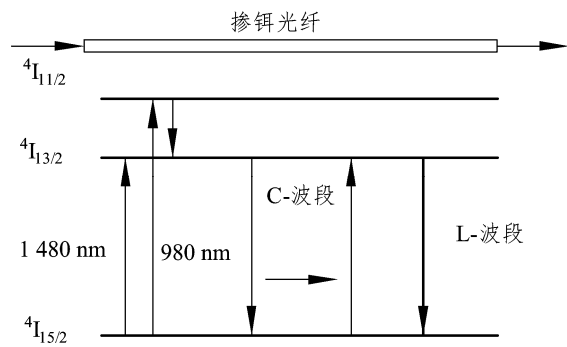


图 4-2 C-波段与 L-波段形成基本原理图

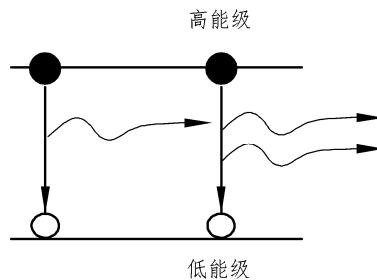


图 4-3 放大自发辐射产生过程示意图

超荧光是介于激光与荧光之间的一种过渡状态，是放大的自发辐射，当泵浦速率达到一定值时，自发辐射的光子受激放大而雪崩式地倍增，但由于集居反转数尚未达到振荡阈值，故激光振荡没有形成，但又与自发辐射不同，超荧光的状态分布不再是均匀的，谱线宽度比荧光光谱宽度窄。根据泵浦光和超荧光传播方向的异同以及光纤两端是否存在反射，超荧光光纤光源具分为单程前向、单程后向、双程前向和双程后向四种常见的结构。

【实验系统与装置】

本实验仪器主要包括 980 nm 激光二极管模块、低浓度掺铒光纤 21 m、高浓度掺铒光纤 31 m、波分复用耦合器、隔离器、环形镜和光谱仪，实验系统装置示意图如图 4-4 所示。

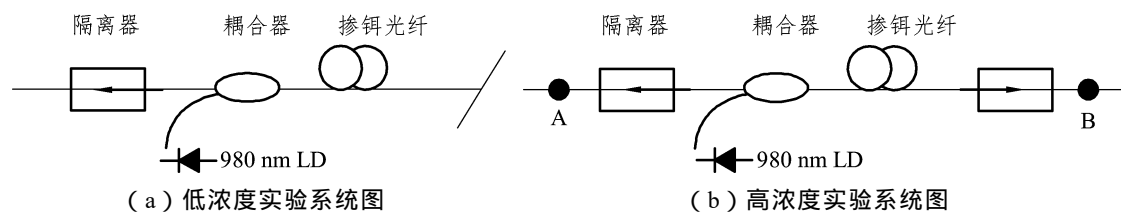


图 4-4 掺铒光纤光源实验系统图

【实验内容与步骤】

本实验内容主要包括测量单程后向结构低浓度掺杂光纤的 $P-I$ 特性和输出光谱的带宽和平坦度，测量单程后向结构高浓度掺杂光纤的 $P-I$ 特性和输出光谱的带宽和平坦度。

- (1) 打开光谱仪和泵浦电源，预热 5 min。
- (2) 依据实验系统装置图 4-4 (a)，将低浓度掺铒光纤 21 m 接入光路，并连好光路。
- (3) 将输出信号接入光功率计，调整泵浦电流逐渐增大，记录电流和功率计的读数，填入表 4-1，绘出 $P-I$ 特性曲线。

表 4-1 单程后向结构低浓度掺杂光纤的 $P-I$ 特性数据记录表

泵浦电流/mA	输出功率/mW	泵浦电流/mA	输出功率/mW

(4) 取下光功率计，将输出信号接入光谱仪，设定扫描波长范围和采样点数，观察输出光谱的特征，并测量输出光谱的带宽和平坦度。

(5) 依据实验系统装置图 4-4 (b)，将低浓度掺铒光纤 31 m 接入光路，并连好光路。

(6) 将输出信号接入光功率计，调整泵浦电流逐渐增大，记录电流和功率计的读数，填入

表 4-2，绘出相应的 $P-I$ 特性曲线。

表 4-2 单程后向结构高浓度掺杂光纤的 $P-I$ 特性数据记录表

泵浦电流/mA	输出功率/mW	泵浦电流/mA	输出功率/mW

(7) 取下光功率计，将输出信号接入光谱仪，设定扫描波长范围和采样点数，观察输出光谱的特征，并测量输出光谱的带宽和平坦度。

【实验注意事项】

- (1) 泵浦电流不要长期过大，否则会导致寿命降低。
- (2) 在用手触摸泵浦二极管前注意消除静电，以防损坏泵浦二极管。
- (3) 保持光纤接口整洁，否则影响光源的输出功率。
- (4) 实验完毕，盖上光纤端面保护帽，以免影响下次实验。

【问题思考和拓展】

- (1) 简述光纤宽带荧光光源的工作原理。
- (2) 说明光纤宽带荧光光源和光纤 EDFA 的异同。
- (3) 查阅相关资料，给出光纤光源的主要技术指标。
- (4) 前向和后向光纤宽带荧光光源的区别是什么？

【参考文献】

- [1] 黄文财，王秀琳，明海. 高功率宽带掺铒光纤超荧光光源研究[J]. 量子电子学报，2005，22(1): 95-97.
- [2] YAMADA M, KANAMORI T, TERUNUMA Y. Fluoride-based erbium doped fiber amplifier with inherently flat gain spectrum[J]. IEEE Photon Technol Lett, 1996, 8(7): 882-884.
- [3] WANG J P, WU Y, LOU C Y, et al. Study on supercontinuum flattening with fiber Bragg grating filters[J]. Journal of Optoelectronics. Laser, 2003, 14(8): 803-805 (in Chinese).

实验 5 发光二极管原理与特性实验

【实验背景】

发光二极管 (Light Emitting Diode, LED) 是通过电子与空穴复合释放能量而发光的非相干光源,在照明、平板显示、医疗器件等领域具有广泛的用途。发光二极管最早诞生于 1962 年,早期只有低光度的红光二极管,随着制造工艺的进步,目前在可见光、红外线及紫外线均可实现,光度也得到大大提高。随着 LED 在照明领域的应用拓展,对 LED 的性能要求也越来越高,随之也出现了一些急需解决的技术问题。与白炽灯、荧光灯等传统照明光源的发光机理不同,LED 属于电致发光器件,其热量不能及时辐射出去,导致器件温度升高,最终影响器件的波长不稳定、器件整体性能不稳定以及器件寿命短,因此实验研究 LED 的综合特性对 LED 的封装设计、实际应用具有重要的意义。本实验主要为基本特性研究,主要内容包括 LED 的伏安特性、电光转换特性、输出光空间分布特性。

【实验目的】

- (1) 理解 LED 的发光原理及其特性参数。
- (2) 测量 LED 的伏安特性、电光转换特性和输出光空间分布特性。
- (3) 测量 LED 的电光转换特性和输出光空间分布特性。

【实验原理】

1. 发光二极管发光原理

发光二极管的核心是 PN 结,由 P 型和 N 型半导体组成,如图 5-1 所示。P 型半导体中空穴的数量远远大于自由电子的数量,空穴为“多子”,电子为“少子”;N 型半导体中空穴为“少子”,电子为“多子”。当两种半导体结合在一起形成 PN 结时,N 区的电子向 P 区扩散,P 区的空穴向 N 区扩散,在 PN 结附近形成空间电荷区与势垒电场。该场会使载流子向扩散的反方向做漂移运动,最终扩散与漂移达到平衡,使流过 PN 结的净电流为零。在空间电荷区内,P 区的空穴被来自 N 区的电子复合,N 区的电子被来自 P 区的空穴复合,使该区内几乎没有能导电的载流子,所以又称为结区或耗尽层。

当加上与势垒电场方向相反的正向偏压时,即 P 型半导体接电源正极,N 型半导体接电源负极,在外电场作用下,结区变窄,P 区的空穴和 N 区的电子就向对方扩散运动,从

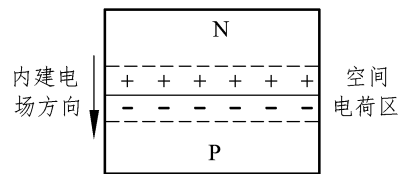


图 5-1 半导体 PN 结示意图

而在 PN 结附近产生电子与空穴的复合，并以热能或光能的形式释放能量。采用适当的材料，使复合能量以发射光子的形式释放，就构成发光二极管。发光二极管发射光谱的中心波长，由组成 PN 结的半导体材料的禁带宽度所决定，不同的材料及不同的掺杂比例，发射波长不同。光谱线宽度一般有几十纳米，利用不同发光颜色的二极管结合光谱合成技术可实现白光 LED。

2. LED 的特性

LED 的特性主要包括伏安特性、电光转换特性、输出光空间分布特性，下面我们分别讨论。伏安特性是指在 LED 两端加电压时，电流与电压的关系，如图 5-2 所示。在 LED 两端加正向电压，当电压较小，不足以克服势垒电场时，通过 LED 的电流很小。当正向电压超过死区电压 U_{th} 后，电流随电压迅速增长。正向工作电流指 LED 正常发光时的正向电流值，根据不同 LED 的结构和输出功率的大小，其值在几十毫安到几安之间。正向工作电压指 LED 正常发光时加在二极管两端的电压。允许功耗是指加于 LED 的正向电压与电流乘积的最大值，超过此值，LED 会因过热而损坏。LED 的伏安特性与一般二极管相似，伏安特性测量原理如图 5-3 所示。

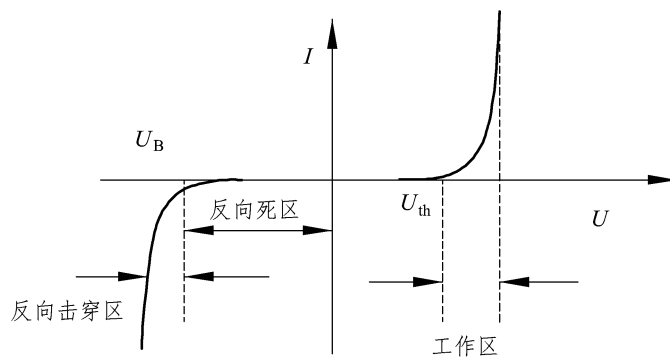


图 5-2 LED 的伏安特性曲线

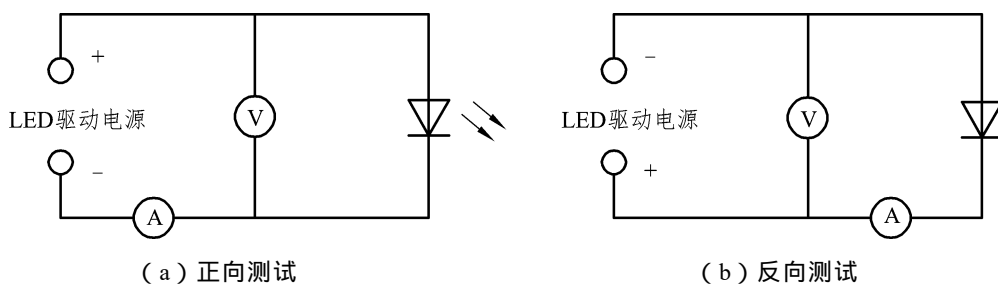


图 5-3 LED 伏安特性测试原理图

LED 的电光转换特性是指发光二极管发出的光在某截面处的照度与驱动电流的关系，理论上照度值与驱动电流近似呈线性关系，这是因为驱动电流与注入 PN 结的电荷数成正比，在复合发光的量子效率一定的情况下，输出光通量与注入电荷数成正比，其照度正比于光通量，电光转换特性测量原理如图 5-4 所示。

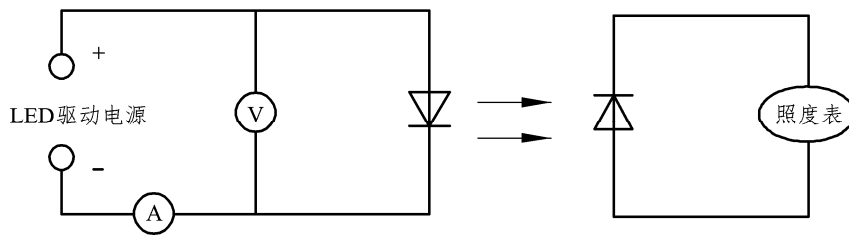


图 5-4 LED 电光转换特性测试原理图

光强空间分布是指从光源发出的光在空间上的分布,反映的是 LED 器件的发光强度的空间分布特性,也称为配光曲线。空间分布特性测量方法是采用一个光度探测器,可选择 LED 光源不动,光度探测器围绕它旋转扫描,也可选择光度探测器不动,LED 光源围绕一个固定中心点旋转,就可以得到不同角度的光强大小,一般测试点设置在 50~60 个,因此一条配光曲线就需要较长时间,如果测量三维空间的光强分布,则测试点更多。实际应用时,一般采用相对大小与角度描述空间光强的分布特性。光源的发光强度不能直接测出,都是通过先测量光源在一定距离下的光照度,然后再根据距离平方反比定律计算得出。通常,光源发光强度的测量方法主要有目视光度法和物理光度法两种。目视光度法以人眼作为接收器判断被比较光源和标准光源的光度量是否相同,因而带有较大的主观性,导致存在主观测量误差;而物理光度法是以带有视函数光探测器的仪器进行客观的检测,排除了人眼的主观因素,所以物理光度法也称客观光度法。由于发光二极管的芯片结构及封装方式不同,输出光的空间分布也不一样。一般以发射强度是以最大值为基准,此时方向角定义为零度,发射强度定义为 100%。当方向角改变时,发射强度(或照度)相应改变。发射强度降为峰值的一半时,对应的角度称为方向半值角。发光二极管出光窗口附有透镜,可使其指向性更好,方向半值角比较小,可用于光电检测、射灯等要求出射光束能量集中的应用环境;不加透镜的发光二极管,方向半值角较大,可用于普通照明及大屏幕显示等要求视角宽广的应用环境。

【实验系统与装置】

本实验仪器主要包括 LED 综合特性实验仪,主要由激励电源、LED 特性测试仪、热特性温控仪、温控测试台、实验装置和 LED 样件盒等组成。

【实验内容与步骤】

本实验内容主要包括测量伏安特性与电光转换特性和 LED 输出光空间分布特性测试。

1. 测量伏安特性与电光转换特性

将 LED 样品紧固在 LED 发射器上,发射器方向指示线对齐 0°。将照度检测探头移至距 LED 灯 10 cm 处,调节探头的高度和角度,使其正对 LED 发射器。先测量 LED 样品的反向特性,再测量 LED 样品的正向特性。

(1) 点击测试仪上的方向按钮,点亮“反向”指示灯,激励电源输出模式选为“稳压”,电源输出选择 0~36 V 挡,“稳压,36 V 挡”状态指示灯亮,点击测试仪上的“测试”按钮,点亮测试状态指示灯。

(2) 将激励电源上“输出调节”旋钮顺时针旋转,间隔 1 V 左右,并记录 $-1 \sim -4$ V 各电压下的反向电流值,数据记录完毕后,点击“复位”按钮,电流归零,反向特性实验结束。

(3) 点击测试仪上的方向按钮,点亮“正向”指示灯,电源输出选为“稳压”,电源输出选择 0~4 V 挡,顺时针旋转“输出调节”旋钮,调节电压至正向前三组设定值附近,记录对应的电流和照度值。

(4) 点击“复位”按钮,电流归零,若样品为高亮型 LED,将激励电源输出模式切换为“稳流,40 mA 挡”,若为功率型 LED,选择“稳流,350 mA 挡”,顺时针旋转“输出调节”旋钮,给定电流值,记录相应电压、照度值。

(5) 数据记录完毕后,点击“复位”按钮,电流归零,点击“测试”按钮,更换样品,重复以上测试步骤,并画出伏安特性与电光转换特性曲线。

2. LED 输出光空间分布特性测试

(1) 将 LED 样品紧固在发射器上,在“稳流”模式下调节驱动电流至设定电流。

(2) 松开 LED 光发射器底部的锁紧螺钉,缓慢旋转发射器,观察照度的变化,以照度最大处对应的角度为基准 0° ,并记录基准 0° 与刻线 0° 的差值。

(3) 对高亮型 LED,每隔 2° 测量一次照度的变化,记录实验数据;对功率型 LED,每隔 10° 测量一次照度的变化,并记录实验数据。

(4) 数据记录完毕后,点击“复位”按钮,电流归零,点击“测试”按钮,测试状态指示灯灭,否则更换样品时可能出现短暂报警。

(5) 更换样品,重复以上测试步骤。

(6) 根据测量结果画出 4 只高亮型 LED、4 只功率型 LED 的输出光空间分布特性曲线。

【实验注意事项】

- (1) 严禁在反向测试时使用电流源作为 LED 的驱动电源。
- (2) 严禁在正向电流较大时使用稳压源作为 LED 的驱动电源。
- (3) 实验之前,请确认短时间内周围环境温度不会出现较大波动。

【问题思考和拓展】

- (1) 简述 PN 结的结电场形成过程和发光二极管的发光原理。
- (2) 发光二极管的特性有哪些?
- (3) 温度会影响发光二极管的哪些特性?

【参考文献】

- [1] 张志伟. 光电检测技术[M]. 北京:清华大学出版社,2018.
- [2] 朱宏军. 交流发光二极管结温测试方法研究[D]. 厦门:厦门大学,2018.
- [3] 温怀疆,牟同升. 脉冲法测量 LED 结温热容的研究[J]. 光电工程,2010,7,53-59.