

# 光电子技术

GUANGDIANZI JISHU SHIYAN

# 实验

主 编 谢应茂

副主编 王风鹏 谢本亮

江西高校出版社

赣南师范学院校本教材基金资助出版

# 光电子技术实验

主 编 谢应茂

副主编 王凤鹏 谢本亮

江西高校出版社

### 图书在版编目(CIP)数据

光电子技术实验/谢应茂主编. —南昌:江西高校出版社, 2007.11

ISBN 978 - 7 - 81132 - 110 - 4

I . 光... II . 谢... III . 光电子技术 - 实验 - 高等学校 - 教材 IV . TN2 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007) 第 177101 号

|      |                                |
|------|--------------------------------|
| 出版发行 | 江西高校出版社                        |
| 社 址  | 江西省南昌市洪都北大道 96 号               |
| 邮政编码 | 330046                         |
| 电 话  | (0791)8529392, 8504319         |
| 网 址  | www.juacp.com                  |
| 印 刷  | 江西教育印刷厂                        |
| 照 排  | 江西太元科技有限公司照排部                  |
| 经 销  | 各地新华书店                         |
| 开 本  | 787mm × 1092mm 1/16            |
| 印 张  | 9                              |
| 字 数  | 225 千字                         |
| 版 次  | 2007 年 11 月第 1 版第 1 次印刷        |
| 印 数  | 1 ~ 1000 册                     |
| 书 号  | ISBN 978 - 7 - 81132 - 110 - 4 |
| 定 价  | 19.80 元                        |

版权所有 侵权必究

# 前 言

光电子技术是由光学技术和电子技术(与微电子技术)结合而成的一门高新技术,是光电子学的工程研究和应用。光电子技术以量子理论为理论基础,以物质的固体、气体、液体、等离子体等形态为对象,以光和电的能量与信息的转换、传播、接收为目标,以光通信、光计算、光存储、光传感、激光医疗、激光武器等等为应用领域,集“光、机、电、计、材”于一身,是一种最先进、最前沿、最实用的高新技术。

自从1960年美国人梅曼(T. H. Maiman)研制成功第一台红宝石激光器,至今已有40多年了。40多年来,已经采用固体、气体、液体、半导体、等离子体和自由电子等各种形态的物质产生激光,其激励(泵浦)的形成有光泵浦、电注入泵浦(通过半导体PN结注入电流)、电子束或离子泵浦、太阳能泵浦、化学能泵浦、核能泵浦等多种方式,最为普遍的是光泵浦和电注入泵浦。在众多的激光器中,半导体激光器独树一帜,具有体积小、效率高、光波覆盖面宽、应用范围广、价格便宜等许多优点。与此同时,半导体光电探测器也获得相应的发展,其性能、应用范围、价格等也同样具有优势,因而半导体激光器、半导体光电探测器连同半导体光波导器件(如光耦合器、光分路器、光开关)、光栅阵列等有源和无源光电器件一起,构成了独具特色、性能优异、用途广泛的半导体光电子技术。

光电子技术在国民经济和国防工业中有着十分广泛的应用,由于光电子技术有很强的实践性,只有掌握了它的基本实验方法,才能真正掌握光电子技术及其在实践中的应用。光电子技术实验是电子科学与技术、光信息科学与技术、光学工程等专业的必修课程之一。

本书内容融基础性、研究性、启发性和应用性于一体。在选题方面,既考虑了教学内容现代化的要求,又兼顾了实验方法与技能的训练;优选了一些能反映光电技术新成就、能激发学生兴趣、使学生能得到先进、有用的实验技能训练的课题。包括光源特性、光电探测、光波导、光纤信息、光调制、光电信号检测与处理、光电技术应用等方面的实验共23个。

实验教学是一个团队成员相互协作的工作,从实验仪器的制作、购置,到实验的编排和实验内容的编写,都需要许多教师和实验员同志长期努力,不断改进和完善。本书在物理实验中心和光电子技术学科组众多老师多年实验教学的基础上,

结合科学研究和我校实验设备、学生的具体情况,并充分考虑普遍适用性的情况下进行编写,是一项集体创新的劳动成果。

本书由谢应茂、王凤鹏、谢本亮、吴诗敏、王彤华、荣垂才负责编写,谢应茂担任主编,统编全稿,王凤鹏、谢本亮任副主编。其中实验6、7、8由谢应茂编写,实验2、17、18、19、20、21、22、23由王凤鹏编写,实验1、5、15由谢本亮编写,实验3、4、13、14由吴诗敏编写,实验12、16由王彤华编写,实验9、10、11由荣垂才编写。编写过程中参阅了有关的著作、文章和仪器说明书,在参考文献中未能一一列出,在此一并向他们表示诚挚的感谢和敬意。

由于编者水平有限,书中难免存在一些疏漏和错误,敬请广大读者批评指正。

编 者

2007年9月于赣州

# 目 录

|       |                                   |     |
|-------|-----------------------------------|-----|
| 实验 1  | LED/LD 的 $P-I-V$ 特性测试 .....       | 1   |
| 实验 2  | 半导体泵浦激光原理 .....                   | 7   |
| 实验 3  | He-Ne 激光器特性测试 .....               | 13  |
| 实验 4  | YAG 固体激光器特性 .....                 | 21  |
| 实验 5  | 光电探测器特性测试 .....                   | 28  |
| 实验 6  | 光波导薄膜厚度和折射率的测量 .....              | 34  |
| 实验 7  | 光波导传输损耗的测量 .....                  | 40  |
| 实验 8  | 用衰减全反射(ATR)方法测量金属膜的复介电常数和厚度 ..... | 44  |
| 实验 9  | 光纤数值孔径及传输损耗测试 .....               | 52  |
| 实验 10 | 光纤分束器及可调衰减器参数测量 .....             | 57  |
| 实验 11 | 光纤传感器 .....                       | 60  |
| 实验 12 | 电光调制 .....                        | 63  |
| 实验 13 | 声光调制 .....                        | 70  |
| 实验 14 | 磁光调制 .....                        | 75  |
| 实验 15 | 液晶光学双稳态 .....                     | 83  |
| 实验 16 | 光学非线性测量 .....                     | 89  |
| 实验 17 | 激光散斑测量 .....                      | 97  |
| 实验 18 | 电子散斑干涉 .....                      | 103 |
| 实验 19 | 相关器研究 .....                       | 107 |
| 实验 20 | 锁定放大器研究 .....                     | 115 |
| 实验 21 | 单光子计数 .....                       | 122 |
| 实验 22 | 等离子体特性测试 .....                    | 128 |
| 实验 23 | 傅里叶变换光谱 .....                     | 136 |

# 实验 1 LED/LD 的 $P - I - V$ 特性测试

发光二极管 (Light Emitting Diode), 简称 LED, 是一种注入式电致发光器件。注入式电致发光现象最早要追溯到 1923 年苏联科学家罗寒夫发现 SiC 中偶然形成的 PN 结中的光发射。直到 20 世纪 60 年代, 人们用 GaAsP 外延生长技术制成第一只实用化红光 LED, 其后 LED 得到迅速发展, 目前, LED 发光颜色覆盖红、橙、黄、绿、蓝、紫可见光全谱, 已得到非常广泛的应用, 为全色显示奠定了基础。

半导体激光器是指以半导体材料为工作物质的激光器, 又称为激光二极管 (Laser Diode), 简称 LD, 是 20 世纪 60 年代初发展起来的一种激光器。它具有体积小、重量轻、功率转换效率高、工作寿命长、覆盖波长范围广、结构简单、价格便宜等优点, 且它能方便地与光纤高效率耦合, 具有直接调制能力等特点。因此, LD 在国民经济、国防建设的各个领域都获得了广泛的应用。

## 一、实验目的

1. 学习 LED/LD 的工作原理和基本特性。
2. 测试 LED/LD 的  $P - I$  (功率 - 电流) 特性和  $V - I$  (电压 - 电流) 特性, 并计算阈值电流和微分量子效率。
3. 了解温度对阈值电流和输出功率的影响。

## 二、仪器设备

LED (发光二极管), LD (半导体激光二极管), LED/LD 电流源, 光功率计, 温控器, 积分球, 万用表。

## 三、实验原理

### 1. LED 工作原理

发光二极管大多由 III - IV 族化合物, 如 GaAs (砷化镓)、GaP (磷化镓)、GaAsP (磷砷化镓) 等半导体制成的, 其核心是 PN 结。因此它具有一般 PN 结的  $V - I$  特性, 即正向导通, 反向截止、击穿特性。此外, 在一定条件下, 它还具有发光特性。在正向电压下, 电子由 N 区注入 P 区, 空穴由 P 区注入 N 区。进入对方区域的少数载流子 (少子) 一部分与多数载流子 (多子) 复合而发光, 如图 1-1 所示。由于复合是在少子扩散区内发光的, 所以光仅在靠近 PN 结面数微米范围内产生。

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

$$\eta_{qi} = \frac{N_r}{G} \quad (1.1)$$

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

$$\eta_{qe} = \frac{N_T}{G} \quad (1.2)$$

式中, $N_T$ 为器件射出的光子数。

发光二极管所发之光并非单一波长,其光谱如图1-2所示。由图可见,该发光管所发之光中某一波长 $\lambda_0$ 的光强最大,该波长为峰值波长。理论和实践证明,光的峰值波长 $\lambda$ 与发光区域的半导体材料禁带宽度 $E_g$ 有关,即 $\lambda \approx 1240/E_g(\text{nm})$ 。式中 $E_g$ 的单位为电子伏特(eV)。若能产生可见光(波长在380 nm紫光~780 nm红光),半导体材料的 $E_g$ 应在3.26~1.63 eV之间。

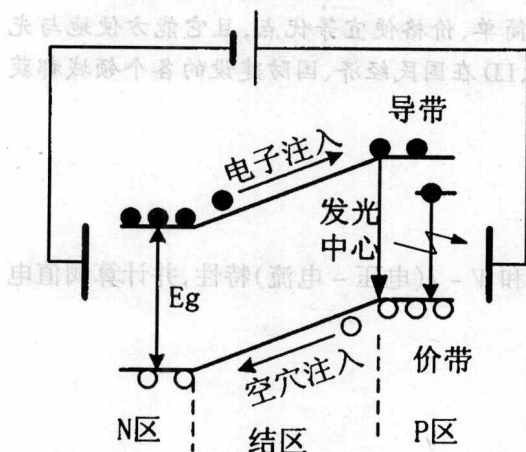


图 1-1 LED 发光原理

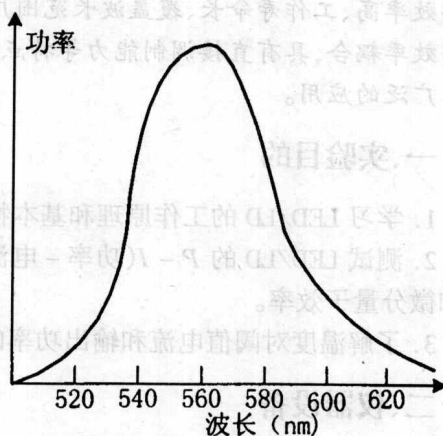


图 1-2 LED 光谱图

## 2. LD 工作原理

从激光物理学中我们知道,半导体激光器的粒子数反转分布是指载流子的反转分布。正常条件下,电子总是从低能态的价带填充起,填满价带后才能填充到高能态的导带;而空穴则相反。如果我们用电注入等方法,使PN结附近区域形成大量的非平衡载流子,即在小于复合寿命的时间内,电子在导带,空穴在价带分别达到平衡,如图1-3所示,那么在此注入区内,这些简化分布的导带电子和价带空穴就处于相对反转分布,称之为载流子反转分布。注入区称为载流子分布反转区或作用区。

结型半导体激光器通常用与PN结平面相垂直的一对相互平行的自然解理面构成平面腔。在结型半导体激光器的作用区内,开始时导带中的电子自发地跃迁到价带和空穴复合,

产生相位、方向并不相同的光子。大部分光子一旦产生便穿出 PN 结区,但也有一部分光子在 PN 结区平面内穿行,并行进相当长的距离,因而它们能激发产生出许多同样的光子。这些光子在平行的镜面间不断地来回反射,每反射一次便得到进一步的放大。这样重复和发展,就使得受激辐射趋于压倒性的优势,即在垂直于反射面的方向上形成激光输出。

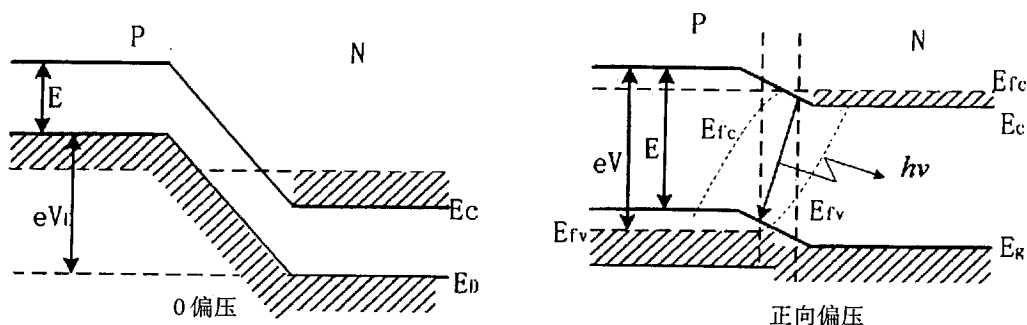
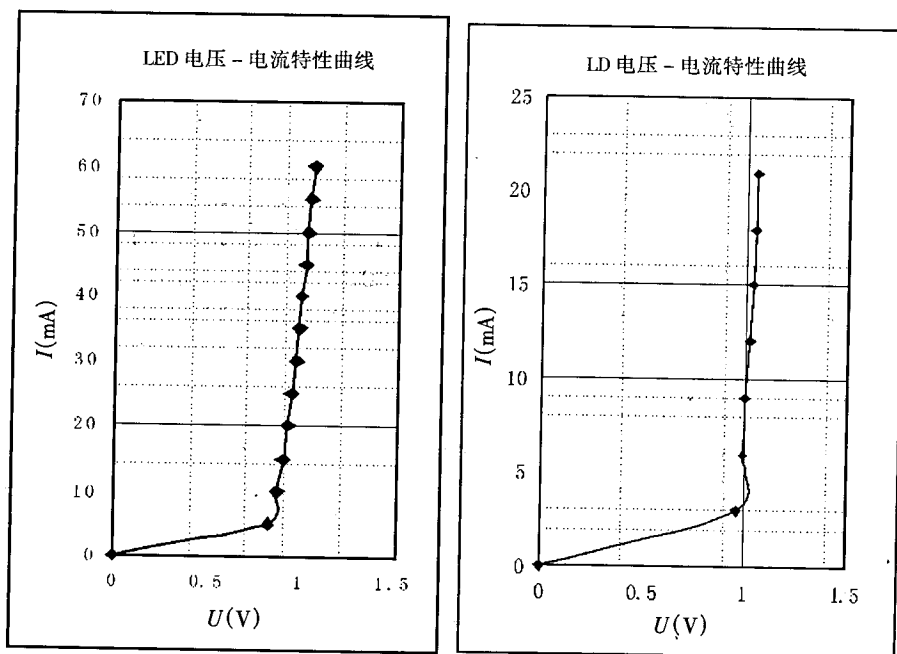


图 1-3 半导体激光器的能带图

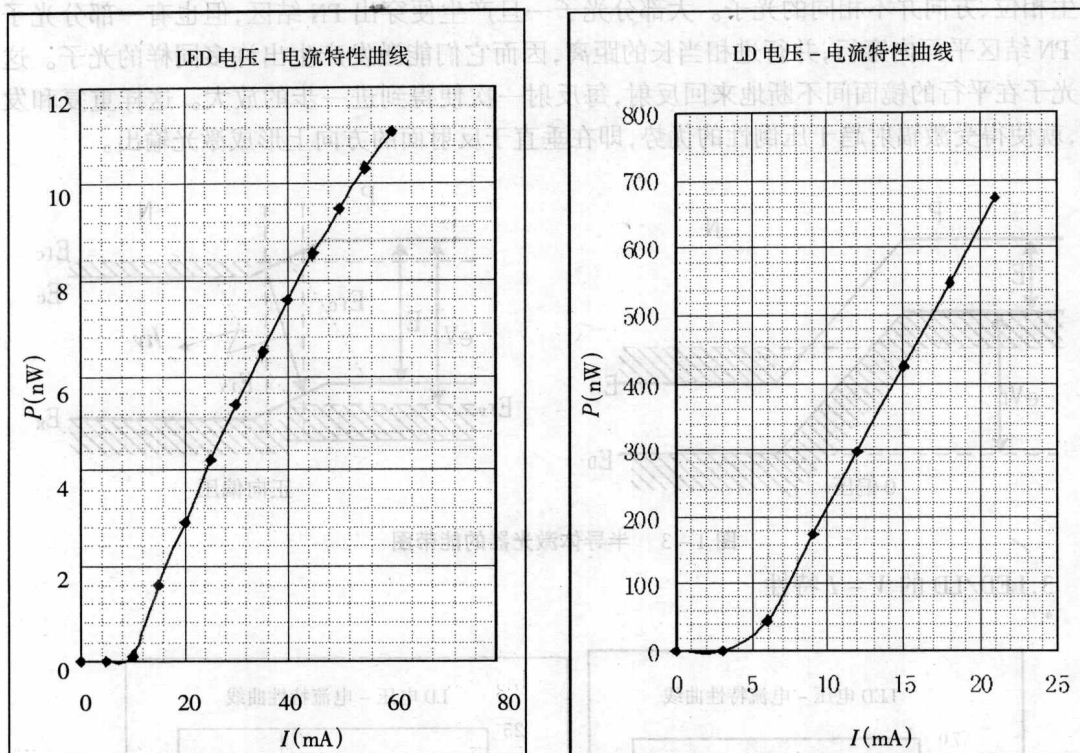
### 3. LED/LD 的 $V-I$ 特性

图 1-4 LED/LD 的  $V-I$  特性曲线

LED 和 LD 都是半导体光电子器件,其核心部分都是 PN 结。因此它们都具有与普通二极管相类似的  $V-I$  特性曲线,如图 1-4 所示。在正向电压小于某一值时,电流极小,不发光;当电压超过某一值后,正向电流随电压迅速增加,发光。我们将这一电压称为阈值电压或开门电压。

### 4. LED/LD 的 $P-I$ 特性

在结构上,由于 LED 与 LD 相比没有光学谐振腔。因此,LED 和 LD 的  $P-I$  关系特性

图 1-5 LED/LD 的  $P-I$  特性曲线

曲线则有很大的差别,如图 1-5 所示。LED 的  $P-I$  曲线基本上是一条近似的线性直线,只有当电流过大时,由于 PN 结发热产生饱和现象,使  $P-I$  曲线的斜率减小。

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

由图 1-5 可以看出,注入电流较低时,输出功率随注入电流缓慢上升。当注入电流达到并超出阈值电流后,输出功率陡峭上升。我们把陡峭部分外延,将延长线和电流轴的交点定义为阈值电流  $I_{th}$ 。根据其  $P-I$  曲线可以求出 LD 的外微分量子效率  $\eta_D$ 。它具有如下关系:

$$P = (I_f - I_{th}) \cdot V \cdot \eta_D \quad (1.3)$$

因此在曲线中,曲线的斜率表示的就是外微分量子效率。

### 5. LD 的温度特性

由于光电子器件是由半导体材料制成,因此温度对其光电特性影响也很大。随着温度的增加,LD 的阈值逐渐增大,光功率逐渐减小,外微分量子效率逐渐减小。阈值与温度的近似关系可以表示为:

$$I_{th}(T) = I_{th}(T_r) \exp[(T - T_r)/T_0] \quad (1.4)$$

式中,  $T_r$  室温,  $I_{th}(T_r)$  为室温下的阈值电流,  $T_0$  为特征温度不同温度下, LD 的  $P-I$  曲线如图 1-6 所示,根据此图可以求出 LD 的特征温度。

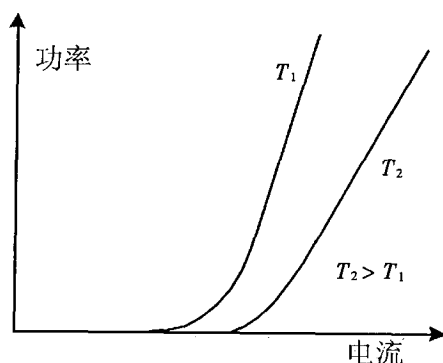


图 1-6 LD 的温度特征曲线

#### 四、实验内容和步骤

1. 按图 1-7 所示线路连接 LED/LD, 注意不要将极性接反! 若没有配积分球, 可直接将 LD 与光功率计连接, 如图 1-8 所示, 将 LED 在暗室内放入光功率计的接口处。实验时, 若不使用积分球, 将只会影响到 LED 各参数的测量精度, 对 LD 各参数的测量不会影响。

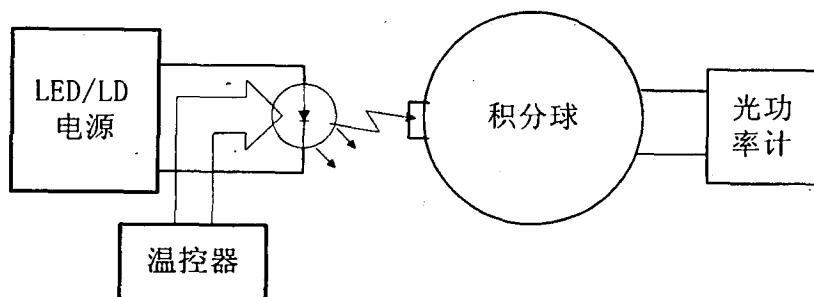


图 1-7 使用积分器和温控器的连接框图

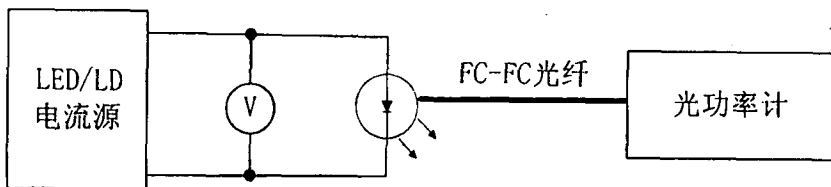


图 1-8 没有使用积分球和温控器的连接框图

2. 若实验中用到温控器, 启动温控器电源, 并将温度调到  $20^{\circ}\text{C}$ 。
3. 开启 LD 的驱动电源, 缓慢调节电流旋钮逐渐增加工作电流, 并用万用表测试 LD 两端的电压值。每隔一定电流间隔, 记录 LD 的电压值和光功率值。绘 LD 的  $P-I$  曲线和  $V-I$  曲线。
4. 开启 LED 的驱动电源, 缓慢调节电流旋钮逐渐增加工作电流, 并用万用表测试 LD 两端的电压值。每隔一定电流间隔, 记录 LED 的电压值和光功率值。绘 LED 的  $P-I$  曲线和  $V-I$  曲线。
5. 调节温控器, 升高 LD 的工作温度重复实验步骤 3, 记录 LD 的  $P-I$  曲线和  $V-I$  曲

线。比较在不同温度下,LD 的特性曲线变化。

6. 从特性曲线中求出阈值电压、阈值功率、量子效率等。

## 五、注意事项

1. LED/LD 电流源恒功测量时,如果仅调节“粗调”旋钮,而“细调”旋钮在最小位置,将不一定能把 LD 输出功率调到足够大。此时必须使用“细调”旋钮把输出功率调大。

2. 插拔 LD 之前,务必先把输出功率“粗调”旋钮调到最小,然后关闭电源开关。这是因为带电插拔 LD 会造成 LD 的劣化。

3. 在 LD 的  $P-I-V$  实验测中,电流值请勿超过 40 mA,以免烧坏元器件。

## 六、思考题

1. 为什么 LED/LD 的输出特性有较大差异?

2. 激光和我们生活中普通光有什么区别? LD 相对于其他激光器有哪些特点?

3. 为什么不用积分球会影响 LED 各参数的测量精度,但对 LD 各参数的测量不会影响?

## 【参考文献】

[1] 李相银. 激光原理技术及应用. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.

[2] 江月松, 李亮, 钟宇. 光电信息技术基础. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.

[3] 湖北众友科技实业股份有限公司. 光电技术原理实验指导书.



图 1-7 LD 功率测量电路示意图

2. 调节温度, 升高 LD 的工作温度, 记录 LD 的  $P-I-V$  特性曲线, 并分析温度对 LD 特性的影响。

3. 开启 LD 的驱动电流, 记录 LD 的电压和光功率值。绘 LD 的  $P-I$  特性曲线。

4. 开启 LD 的驱动电流, 记录 LD 的电压和光功率值。绘 LD 的  $P-I$  特性曲线。

5. 开启 LD 的驱动电流, 记录 LD 的电压和光功率值。绘 LD 的  $P-I$  特性曲线。

6. 开启 LD 的驱动电流, 记录 LD 的电压和光功率值。绘 LD 的  $P-I$  特性曲线。

7. 开启 LD 的驱动电流, 记录 LD 的电压和光功率值。绘 LD 的  $P-I$  特性曲线。

8. 开启 LD 的驱动电流, 记录 LD 的电压和光功率值。绘 LD 的  $P-I$  特性曲线。

9. 开启 LD 的驱动电流, 记录 LD 的电压和光功率值。绘 LD 的  $P-I$  特性曲线。

10. 开启 LD 的驱动电流, 记录 LD 的电压和光功率值。绘 LD 的  $P-I$  特性曲线。

## 实验 2 半导体泵浦激光原理

半导体泵浦激光器出现在 20 世纪 80 年代,它利用半导体激光器价格便宜、体积小、电光转换效率高等优点,针对( $\text{Nd}^{+3}$ )的强吸收波长(808 nm 左右),用相应波长的半导体激光器泵浦固体激光器,使两种激光器的优势互补。目前半导体泵浦激光器已获得广泛应用。

### 一、实验目的

1. 理解 LD 泵浦  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  固体激光器的基本工作原理。
2. 掌握连续激光器阈值、转换效率概念及测量方法。
3. 学习用刀口法测量光场分布及相关特性。

### 二、仪器设备

半导体泵浦激光原理实验装置, He - Ne 激光器, 激光功率计, 刀口装置。

### 三、实验原理

#### 1. 光源发光机理——自发辐射、受激吸收和受激辐射

普通常见光源的发光(如电灯、火焰、太阳等的发光)是由于物质在受到外来能量(如光能、电能、热能等)作用时,原子中的电子就会吸收外来能量而从低能级跃迁到高能级,即原子被激发。激发的过程是一个“受激吸收”过程。处在高能级( $E_2$ )的电子寿命很短(一般为  $10^{-8} \sim 10^{-9}$  秒),在没有外界作用下会自发地向低能级( $E_1$ )跃迁,跃迁时将产生光(电磁波)辐射。辐射光子能量为

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (2.1)$$

这种辐射称为自发辐射。原子的自发辐射过程完全是一种随机过程,各发光原子的发光过程各自独立,互不关联,即所辐射的光在发射方向上是无规则的射向四面八方,另外其位相、偏振状态也各不相同。

在通常热平衡条件下,处于高能级  $E_2$  上的原子数密度  $N_2$ , 远比处于低能级的原子数密度低,这是因为处于能级  $E$  的原子数密度  $N$  的大小随能级  $E$  的增加而指数减小,即  $N \propto \exp(-\frac{E}{kT})$ , 这就是著名的波耳兹曼分布规律。于是在上、下两个能级上的原子数密度比为

$$N_2/N_1 \propto \exp[-(E_2 - E_1)/kT] \quad (2.2)$$

式中  $k$  为波耳兹曼常数,  $T$  为绝对温度。因为  $E_2 > E_1$ , 所以  $N_2 \ll N_1$ 。例如, 已知氢原子基

态能量为  $E_1 = -13.6 \text{ eV}$ , 第一激发态能量为  $E_2 = -3.4 \text{ eV}$ , 在  $20^\circ\text{C}$  时,  $kT \approx 0.025 \text{ eV}$ , 则

$$N_2/N_1 \propto \exp(-400) \approx 0 \quad (2.3)$$

可见, 在  $20^\circ\text{C}$  时, 全部氢原子几乎都处于基态, 要使原子发光, 必须外界提供能量使原子到达激发态, 一般的光源采用加热、碰撞等方法来达到这一目的。对于激光则采用受激吸收的方法来完成, 即用满足(2.1)式的光子使原子从低能级向高能级跃迁。而处在高能级的原子在满足(2.1)式的光子的激励下向低能级跃迁时, 将发出另一个同频率的光子, 这一过程就称为受激辐射。这种受激辐射的光子有显著的特点, 就是原子可发出与诱发光子全同的光子, 不仅频率(能量)相同, 而且发射方向、偏振方向以及光波的相位都完全一样。于是, 入射一个光子, 就会出射两个完全相同的光子。这意味着原来光信号被放大, 这种在受激过程中产生并被放大的光, 就是激光, 即光子简并度很高( $\bar{n} \gg 1$ )的一种光辐射。如图 2-1 所示。

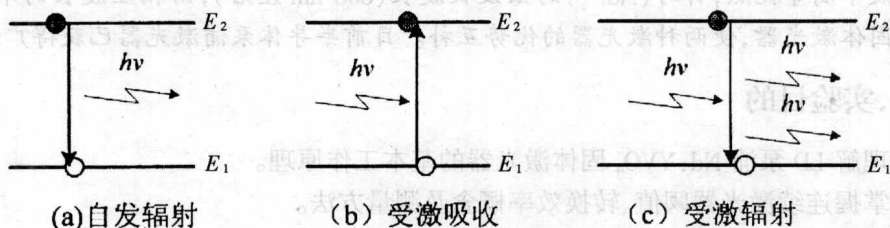


图 2-1 双能级原子中的三种跃迁

## 2. 产生激光的条件

综上所述, 要产生激光, 必须使受激辐射强于受激吸收, 产生激光的三个基本物理条件是: (1) 原子系统两个特定能级间实现粒子数反转; (2) 对可获得受激辐射放大的光辐射场状态(模式)进行有限的限制; (3) 足够长的受激辐射放大过程。

为达到以上条件, 激光器必须包括三个基本组成部分: 工作物质、泵浦源和光学谐振腔。

工作物质的能级结构必须与泵浦源相吻合。设工作物质有三能级,  $E_1$ ,  $E_2$  和  $E_3$ , 三能级中的粒子数满足指数关系, 如图 2-2 所示。现在如果有频率为  $\nu_{31} = \frac{(E_3 - E_1)}{h}$  的泵浦光照在粒子上, 使一部分  $E_1$  能级的粒子跃迁到  $E_3$  能级, 可使  $E_1$  和  $E_3$  的粒子数几乎相等。如果  $E_2$  比较靠近  $E_3$ , 这样就能使  $E_3$  能级的粒子数大于  $E_2$  能级的粒子数。从而在  $E_2$  和  $E_3$  之间形成了粒子数的反转。若此时又有频率满足  $\nu = \frac{(E_3 - E_2)}{h}$  的光子入射, 则刚好诱发  $E_3$  和  $E_2$  之间的受激辐射跃迁, 这就形成了有放大作用的受激辐射。要持续有激光输出, 必须有泵浦源不断将粒子从  $E_1$  抽运到  $E_3$ , 还必须要有光学谐振腔将频率为  $\nu$  的光反馈回工作物质诱发更多的受激辐射。

由于  $E_3$  和  $E_2$  之间的能级间隔小于  $E_1$  和  $E_3$  之间的能级间隔, 所以辐射出的激光比泵浦光的波长要长。

## 3. LD 泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 固体激光器

半导体激光器(LD)泵浦钕钒酸盐(Nd:YVO<sub>4</sub>)固体激光器结构如图 2-3 所示。其中采用波长为 808 nm 的半导体激光器作为泵浦光源, 工作物质为 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体, 得到 1 064 nm 的激光输出。由于工作物质晶体中的  $\text{Nd}^{+3}$  对 808 nm 的光有很强的吸收能力, 因此这种

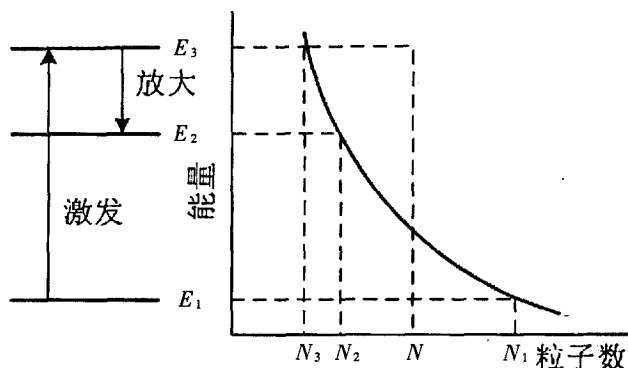
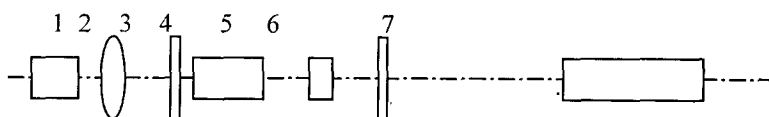


图 2-2 三能级结构粒子数反转

1. LD 2. 耦合镜 3. 全反镜 4. Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体 5. KTP 6. 输出镜 7. 功率计图 2-3 LD 泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 固体激光器结构示意图

激光器具有较高的电光转换效率。

这种激光器继承了半导体激光器的体积小、电光转换率高、结构简单、装调方便、使用寿命长等优点,同时又克服了半导体激光器光束质量差的缺点。

#### 4. 激光倍频

当光波电场作用于介质时,介质产生极化。如果作用于介质的光强足够强,则介质极化强度  $P$  与电场  $E$  之间的关系为

$$P = \epsilon_0(\chi_1 E + \chi_2 E^2 + \chi_3 E^3 + \cdots). \quad (2.4)$$

可见极化强度与电场的关系包含了一次线性项和二次、三次非线性项。这里我们只考虑二次非线性项

$$P^{(2)} = \epsilon_0 \chi_2 E^2 \quad (2.5)$$

若有角频率为  $\omega$  的单色光入射到非线性介质上,则场强  $E = E_0 \cos \omega t$ ,代入(2.5)式中得到

$$P^{(2)} = \epsilon_0 \chi_2 E_0^2 \cos^2 \omega t = \frac{\epsilon_0}{2} \chi_2 E_0^2 (1 + \cos 2\omega t) \quad (2.6)$$

式中第二项代表频率等于基频  $\omega$  两倍的电偶极矩,它将辐射二次谐波(倍频光),这就是激光的倍频效应。

实验中用 KTP(KTiOPO<sub>4</sub> 磷酸钛氧钾)晶体将 1 064 nm 激光变换成 532 nm 的激光。

#### 5. LD 泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 固体(倍频)激光器主要参数测量方法

(1) 泵浦功率( $P_{in}$ ) - 输出功率( $P_{out}$ )特性曲线。LD 作为固体激光器的泵浦光源,其输出功率作为固体激光器的泵浦功率  $P_{in}$ ,而固体激光器的输出功率为  $P_{out}$ ,其曲线为  $P_{in} - P_{out}$  曲线。如图 2-4 所示。随泵浦功率增加,激光器首先是渐渐地增加自发辐射,直至超过阈值,发生受激辐射。最感兴趣的参数是开始发生受激辐射时的泵浦功率值,通常把这个功率值称之为阈值功率,用  $P_{th}$  表示。

(2) 阈值功率( $P_{th}$ )和转换效率。阈值功率是 LD 泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 固体激光器开始受激辐射时的对应的泵浦功率。利用激光器的  $P_{in} - P_{out}$  曲线可以找到  $P_{th}$ , 其作法有三种: 第一是双斜法, 它是将  $P_{in} - P_{out}$  曲线中两条直线延长线交点所对应的功率作为激光器的阈值功率  $P_{th}$ , 如图 2-4(a) 所示; 第二种作法是, 输出光功率延长线与功率轴的交点作为激光器的  $P_{th}$ , 如图 2-4(b) 所示, 这是一种比较常规的作法; 第三种方法是在  $P_{in} - P_{out}$  曲线中, 将输出功率对泵浦功率求二阶导数, 求导数波峰所对应的功率值为  $P_{th}$ , 这种作法的测量精度较高, 如图 2-4(c) 所示。

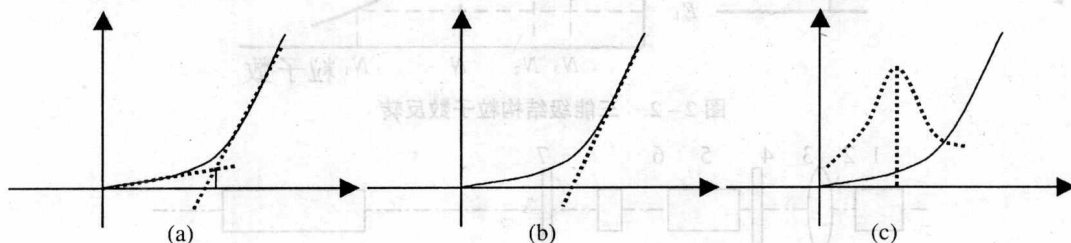


图 2-4  $P_{in} - P_{out}$  曲线及  $P_{th}$  的求法

表示光-光转换效率的量值是  $P_{th}$  以上的  $P_{in} - P_{out}$  曲线的斜率, 用  $\Delta P_{out} / \Delta P_{in}$  表示。在  $P_{th}$  以上的  $P_{in} - P_{out}$  曲线的斜率表示波长为 808 nm 的泵浦功率有多少转换成 1 064 nm 固体激光器的输出功率。

(3) 光强分布和光斑大小。激光束基模的光强分布是高斯分布, 设激光沿  $z$  轴传播, 则在垂直于  $z$  轴的  $xy$  平面上的光强分布  $I(x, y)$  为

$$I(x, y) = \frac{2P_0}{\pi W^2} \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{W^2}\right] \quad (2.7)$$

或者

$$I(x, y) = I_0 \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{W^2}\right] \quad (2.8)$$

其中  $P_0$  为光束的总功率,  $I_0$  为光束截面上的中央最大光强,  $W$  为光斑半径, 它定义为光强衰减到中央最大光强的  $1/e^2$  的位置与  $z$  轴之间的距离, 称为半宽度。衡量光斑大小也常用半极大全宽度(FWHM), 它定义为光强衰减到中央最大光强的一半的位置与  $z$  轴之间距离的 2 倍, 称为半功率直径, 记为  $D_{1/2}$ , 它与  $W$  的关系由式(2.7)或式(2.8)可得:

$$D_{1/2} = \sqrt{2 \ln 2} W = 1.1774 W \quad (2.9)$$

用刀口法可以测定光斑的大小和验证光斑的光强分布是高斯分布。实验中使刀口平行于  $y$  轴, 沿垂直于  $x$  轴方向移动当刀口缓慢推入光束时, 设刀口挡住了  $x \leq a$  的所有点。未被刀口挡住而通过的光功率  $P$  用函数表示为:

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} \int_a^{\infty} I(x, y) dx dy = \frac{P_0}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{2}}{W} a\right) \quad (2.10)$$

如果先用刀口把光束全部挡住, 然后把刀口缓慢拉出时, 未被刀口挡住而通过的光功率可用相应的函数表示。将式(2.7)、(2.8)和式(2.10)归一化后有:

$$\frac{I(x, y)}{P_0} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\sigma^2}\right) \quad (2.11)$$

$$\frac{I(x, y)}{P_0} = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\sigma^2}\right) \quad (2.12)$$

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{a}{\sqrt{2}\sigma}\right) \quad (2.13)$$

其中  $\sigma = W/2$  是数理统计中的标准偏差。根据式(2.12)和式(2.13)作出的归一化高斯分布和相对功率与刀口位置关系曲线如图 2-5 所示。

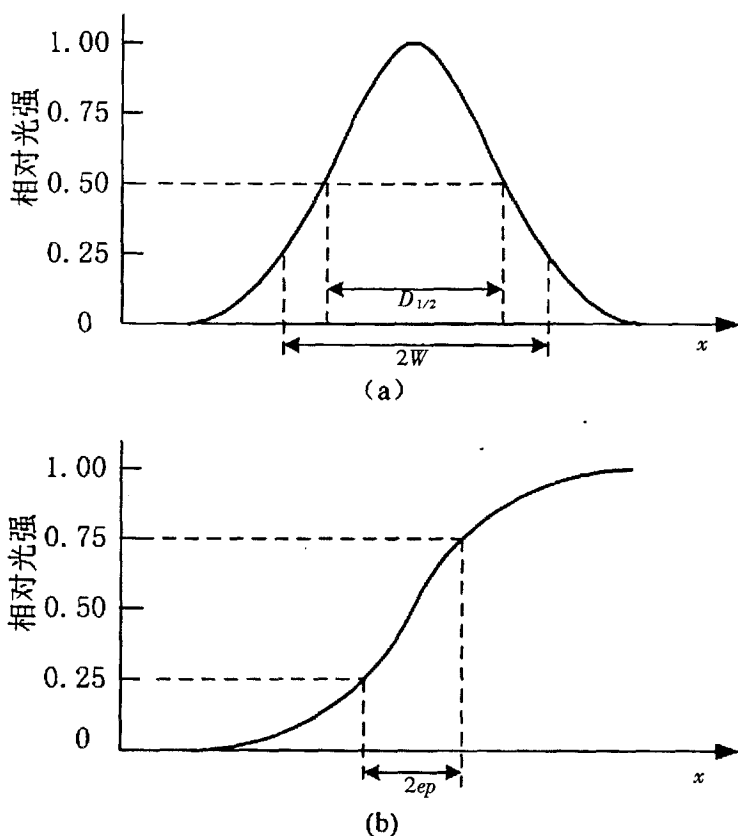


图 2-5 (a)归一化高斯分布;(b)相对功率与刀口位置关系

可以证明,相对功率为 0.25 和 0.75 的点分别位于高斯分布曲线极大值两侧,其距离  $ep = 0.6745\sigma$ 。所以从由实验得到的相对功率与刀口位置的关系曲线就可确定  $ep$  的值。算出  $\sigma$  值后就可计算  $P/P_0$  的理论值,进行曲线拟合。如果拟合得好,就证明基横模光强是高斯分布。用  $ep$  的值可计算光斑大小:

$$W = 1.4826(2ep) \quad (2.14)$$

$$D_{1/2} = 1.7456(2ep) \quad (2.15)$$

#### 四、实验内容和步骤

##### 1. 半导体激光器 $P-I$ 特性测试

连上电线,将电流调到最小;打开激光电源将仪器预热 10~30 分钟;将光功率计探头置