

光纤通信技术基础实验

GUANGXIAN TONGXINJISHU JICHUSHIYAN

◎ 吕 敏 陈 笑 王义全/编著

中央民族大学出版社
China Minzu University Press

光纤通信技术基础实验

GUANGXIAN TONGXINJISHU JICHUSHIYAN

吕敏 陈笑 王义全/编著



中央民族大学出版社
China Minzu University Press

图书在版编目 (CIP) 数据

光纤通信技术基础实验/吕敏等编著. —北京: 中央民族大学出版社, 2011. 10

ISBN 978 - 7 - 5660 - 0068 - 2

I. ①光… II. 吕… III. ①光纤通信—实验—高等学校—教材 IV. ①TN929.11 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 201041 号

光纤通信技术基础实验

编 著 吕 敏 陈 笑 王义全

责任编辑 舒 松

封面设计 布拉格

出 版 者 中央民族大学出版社

北京市海淀区中关村南大街 27 号 邮编: 100081

电话: 68472815(发行部) 传真: 68932751(发行部)

68932218(总编室) 68932447(办公室)

发 行 者 全国各地新华书店

印 刷 厂 北京华正印刷有限公司

开 本 880 × 1230 (毫米) 1/32 印张: 4.75

字 数 150 千字

版 次 2011 年 10 月第 1 版 2011 年 10 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5660 - 0068 - 2

定 价 16.00 元

版权所有 翻印必究

前 言

光纤通信技术基础实验是为光信息科学与技术专业学生开设的专业实验课程，是光纤通信技术理论教学的重要补充。本书是在光纤通信技术基础实验校内讲义的基础上，经修改与扩充完成的。旨在培养本科生对基本知识的应用能力，为培养学生的创新能力和科研能力打基础。

本书由吕敏、陈笑、王义全三位教师根据中央民族大学光信息科学与技术专业的知识结构特点、学校专业建设的指导精神及社会对本专业毕业生的具体要求，结合本专业本科生培养方案的设置而编写的。

该教材从2006年就以讲义的形式在教学中试用，通过几年的不断改进，学生反映效果良好。本书共包含14个基础实验，实验一到实验十由吕敏同志编写，实验十一到实验十四由陈笑同志、王义全同志编写。

本教材得到了中央高校基本科研业务费专项资金资助。

《光纤通信技术基础实验》可以作为高等学校光信息科学与技术专业实验教材或者参考书，也可以供相关人员参考使用。

目 录

实验注意事项	(1)
实验一 半导体激光器的特性测量	(3)
实验二 单模光纤的色散和损耗测量	(16)
实验三 单模光纤数值孔径的测量	(27)
实验四 光纤几何参数的测量	(32)
实验五 部分无源器件的特性测量	(54)
实验六 掺铒光纤放大器的特性测量	(66)
实验七 波分复用/解复用系统模拟	(75)
实验八 光纤通信系统误码特性的测量	(88)
实验九 光纤端场传感实验	(93)
实验十 棱镜耦合法测量光波导的薄膜厚度 和折射率	(106)
实验十一 光纤型 Mach - Zehnder 干涉仪的 干涉实验	(115)
实验十二 保偏光纤偏振消光比的测量	(123)
实验十三 各类 2×2 光纤耦合器的研制实验	(131)
实验十四 光纤型 WDM 波分复用器的研制实验	(139)
参考文献	(143)

实验注意事项

1. 实验中光纤光源出来的光为较强的红外光，切勿将该光直接对准人的眼睛。

2. 由于本实验的仪器都十分昂贵，实验时应该特别注意轻拿轻放，切勿用力过猛以免损伤器件；严禁过分折弯光纤跳线和光纤以免折断；电源开关不要过于频繁，以免影响激光器寿命。

3. 超量程的输入光信号会损坏探测器，不可直接测量超量程光，如实在需要应该加相应倍数的衰减器，不要将超过 10mW 的光信号直接输入到光纤功率计探头，测量大功率的信号可以考虑使用衰减器。

4. 为保证测量结果的精度，光纤跳线连接器插入仪表前，应注意保持端面清洁，可用无尘擦拭纸擦连接器插头端；连接时不能过松或者过紧；并应该多次测量求平均值。

5. 仪表使用一段时间后，若发现测试值偏小时，可以用牙签缠上脱脂棉插入探测器孔清洁。

6. 做完实验后，光纤跳线可以不必从仪表上取下，保持连接即可，有利于避免因频繁插拔而弄脏跳线连接端面或对器件造成损伤。

7. 法兰盘和衰减器有缺口，连接时，要将连接头上的突起（key）对着缺口，不能强行大力旋扭。

8. 按照国际惯例，APC 为绿色标志，FC 为黑色标志。ED-

FA 为 APC 接口，功率计为 PC 接口。APC 和 FC 不能直接连接，否则造成光源或者 EDFA 不稳定，并且造成很大的损耗。

9. 法兰式固定衰减器和法兰盘外形相同，但底座上写有“10dB”字样，注意区别，否则可能造成测量结果错误。

实验一 半导体激光器的特性测量

〔实验目的〕

1. 通过测量半导体激光器工作时的功率、电压、电流，画出 $P-V$ 、 $P-I$ 、 $I-V$ 曲线，掌握半导体激光器的工作特性。
2. 通过曲线计算半导体激光器的阈值，以及功率效率、外量子效率和外微分效率，并对三者进行比较。
3. 通过调整不同的静态工作点和输入信号强度大小，观察截止区、线性区、限流区的信号的不同响应（信号畸变，线性无畸变），了解调制的工作原理。

〔实验原理〕

半导体激光器是用半导体材料作为工作物质的一类激光器，由于半导体物质结构上的差异，产生激光的具体过程比较特殊。常用的材料有砷化镓（GaAs）、硫化镉（CdS）、磷化铟（InP）、硫化锌（ZnS）等。激励方式有电注入、电子束激励和光泵浦三种形式。

半导体激光器具有体积小、效率高等优点，广泛应用于激光通信、印刷制版、光信息处理等方面。

一、半导体激光器的结构与工作原理

1. 注入式同质结激光器的工作原理

半导体材料多是晶体结构。当大量原子规则而紧密地结合成晶体时，晶体中那些价电子都处在晶体能带上。价电子所处的能带称为价带（对应较低能量），与价带最近的高能带称为导带，能带之间的空域称为禁带。当加外电场时，价带中电子跃迁到导带中去，在导带中可以自由运动而起导电作用。同时，价带中失掉一个电子，则相当于出现一个带正电的空穴，这种空穴在外电场的作用下，也能起导电作用。因此，价带中空穴和导带中的电子都有导电作用，统称为载流子。

没有杂质的纯净半导体，称为本征半导体。如果在本征半导体中掺入杂质原子，则在导带之下和价带之上形成了杂质能级，分别称为施主能级和受主能级。有施主能级的半导体称为 n 型半导体；有受主能级的半导体称为 p 型半导体。在常温下，热能使 n 型半导体的大部分电子被激发到导带上，成为自由电子。而 p 型半导体的大部分受主原子则俘获了价带中的电子，在价带中形成空穴。因此，n 型半导体主要由导带中的电子导电；p 型半导体主要由价带中的空穴导电。

半导体激光器中所用半导体材料，掺杂浓度较大，n 型杂质原子数一般为 $2 \sim 5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ；p 型为 $1 \sim 3 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 。

在一块半导体材料中，从 p 型区到 n 型区突然变化的区域称为 p-n 结。其交界面处将形成一空间电荷区。n 型半导体导带中的电子要向 p 区扩散，而 p 型半导体价带中的空穴要向 n 区扩散。这样一来，结区附近的 n 型区由于是施主而带正电，结区附近的 p 型区由于是受主而带负电。在交界面处形成一个由 n 区指向 p 区的电场，称为自建电场，见图 1.1，此电场会阻止电子和空穴的继续扩散。

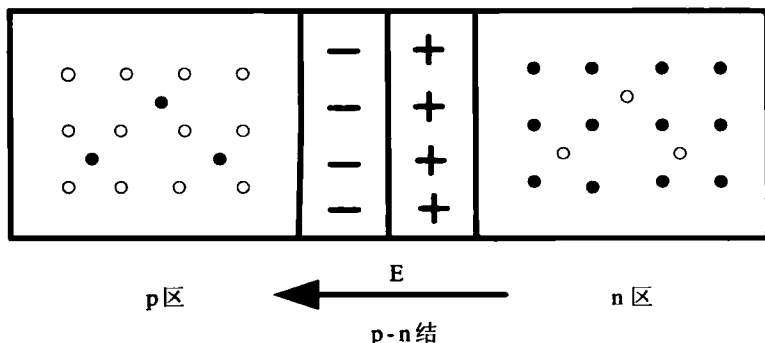


图 1.1 自建电场的示意图

若在形成了 p-n 结的半导体材料上加上正向偏压，p 区接正极，n 区接负极，则正向电压的电场与 p-n 结的自建电场方向相反，削弱了自建电场对晶体中电子扩散运动的阻碍作用，使 n 区中的自由电子在正向电压的作用下，又源源不断地通过 p-n 结向 p 区扩散，在结区内同时存在着大量导带中的电子和价带中的空穴时，它们将在注入区产生复合，当导带中的电子跃迁到价带时，多余的能量就以光的形式发射出来。这就是半导体场致发光的机理，这种自发复合的发光称为自发辐射。

要使 p-n 结产生激光，必须在结区内形成粒子反转分布状态，需使用重掺杂的半导体材料，要求注入 p-n 结的电流足够大（如 $30000\text{A}/\text{cm}^2$ ）。这样在 p-n 结的局部区域内，就能形成导带中的电子多于价带中空穴数的反转分布状态，从而产生受激复合辐射而发出激光。

2. 半导体激光器结构

最常见的激光器有法布里-珀罗型（F-P）激光器，随着技术的进步，激光器的制造工艺有了突飞猛进的提高，新的品种不断出现，还有分布反馈激光器、量子阱激光器、垂直腔面发射

激光器等。

F-P 型激光器如图 1.2 所示，其外形及大小与小功率半导体三极管差不多，仅在外壳上多一个激光输出窗口。夹着结区的 p 区与 n 区做成层状，结区厚为几十微米，面积约小于 1mm^2 。光学谐振腔是利用与 p-n 结平面相垂直的自然解理面（110 面）构成，它有 35% 的反射率，已足以引起激光振荡。若需增加反射率可在晶面上镀一层二氧化硅，再镀一层金属银膜，可获得 95% 以上的反射率。一旦半导体激光器上加上正向偏压时，在结区就发生粒子数反转而进行复合。

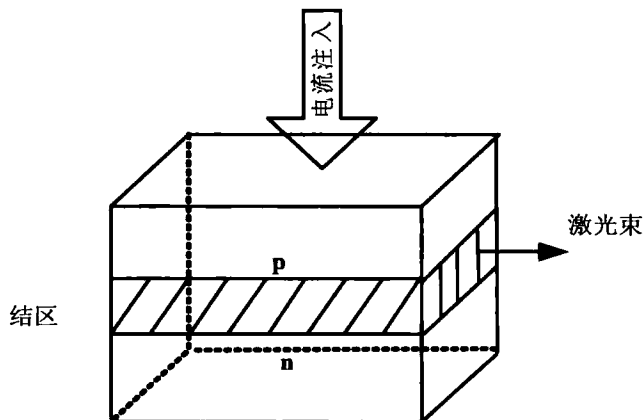


图 1.2 半导体激光器的结构图

F-P 激光器存在着多个纵模，谱宽较宽。而分布反馈激光器是单纵模激光器，其边模抑制比 MSR 能达到 30dB，谱宽在 50MHz 以下，具有非常好的单色性和方向性，由于它没有使用晶体解理面作为反射镜，所以更容易集成化，应用前景十分诱人。量子阱激光器可以通过改变有源层的厚度来改变发射波长，大大降低了阈值电流，具有低阈值电流、可高温工作、谱线窄和

调制速度高等优点。垂直腔面发射激光器 VCSEL 是一种电流和发射光束方向都与芯片表面垂直的激光器。垂直腔结构对于二维应用具有很好的灵活性，与光纤耦合时具有最高的耦合效率。

二、半导体激光器的工作特性

图 1.3 给出了典型的半导体激光器的工作特性示意图。其中实线是输出光功率和工作电流的关系曲线（P-I 曲线），虚线是工作电压和工作电流的关系曲线（V-I 曲线）。

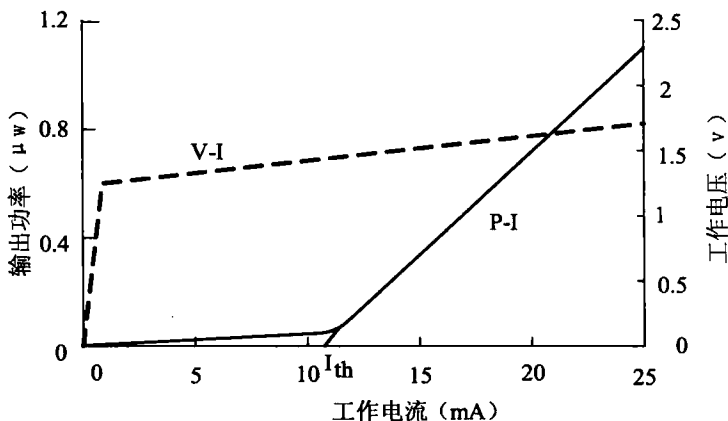


图 1.3 LD 的 V-I 曲线和 P-I 曲线

1. 阈值电流 (I_{th})

当注入 p-n 结的电流较低时，只有自发辐射产生，并不产生激光。随着电流值的增大增益也增大，当电流值增大到一定量时，p-n 结产生激光，则称此电流值为阈值电流，用 I_{th} 表示，如图 1.3 中 P-I 曲线所示。

阈值电流 (I_{th}) 的测量方法：

阈值电流可以从三种不同的描述方法中测得，如图 1.4 所

示。(1) 用 $P-I$ 曲线描述：如图中的实线，在 $P-I$ 曲线的快速上升段上取其中的线性部分延长线与横坐标的交点 a 即为阈值电流；或把荧光部分和激光部分分别近似看成两条直线，其交点 b 即为阈值电流；(2) 用 $P-I$ 一阶微分曲线 (dP/dI 曲线) 描述：如图中虚线，在 dP/dI 曲线上，取上升沿的中点所对应的电流值作为阈值点，此处的中点是指图中 c 点（即输出功率上升到最大值的 10% 处）和 d 点（即功率上升到 90% 处）的中点；(3) 用 $P-I$ 二阶微分曲线 (d^2P/dI^2 曲线) 描述：如图中短画线，用曲线的顶点 e 所对应的电流值作为阈值点。

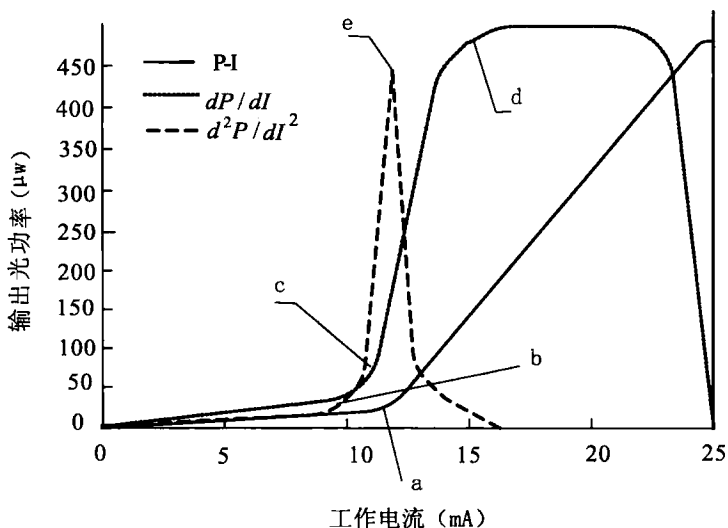


图 1.4 LD 的三种工作特性曲线

2. 发散角

由于半导体激光器的谐振腔短小，激光方向性较差，在 PN

结的垂直平面内，发散角最大，可达 $20^\circ - 30^\circ$ ；在 PN 结的水平面内约为 10° 左右（由于实验中我们使用的 LD 已经过准直，本实验不测发散角）。

3. 效率

a. 外量子效率

定义为： $\eta_{ex} = \frac{\text{激光器每秒钟发射的光子数}}{\text{激光器每秒钟注入的电子 - 空穴对数}}$

$$= \frac{P_{ex}/h\nu}{I/e_0}$$

其中 P_{ex} 为激光器输出光功率， h 为普朗克常数， e_0 为电荷常数， I 为工作电流。一般温度达 77K 时，GaAs 激光器外量子效率达 70% - 80%；达 300K 时，降到 30% 左右。

b. 功率效率

定义为： $\eta_p = \frac{\text{激光器辐射的光功率}}{\text{激光器消耗的电功率}} = \frac{P_{ex}}{VI}$

由于 $h\nu \approx E_g \approx e_0 V$ ，所以功率效率可以近似为外量子效率。其中 V 为激光器工作电压。

c. 外量子微分效率

由于激光器是阈值器件，当 I 小于 I_{th} 时，发射功率几乎为零，而当电流大于阈值以后，输出功率随电流线性增加，所以用外量子效率和功率效率对激光器的描述都不够直接，于是定义了

外量子微分效率： $\eta_D = \frac{(P_{ex} - P_{th})/h\nu}{(I - I_{th})/e_0} \cong \frac{P_{ex}/h\nu}{(I - I_{th})/e_0}$

由于各种损耗，目前的双异质结器件，室温时的 η_D 最高只达 10%，只有在低温下才能达到 30% - 40%。

4. 光谱特性

由于半导体材料的特殊电子结构，受激复合辐射发生在能带（导带与价带）之间，所以激光发光区较宽，又因谐振腔结构不

同，故 LD 的谱线宽度也不同。输出激光的峰值波长还随环境温度的变化而改变。

三、半导体激光器的调制特性

激光具有极好的时间相干性和空间相干性，它与无线电波相似，易于调制，且光波的频率极高，能传递信息的容量很大。加之激光束发散角小，光能高度集中，既能传输较远距离，又易于保密。因而为光信息传递提供了一种理想的光源。

把将要传输的信息加载于激光辐射的过程称为激光调制，把完成这一过程的装置称为激光调制器，由已调制的激光辐射中还原出所加载信息的过程称为解调。由于激光起到“携带”信息的作用，所以称其为载波。通常将欲传递的信息称为调制信号。被调制的激光称为已调波或调制光。

激光调制与无线电波调制类似，激光振荡的瞬时电场也可表示为：

$$E(t) = A\cos(\omega t + \varphi) \quad (1-1)$$

式 (1-1) 中， A 为激光振荡的复振幅， ω 为调制的角频率， φ 为调制的相位角。模拟激光调制可分为调幅、调频和调相等类型。按载波的振荡输出方式不同又可分为连续调制、脉冲调制和脉冲编码调制等。脉冲调制主要分为脉冲调幅 (PAM)、脉冲强度调制 (PIM)、脉冲调频 (PFM)、脉冲调位 (PPM) 及脉冲调宽 (PWM) 等类型。脉冲编码调制 (PCM) 是先将连续的模拟信号通过抽样、量化和编码，转换成一组二进制脉冲代码，用幅度和宽度相等的矩形脉冲的有、无来表示，再将这一系列反映数字信号规律的电脉冲加在一个调制器上以控制激光的输出。这种调制形式也称为数字强度调制 (PCM/IM)。

激光调制分为内调制和外调制两类。

间接调制也叫外调制，是指加载调制信号是在激光形成以后

进行的，即调制器置于激光谐振腔外，在调制器上加调制信号电压，使调制器的某些物理特性发生相应的变化，当激光通过它时即得到调制。所以外调制不是改变激光器参数，而是改变已经输出的激光的参数（强度、频率等）。由于内调制在波长上引入啁啾，所以外调制是当前人们较重视的一种调制方法。激光间接调制的方法由调制器依据的原理不同常分为电光调制、声光调制、磁光调制、干涉调制等。

直接调制也叫内调制，是指加载调制信号是在激光振荡的过程中进行，以调制信号的规律去改变振荡的参数，从而达到改变激光输出特性实现调制的目的。例如通过直接控制激光泵浦源来调制输出激光的强度。内调制也可在激光谐振腔内放置调制元件，用信号控制调制元件，以改变谐振腔的参数，从而改变激光输出特性实现调制。

由于直接调制技术具有简单、经济、容易实现等优点，是低速光纤通信中最常采用的调制方式，但只适合用于半导体激光器和发光二极管，这是因为发光二极管和半导体激光器（对激光器来说，阈值以上部分）基本上与注入电流成正比，而且电流的变化转换为光频调制也呈线性，所以可以通过改变注入电流来实现光强度调制。直接调制会引入光源的啁啾，这在长途系统中会引入较大的色散，使传输质量变差，特别是在高速传输系统中，应尽量避免。

直接调制的原理图如图 1.5 所示。

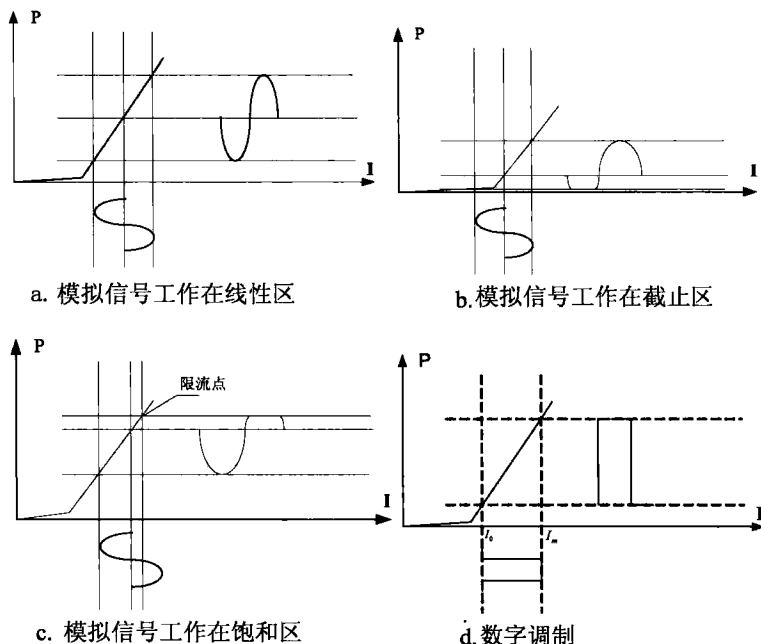


图 1.5 半导体激光器的直接调制原理图

图 1.5 中，每个图形横坐标下方的曲线是需要调制的电流信号，右侧是调制后输出的光电流信号。从图 a 中可以看出输入信号和输出信号失真度很小，这种状态下的工作点基本位于线性工作区的中间。图 b 和图 c 是分别工作在截止区和饱和区的特性，由于工作电流偏低或偏高，所以有一部分信号畸变很大，造成信号失真。图 d 为数字信号直接调制的示意图（注：任何半导体激光器都会有一个电流上限，从保护激光器和激光器的寿命考虑，设计电路时限流点都会小于这个电流上限的 20% ~ 40% 左右）。

因为半导体激光器的 PN 结电容特性，直接调制的带宽并不