

● 光通信系列丛书

光纤数字通信技术

解金山 陈宝珍 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

URL: <http://www.phei.co.cn>

438174

光通信系列丛书

光纤数字通信技术

解金山 陈宝珍 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

内 容 提 要

本书从光纤通信技术角度出发,系统完整地阐述了光纤通信的各个方面和主要高新技术领域。内容分四个方面:一是光纤通信的基础理论;从技术和应用观点对相关基本理论加以论述。二是光纤系统工程设计;全面叙述了在设计一个光缆通信系统时所必须考虑的各种问题。三是介绍光缆线路施工技术与维护的有关知识。四是介绍光纤通信领域中的高新技术。

本书有很高使用价值。集理论、技术、知识、应用以及发展方向于一体。是从事光纤通信研制、生产、设计、施工以及维护的工程技术人员必备工具书,也是大专院校通信专业、光电技术专业师生的重要参考书。

丛 书 名:光通信系列丛书

书 名:光纤数字通信技术

编 著:解金山 陈宝珍

责任编辑:徐德霆

印 刷 者:北京科技大学印刷厂

出版发行:电子工业出版社出版、发行 URL:<http://www.phei.co.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036 发行部电话:68214070

经 销:各地新华书店经销

开 本:787×1092 1/16 印张:20.25 字数:518.40 千字

版 次:1997 年 10 月第一版 1997 年 10 月第一次印刷

书 号:ISBN 7-5053-3971-0
TN·1045

定 价:26.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换

版权所有·翻印必究

前 言

光通信是一种古老的信息传递方式,也是一种被普遍使用的信息交流方法。中国古代边防报警的烽火台的烟火、古埃及的烽烟塔、美洲印第安人利用烟火传递信息等都属于原始性的一种光通信。当时,由烽火台或山顶放出断断续续的青烟就可以认为是一种数字信号。这种信号是以青烟的出现与消失为编码,犹如现在的二进制。光是信息的载体,空气是传输媒介,人的眼睛就是光检测器。信号由一个烽火台传向另一个烽火台,其作用就是信号再生,象中继器一样将信号传到远方。随着人类文明社会的进步和不断发展,这种传递信息的方式得到了广泛的普及和应用。如交通信号灯、船只上的“旗语”、战场上的信号弹与红白旗、体育运动中的各种手势等都具有类似的意义。

显然,上述的信息传递方法虽然有的至今还在使用,但是就人类现代文明来说,即使非常发达的电信也难以满足信息化社会的需求,何况那些带有浓厚原始性的通信方式。人们早就有所设想,既然金属导线可以传输电信号,那么,玻璃是否可以传输光信号呢?人们的设想和追求,只有当三个主要技术问题得到解决后,才可能变成现实。这三个技术问题是:便于应用且性能优良的光源;能长距离传输光信号的细长的玻璃丝;以及灵敏地把光信号变成电信号的检测器。科学的发展、技术的进步总是以人们的需要为动力的。

1960年红宝石激光器诞生,同年秋氦氖气体激光器问世,给光源的解决带来了极大希望。因为激光器发出的激光能量很集中,颜色纯、带宽大。更为有意义的是1962年半导体激光器的研制成功。在经过短短的七、八年间,于1970年实现了连续波工作,而且工作寿命日益提高,直至1977年,实现了工作寿命达百万小时。再加上其体积小,重量轻,功率转换效率高以及可以直接调制等优点。因此,第一个问题得到了圆满解决。

关于能长距离传输光信号的细长玻璃丝(即光导纤维)是这样得到解决的。1966年,被称为“光通信之父”的英籍华人高锟(Kao CK)博士发表了首篇开创性和奠基性论文——光频率的介质纤维表面波导(Dielectric-fibre Surface Waveguides for Optical Frequencies)。指出实现长距离大容量传输,介质纤维所必需的结构和材料特性。此后,对石英玻璃纤维以及其它玻璃纤维进行了广泛的研究。于1970年实现了掺杂石英光纤20dB/km的低损耗。在此后的两三年间,研制的光纤不仅具有优良的传输特性,而且有良好的机械性能,达到了实用化程度。事情发展也巧,也就是在七十年代前期研制成功了低噪声的光检测器。于是三个技术难题全部得到了解决。从此光通信技术得到了蓬勃的发展。直到今天,光纤通信已是通信网的主要传输方式。而不同层次的光纤通信网几乎遍布全球。

光纤通信技术之所以发展这样迅速,除了人们日益增长的信息传递和交换外,主要是由光纤通信本身所具有的优点所决定的。这些优点可以概括为以下几个方面。

- 带宽极大。光纤可利用的带宽为50000GHz,理论上一对单模光纤可传2.5亿个话路;
- 中继距离长。一般可达50~80km,甚至上百公里;
- 传输损耗低。1.3 μ m单模光纤的损耗为0.4dB/km,1.55 μ m单模光纤的损耗为0.2dB/km,波长更长时,损耗还要低;
- 光纤重量轻,可以弯曲,容易铺设;

- 抗电磁干扰;传输质量好;
- 不用或少用金属,能节省大量贵重金属,如铜、铅等。因此还具有抗腐蚀性能;
- 可以采用多种复用技术,特别是光的波分复用(WDM)、频分复用(FDM)、时分复用(TDM)等。能达到资源共享、节省投资并充分地利用光纤带宽;
- 由于传输信号不向外辐射,所以保密性能好;
- 原材料(SiO_2)丰富,整个通信系统成本低;
- 不受气候变化影响。这是与大气激光通信显著不同的地方。

本书是多年来教学、科研、生产实践的总结。概括起来,具有以下特点:

(1) 具有很强的使用性。突出使用性是本书写作的重要指导思想之一。即使是基础理论篇也是围绕应用作准备的。

(2) 追求系统性、完整性和逻辑性是本书写作的第二个重要指导思想。全书分四大篇,每篇围绕一个中心,它包括了光纤通信领域的各个最重要方面。并且在篇节安排上尽量作到前呼后应,一环扣一环。

(3) 全书自始至终尽可能作到深入浅出,通俗易懂。书中几乎没有高深的数学处理和深奥理论。对学过光纤通信的人,在看本书时会有一种新鲜感;对于没学过光纤通信的人,在看本书时会有一种兴趣感。

(4) 本书尽可能的收集国内外的有关成果和经验,特别是更注意国内的成果,做到集思广益,为我所用。

(5) 对光纤通信领域中主要的高新技术作了系统的较完整的介绍,使读者对光纤通信的发展方向有一个全面的了解。

本书在撰写过程中得到了许多同志的热情支持和帮助。硕士生刘阳春执笔撰写了“光缆有线电视(CATV)传输系统”,许广俊和黄水清参与了部分工作。此外,高级工程师黄章勇、陈跃武以及工程技术人员余德惠、守建媛、杨琳等也给予了大力支持。对以上诸位同志的合作和帮助在此表示衷心的感谢。

光纤通信技术是一个蓬勃发展的高科技领域,许多方面还处于发展之中,由于我们的水平和写作时间的限制,书中错误和不妥之处实为难免,敬请读者批评指正。

作者

一九九六年元月

目 录

第一章 光纤通信的基础理论	(1)
1.1 半导体激光器光源	(1)
1.1.1 引言	(1)
1.1.2 光纤通信对半导体激光器光源的要求	(1)
1.1.3 半导体发光原理	(3)
1.1.4 半导体激光器的结构与工作原理	(5)
1.1.5 半导体激光器的性能参数	(6)
1.1.6 半导体激光器的瞬态特性	(8)
1.1.7 半导体激光器的退化问题	(10)
1.1.8 使用半导体激光器时应注意的事项	(11)
1.2 半导体发光二极管光源	(11)
1.2.1 引言	(11)
1.2.2 发光二极管的基本类型与性能	(11)
1.2.3 发光管与光纤的光耦合	(16)
1.2.4 发光管与激光器性能的比较	(17)
1.2.5 光源的选用问题	(18)
1.3 光检测器	(19)
1.3.1 引言	(19)
1.3.2 光检测器的基本参数	(20)
1.3.3 PIN 光电二极管	(22)
1.3.4 雪崩光电二极管(APD)	(22)
1.3.5 光电检测器的可靠性	(26)
1.3.6 光电检测器使用中的注意事项	(26)
1.4 光放大器	(27)
1.4.1 引言	(27)
1.4.2 光纤光放大器	(27)
1.4.3 半导体激光放大器(SLA)	(29)
1.4.4 两种主要的光放大器的性能比较	(29)
1.5 光纤与光缆	(30)
1.5.1 引言	(30)
1.5.2 光纤的主要类型及其性能	(30)
1.5.3 光纤的标准化问题	(32)
1.5.4 光纤的导光原理	(34)
1.5.5 光纤的重要参数	(37)
1.5.6 单模光纤的传输性能	(39)

1.5.7	光纤弯曲和芯包界面不光滑所带来的影响	(40)
1.5.8	光纤特性	(40)
1.5.9	光纤参数的测量	(44)
1.5.10	新型单模光纤	(52)
1.5.11	光缆	(53)
1.6	光纤数字通信系统	(55)
1.6.1	系统的参考模型	(55)
1.6.2	光纤数字通信系统	(57)
1.6.3	系统的性能指标	(57)
1.6.4	中继距离的计算	(62)
1.7	光线路码	(63)
1.7.1	引言	(63)
1.7.2	光纤数字通信系统中的线路码	(64)
1.7.3	mB1H 码在我国的运用	(68)
1.7.4	线路码的主要性能参数	(72)
1.8	光纤传输设备	(73)
1.8.1	光端机的基本组成与功能	(73)
1.8.2	光发送电路	(74)
1.8.3	光接收电路	(78)
1.8.4	光接收机的主要性能与参数	(79)
1.8.5	光中继机	(87)
	参考文献	(89)
第二章	光缆数字传输系统工程的设计	(90)
2.1	引言	(90)
2.2	光纤通信系统工程的设计依据、原则和步骤	(91)
2.3	光缆传输系统工程的总体考虑	(91)
2.3.1	数字系列等级的选定	(91)
2.3.2	线路传输码型的选择	(92)
2.3.3	辅助系统	(92)
2.3.4	光缆线路路由的确定	(93)
2.3.5	光系统技术考虑	(94)
2.3.6	电气性能参数及其指标	(96)
2.3.7	设备使用条件及电源	(100)
2.4	光缆通信干线工程的规模容量	(100)
2.4.1	拟建光缆通信干线在全国网络中的地位和作用	(100)
2.4.2	业务量需求预测	(101)
2.4.3	原有通信网分担能力的考虑	(102)
2.4.4	规模容量的确定	(102)
2.5	光纤通信系统中继段长的设计与计算	(103)
2.6	传输系统的配置与组织	(107)

2.6.1	假设参考数字通道与数字段	(107)
2.6.2	传输系统局站设置	(107)
2.6.3	传输系统组织	(108)
2.6.4	中继段长度	(109)
2.6.5	辅助系统组织	(109)
2.7	传输系统的指标	(110)
2.7.1	误码率	(110)
2.7.2	抖动性能	(114)
2.8	光纤光缆的选用	(115)
2.8.1	CCITT 对光纤的有关建议	(115)
2.8.2	对光缆的技术要求	(116)
2.8.3	光缆的种类和适用范围	(118)
2.9	光缆传输系统扩容及方案的选择	(128)
2.10	光纤数字传输系统的可用性指标	(133)
2.11	光缆线路的防护	(138)
2.11.1	雷电危害及其防护	(138)
2.11.2	强电影响及其防护	(138)
2.11.3	防潮防水问题	(142)
2.11.4	光缆对地绝缘问题	(142)
2.11.5	鼠害与蚁害的防护	(142)
2.11.6	天灾与人祸的防备	(143)
2.12	长途光缆通信系统的供电方式	(143)
	参考文献	(145)
第三章	光缆线路的施工与维护	(146)
3.1	高次群数字复接设备	(146)
3.1.1	数字多路复接的构成方式	(146)
3.1.2	设备的基本参数	(147)
3.1.3	设备的工作原理	(152)
3.2	34M 光端机与光中继机	(153)
3.2.1	引言	(153)
3.2.2	基本概况与技术指标	(153)
3.2.3	光线路码型及设备	(154)
3.2.4	传输辅助设备	(160)
3.2.5	开通与维护	(162)
3.3	140M 光端机与光中继机	(166)
3.3.1	引言	(166)
3.3.2	传输设备与系统	(167)
3.3.3	开通与维护	(179)
3.4	光无源器件	(180)
3.4.1	光纤连接器	(180)

3.4.2	光耦合器	(184)
3.4.3	光开关	(185)
3.4.4	光分路耦合器或光合路耦合器	(188)
3.4.5	光分波器或光合波器	(190)
3.4.6	光隔离器	(192)
3.4.7	光衰减器	(193)
3.5	光纤通信常用仪器仪表	(194)
3.5.1	光功率计	(194)
3.5.2	光时域反射仪(OTDR)	(195)
3.5.3	稳定化光源	(198)
3.5.4	误码、抖动测试仪	(199)
3.5.5	光纤熔接机	(200)
3.6	光缆线路工程设计与施工技术	(201)
3.6.1	光缆敷设工程中的要求和注意事项	(201)
3.6.2	光缆敷设中张力的计算	(202)
3.6.3	架空光缆的设计与施工	(205)
3.6.4	直埋光缆线路的设计与施工	(207)
3.6.5	管道光缆线路的设计与施工	(209)
3.6.6	海下光缆线路工程的设计与施工	(210)
3.7	光纤和光缆的接续	(212)
3.7.1	光纤接续引起衰耗的原因	(212)
3.7.2	光纤的连接技术	(214)
3.7.3	光缆的接续	(215)
3.8	光缆线路施工过程中的现场测试	(217)
3.8.1	引言	(217)
3.8.2	便携式光纤衰耗测试仪	(217)
3.8.3	单盘光缆衰耗的测试	(218)
3.8.4	光纤接头衰耗的测量	(218)
3.8.5	光缆线路段或中继段的总衰耗测试	(219)
3.9	光缆通信系统主要技术指标测试和日常维护	(219)
3.9.1	光接口技术指标的测试	(220)
3.9.2	电接口技术指标的测试	(222)
3.9.3	日常维护	(222)
	参考文献	(224)

第四章 光纤通信中的高新技术

4.1	相干光通信	(225)
4.1.1	引言	(225)
4.1.2	相干光通信外差接收系统对光源的要求	(226)
4.1.3	相干光通信的调制技术	(227)
4.2	超大容量光纤通信系统	(229)

4.3	光孤子通信	(230)
4.3.1	引言	(230)
4.3.2	光孤子的物理概念	(230)
4.3.3	光孤子通信	(233)
4.3.4	光孤子通信的一些典型系统	(236)
4.4	光同步数字传输网	(242)
4.4.1	概述	(242)
4.4.2	光同步数字传输网的基本概念	(244)
4.4.3	SDH 传送网的结构	(251)
4.4.4	SDH 设备	(256)
4.5	光纤用户网	(268)
4.5.1	引言	(268)
4.5.2	用户网在通信网中的层次和特点	(269)
4.5.3	光纤用户网发展的动力与状况	(271)
4.5.4	现有用户网的特点及光纤化目标	(272)
4.5.5	光纤用户网的拓扑结构和设计根据	(273)
4.5.6	光纤用户网的应用和重大作用	(277)
4.6	光纤通信中的复用技术	(278)
4.6.1	复用技术的基本概念	(279)
4.6.2	WDM 的应用	(280)
4.6.3	FDM 的应用	(287)
4.6.4	光时分复用	(293)
4.6.5	副载波复用光波系统的应用	(296)
4.7	光缆有线电视(CATV)传输系统	(302)
4.7.1	概述	(302)
4.7.2	系统构成以及网络结构	(303)
4.7.3	系统传输原理	(305)
4.7.4	系统设计	(310)
4.7.5	宽带综合服务网展望	(314)
	参考文献	(316)

第一章 光纤通信的基础理论

本章从实际应用的角度出发,阐述光纤通信各个重要组成部分的工作原理。其中包括光电子器件、光放大器、光纤与光缆、通信系统的组成与性能、线路码型以及传输设备等^(1,2)。

1.1 半导体激光器光源

1.1.1 引言

半导体激光器是激光器中的一个大的家族。它与固体激光器、气体激光器以及其它类型的激光器相比,具有体积小、重量轻,电光转换效率高,可以直接调制,使用方便等优点。半导体激光器由于这些优点,所以得到了非常广泛地应用。目前其主要应用领域是用作光纤通信、光计算机、精密测距以及光信息处理系统中的光源。此外,还用于光盘技术、激光印刷技术等。

什么叫激光呢!我们平常看到的大多数光都属于自然光,即由发光物体本身内部独立地产生出的一种光,是自发发射的。如果在发光过程中受到外界影响(如光照、辐射、注入电流等)而产生出的一种光,这种光就叫激光,是受激发射的一种光。例如固体发光情况,图 1-1(a)是属于自发发射的光,图 1-1(b)是受激发光。凡是激光都具有以下特点:(1)方向性强,即光束在空间的发散性小;(2)光功率密度大;(3)光谱较窄;(4)是相干光。半导体激光器所产生的激光也不例外。正是由于以上这些特点,再加上半导体激光器的独特优点,使得半导体激光器在上述应用领域中成为最佳的选手。

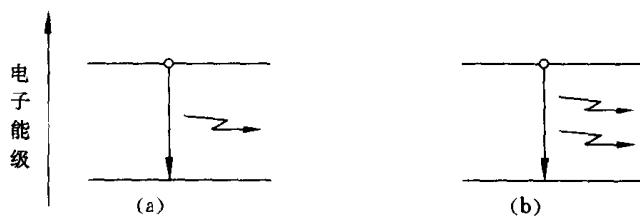


图 1-1

半导体激光器自 1962 年出世到 1970 年实现室温连续波工作以来,它的发展与成熟可以说是与光纤通信技术的发展与成熟密切相关,两者相辅相成,互相推动。半导体激光器发展到今天,可以说已经达到相当成熟的程度。其结构已是花样繁新,性能也相当优越。对应于短波长窗口($0.8\sim 0.9\mu\text{m}$)的 GaAs/GaAlAs 激光器以及对应于长波长窗口($1.31\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$)的 InGaAsP/InP 激光器都已完全实用化,寿命都在几十万小时甚至上百万小时。而超长波长窗口($>2\mu\text{m}$ 波长)的激光器也有突破性的进展。除了分离的单个激光器之外,激光器的集成技术也有了很大的发展,这就是当前的所谓光电集成(OEIC)及单片集成光路。可以预料,这些集成技术的发展与实用化,将给信息社会带来巨大而深刻的影响。

1.1.2 光纤通信对半导体激光器光源的要求

作为光纤通信光源的半导体激光器,并不是任何半导体激光器都可胜任的。除了激光器发

射的波长与使用的光纤低衰耗窗口相适应外,还必须具备以下条件:

1. 从通信系统工程角度考虑,激光器的工作寿命应保证在 10 年以上,为 10^5 小时量级。对于海下系统和空间激光通信,激光器的工作寿命应保证在 25 年以上。这是通信系统的可靠性要求与线路维护修理的经济性所决定的。特别是海下通信和空间通信,在系统运转期间更换光源,其经济代价是巨大的,甚至是不可能的。

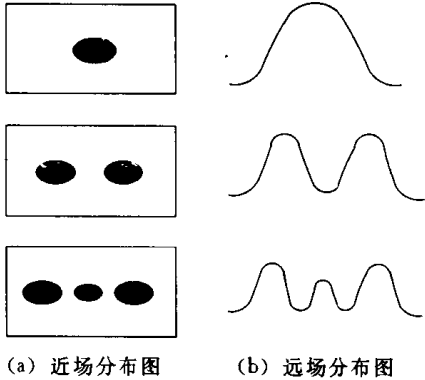


图 1-2

2. 激光器要有较大的光功率输出。特别是要有较大的尾纤功率。当光纤衰耗一定时,激光器耦合进光纤的功率越大,则传输的距离就越长。一般激光器的尾纤输出功率应为 1mW 以上。

3. 激光器的模式要好。所谓模式,即激光器所产生的稳定光场场形。模式又分为横模和纵模。横模是指激光器产生的稳定的光斑(即光场)。在激光器出光的端面上的光斑分布称为近场分布,在端面附近空间上的分布称为远场分布(见图 1-2)。如果光斑只有一个主瓣,则称为基横模;若为两个或多个光瓣,则称为多横模。相对应的激光器分别称为基横模激光器和多横模激光器。不难

理解,基横模激光器与光纤之间的耦合效率可能要高些,即能得到较大的尾纤功率。而纵模是指激光器所产生的激光频谱。若激光器的频谱分布只有一个峰,则称为单纵模;若为两个或多个峰则称为多纵模。相对应的激光器分别称为单纵模和多纵模激光器。为了比较纵模特性,把最高峰二分之一处的光谱宽度,定义为谱宽或光谱线宽,常以 Δf 或 $\Delta \lambda$ 表示,或取光强最大值之半所对应的全宽度(FWHM)。谱宽越大,在光纤中传输的色散越严重,越不利于传输。由于以上原因,我们希望激光器既是单横模又是单纵模。

4. 激光器要有高速响应特性,即有良好的调制特性。调制性能的好坏直接关系到通信的速率,即通信的容量问题。

5. 激光器要有良好的温度特性。即激光器在工作环境温度变化时,其输出性能应相对的不变。众所周知,半导体对温度很敏感,激光器发射波长和输出光功率与温度有关。因此,为了保证光纤通信系统的性能,光源的温度特性应能满足系统的要求,即激光器特性随温度的变化应限制在许可的范围内。

以上是作为光纤通信光源所具备的主要条件。这方面的详细要求汇总在表 1-1 之中。

表 1-1 光纤通信系统中光源应具备的条件

条件	项 目	要 求	指 标
必要 条件	发射波长	与光纤的低衰耗低色散波长相一致	0.85, 1.3, 1.55 μ m
	输出功率	室温连续工作,尾纤功率越大越好	$\geq 1\text{mW}$
	电光效率	应与端机中晶体管、IC 相一致,电光转换效率应大些	$> 10\%$
	工作可靠性	工作寿命长,工作稳定性好	10^5h 量级
	温度特性	发射波长和输出功率随温度变化应在许可范围内	0.4nm/ $^{\circ}\text{C}$, $\sim 0.5\%/^{\circ}\text{C}$

续表

条件	项 目	要 求	指 标
充分条件	光谱宽度 (时间相干性)	$\Delta\lambda$ 越小越好,其影响程度与光纤长度和带宽有关	2nm
	光束宽度 (空间相干性)	光束在空间的发散性越小越好	40×30 (度)
	调制特性	应能直接调制,响应速度越快越好	t_r, t_f 约 0.35ns
	体积,重量	体积小,重量轻,外观美,使用方便	
	成本与性能	性能价格比好,在市场上有竞争力	

1.1.3 半导体发光原理

1. 电子的共有化运动与能带的形成

我们都知道,原子是由带正电荷的核和围绕核外旋转运动着的电子(负电荷)所组成。当大量原子集聚结合在一起形成晶体时,原子核外的电子运动轨道(即能级)要发生不同程度的重叠,如图 1-3 所示。原子之间的距离越近,原子核外电子轨道重叠越多。这样一来,电子不再属于某一原子所有,而是共有化了。共有化电子可在更大范围内甚至整个晶体中运动。晶体中电子的这种运动称为共有化运动。电子共有化表明从能级转变为能带。对应于最外层能级所组成的能带,通常称为导带。在导带中的电子与自由电子相似,比较自由,称为准自由电子。参加导电的电子主要就是这一部分电子。能带之间的间隔里是没有电子存在的,这个区间称为禁带。次外层的能带称为价带。固体中的能带就是这样形成的。

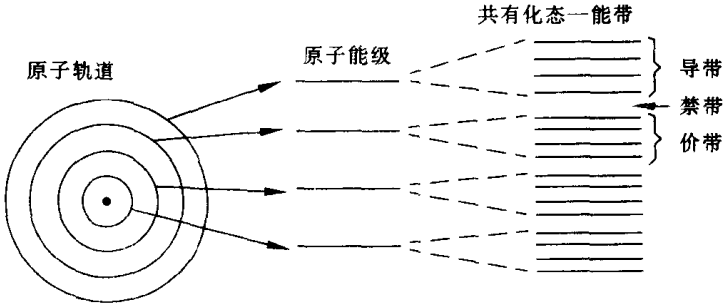


图 1-3

物体的许多重要性质,如电学、光学等性质都是由能带结构决定的。由于内层能带是充满电子并受原子核的束缚,所以对物质的性质无有什么影响和贡献。因此,我们只着重讨论导带、价带和禁带。图 1-4 是简化的能带图。平常室温下导带中的电子很少,甚至是空的,所以又称为空带。而价带是原子价电子能级所组成,可能被电子占满(称为满带)也可能未占满。价带占满与否以及禁带宽度 E_g 的大小对固体电学性质影响很大。例如,固体有导体、半导体以及绝缘体之分。之所以如此,就是由能带结构决定的。绝缘体的 E_g 值很大,室温下电子很难从价带跃迁到导带中去参加导电,所以显示出绝缘特性。而导体的 E_g 值为零,即导带与价带连成一片,电子可自由运动,所以呈现出良好的导电性。介乎两者之间的就是半导体,其 E_g 值不大不小,室温下导带中有一定数量的电子,但是价带中的电子比较容易被激发到导带中去,因而导电性能受温度变化影响较大。以上所述,说明了固体的物理性质是由其能带结构所决定的。

2. 载流子的统计分布

在绝对零度温度($T=0^\circ\text{K}$)时,导带中无一个电子,在室温情况下半导体中导带中只有少量电子。载流子(即参加导电的电子与空穴)的分布状况是这样的,处于高能量状态的电子数

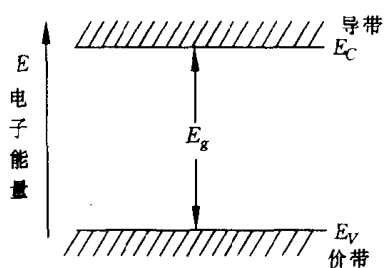


图 1-4

少,而处于低能量状态的电子数多,也即是价带中电子多。这种分布称为正常分布。这种情况下材料发光效率很低。在非热平衡情况下可能会出现一种反常的分布状况,即电子占据高能量状态的几率大于电子占据低能量状态的几率。这种物理现象是非常重要的,是受激发射(产生激光)的必要条件。在激光科学领域中把这种反常的分布称之为粒子数反转分布。意思是占据高能态的电子数大于电子占据低能态电子数的一种分布状态。这里所说的粒子包括电子、原子、离子、分子等微粒。怎样能实现这种反常分布呢?方法很多,例如光照、辐照、加热、以及注入电流等均可。在激光技术中,把实现粒子数反转分布过程称之为泵浦或抽运。把粒子数反转分布状态,有时也称为负温度状态。

3. 半导体电注入发光机理

在 n 型半导体中多数载流子是导带底附近的电子,少数载流子是价带顶附近的空穴(带正电荷);在 P 型半导体中,多数载流子是价带顶附近的空穴,少数载流子是导带底附近的电子。电子在导带和价带之间的光跃迁有三种形式:

(1) 导带内能量为 E_1 的电子,自发地跃迁到价带内能量为 E_2 的能级上,并与空穴复合,这时将能量以光子的方式发射出来,其能量为

$$h\nu = E_1 - E_2 \quad (1-1)$$

这种光发射称为自发发射,如图 1-5(a)所示。式中 h 是普朗克常数, ν 是光波的频率,该式称为玻尔条件。

(2) 导带内的电子,在光照射下跃迁到价带并与空穴复合,这时发射的光子能量、方向、频率与照射光相同,这种光的发射称为受激发射,如图 1-5(b)所示。

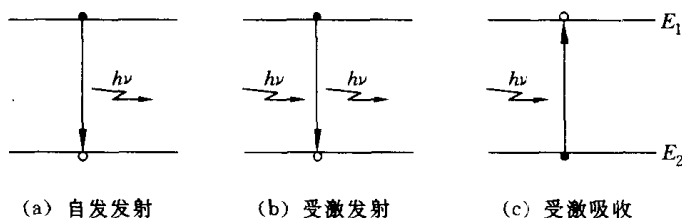


图 1-5 半导体中的光跃迁

(3) 当价带顶附近的电子在外界作用下,如光照下,吸收能量后跃迁到导带,这个过程叫做受激吸收,是受激发射的逆过程。通常称为光吸收,如图 1-5(c)所示。

半导体中导带和价带之间的光跃迁应同时满足能量和动量守恒。这是由半导体内部电子运动状态所决定的。以上三种形式的光跃迁,在激光器的工作过程中是同时存在的。

由上所述不难理解,半导体发射出的光子能量应近似等于其材料的禁带宽度,即

$$\text{光子能量} = h\nu \approx E_g \quad (1-2)$$

又因为光波长 $\lambda = \frac{c}{\nu}$, 所以发射出的光波波长应是

$$\lambda \approx \frac{hc}{E_g} \quad (1-3)$$

因而,只要知道半导体材料的 E_g 值,就可近似求得该材料激光器所发射出的波长。

实际上半导体激光器所发射出的光波长不是单一值,其波长有一定的范围。造成这种现象

的原因有两个：一是半导体的导带和价带都有很多能级所组成，这些能级的能量有微小差别；二是半导体的能带结构受掺杂和晶体缺陷影响较大，使得 E_g 值有微小的变化。正因为这些原因，所以半导体发射出的光是不够纯的，即单色性较差。

这里须指出，不是所有半导体材料都可用来制造发光器件的。只有直接带隙半导体材料才能制作发光器件，因为它们是竖直跃迁，直接光跃迁发光效率高（见图 1-6(a)），GaAs, InP 等就属于此类。另一种是间接带隙半导体，间接光跃迁发光效率较低，不适于作发光器件（见图 b），如 Si, Ge 等。其光跃迁过程有第三者参加，即电子只能在与晶格碰撞之后才能实现光跃迁。这样一来光跃迁几率很小，因而不适合于制作发光器件。

1.1.4 半导体激光器的结构与工作原理

半导体激光器实质上是一个光波振荡器，它具有振荡、反馈与放大作用。它的结构，通常是一个多层状异质结条形结构，如图 1-7 所示。该图是长波长（ $1.0 \sim 1.6 \mu\text{m}$ ）激光器的结构示意图，短波长（ $0.8 \sim 0.9 \mu\text{m}$ ）激光器的结构与此基本相同。这里的层状结构是利用外延生长技术完成的。异质结是不同材料相结合。半导体激光器和发光管一般都是双异质结（DH）结构。它是指 P 型限制层与有源层及 n 型限制层与有源层所组成的两个异质结。激光器的长度 L 一般为 $200 \sim 400 \mu\text{m}$ 之间，宽度约 $150 \sim 250 \mu\text{m}$ ，出光窗口为矩形，尺寸约为 $2 \times 0.2 (\mu\text{m})$ （长 $\times$ 高）。

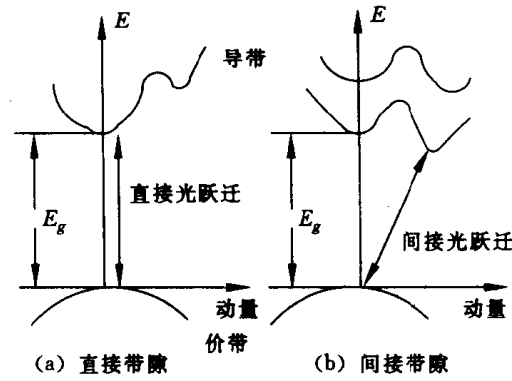


图 1-6

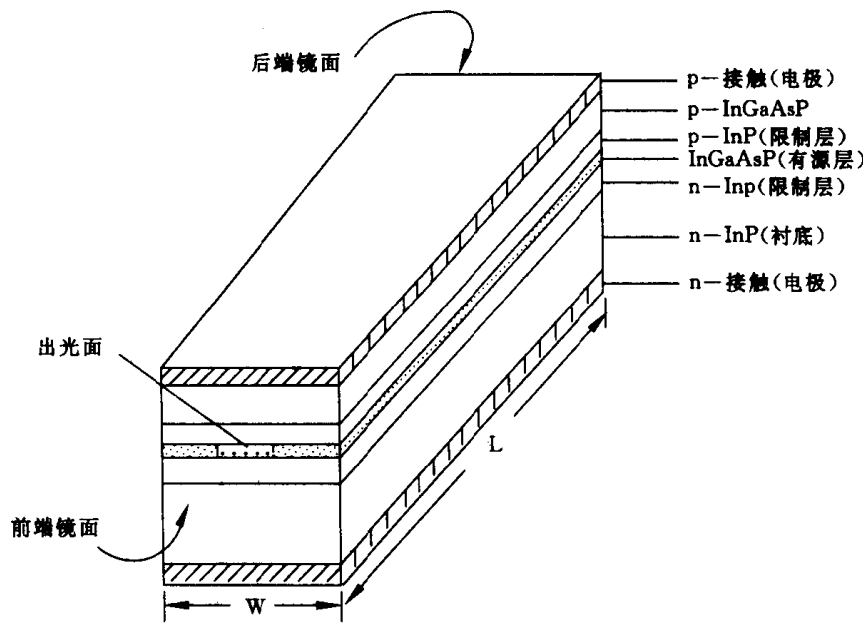


图 1-7 半导体激光器结构示意图

下面我们讨论激光器的工作原理。

1. 有源区。当注入有源区中的载流子达到粒子数反转时，电子与空穴复合产生光子，并立即达到稳定的激光输出。因此，有源区是生产光子的“车间”，激光器是光子制造“工厂”。

2. 限制层。限制层材料与有源区材料相比是属于宽带隙材料,因而可以把注入的载流子限制在有源区内。与此同时,限制层的折射率比有源区的折射率低,因此构成了光波导条件,把产生的光也限制在有源区。所以说双异质结构具有同时对载流子和光子的限制作用。这是非常理想的双限制作用。这是设计与制造激光器所必需考虑的重要问题。

3. 端镜面。激光器两端是解理的端镜面,两者是平行的,同时又是非常平坦光亮的。它可以使有源区产生的光部分的逸出。因此端镜面和有源区构成了光的容器。另外,有源区里产生的光不断从两端反射(即反馈),形成光的振荡。随着电流不断注入,光逐渐放大并趋于稳定的输出状态。因此,端镜面起到了谐振器的作用。所以常常被称为谐振腔。

综上所述不难理解,有源区实质上是一个矩形有源光波导,它与谐振腔共同构成了光波振荡器、放大器以及光的储存器。

这里须指出,在有源区的复合可能存在两种情况。一是辐射复合,即以光的形式释放能量;另一种是无辐射复合,即以热的形式释放能量。这就是说载流子的复合不一定都产生光。

1.1.5 半导体激光器的性能参数

半导体激光器的性能参数,是评价激光器好坏的依据和标准。同时,只有深刻理解激光器的许多重要特性时,才能正确使用激光器,并尽可能的延长激光器的工作寿命。因此,这是一个非常重要的问题。关于半导体激光器的性能参数,大体上可分为电学参数、电光参数、热学参数、光学参数以及可靠性参数五个方面。现分别讨论如下。

1. 电学参数

激光器的电学参数是指其伏安特性,如图 1-8 所示。由此图可以得到两个重要参数:正向压降 V_F 和正向电阻。正向压降又称为导通(或开通)电压,它是利用 $V-I$ 曲线斜率外推到电压轴上的交点值。一般情况下, V_F 值在 1~1.5 伏之间。短波长激光器(GaAs, 0.8~0.9 μm 波长) V_F 值稍高,约 1.5 伏;而长波长激光器(InGaAsP/InP, 1.0~1.7 μm 波长) V_F 值较低,约 1 伏左右。若 V_F 值过高,对激光器长期工作是不利的。正向电阻又称为串联电阻,常以 R_F 或 R_s 来表示,它是由 $V-I$ 曲线斜率求得的,即 $R_F = (\tan\theta_F)^{-1} = \frac{\Delta V}{\Delta I}$,由于这种形式关系,所以也称为微分电阻。 R_F 值一般为 2~3 Ω 。若此值过大,说明制造工艺不好,不利于室温下连续工作。此外,从 $V-I$ 曲线上还可求得器件的反向压降 V_R 。该值越大越好,但是不可能太大,短波长激光器 V_R 值一般应大于 4 伏,长波长激光器应大于 2 伏。

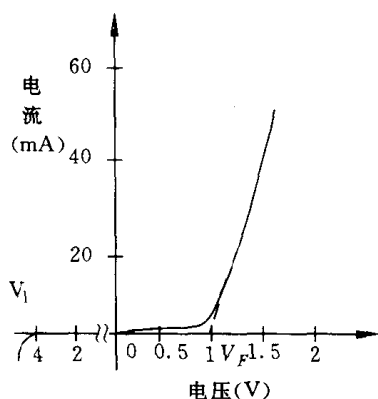


图 1-8 1.3 μm 激光器的 $V-I$ 特性

2. 电光参数

最能表明激光器电光性能的是 $P-I$ 曲线,即输出光功率与驱动电流关系曲线,如图 1-9 所示。由图可知,当驱动电流较小时,激光器只能输出微弱的荧光,光能量不集中。其大小一般在几十 μW 量级。当驱动电流继续增加时,激光器就会突然出现光功率的剧增,若这时用红外变象管观察,激光器发出极亮的光,光能量相当集中,这就是激光器发出的激光。此时的驱动电流称为阈值电流(I_{th}),这是激光器最重要的特征参数。阈值电流的大小,可以从 $P-I$ 曲线线性部分外推到电流轴上的截距求得。阈值电流越小越稳定,则说明激光器的设计和制造工艺越好。对于短波长激光器,其 I_{th} 值

一般在 50~100mA 之间;长波长激光器 I_{th} 值一般在 20~50mA 之间。须指出,激光器的阈值大小不仅与所使用的材料有关,而更重要的是与激光器的结构有关。同一种材料不同的结构,其阈值往往差别很大。目前较好的激光器阈值小于 10mA。阈值越小越稳定,越有利于激光器的长期工作寿命。阈值大小,对于研制者和使用者都是重要的。

电光性能的另一个重要参数是效率。它是表明电功率转换为光功率的比率。通常有四种表示方法,它们是

(1) 功率效率 η_P 。它定义为消耗单位电功率所产生的光功率大小,即

$$\eta_P = \frac{P_{ex}}{IV + I^2 R_F} \quad (1-4)$$

其中, P_{ex} 是激光器输出的总光功率。显然, η_P 与工作电流 I 有关。因而以 η_P 表示效率时应说明工作电流。

(2) 外量子效率 η_{ex} 。定义为激光器内每秒钟发射出的光子数与有源区每秒钟注入的电子-空穴对数之比,即

$$\eta_{ex} = \frac{P_{ex}/h\nu}{I/e} = \frac{P_{ex}}{IV} \quad (1-5)$$

其中 $h\nu$ 为发射的光子能量, e 为电子电荷。

(3) 内量子效率 η_i 。定义为有源区每秒钟产生的光子数与有源区每秒钟注入的电子-空穴对数之比。由于复合产生的光子有少部分在腔内损耗掉,所以说 $\eta_i > \eta_{ex}$ 。

(4) 外微分量子效率 η_D 。定义为

$$\eta_D = \frac{(P_{ex} - P_{th})/h\nu}{(I - I_{th})/e} = \frac{P_{ex}}{(I - I_{th})V} \quad (1-6)$$

式中 P_{th} 为阈值电流时的光功率,一般很小。由图 1-9 可知, η_D 为 $P-I$ 曲线线性范围内的斜率,所以又称为斜率效率。 η_D 与工作电流大小无关,仅与激光器的结构参数、工艺水平以及温度有关。实际工作中 η_D 使用较多,也最重要。

3. 热学参数

热学参数是指激光器的热阻 R_T ,它是决定激光器能否在室温下连续工作的重要参数之一。 R_T 定义为外加单位电功率在有源区所产生的温升,即

$$R_T = \frac{T_{ac} - T_a}{P_e} \quad (^\circ\text{C}/\text{W}) \quad (1-7)$$

其中 T_{ac} 为有源区的温度, T_a 为热沉温度,也即是环境温度。激光器的热阻一般在 30~80 $^\circ\text{C}/\text{W}$ 之间。多数器件为 50~60 $^\circ\text{C}/\text{W}$ 。 R_T 越小,则器件热学性能越好,越有利于器件长寿命工作。由于 T_{ac} 很难直接测量,只能利用器件某些参数对温度变化敏感特性来间接计测。

4. 光学性能

激光器发出的激光光束在空间是有一定的分布形状的。光束的宽度用其发散角 θ 来表示。它定义为输出光强下降到最大值一半时所对应的光束空间分布的角度(见图 1-10)。由于光束的空间分布是不对称的,所以常用垂直和平行于 pn 结的发散角 $\theta_\perp$ 和 $\theta_\parallel$ 来表示。其大小反映了激光束的发散性。一般的激光器的 $\theta_\parallel$ 大约在 8~14 $^\circ$,而 $\theta_\perp$ 为 40~60 $^\circ$ 之间。它的平面分布如图 1-11 所示。

光束宽度代表光源的空间相干性,用其相干线度 L_c 来表示,即在 L_c 线度内不同点上发出的光能够产生干涉。 L_c 越大表示空间相干性越好。 L_c 与 θ 的关系为

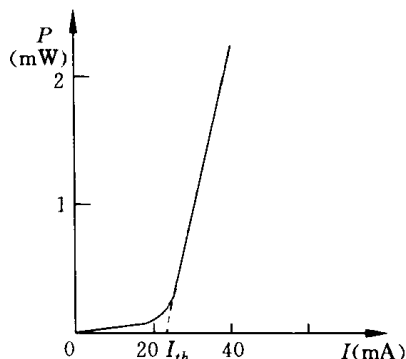


图 1-9