

High Speed Optoelectronic Device Modeling
and Integrated Circuit Design



高速光电子器件建模及 光电集成电路设计技术

高建军 著



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

华东师范大学研究生重点教材建设基金资助

High Speed Optoelectronic Device Modeling
and Integrated Circuit Design

**高速光电子器件建模及光电
集成电路设计技术**

高等教育出版社

内容简介

本书是作者在微波和光通信技术领域多年学习、工作、研究和教学过程中获得的知识 and 经验的总结。主要研究内容包括高速光电子器件的工作机理、建模技术和参数提取技术,以及光接收机和发射机集成电路设计技术。光电子器件小信号等效电路模型、大信号非线性等效电路模型和噪声等效电路模型,以及等效电路模型的参数提取技术是本书的重点。

本书可以作为光电子专业、微波专业和电路与系统专业的高年级本科生和研究生教材,也可以供从事集成电路设计的科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高速光电子器件建模及光电集成电路设计技术/高建军著. —北京:高等教育出版社, 2009.6

ISBN 978 - 7 - 04 - 025800 - 4

I. 高… II. 高… III. ①光电器件 - 系统建模②光电集成电路 - 电路设计 IV. TN15 TN491.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 008067 号

策划编辑 刘 英 责任编辑 孙 薇 封面设计 于 涛
责任绘图 杜晓丹 版式设计 张 岚 责任校对 刘 莉
责任印制 尤 静

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010 - 58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800 - 810 - 0598
邮政编码	100120	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010 - 58581000		http://www.hep.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	北京铭成印刷有限公司		http://www.landaco.com.cn
		畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787 × 960 1/16	版 次	2009 年 6 月第 1 版
印 张	14.75	印 次	2009 年 6 月第 1 次印刷
字 数	270 000	定 价	30.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 25800 - 00

序

高速光电子器件建模和光电集成电路设计技术是光纤通信和光网络中的一个关键问题，同时也是微电子、光电子和微波与电磁场技术的交叉学科，有许多科学技术问题需要进一步研究解决。本书作者高建军教授在该领域从事研究近20年，具备系统的科学技术知识，在国际著名期刊上发表了多篇科研论文，并具有丰富的文献研究报告。《高速光电子器件建模及光电集成电路设计技术》一书综合了很多作者的研究成果，以及一些最新进展。文中针对光电子器件的表征技术提出了一些新的研究方法和建议，讨论了光电集成电路的设计关键技术，同时在探索新的分析思路方面进行了很好的尝试，形成了一套研究方法。

该书注重介绍实用技术，可以帮助读者了解这些研究方法建立的背景、实际工作中可能出现的问题，以掌握应用的条件和使用的技巧。

作者与德国、加拿大及新加坡等国家的科研机构具有广泛的国际合作和联系，同时在IEEE(国际电子电器工程师协会)担任多个期刊的编委和评审人，为撰写符合国际学术前沿发展的学术著作提供了基础。这一学术专著对于从事光电子器件和集成电路设计的高等院校、研究院所的研究生、教师和科研人员，无疑是一本具有重要实用价值的参考书。为此我乐意为此书做序，并深切期望该书的出版能为光电子学领域理论研究和和技术应用的发展，为高速光电子学的开拓和发展起到积极的推动作用。

中国科学院院士

褚君浩

2009年3月29日

前 言

光电集成电路的计算机辅助设计是集成电路设计的主要课题之一，对于缩短集成电路的设计周期、降低设计和制作成本、提高可靠性具有重要意义。光电子器件模型是影响电路设计精度的最主要因素，电路规模越大、指标和频段越高，对器件模型要求也越高。因而准确的器件模型对提高光电集成电路设计的成功率、缩短电路研制周期是非常重要的。

本书是作者在微波和光通信技术领域多年学习、工作、研究和教学过程中获得的知识和经验的总结。编写的主要目的是通过对作者在光电子器件建模和光电集成电路设计方面所作的研究工作加以回顾和总结，以利于今后研究工作的深入开展。本书的核心内容源自作者单独或者与新加坡、德国和加拿大研究学者合作发表在国际重要期刊的文章，作者希望这些想法、概念和技术能够为国内外同行共享。

本书可以作为高年级本科生和研究生的教材，也可以供从事光电子、微波和集成电路设计的工程师参考。集成电路的计算机辅助设计日新月异，作者也竭尽全力对本书所涵盖的领域提供最新的资料。本书共分为七章，重点介绍光电子器件小信号等效电路模型、大信号非线性等效电路模型和噪声等效电路模型，以及等效电路模型的参数提取技术，同时对光纤通信最重要的接收机和发射机中核心集成电路的设计进行了详细的描述。

衷心感谢我的导师——清华大学高葆新教授和已故电子工业部梁春广院士对我十余年研究工作的指导、鼓励和支持，衷心感谢我的博士后导师——中国科学院微电子研究所吴德馨院士对我的帮助。同时对本课题的研究合作者德国柏林工业大学高频技术研究所的 Georg Boeck 教授表示感谢。

在此谨向所有关心、帮助过我的老师和同学致以真诚的谢意，衷心感谢他们对我多年默默无闻科研工作的理解和支持。

尽管作者花费了大量的时间和精力从事手稿的准备，但书中难免存在不足，敬请读者对本书的结构和内容给予批评指正。

作 者

2008年9月于华东师范大学

目 录

第一章 绪论	1
1.1 光纤通信系统的组成	1
1.2 光电集成电路计算机辅助设计	2
1.3 本书的目标和结构	4
参考文献	5
第二章 半导体激光器工作原理和表征技术	7
2.1 半导体激光器发光机理	8
2.1.1 原子能级	8
2.1.2 光子辐射	9
2.1.3 粒子数反转	12
2.1.4 光增益	13
2.2 半导体激光器的基本结构和类型	13
2.2.1 法布里-珀罗激光器	13
2.2.2 量子阱激光器	16
2.2.3 分布反馈激光器	18
2.2.4 垂直腔面发射激光器	20
2.2.5 增益导引激光器和折射率导引激光器	21
2.3 半导体激光器表征技术	22
2.3.1 速率方程	23
2.3.2 小信号强度调制特性	26
2.3.3 小信号频率调制特性	31
2.3.4 噪声特性	33
2.3.5 大信号特性	35
2.3.6 温度特性	38
本章小结	39
参考文献	39
第三章 高速半导体激光器建模技术	43

3.1 异质结半导体激光器建模技术	44
3.1.1 大信号模型	44
3.1.2 小信号模型	48
3.1.3 噪声模型	50
3.2 量子阱激光器建模技术	55
3.2.1 大信号模型	55
3.2.2 小信号模型	58
3.3 半导体激光器模型参数提取技术	61
3.3.1 直接提取技术	61
3.3.2 半分析提取技术	69
本章小结	74
参考文献	74
第四章 高速半导体光电探测器建模技术	77
4.1 光电探测器的基本工作原理	77
4.2 光电探测器的基本特性	79
4.2.1 响应度	79
4.2.2 量子效率	80
4.2.3 吸收系数	80
4.2.4 暗电流和击穿电压	80
4.2.5 上升时间和带宽	81
4.2.6 噪声	81
4.3 光电探测器建模技术	82
4.3.1 PIN 光电探测器等效电路模型	82
4.3.2 雪崩光电探测器等效电路模型	87
4.3.3 金属-半导体-金属光电探测器等效电路模型	94
本章小结	102
参考文献	102
第五章 高速半导体晶体管建模技术	106
5.1 微波射频半导体晶体管	106
5.2 GaAs MESFET/HEMT 建模技术	110
5.2.1 小信号等效电路模型	110
5.2.2 大信号等效电路模型	112
5.2.3 噪声等效电路模型	115

5.2.4 模型参数提取技术	120
5.3 GaAs/InP HBT 建模技术	123
5.3.1 大信号等效电路模型	123
5.3.2 小信号等效电路模型	125
5.3.3 噪声等效电路模型	126
5.3.4 模型参数提取技术	127
5.4 SiGe HBT 建模技术	131
5.5 MOSFET 建模技术	132
5.5.1 小信号等效电路模型	132
5.5.2 大信号等效电路模型	134
5.5.3 噪声等效电路模型	136
5.5.4 模型参数提取技术	137
本章小结	137
参考文献	138
第六章 光发射机驱动电路设计技术	141
6.1 光发射机基本工作原理	141
6.2 光发射机的集成方式	143
6.2.1 单片集成光发射机	144
6.2.2 混合集成光发射机	145
6.3 直接调制驱动电路设计	146
6.4 外调制驱动电路设计	149
6.4.1 MESFET/HEMT 基外驱动电路设计	150
6.4.2 BJT/HBT 基外驱动电路设计	158
6.4.3 MOSFET 基外驱动电路设计	163
6.5 分布式驱动电路设计	164
6.6 驱动电路电感电容峰化技术	166
6.6.1 驱动电路电感峰化技术	167
6.6.2 驱动电路电容峰化技术	170
6.6.3 10 Gb/s 调制器驱动电路设计	172
本章小结	173
参考文献	173
第七章 高速光接收机前端电路设计技术	177
7.1 光接收机的基本指标	178

7.1.1	信噪比	178
7.1.2	误码率	179
7.1.3	灵敏度	181
7.1.4	眼图	181
7.1.5	信号带宽	182
7.1.6	噪声带宽	184
7.1.7	动态范围	184
7.2	光接收机前端的电路结构	186
7.2.1	常用的光接收机前端电路形式	186
7.2.2	高阻型前置放大器	187
7.2.3	跨阻型前置放大器	189
7.2.4	高阻型和跨阻型前置放大器的比较	190
7.3	前置放大器的性能指标	191
7.3.1	二口网络 S 参数	191
7.3.2	二口网络噪声系数	194
7.3.3	跨阻增益和 S 参数之间的关系	195
7.3.4	等效输入噪声电流谱密度和噪声系数之间的关系	196
7.4	高速前置放大器设计	198
7.4.1	基于 BJT 的前置放大器设计	198
7.4.2	基于 HBT 的前置放大器设计	200
7.4.3	基于 MESFET/HEMT 的前置放大器设计	203
7.4.4	基于 MOSFET 的前置放大器设计	206
7.4.5	分布式前置放大器设计	207
7.5	接收电路电感电容峰化技术	209
7.5.1	接收电路电感峰化技术	210
7.5.2	接收电路电容峰化技术	212
7.6	光电探测器和前置放大器之间匹配电路设计	214
7.6.1	电感窄带调谐技术	217
7.6.2	宽带匹配技术	218
	本章小结	219
	参考文献	219

第一章 绪 论

光纤通信以其极大的通信容量、极低的传输损耗，在通信领域中占据了越来越主导地位。利用光纤固有的特性和成熟的技术来增加通信容量，通常有三种途径：(1)利用现有管道增敷光缆或增加光缆内光纤数。(2)采用多路复用技术，包括波分复用和频分复用，以充分利用光纤带宽，构成几十路甚至上千路复用系统。(3)采用超高速传输，通过开发高速光电器件以实现数千兆比特每秒(Gb/s)传输。国内外的研究报告表明，无论从经济上还是从技术上看，采用高速传输系统都比较理想，因此为实现大容量传输，一直侧重提高传输速率的研究。光纤数字通信系统在干线通信系统中已进入了自己的成熟期和完备期，光纤通信技术的另一发展趋势和研究热点是宽带光纤网络，特别是采用光纤技术的接入网和用户环路，并以光纤入户为最终目标，实现宽带综合业务网(B-ISDN)。

继 565 Mb/s 系统大量应用之后，1.6 Gb/s、1.7 Gb/s、2.5 Gb/s 和 10 Gb/s 系统已用于公用网长途干线中，均得到了令人满意的结果。更高速率系统，相干光通信、频分复用、光放大器等新技术正在研究之中，且已取得突破性进展。我国长途电信网将建成覆盖全国的以光缆为主，以数字微波、卫星为辅的多种通信手段构成的传输基础网。经济的迅速发展已经对电信网的传输容量提出了更高的要求，发展更高速率的光缆系统已经成为我国干线网下一步研究的重大课题。

1.1 光纤通信系统的组成

光纤通信系统与其他通信系统的区别从原理上讲只是载波频率的不同，光载波的频率高达 100 THz 的数量级，而微波载频的范围在 1~10 GHz，由于光频载波频率和微波载波频率的差别，光纤通信的信息容量可以比微波系统高出 10 000 倍，调制速率可以高达 Tb/s 的量级，正是由于光纤通信系统具有如此巨大的带宽能力，才使得人们不断对它进行研究和开发。

图 1.1 给出了光纤通信系统的结构示意图，它由光发射机、通信信道(光纤)和光接收机三部分组成，和其他通信系统是一致的。光发射机的作用是将电信号转变为光信号，并将光信号耦合进入通信信道光纤中，它主要由复用器、激光器调制电路和光源组成，其中光源是光发射机的核心，在高速光纤通

信系统中, 主要采用半导体激光器作为光源。光信号通过对光载波的调制而获得, 在大多数情况下采用直接对半导体光源注入进行直接调制的方法, 也可以使用外调制器。信道耦合器通常是一个微透镜, 它最大可能地将光信号耦合进入光纤中。光接收机在光纤的末端将接收到的光信号恢复成原来的电信号, 它主要由光电探测器、光接收机前端和解调器组成。光电探测器是光接收机的主要部件, 它能将光纤传来的已调光信号变为相应的电信号, 经前置放大器放大后送入解调器进行处理。解调器的设计依赖系统调制方式, 它的作用是对光接收机前端送来的信号进行判决, 恢复出原来的电信号信息。

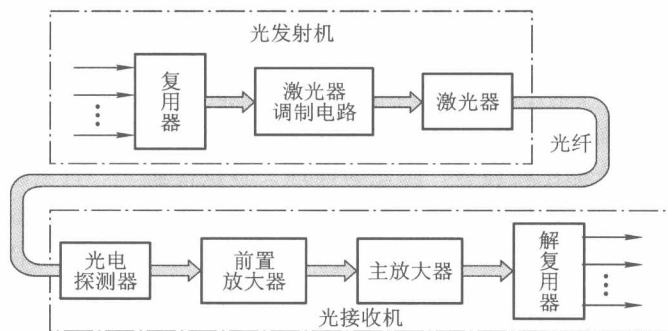


图 1.1 高速光纤通信系统结构示意图

目前大多数光纤传输系统采用强度调制 - 直接检测 (IM - DD) 方式, 其速率高达几个 Gb/s ~ 几十个 Gb/s, 这与光纤低损区可提供 10^5 Gb/s 的传输容量相差很大, 说明光纤还有很宽的频带可以利用, 因而可以采用复用技术。波分复用 (WDM) 和时分复用 (TDM) 系统是目前市场上最有前景的光纤传输系统, 利用现有已铺设的光纤光缆, 通过复用技术改造已有的光端机进行扩容, 可以在一根光纤中同时传输不同波长的光载波信号, 其优点是传输容量大, 可以进行双向通信。

在光发射机和光接收机中分别加入复用/解复用电路 (MUX/DMUX), 复用器将低速信号有效地且低串扰地复合在一起输入光端发送部分, 而解复用电路在光接收机部分将检测出来的高速信号分离出每个低速信号。这样的电处理方式仍然可以工作在比较低的速率范围, 如 8×2.5 Gb/s 或 32×2.5 Gb/s 等效于 20 Gb/s 或 80 Gb/s 的时分复用系统, 这样利用已成熟的光学器件技术可以克服电学方面的困难。

1.2 光电集成电路计算机辅助设计

目前应用于光纤通信设备中的光电集成电路 (OEIC) 研究和制造技术已成

为此领域的关键技术。OEIC 是指在不降低各种器件性能的情况下,集光子器件和电子器件于一体的单片集成电路,由于光电器件性能的互补,可以得到功能强大的光电集成电路,具有混合集成电路无法比拟的优势^[1-5];

(1) 由于寄生电感和电容的降低,光电器件特性如速率、灵敏度等得到了很大的改善。

(2) 采用光互连提高了集成电路的特性。

(3) 简化了制作工艺、装配和调试。

(4) 成本降低,可靠性提高。

(5) 利用电子和光子的相互作用可实现新的功能。

(6) 便于使用(体积小、重量轻、功能全)。

由于材料生长技术、微细加工技术、光子器件和电子器件的工艺共容问题及器件之间的串扰(电、光和热)等问题,直到 20 世纪 80 年代初,OEIC 研究才有所突破,成为当今高技术领域十分热门的课题^[6]。OEIC 除了可以用在长距离光纤通信系统以外,在计算机网络之间、基板之间、芯片之间的光互连和光信号处理中也得到了广泛的应用。

OEIC 中光子器件主要包括半导体激光器(Laser Diode, LD)、光电探测器(Photo Diode, PD)、光纤及各种波导器件,电子器件主要包括场效应晶体管、高电子迁移率晶体管和异质结晶体管等。利用光电混合集成电路技术,可以将所有的光子器件和电子器件制作在同一半导体材料上,从而实现单片集成光发射机、光接收机、光复用器和光开关等。OEIC 的集成规模由最初的两个器件发展到现在的几个器件、几十个器件、上千个器件构成的用于多路信息处理的光接收和发射机芯片。

随着光纤通信速率和 OEIC 集成度的不断提高,给 OEIC 设计者提出了崭新的课题。OEIC 是高度集成化电路,尺寸小、元件密度高,且一经制作便几乎无法调整,因此仅靠传统手工调整制作 OEIC 已不能满足当今光纤通信高速发展的需要,必须依赖于 OEIC 计算机辅助设计(CAD)技术。可以预言,随着集成光电子学的不断前进,光电集成电路计算机辅助设计也必将成为推动 OEIC 发展的重要手段,它可改变过去手算、手调或依靠简单计算的落后局面,为系统设计者提供一种方便、准确、快速的自动化设计手段,对提高 OEIC 的设计精度、降低研制和生产成本、缩短研制周期、提高光纤通信系统的速率和准确度将起到重要的促进作用。

光电集成电路的设计频段已经发展到微波频段,OEIC 设计和微波电路设计紧密结合的结果可以使工作频率大幅度提高,如半导体激光器和光电探测器的电路匹配设计及超宽带、低噪声光接收机前置放大器设计均是微波电路在高速光纤通信系统中的应用。因此只有和微波 CAD 软件很好地结合才能完成光

电集成电路计算机辅助设计。另外，微波集成 CAD 经过多年的发展，已经十分成熟，因此基于微波电路 CAD 软件平台开发 OEIC CAD 仿真软件是最佳途径之一。

要想借助微波电路 CAD 软件实现 OEIC CAD，就必须建立起能充分反映光电子器件的性能并可用纯电学元件等效的光电子器件等效电路模型，像处理电信号一样处理光信号，具体来说即将 OEIC 中的光路部分用电路变量如受控源的形式来实现，得到一个光电一体化的可以被微波电路 CAD 软件所接受的宏模型。

器件模型能否准确、简便地反应器件的各方面性能，是决定 CAD 软件质量的关键，因此 OEIC CAD 研究的核心就是光电子器件等效电路模型的建立。要想形成一套通用的 OEIC CAD 软件，必须把电子线路 CAD、微波电路 CAD 和光电子器件模型相结合，实现以下几项功能：

(1) 具有高速光纤通信中所具有的光子和电子器件模型，包括线性模型、非线性模型和噪声模型等。并且具有用户自定义器件模型功能，以便随时加入新型器件模型。

(2) 可以对超高速数字电路形式实现的 OEIC 光发射机、光接收机进行电路模拟，包括直流、交流、噪声和瞬态分析。

(3) 可以对微波单片电路(MMIC)形式实现的光接收机(包括前置放大器和主放大器等)进行小信号分析和噪声分析。

(4) 可以对在电子电路和光子电路之间加入的匹配电路，如半导体激光器驱动电路、光电探测器和前置放大器之间的匹配电路开展研究。

(5) 该电路模拟器最好具有电路设计优化功能，如能对电路特性、有源器件的简单物理参数进行优化设计的功能。

1.3 本书的目标和结构

本书的目标为培养读者对光电子器件建模和电路设计进行深入研究和分析的能力。大规模集成电路芯片的开发需要一支由市场专家、系统结构设计工程师、逻辑设计工程师、电路与版图设计工程师、封装工程师、测试工程师以及工艺和器件工程师等不同专业人员组成的团队。最基本的任务是完成计算机辅助设计和优化，而电路计算机辅助设计和优化的基础是建立精确的能反映器件物理特性的等效电路模型。半导体器件模型是影响电路设计精度的最主要因素。电路规模越大、指标和频段越高，对器件模型要求也越高，同时非线性电路设计比线性电路设计对器件模型的要求还要高。因此准确的器件模型对于提高 RF 和微波毫米波单片集成电路设计的成功率、缩短电路研制周期是非常重

要的。本书共分为七章，重点介绍以光电子器件(半导体激光器和探测器)以及高速电子器件为主的器件工作原理，建模技术和参数提取技术以及相应的高速光接收机和发射机电路设计技术。下面对第二章~第七章的主要内容做一下概括：

第二章主要对半导体激光器工作原理、基本结构以及各种新型半导体激光器(包括法布里-珀罗激光器、分布反馈激光器、分布布拉格激光器、量子阱激光器和垂直腔面发射激光器)进行了介绍，同时就如何表征半导体激光器的物理特性进行了讨论，并且利用反映物理机理的物理速率方程对半导体激光器的直流特性、小信号调制特性、温度特性和噪声特性进行了描述。

第三章主要介绍半导体激光器的建模技术和参数提取技术，建模技术包括小信号模型、大信号模型和噪声模型，参数提取包括寄生元件和速率方程模型参数提取技术的介绍，和第二章共同构成对半导体激光器的完整描述。

第四章介绍了光电探测器的基本工作原理和基本特性，并着重研究目前常用的高速光电探测器的物理建模技术和经验建模技术，结合微波有源器件建模原理对高速光电探测器进行了深入分析。

第五章详细介绍了用于高速光纤通信集成电路设计的微波射频器件，主要包括Ⅲ-V族化合物半导体晶体管MESFET/HEMT、HBT以及Si基MOSFET和SiGe HBT四种常用的晶体管。讨论了上述器件的工作原理，并介绍了这些器件的线性建模技术、非线性建模技术、噪声建模技术以及模型参数提取技术。

第六章首先介绍了光发射机的工作原理以及直接调制和外调制驱动电路的设计要点。接着对光发射机的混合集成方式和单片集成方式进行了讨论，总结了常用高速器件构成的外调制驱动电路设计，给出了最新的研究进展。

第七章对高速光接收机前置放大器的设计方法、电路拓扑和特性进行了详细的讨论，给出多种工艺条件下的前置放大器的设计要点，推导了跨阻增益和S参数之间的关系以及等效电路谱密度和噪声系数之间的关系。

参考文献

- [1] Keijiro H, Toshio F, Koji I, et, al. Optical communication technology roadmap[J]. IEICE Trans. Electron, 1998(8): 1328-1341.
- [2] 高琨. 光纤技术和光电子集成的现状和趋向[J]. 光通信技术, 1989, 13(1): 1-8.

- [3] 原荣. 光纤通信网络[M]. 北京: 电子工业出版社, 1999.
- [4] 祝宁华. 光电子器件微波封装和测试[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [5] Show N N, Carter A. Optoelectronic integrated circuits for microwave optical system[J]. Microwave Journal, 1993(10): 90-100.
- [6] Kenneth P. High speed circuits for lightwave communication[J]. International Journal of High Electronics and System, 1998, 9(2): 313 - 346.

第二章 半导体激光器工作 原理和表征技术

激光器被视为 20 世纪的三大发明(其他两项为半导体和原子能)之一,世界上第一个实用的红宝石激光器(属于晶体激光器)是在 1960 年由美国科学家 Theodore Meiman 发明的,奠定这个领域工作和实践基础的是美国科学家 Charles Townes Alexander Prokhorov 和 Nikolay Basov,为此三人获得了 1964 年的诺贝尔物理学奖。英文激光器单词(Laser)源自 Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation(受激辐射引起的光放大)。

激光器有多种形式,它的尺寸小到仅相当于一颗盐粒,大到可以填满一间房子,产生激光的介质可以是气体、液体绝缘晶体或者半导体。图 2.1 给出了激光器的分类列表,但是值得注意的是,在光纤通信系统中用到的几乎全是半导体激光器。半导体激光二极管自从 20 世纪 70 年代发展起来后,以其优越的辐射特性,如亮度、定向性、窄的光谱宽度以及输出光强单色性,已经成为长距离光纤通信系统的最佳光源。

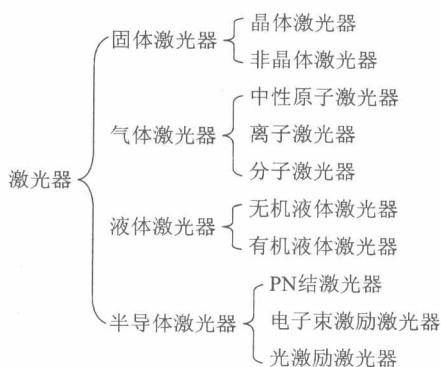


图 2.1 激光器的分类

半导体激光器长距离光纤通信系统中的电光转换器件,将所需要传输的电信号转换为调制的光信号通过传输媒质光纤发射出去,它应该满足以下几点要求:

- (1) 发射的光波波长应该在传输光纤的两个低损窗口之内,即短波长 $0.85 \mu\text{m}$ 和长波长 $1.31 \mu\text{m}$ 、 $1.55 \mu\text{m}$ 。
- (2) 发射的光功率要足够大,以满足长距离光纤通信系统的需要。
- (3) 小信号调制带宽要足够宽,以满足高速光纤通信系统的需要。
- (4) 温度特性好,强度噪声低。
- (5) 阈值电流低,响应速度快。
- (6) 可靠性好,寿命长。
- (7) 易于直接调制和间接调制。

随着对长距离光纤通信系统的可靠性要求的不断提高,对半导体激光器的

要求也相应提高,具有量子阱(Quantum Well, QW)、分布反馈(Distributed Feedback, DF)和极窄光谱宽度(纳米级)特性的半导体激光器已经研制成功,成为长距离光纤通信系统最常用的光源,垂直腔面发射激光器(Vertical Cavity Surface Emitting Lasers, VCSEL)就是光源技术的最新成果^[1-6]。

波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)、密集波分复用和高密集波分复用已经向激光二极管设计者提出了新的挑战,在这些技术中用频率而不是用波长来度量信道的分割已经变得如此小,以至于拥有0.1 nm光谱宽度的激光二极管都不能满足要求。

本章主要介绍半导体激光器的工作原理、基本结构以及新型半导体激光器的种类,然后介绍半导体激光器的直流特性、小信号调制特性、温度特性和噪声特性。

2.1 半导体激光器发光机理

尽管各种激光器在结构上有所差别,但其基本工作原理是相同的。产生激光必须有以下三个关键过程:光子吸收、自发辐射和受激辐射,下面分别介绍原子能级的概念和三个产生激光的关键过程^[7-12]。

2.1.1 原子能级

半导体是由紧密排列的原子组成的一种固态物质,其中每个原子包含有多个电子,物质的性质是由最外围的电子决定的。在原子内部存在着不同的能级:较低能量的价带(Valence Band)和较高能量的导带(Conduction Band),电子是通过禁带(Energy Gap) E_g 分开的,每一个能带包括了一系列的能级,电子可以在价带和导带的轨道上活动,由于禁带不包括任何能级,因此电子不可能在禁带上活动。图2.2给出了一个典型的半导体能带结构图,在绝对温度为零以及无外加电场的情况下,所有的电子几乎都在价带上,而导带上没有电子,

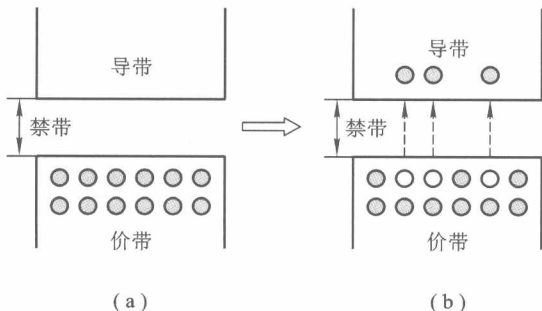


图2.2 典型的半导体能带结构图