

Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits

二极管激光器与集成光路

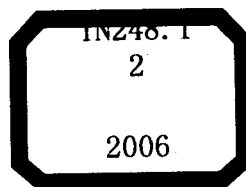
〔美〕拉里·A·科尔德伦 (Larry A. Coldren)

〔美〕斯科特·W·科尔津 (Scott W. Corzine)

史寒星 译



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



二极管激光器与集成光路

Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits

〔美〕 拉里·A·科尔德伦 (Larry A. Coldren)

〔美〕 斯科特·W·科尔津 (Scott W. Corzine)

史寒星 译

北京邮电大学出版社

· 北京 ·

Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits
Copyright © 1995 by John Wiley & Sons, Inc.
All Rights Reserved. Authorized translation from the English
language edition published by John Wiley & Sons, Inc.

二极管激光器与集成光路
Copyright © 1995 by John Wiley & Sons, Inc.
版权所有。经授权由 John Wiley & Sons, Inc 出版的英文版翻译。

著作权合同登记号 图字:01-2004-5833

图书在版编目(CIP)数据

二极管激光器与集成光路/(美)科尔德伦(Coldren, L. A.), (美)科尔津(Corzine, S. W.)编著;
史寒星译. —北京:北京邮电大学出版社, 2006

ISBN 7-5635-1293-4

I. 二... II. ①科...②科...③史... III. ①二极管—激光器—研究生—教材
②光集成电路—激光器—研究生—教材 IV. ①TN248.1②TN491

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 118368 号

书 名: 二极管激光器与集成光路
作 者: [美]拉里·A·科尔德伦(Larry A. Coldren), 斯科特·W·科尔津(Scott W. Corzine)
译 者: 史寒星
责任编辑: 陈岚岚
出版发行: 北京邮电大学出版社
社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)
北方营销中心: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578
南方营销中心: 电话: 010-62282902 传真: 010-62282735
E-mail: publish@bupt.edu.cn
经 销: 各地新华书店
印 刷: 北京忠信诚胶印厂
开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16
印 张: 26.25
字 数: 653 千字
印 数: 1—3 000 册
版 次: 2006 年 12 月第 1 版 2006 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 7-5635-1293-4/TN·463

定 价: 58.00 元

· 如有印装质量问题, 请与北京邮电大学出版社营销中心联系 ·

致 谢

本教材主要来源于以下两部分:一部分是 Coldren 教授有关二极管激光器和导波光学的研究生课程讲义,另一部分是 Corzine 在加州大学 Santa Barbara 分校(UC-Santa Barbara)撰写的博士论文,该文的主要内容是具有应变量子阱有源区的垂直腔激光器。这两部分都与众人的贡献密不可分。虽然讲义的最初目的只是在于补充本领域已有的书籍,但是随着时间的推移,该课程对讲义的依赖程度越来越大,因此也就有必要撰写这本教材了。非常感谢多年来修习了这门课并批改了作业的出色的学生们,本书的许多重要内容都是基于他们在课堂上提出的那些难于回答的问题而写成的。

在课堂以外,我们与 UC-Santa Barbara 的其他教职人员以及学生的交互合作,极大地促进了我们对于本书内容的理解。这些人员包括:教授 Kroemer、Dagli、Bowers、Yeh 和 Suemune(现任职于 Hokkaido 大学),学生 Ran-Hong Yan、Randy Geels、Jeff Scott、Bruce Young、Dubravko Babic、Zuon-Min Chuang、Vijay Jayaraman 和 Radha Nagarajan。Dagli 教授提供了大量数值分析的材料,Yeh 教授发现了本书中的多处错误和遗漏,我们要特别对他们表示感谢。

最后,感谢 Sherene Strobach 对于本书的成稿所做的大量工作。没有她的协助,我们就不可能完成本书的撰写。

Larry A. Coldren
Scott W. Corzine

前 言

二极管激光器已经成为重要的商业产品。从光盘播放机中的读写头到光纤通信系统中的发射机,二极管激光器已被广泛应用在许多领域。随着产品的可靠性和制造工艺的提高,不仅在消费产品中,而且在数据通信网和电信网中,二极管激光器都有了新的应用。虽然基于 GaAs 的“短”波长(大约 $0.7\sim 0.9\ \mu\text{m}$)激光器和基于 InP 的“长”波长(大约 $1.3\sim 1.6\ \mu\text{m}$)激光器仍然能够满足大多数应用的需要,但对于波长更短的可见光范围,以及波长更长的 IR 范围,人们的关注程度都在不断提高,并在开发各种相应的实用光源。对于研究生和有经验的工程师来说,在这样一个飞速发展的领域里,既要掌握基础知识又要了解最先进的前沿动态就变得非常困难。

本书的目的是为有一定理论基础的学生提供一本二极管激光器和相关的集成光路方面的教科书。本书所介绍的大多是很前沿的领域,但同时也提供了许多基本的背景材料。附录中既包含了各种背景材料,也包含了对一些更为前沿课题的更详细的阐述。因此通过适当地使用附录,可以使本书成为不同程度学生的学科教材,并且本书内容完备,自成体系。

本书适合研究生水平。学生需要掌握基本的本科程度的量子力学、固体物理和电磁场理论知识,并且最好能够先修一门光电子入门课程。不过,附录 1 和 3 介绍了所需的大部分基础知识。因此,只要读者能够仔细研读这些附录,即使略微欠缺某些背景知识也可以使用该书。实际上,第 1 章至第 3 章以及附录 1 至附录 7 全面地介绍了大多数种类的二极管激光器,用这些内容就可以为那些缺乏所需背景知识的学生开设一门相对基础的课程。也就是说,用这些内容甚至可以开设本科高年级的课程。

另一方面,如果要用本书作为研究生高级教材,则无需包括前 7 个附录的内容(当然,这些内容仍可以作为参考,随附习题也可以作为作业,以确保学生理解这些内容。不过,附录 5 阐述了模式增益和损耗的定义,由于业界的很多人士对这一概念都不甚了解,因此我们仍建议复习该附录)。在较快地讲完前 3 章后,可以进入第 4、5 两章,这两章详细分析了增益和激光器动态。若要更详尽地分析增益的物理机理,可以讲授附录 8 至附录 12 中的某些内容。引入这些内容可以为这一重要问题提供完整的分析。

第 6 章至第 8 章分析了有关二极管激光器的各种电磁波问题,这些内容对于理解现代通信链路和网络中采用的各类先进器件都是比较基本的内容。不过,把这些材料留到最后,可以使学生首先对激光器的工作原理有较为全面的理解和掌握,而不至于被侧向波导分析所需的各种数学方法所困扰。这样,只通过一门课程就可以获得对激光器工作性能的理解和分析能力。第 6 章介绍了微扰和耦合模理论,第 7 章介绍了介电波导分析方法。第 6 章是为了强调其内容的普遍性,我们无需了解侧向模式分布的细节就可以推导出这些非常有用的方法。利用这些耦合模结果,我们将再次分析光栅和 DFB 激光器。多年来,人们用来

分析这些器件的主要都是这些方法。但是,本书在第 3 章中,首先利用了精确的矩阵相乘方法来分析基于光栅的 DFB 和 DBR 激光器,由此所得的近似公式与耦合模理论结果推导出的公式是一致的。由于计算机的普及,以及采用复光栅设计的具有多个独立节段的激光器的出现,我们认为,应当把矩阵相乘法作为主要方法传授给学生。垂直腔激光器的出现也证实了这一方法的价值。然而,应该认识到,耦合模理论有利于将复波导几何特性的描述简化为简单的解析公式,这对于设计工作尤为有用。第 8 章将前 7 章中的大多数知识结合起来,提供了一套相对复杂的集成光路的设计实例。

第 7 章和第 8 章还介绍了一些基本的数值方法。随着成本较低的工作站和相关软件的出现,这些方法在求解复矩阵方程方面的作用日益增加。第 7 章为光波导分析引入了有限差分法,第 8 章为分析实际的 PIC 结构而介绍了光束传输法。

与该领域的其他教科书不同,本书是一本工程教材。学生在深入了解复杂的物理细节(诸如材料增益过程或者介电波导中的模式耦合)之前,首先应掌握一些能力,即根据对物理表象的理解来解决一些实际的二极管激光器问题的能力。这样既可以激励大家学习基础原理细节,又提供了一套工具,可以将每次学到的新知识点立刻用于解决实际问题。本书也注重了描述的准确性和一致性。比如,书中仔细区分了 LED 和激光器的内部量子效益;计算增益时不但阐明了分析方法,而且显示了与实验数据的一致性。最后,我们注意将所有章节和附录中的符号保持一致,从而保证了全书内容的完整性。

Larry A. Coldren
Scott W. Corzine

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 固体能级与能带	2
1.3 自发跃迁与受激跃迁:光的产生	3
1.4 二极管激光器中载流子的横向限制:双异质结构	4
1.5 用于二极管激光器的半导体材料	6
1.6 外延生长技术	9
1.7 实际激光器的电流、载流子和光子的侧向限制	11
习题	17
第 2 章 关于二极管激光器的现象学方法	19
2.1 引言	19
2.2 有源区内载流子的产生与复合	19
2.3 自发光子的产生与发光二极管	21
2.4 激光器腔体内光子的产生与损耗	23
2.5 激光器的阈值增益或稳态增益	25
2.6 阈值电流和输出功率与电流的关系	27
2.6.1 基本的 $P-I$ 特性	27
2.6.2 激光器驱动电流对镜面反射率和腔长的影响	29
2.7 弛豫谐振与频率响应	32
2.8 实际二极管激光器的特性测试	35
2.8.1 共面激光器的内部参数: α_i , η_i 和 g 与 J 的关系	35
2.8.2 VCSEL 的内部参数: η_i 和 g 与 J , α_i 和 α_m 的关系	37
2.8.3 效率与热流	37
2.8.4 温度对驱动电流的影响	38
2.8.5 导数分析	39
习题	41
第 3 章 二极管激光器的镜面与谐振	44
3.1 引言	44

3.2	散射理论	45
3.3	某些常用元素的 S 矩阵和 T 矩阵	48
3.3.1	电介质界面	48
3.3.2	无不连续点的传输线	49
3.3.3	电介质节段和 Fabry-Perot 标准具	51
3.3.4	Fabry-Perot 激光器	53
3.4	三镜面和四镜面激光腔	54
3.4.1	三镜面激光器	54
3.4.2	四镜面激光器	57
3.5	光栅	59
3.5.1	引言	59
3.5.2	传输矩阵理论	60
3.5.3	光栅的有效镜面模型	64
3.6	DBR 激光器	66
3.6.1	引言	66
3.6.2	阈值增益和输出功率	66
3.6.3	模式选择和调谐性	69
3.7	DFB 激光器	71
3.8	单频激光器的模式压缩比	74
	习题	75

第 4 章 增益与电流的关系 78

4.1	引言	78
4.2	辐射跃迁	78
4.2.1	基础定义与基本关系	78
4.2.2	辐射跃迁速率的基本描述	81
4.2.3	跃迁矩阵元	83
4.2.4	降低的态密度	86
4.2.5	与爱因斯坦受激速率常数的对应关系	88
4.3	光增益	88
4.3.1	增益的常规表示	88
4.3.2	线形展宽	91
4.3.3	增益谱的一般特征	94
4.3.4	多体效应	95
4.4	自发发射	97
4.4.1	单模自发发射速率	97
4.4.2	总的自发发射速率	98
4.4.3	自发发射因子	100
4.5	非辐射跃迁	101

4.5.1	缺陷与杂质复合	101
4.5.2	表面与界面复合	103
4.5.3	俄歇复合	107
4.6	有源材料及其特性	111
4.6.1	应变材料与掺杂材料	112
4.6.2	常用有源材料的增益谱	113
4.6.3	增益与载流子密度的关系	115
4.6.4	自发发射谱和电流与载流子密度的关系	118
4.6.5	增益与电流密度的关系	120
4.6.6	增益的实验曲线	122
4.6.7	阱宽度、掺杂与温度的影响	123
	习题	126
第 5 章	动态效应	130
5.1	引言	130
5.2	第 2 章回顾	130
5.2.1	速率方程	131
5.2.2	稳态解	132
5.2.3	稳态多模解	136
5.3	速率方程的微分分析	137
5.3.1	小信号频率响应	141
5.3.2	小信号瞬态响应	144
5.3.3	小信号 FM 响应或频率啁啾	147
5.4	大信号分析	150
5.4.1	大信号调制:多模速率方程的数值分析	151
5.4.2	启动时延	153
5.4.3	大信号频率啁啾	155
5.5	相对强度噪声和线宽	156
5.5.1	RIN 的常规定义和频谱密度函数	156
5.5.2	Schawlow-Townes 线宽	158
5.5.3	Langevin 法	160
5.5.4	Langevin 噪声谱密度与 RIN	161
5.5.5	频率噪声	165
5.5.6	线宽	166
5.6	载流子输运效应	169
5.7	反馈效应	173
5.7.1	静态特性	173
5.7.2	动态特性与线宽	177
	习题	181

第 6 章 微扰与耦合模理论	183
6.1 引言	183
6.2 微扰理论	184
6.2.1 均匀介电微扰	184
6.2.2 量子阱激光器的模式增益与折射率微扰的范例	184
6.3 耦合模理论:两模式耦合	185
6.3.1 反向耦合:光栅	186
6.3.2 DFB 激光器	193
6.3.3 同向耦合:方向耦合器	196
6.3.4 四端口方向耦合器	200
6.3.5 同向耦合滤波器与电光开关	202
6.4 模式激发	206
6.5 结论	208
习题	208
第 7 章 介质波导	210
7.1 引言	210
7.2 入射到平面介质边界上的平面波	211
7.3 介质波导的分析方法	213
7.3.1 驻波法	213
7.3.2 横向谐振	215
7.3.3 截止和“泄漏”或“准模式”	216
7.3.4 辐射模	217
7.3.5 多层波导	219
7.3.6 用于任意波导形状的 WKB 方法	219
7.3.7 用于沟道波导的有效折射率法简介	224
7.3.8 波动方程的数值求解	225
7.4 导模功率与有效宽度	227
7.5 名义上导模的辐射损耗	230
习题	234
第 8 章 集成光路	237
8.1 引言	237
8.2 采用串联光栅反射器的可调谐激光器和激光器-调制器	237
8.2.1 两段和三段 DBR 激光器	238
8.2.2 两段器件范例	240
8.2.3 更宽调谐范围的四段 DBR	243
8.2.4 激光器-调制器或放大器	246

8.2.5 激光器-调制器范例	252
8.3 利用方向耦合器实现输出耦合和信号合成的 PIC	255
8.3.1 采用方向耦合器输出分接的环形激光器	256
8.3.2 集成外差接收机	258
8.4 采用同向耦合滤波器的 PIC	262
8.5 分析 PIC 的数值方法	266
8.5.1 引言	266
8.5.2 隐性的有限差分光束传播法	267
8.5.3 利用光束传播法计算 z 不变波导的传播常数	269
8.5.4 利用光束传播法计算本征模形状	270
习题	270
附录 1 固态物理基础回顾	273
A1.1 量子力学入门	273
A1.1.1 引言	273
A1.1.2 量子阱与束缚电子	274
A1.2 固态物理基础	278
A1.2.1 晶体中的电子和能带	278
A1.2.2 有效质量	281
A1.2.3 利用自由电子(有效质量)理论分析态密度	282
附录 2 费米能量和载流子密度与泄漏之间的关系	287
A2.1 常规关系	287
A2.2 体材料的近似	289
A2.3 穿越异质势垒的载流子泄漏	294
A2.4 内部量子效率	297
附录 3 简单双异质结构中的光导波引论	299
A3.1 引言	299
A3.2 三层平板介质波导	299
A3.2.1 对称平板情况	300
A3.2.2 常规非对称平板情况	301
A3.2.3 横向限制因子 Γ_x	302
A3.3 二维波导的有效折射率法	302
A3.4 远场	305
附录 4 光模式密度、黑体辐射和自发发射因子	308
A4.1 光腔体模式	308
A4.2 黑体辐射	309

A4.3	自发发射因子 β_{sp}	309
附录 5	模式增益、模式损耗与限制因子	311
A5.1	引言	311
A5.2	模式增益的经典定义	311
A5.3	模式增益和限制因子	313
A5.4	内部模式损耗	315
A5.5	有源/无源节段腔体的更精确分析	315
A5.5.1	轴向限制因子	315
A5.5.2	阈值条件和微分效率	317
A5.6	色散对模式增益的影响	319
附录 6	关于增益与自发发射的爱因斯坦方法	320
A6.1	引言	320
A6.2	爱因斯坦系数 A 与 B	322
A6.3	热平衡	323
A6.4	增益计算	324
A6.5	自发发射速率计算	327
附录 7	周期结构与传输矩阵	329
A7.1	引言	329
A7.2	本征值和本征矢量	329
A7.3	应用于布拉格条件下的介质堆垛	330
A7.4	应用于远离布拉格条件下的介质堆垛	332
A7.5	与近似方法的对应关系	334
A7.5.1	傅里叶极限	334
A7.5.2	耦合模极限	335
A7.6	布拉格条件下通用的反射率	336
习题		337
附录 8	半导体中的电子态	340
A8.1	引言	340
A8.2	电子态的一般描述	340
A8.3	Bloch 函数和动量矩阵元	341
A8.4	量子阱中的能带结构	343
A8.4.1	导带	343
A8.4.2	价带	344

A8.4.3 应变量子阱	349
附录 9 费米黄金法则	353
A9.1 引言	353
A9.2 跃迁速率的半经典推导	353
A9.2.1 情形 I: 矩阵元与终态密度的乘积为常数	355
A9.2.2 情形 II: 矩阵元与终态密度的乘积为 δ 函数	356
A9.2.3 情形 III: 矩阵元与终态密度的乘积为 Lorentzian 型	357
习题	358
附录 10 跃迁矩阵元	360
A10.1 一般推导	360
A10.2 与偏振有关的效应	362
A10.3 量子阱中包络函数的引入	364
附录 11 应变带隙	366
A11.1 应力和应变的一般定义	366
A11.2 应变和带隙的关系	368
A11.3 应变与能带结构的关系	372
附录 12 俄歇过程的阈值能量	373
A12.1 CCCH 过程	373
A12.2 CHHS 和 CHHL 过程	374
附录 13 Langevin 噪声	375
A13.1 Langevin 噪声源的特性	375
A13.1.1 相关函数和谐密度	375
A13.1.2 Langevin 噪声相关强度的计算	377
A13.2 特殊的 Langevin 噪声相关	377
A13.2.1 光子密度和载流子密度 Langevin 噪声相关	377
A13.2.2 光子密度和输出功率 Langevin 噪声相关	378
A13.2.3 光子密度和相位 Langevin 噪声相关	379
A13.3 噪声谱密度计算	380
A13.3.1 光子噪声谱密度	380
A13.3.2 输出功率噪声谱密度	381
A13.3.3 载流子噪声谱密度	382
习题	383

附录 14 微扰公式的推导细节 384

附录 15 电光效应 386

附录 16 有限差分问题的求解 391

 A16.1 矩阵形式 391

 A16.2 一维介质平板示例 392

附录 17 激光器腔体的优化设计 394

 A17.1 一般方法 394

 A17.2 特殊情形 395

 A17.2.1 情形 A1:固定 L ($\alpha_{ia}=\alpha_{ip}$)来优化 L_a 395

 A17.2.2 情形 A2:固定 L ($\alpha_{ia}\neq\alpha_{ip}$)来优化 L_a 396

 A17.2.3 情形 B1:固定 L_p ($L_p=0$)来优化 L_a 396

 A17.2.4 情形 B2:固定 L_p ($L_p\neq0$)来优化 L_a 397

 A17.2.5 情形 C:固定 L_p/L_a 来优化 L_a 398

 A17.2.6 情形 D:固定 L_a 和 L_p 来优化 N_w (共面激光器) 398

 A17.2.7 情形 E:固定 L 来优化 N_w (VCSEL) 399

 A17.2.8 情形 A~E 的总结 399

 A17.3 增益曲线上的最佳工作点 400

 A17.4 增益曲线上偏移的最佳工作点 402

 A17.5 其他设计考虑 403

 A17.5.1 高速设计 403

 A17.5.2 热效应 404

译者跋..... 405

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

如同大多数其他类型的激光器一样,二极管激光器的构成是将某种光增益介质置于一个光学谐振腔中。增益介质和谐振腔的设计是现代激光器制作中的关键要素。增益介质通常由能够吸收特定波长范围内入射辐射的材料组成。但是,如果通过注入电能量或者光能量来泵浦该材料,则材料中的电子可被激发到更高的非平衡能级上,因此通过激发这些电子产生额外的辐射,可以对入射辐射进行放大而不是吸收。如果产生的增益足够克服光学谐振腔中某一谐振模式的损耗,则称这一模式达到阈值,并且发射出较为相干的光。谐振腔为被放大的辐射提供所需的正反馈,由此可以建立激射振荡并将其保持在高于阈值的泵浦水平。正如其他任何一种振荡器,其输出功率的饱和值等于输入值减去所有内部损耗的值。

二极管激光器代表了当前许多不同类型激光器中的一类。其他重要的激光器类型包括气体激光器和固体激光器这两种,氦氖气体激光器和掺钕 YAG(钕铝石榴石)固体激光器是这两类激光器中最常见的实例。二极管激光器不同于其他各种类型激光器的主要原因是可以用电流对其直接泵浦。通常这将导致更高的工作效率,二极管激光器总的功率转换效率普遍会达到约 50%;而分别由等离子激发或者非相干闪光灯泵浦的气体 and 固体激光器的效率一般只在 1% 的量级。不过,某些激光器的效率要高些,例如 CO_2 气体激光器的效率通常高于 10%。

由于腔长较长且增益带宽较窄,气体和固体激光器一般比简单的半导体激光器具有更为相干的光输出。然而,更为复杂的单频二极管激光器的线宽可以与其相比,达到低兆赫兹范围。半导体激光器与其他激光器的另一个显著区别是其净尺寸,气体和固体激光器的长度通常为几十厘米,而二极管激光器芯片通常只有一个盐粒大小,不过硬件的安装和封装还是将有用元件的尺寸增加到了立方厘米的量级。

最后,二极管激光器的另一个属性是其高可靠性或长使用寿命,正因为如此,二极管激光器被广泛地用于许多重要的应用领域,例如光纤通信系统。气体或固体激光器的使用寿命通常为几千小时,而合格的二极管激光器的使用寿命则可高达几百年。不过,近期出现的二极管激光器泵浦的固体激光器(例如用二极管泵浦 Nd-YAG)可以同时提供两种技术的最佳优点。

本章将尝试介绍一些理解半导体二极管激光器所需的基本要素。首先,基于附录 1 给出的背景知识,描述半导体中的能级和能带;然后介绍光与这些能级的相互作用;再则讨论通过异质结构对载流子和光子的限制作用来增强这种相互作用;另外,还将简要陈述用于二极管激光器的各种材料以及如何生长这些材料的外延层;最后,将介绍如何对这些外延层进行侧向成型从而在实际激光器应用中提供电流、载流子和光子的侧向限制。

1.2 固体能级与能带

为了能够理解激光器的增益是如何实现的,我们必须对增益媒质中那些电子能够占据的能级有所了解。采用适当的电子势来求解薛定谔方程可以得到允许的各个能级。在附录 1 中简要回顾了这一重要的固体物理概念,并且推导了我们随后将用到的其他一些函数。图 1.1 简要阐述了在孤立原子和半导体固体中与光致跃迁相关的各个能级,图中垂直方向为电子势。

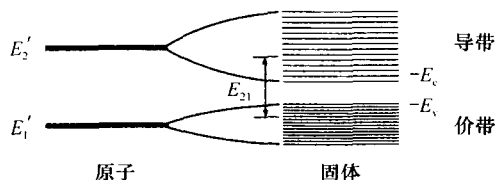


图 1.1 在晶体中,原子的两个分立能级逐渐演变成含有多个能级的能带

在气体与固体激光器中,环绕气体或固体的主体原子只能轻微地扰动活动原子的能级,这些能级仍像孤立原子的原始能级一样清晰。例如,在 $1.06\ \mu\text{m}$ 波长跃迁的掺钕 YAG 激光器采用了钕原子的 ${}^4\text{F}_{3/2}$ 能级作为激光器的第二上能态,而用 ${}^4\text{I}_{11/2}$ 能级作为激光器的第一下能态。由于所涉及的只有这两个原子能级,所以发射或吸收的光子都需具有几乎精确的能量, $E_{21} = hc/1.06\ \mu\text{m}$ 。

另一方面,在共价键固体中(例如用于制造二极管激光器的半导体材料),当通过共价键而形成固体结构时,构成原子的单原子最高能级展宽成能级带,图 1.1 阐释了这一现象。为了便于理解这一分裂的原因,我们首先来分析单一共价键。当两个原子非常接近时,原子的外层价电子可以自适应成为集中在两个原子核之间的具有低能量的成键(对称)电荷分布,或者成为在两个原子核之间没有电荷的高能量反键(反对称)分布。换句话说,由于电子具有两种方式在两个原子周围进行自我调整,所以电子的一个孤立能级现在分裂为两个能级^①。在共价键中,两个原子的电子都占据能量较低的成键能级(只要其自旋相反),而能量较高的反键能级保持为空。

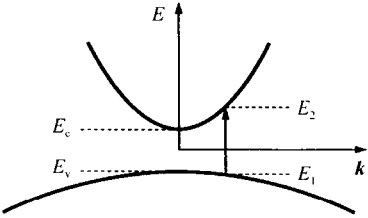
如果在这两个原子的连线上引入另一个原子,可能会出现一种既非成键又非反键的新的电荷分布。这样,在这两种极端之间形成了第三个能级。当 N 个原子在一条直线链上形成共价键时,在最低能量的成键态和最高能量的反键态之间出现 N 个能级,从而构成一个能带。在这个原子线性链中,自旋简并允许所有的 N 个电子处于能带的下一半中,而能带的上一半为空。然而在一个三维晶体中,能级数目更接近于晶胞的数目,而非原子的数目。在典型的半导体晶体中,每个初始晶胞对应两个原子。由此,第一个原子填充进入能带的下一半(正如线性链一样),而第二个原子进入上一半,因此整个能带为满。

半导体价带由各个单原子被占据的最高原子能级的多次分裂构成。根据定义,在半导

^① 常见的对能级分裂的不正确的解释是泡利不相容原理,该原理禁止多个电子占据相同的能态(并且如其所论,导致强制分裂)。实际上,这种分裂是与两个耦合系统的波动方程的求解有关的一种基本现象,它等效地应用于概率、电磁波或任何其他波。它与泡利不相容原理根本无关。

体中当 $T=0\text{ K}$ 而且没有外界激射时,价带被完全填满。同样,紧邻的更高的原子能级分裂成为导带,在无激发的半导体中完全为空。当对系统施加热或其他能量时,价带中的电子可能被激发至导带,正如分立原子中的电子被激发至更高一层的原子能级一样。在固体中,这种激发在价带中产生空穴(缺失电子),在导带中产生电子,两者都有利于导电。

虽然图 1.1 显示许多导带-价带能态对都可以与能量为 E_{21} 的光子相互作用,附录 1 表明由于在能量守恒之外还必须要遵循动量守恒,因而对于给定的跃迁能量这种相互作用将被限制在有限的一些能态对之间产生。为了说明这一问题,图 1.2 绘出了电子能量与 k 矢量之间的关系曲线($E-k$)(注意,定量 $=\hbar k$)。由于参与相互作用的光子的动量非常小,导带与价带之间的跃迁必须具有相同的 k 矢量,在该图中只允许垂直跃迁。这一事实对于增益的计算至关重要。

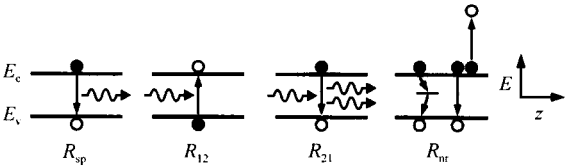


注:图中显示了一个电子从价带中的束缚态(E_1)跃迁至导带中的自由载流子能态(E_2),该跃迁在价带中留下了一个空穴。导带底能量与价带顶能量分别为 E_c 和 E_v 。

图 1.2 半导体中电子能量与波数的关系曲线

1.3 自发跃迁与受激跃迁:光的产生

对半导体中存在的能级具有了一定的了解之后,我们可以进一步分析可能存在的各种电子跃迁及其与光波的各种可能的相互作用。图 1.3 绘出了各种重要的电子跃迁形式,并着重强调了与光子(光波量子)吸收或发射有关的类型。



注:前三类代表辐射跃迁,其中或者由光子提供能量来解放电子,或者由束缚电子释放的能量来产生光子。第四类表示两种非辐射过程。

图 1.3 导带与价带之间的电子跃迁

虽然我们考虑的是半导体,但图中只绘出了导带与价带的一个能级。正如上文以及附录 1 所述,动量守恒决定了对于某一给定跃迁能量,这些能带中只有有限数目的能级对能够参与到跃迁当中。事实上,如果不是由于有限的能态寿命而导致的有限的相互作用带宽,只有一对能态对是完全正确的。不论如何,在计算增益和其他效应的过程中,都需要先找出一个能态对的贡献,然后通过积分来包含其他能态对的贡献;因此,只要分析其中一个导带-价