



普通高等教育“十三五”规划教材

科学与工程类专业规划教材

# 半导体光电子学

（第3版）

黄德修 黄黎蓉 洪伟 编著

工程类专业规划教材

# 半导体光电子学

(第3版)

黄德修 黄黎蓉 洪伟 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

半导体光电子学是研究半导体中光子与电子相互作用、光能与电能相互转换的一门科学,涉及量子力学、固体物理、半导体物理等一些基础物理,也关联着半导体光电子材料及其相关器件,在信息和能源等领域有着广泛的应用。

本书是作者在2013年第2版的基础上经进一步修改、提炼、补充和拓展而成的,基本保留了第2版的章节结构。半导体光电子器件的性能改善无不是通过不断优化半导体材料和器件结构以增强电子与光子的相互作用、实现高效电能与光能相互转换的结果,其中异质结所形成的电子势垒和光波导的双重效应起到了关键作用。全书分10章,各章内容相互关联,形成当今半导体光电子学较为完整的、理论和实际应用相结合的体系。

本书可作为大学理科光学专业、工科物理电子学、光学工程和光电信息工程等专业本科生的教学用书和相关专业研究生的参考用书,也可供相关科技工作者参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

半导体光电子学/黄德修,黄黎蓉,洪伟编著. —3版. —北京:电子工业出版社,2018.6

光电信息科学与工程类专业规划教材

ISBN 978-7-121-34256-1

I. ①半… II. ①黄… ②黄… ③洪… III. ①半导体电子学—光电子学—高等学校—教材 IV. ①TN36

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第106110号

责任编辑:竺南直

印 刷:天津千鹤文化传播有限公司

装 订:天津千鹤文化传播有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:20.25 字数:518千字

版 次:1989年8月第1版

2018年6月第3版

印 次:2018年6月第1次印刷

定 价:49.80元



凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: davidzhu@phei.com.cn。

# 前 言

《半导体光电子学》第2版自2013年元月问世至今已历时了5年。在历史长河中,5年时光只是弹指一挥间。然而,这短短的5年中,人们都能感受到我国正走向富强、人民正奔向小康。其间最令人感受深刻的莫过于我国一跃进入信息社会,尽情享受由信息带来的财富和高质量生活。可能许多人并未关注我国的超级计算机在国际评比中屡登榜首,但都能感受到凭借一个小小的手机能知天下事,能与国内乃至世界各地的亲朋好友随时视频通信,足不出户即可购物和支付等科技的变革。不少人可能只知道巨型计算机的运算速度只取决于集成电路芯片,却并不知晓计算机中日益增多的光互连、并行光信息处理对信息容量所做出的贡献。也可能不少人只知道手机通信如此便捷得益于无线通信(常称的Wi-Fi),却不去深究如果没有光纤/光缆进入千家万户、没有跨海跨洋的大容量光缆连接到世界各地,并由此构建的光通信网络大平台,则无线通信将只能实现短距离且难以畅通的信息交流。这就是因为包括无线网在内的各种互联网+业务都将汇集到光通信网络这个大平台上进行信息的快速(光速)传输与交换之故,各种互联网只是光网络的接入网而已。基于这一认识,就不难理解由光纤/光缆作为信息传输介质所编织的光网络中,有无数体积很小但高效率工作的半导体激光器发出作为信息载体的激光,有无数接收信息的半导体光探测器。正是它们长年累月的默默奉献才有今天的光网络大平台。

为了促进我国半导体光电子材料和器件的发展以及培养这一领域专业人员的需要,早在1985年原我国电子工业部教材编审委员会征集相关教材选题时,本人所提出的《半导体光电子学》选题被认可后并在全国招标,1988年本人所提交的书稿又被该教材编审委员会选中,并于1989年由指定的电子科技大学出版社出版。为适应半导体光电子学的快速发展,本书的第2版于2013年元月由电子工业出版社出版发行。承蒙一些重点高校相关专业任课教师的器重,本书被用作相关专业大学本科教材、高校或相关研究所硕士研究生的选修课程以及博士研究生入学考试的参考书。时隔5年虽经3次印刷,但仍能发现书中存在一些错误和不足。为此,2017年初经与电子工业出版社竺南直博士(本书责任编辑)商定,将对本书内容做进一步精炼,结合其本身的发展需要增加一些新的内容,并于2018年出版本书的第3版。

为了确保此版有更充实的内容,本书原作者特邀请华中科技大学黄黎蓉教授和洪伟副教授共同参与本书第3版的相关工作。她们二位早年跟随我完成博士学位后又与我共同从事科研与教学,她们均有较高的学术造诣和认真的治学态度,因而期待此版有更好的质量与读者见面。

第3版沿用第2版的章节结构应是合理的。这基于几个方面:①综观半导体光电子学的发展,无不是通过加强半导体光电子材料中电子与光子的相互作用、增强二者之间能量转换效率,以获得各种半导体光电子器件所需的性能的。这是贯穿全书的主线。②本书章节较多涉及了最能体现上述特点的半导体光发射器件。这是因为相比之下光吸收材料和相关器件要单纯许多。例如,用作光发射器件的半导体材料要求是直接带隙的,而且根据发射波长,对半导体材料的组成元素和比例(即组份比)都有严格要求,对有源层和限制层之间有很高的

晶格匹配要求;而作为半导体光探测器的半导体除了选用量子跃迁效率高的直接带隙材料外,间接带隙半导体也能产生较强的光吸收。③ 将以量子阱为代表的低维量子材料置于全书中心位置的第 6 章,体现其核心地位,也体现了半导体光电子材料的发展和认识规律,具有承前启后的作用。只有认识到体材料中具有 3 个自由度的电子受限能力不足而不利于其与光子相互作用的增强,才能理解减少电子自由度的重要性,也才有后来半导体光电子器件性能的提升。

本书第 1 章是全书的理论基础,半导体光电子器件的功能是电子在半导体能带之间跃迁的结果。跃迁速率的大小反映电子与光子相互作用的强弱,是量子力学、半导体物理等近代物理向光电子领域的延伸。第 2 章的异质结是两种不同带隙的半导体所形成的晶体界面和载流子势垒,同时利用异质结两边的折射率差又可成为光子全反射界面,从而成为第 3 章光波导的基础。异质结的这种双重作用是第 4 章体材料半导体激光器的基本结构要件,也是其后发展各种高性能半导体光电子材料和器件的基础。异质结之间的距离必须从对载流子限制和对光子限制的光波导效应各自优化的基础上做综合考虑,以求得到第 5 章所列器件的最佳性能,例如,激光器的阈值电流、输出光的模式、线宽、调制等特性。

本书第 3 版对前一版仍存在的少数印刷失误和内容叙述不妥之处做了修改;结合半导体光电子学的最新进展对某些章节内容做了较多补充;进一步加强了全书各章节内容之间的关联和前后呼应,以求更加系统和连贯。尽管如此,限于作者水平,仍会有一些不尽人意之处,恳请读者不吝批评指正。

本书仅是作者以光信息传输中所用光源和探测、光信息存储和处理所需的半导体光电子器件为应用背景,对半导体光电子材料中电子与光子相互作用的基本理论、器件结构和性能要求等方面的粗浅认识基础上编写的,远非半导体光电子学丰富内涵的全部。在第 10 章所提的正待发展的半导体光电子学的几个方面以及绪论中所提的有待进一步探索的几个问题也只是受限于作者认识水平所为。但愿本书能为致力于进一步发展半导体光电子学、进一步提高半导体光电子器件性能和拓展其应用的同仁提供一点创新动力。

最后对长期关心、支持和使用本书的朋友们致以衷心的感谢。

黄德修

2018 年 2 月于华中科技大学

# 目 录

绪论	1
第 1 章 半导体中光子-电子的相互作用	4
1.1 半导体中量子跃迁的特点	4
1.2 直接带隙与间接带隙跃迁	5
1.2.1 概述	5
1.2.2 电子在能带之间的跃迁几率	7
1.2.3 电子在浅杂质能级和与其相对的能带之间的跃迁	11
1.2.4 重掺杂时的带-带跃迁	13
1.3 光子密度分布与能量分布	14
1.4 电子态密度与占据几率	16
1.5 跃迁速率与爱因斯坦关系	20
1.5.1 净的受激发射速率和半导体激光器粒子数反转条件	22
1.5.2 自发发射与受激发射速率之间的关系	24
1.5.3 净的受激发射速率与增益系数的关系	25
1.5.4 净的受激吸收速率与吸收系数	25
1.6 半导体中的载流子复合	26
1.6.1 自发辐射复合速率	27
1.6.2 俄歇 (Auger) 复合	31
1.7 增益系数与电流密度的关系	36
思考与习题	42
参考文献	43
第 2 章 异质结	44
2.1 异质结及其能带图	44
2.1.1 pN 异型异质结	45
2.1.2 突变同型异质结	47
2.1.3 渐变异质结	48
2.2 异质结在半导体光电子学器件中的作用	49
2.2.1 在半导体激光器 (LD) 中的作用	49
2.2.2 异质结在发光二极管 (LED) 中的作用	50
2.2.3 异质结在光电二极管探测器中的应用	50
2.3 异质结中的晶格匹配	50
2.4 对注入激光器异质结材料的要求	55
2.4.1 从激射波长出发来选择半导体激光器的有源材料	56
2.4.2 从晶格匹配来考虑异质结激光器材料	58

2.4.3	由异质结的光波导效应来选择半导体激光器材料	58
2.4.4	衬底材料的考虑	63
2.5	异质结对载流子的限制	63
2.5.1	异质结势垒对电子和空穴的限制	63
2.5.2	由泄漏载流子引起的漏电流	66
2.5.3	载流子泄漏对半导体激光器的影响	69
	思考与习题	70
	参考文献	70
<b>第3章</b>	<b>平板介质光波导理论</b>	<b>72</b>
3.1	光波的电磁场理论	72
3.1.1	基本的电磁场理论	72
3.1.2	光学常数与电学常数之间的关系	73
3.2	光在平板介质波导中的传输特性	78
3.2.1	平板介质波导的波动光学分析方法	78
3.2.2	平板介质波导的射线分析法	84
3.3	矩形介质波导	91
	思考与习题	95
	参考文献	96
<b>第4章</b>	<b>异质结半导体激光器</b>	<b>97</b>
4.1	概述	97
4.2	光子在谐振腔内的振荡	98
4.3	在同质结基础上发展的异质结激光器	101
4.3.1	同质结激光器	101
4.3.2	单异质结半导体激光器	102
4.3.3	双异质结激光器	103
4.4	条形半导体激光器	105
4.4.1	条形半导体激光器的特点	105
4.4.2	条形激光器中的侧向电流扩展和侧向载流子扩散	106
4.5	条形激光器中的增益光波导	111
4.5.1	概述	111
4.5.2	增益波导的数学分析	112
4.5.3	增益波导激光器中的像散、 $K$ 因子	117
4.5.4	侧向折射率分布对增益波导的影响	118
4.6	垂直腔表面发射激光器 (VCSEL)	120
4.6.1	概述	120
4.6.2	VCSEL 的结构	121
4.6.3	布拉格反射器	123
4.7	分布反馈 (DFB) 半导体激光器	126
4.7.1	概述	126

4.7.2	耦合波方程	127
4.7.3	耦合波方程的解	129
4.7.4	阈值增益和振荡模式	130
4.7.5	DFB 激光器结构与模选择	132
	思考与习题	134
	参考文献	135
<b>第 5 章</b>	<b>半导体激光器的性能</b>	<b>137</b>
5.1	半导体激光器的阈值特性	137
5.1.1	半导体激光器结构对其阈值的影响	137
5.1.2	半导体激光器的几何尺寸对阈值电流密度的影响	138
5.1.3	温度对阈值电流的影响	141
5.2	半导体激光器的效率	142
5.3	半导体激光器的远场特性	145
5.3.1	垂直于结平面的发散角 $\theta_{\perp}$	146
5.3.2	平行于结平面方向上的发散角 $\theta_{\parallel}$	148
5.3.3	波导结构对远场特性的影响	148
5.4	半导体激光器的模式特性	149
5.4.1	纵模谱 <sup>[11]</sup>	150
5.4.2	影响纵模谱的因素	151
5.4.3	激光器的单纵模工作条件	153
5.4.4	“空间烧洞”效应对单模功率的限制	155
5.4.5	温度对模谱的影响	156
5.4.6	单纵模激光器	157
5.5	半导体激光器的光谱线宽	158
5.5.1	肖洛-汤斯 (Schawlow-Townes) 线宽 $\Delta\nu_{ST}$	158
5.5.2	半导体激光器的线宽	159
5.5.3	与输出功率无关的线宽	161
5.5.4	增益饱和与线宽	161
5.6	半导体激光器的瞬态特性	162
5.6.1	瞬态响应的物理模型	162
5.6.2	速率方程	163
5.6.3	延迟时间 $t_d$	164
5.6.4	半导体激光器的直接调制	165
5.6.5	张弛振荡	167
5.6.6	自持脉冲	170
5.7	半导体激光器的退化和失效	171
5.7.1	半导体激光器的工作方式	171
5.7.2	半导体激光器的退化	173
5.7.3	欧姆接触的退化	175



5.7.4	温度对半导体激光器退化的影响	175
	思考与习题	175
	参考文献	176
<b>第6章</b>	<b>低维量子半导体材料</b>	<b>178</b>
6.1	概述	178
6.2	量子阱的基本理论和特点	180
6.2.1	量子阱中的电子波函数和能量分布	180
6.2.2	量子阱中电子的态密度和增益	182
6.2.3	量子阱中的激子性质	184
6.2.4	应变量子阱	185
6.3	量子阱半导体激光器	187
6.3.1	概述	187
6.3.2	单量子阱(SQW)半导体激光器	188
6.3.3	多量子阱(MQW)半导体激光器	189
6.3.4	量子级联激光器	191
6.4	量子线与量子点	192
6.4.1	量子线和量子点基本理论	192
6.4.2	量子线和量子点制备方法	194
6.4.3	量子点的定位生长	195
6.4.4	硅基异质外延的量子点及激光器	196
	思考与习题	199
	参考文献	199
<b>第7章</b>	<b>半导体光放大器(SOA)</b>	<b>202</b>
7.1	概述	202
7.2	半导体光放大器的性能要求	204
7.2.1	半导体光放大器的增益特性	205
7.2.2	半导体光放大器的噪声特性	210
7.2.3	半导体光放大器的耦合特性 <sup>[7]</sup>	211
7.3	半导体光放大器应用展望	212
7.3.1	半导体光放大器在光纤通信传输网上的应用	213
7.3.2	半导体光放大器在全光信号处理中的应用	214
	思考与习题	217
	参考文献	218
<b>第8章</b>	<b>可见光半导体光发射材料和器件</b>	<b>219</b>
8.1	概述	219
8.2	红光半导体光发射材料和器件	222
8.2.1	红光半导体材料	222
8.2.2	红光半导体激光器	224

8.2.3	红光发光二极管	226
8.3	蓝/绿光半导体光发射材料和器件	228
8.3.1	概述	228
8.3.2	III-N 化合物半导体光发射材料	229
8.3.3	蓝/绿光半导体光发射器件	232
	思考与习题	233
	参考文献	234
<b>第 9 章</b>	<b>半导体中的光吸收和光探测器</b>	<b>236</b>
9.1	本征吸收	236
9.1.1	直接带隙跃迁引起的光吸收	237
9.1.2	间接带隙跃迁引起的光吸收	239
9.2	半导体中的其他光吸收	243
9.2.1	激子吸收	243
9.2.2	自由载流子吸收	247
9.2.3	杂质吸收	249
9.3	半导体光电探测器的材料和性能参数	250
9.3.1	常用的半导体光电探测器材料	250
9.3.2	半导体光电探测器的性能参数	250
9.4	无内部倍增的半导体光探测器	253
9.4.1	光电二极管	253
9.4.2	PIN 光探测器	254
9.4.3	光电导探测器	256
9.5	半导体雪崩光电二极管 (APD)	257
9.5.1	APD 的原理与结构	257
9.5.2	APD 的噪声特性	261
9.5.3	APD 的倍增率 (或倍增因子)	263
9.5.4	APD 的响应速度	263
9.5.5	低电压工作的 APD	264
9.6	量子阱光探测器	265
9.6.1	量子阱雪崩倍增二极管	265
9.6.2	基于量子阱子能级跃迁的中/远红外探测器	266
9.6.3	基于量子限制斯塔克效应的电吸收调制器	267
	思考与习题	270
	参考文献	271
<b>第 10 章</b>	<b>半导体光电子器件集成</b>	<b>273</b>
10.1	概述	273
10.1.1	集成电路的启示	273
10.1.2	PIC 和 OEIC 出现的逻辑推理	273
10.1.3	PIC 和 OEIC 的发展	274

10.1.4	应用需求对 PIC 和 OEIC 的强力拉动	275
10.2	发展 PIC 和 OEIC 的困难与启示	276
10.2.1	制约 PIC 和 OEIC 发展的因素	276
10.2.2	发展 PIC 和 OEIC 的某些启示	277
10.3	几种常用的光子集成手段	280
10.3.1	对接再生长	280
10.3.2	选区外延生长	281
10.3.3	量子阱混合	281
10.3.4	键合	282
10.3.5	双波导集成	282
10.4	推动 PIC 发展的可能技术方案	283
10.4.1	微环谐振腔	283
10.4.2	光子晶体	286
10.4.3	表面等离子体激元 (SPP)	289
10.4.4	超材料、超表面	295
	思考与习题	301
	参考文献	302
附录 A	薛定谔方程与一维方势阱	306
附录 B	半导体的电子能带结构	310

## 绪 论

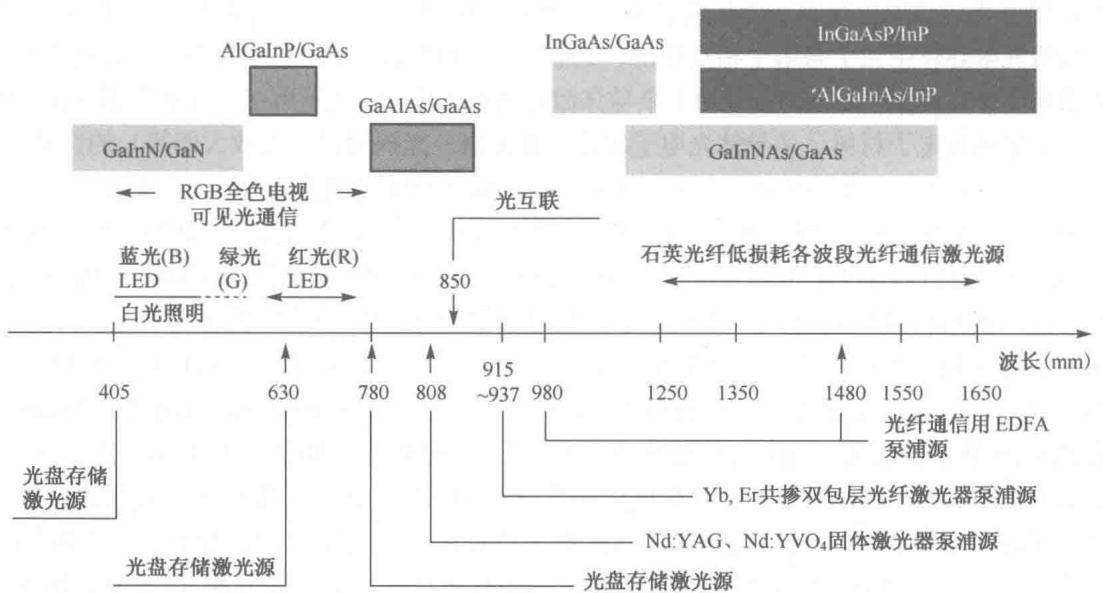
半导体光电子学是研究半导体中光子与电子相互作用、光能与电能相互转换的一门科学，涉及量子力学、固体物理、半导体物理、光学等一些基础物理，也关联着半导体光电子材料及其相关器件。因此，半导体光电子学的内涵远超出半导体光学或半导体中的光学性质，即不是简单地研究将光作用到半导体上所产生的物理现象而忽略半导体中电子对光子的反作用和能动性。

早在 1873 年，史密斯 (W. Smith) 就在“不良导体”（当时还没有半导体这个名词）砾中看到在光作用下电导增加的现象。1887 年赫兹 (Hertz) 将各种因光而致电的变化现象统称为光电效应。此前也有一些学者发现某些不同于金属导电性质的“不良导体”（如温度升高时其电导反而增加；与金属接触出现单向导电等），至 1911 年前后才将这种“不良导体”称为半导体。1897 年汤姆逊 (Thomson) 首先发现电子，1905 年爱因斯坦 (Einstein) 又提出光子学说，这一对并行性和互补性极强的微观粒子为后来研究和发展半导体光电子学奠定了基础。到 20 世纪前半叶才将电子在半导体中的行为上升到理论高度，并发现杂质对半导体性能产生大的影响。通过提纯得到真正的本征半导体，又可通过人为掺入杂质改变半导体的导电性质。在研究微观粒子运动规律的量子力学、统计物理、热力学等现代物理的基础上形成了半导体物理学，为 1947 年出现晶体管和其后的微电子学奠定了理论基础。其中虽也涉及了在光照作用下半导体中出现非平衡载流子（光生载流子），但并未涉及电子转化为光子的逆过程。系统地研究半导体中光子与电子相互作用、光能与电能相互转换，使之成为当今极具活力和发展潜力的半导体光电子学，首先应归功于半导体激光器的出现，以及其后在光纤通信需求的强烈拉动下，半导体光电子材料、半导体光电子器件（激光器、光探测器、光放大器等）的快速发展。

在 1953 年 9 月，美国的冯·纽曼 (Von Neumann) 就曾在他的—篇未正式发表的手稿中预言在半导体中产生受激发射的可能性（后于 1987 年正式发表于 IEEE J. Quantum Electron. QE-23 (6):659-673）。巴丁 (J. Bardeen) 在冯·纽曼理论预言的基础上认为，通过各种方法（例如向 PN 结注入少数载流子）扰动导带电子和价带空穴的平衡浓度，致使非平衡少数载流子复合而产生光子，其辐射复合速率可以像放大器那样，以同样频率的电磁辐射作用来提高，这应该是激光器 (Laser) 的最早概念，比戈登 (Gorden) 和汤斯 (Towes) 所报告的微波量子放大器 (Maser) 的概念还早一年。前苏联列别捷夫物理研究所的巴索夫 (Basov) 于 1958 年首次公开发表文章提出在半导体中实现负温态（即粒子数反转）的理论和将载流子注入半导体 PN 结实现“注入激光器”的论述，只是他的理论和实验基于间接带隙半导体 (Ge)，这是探索中所经历的一段曲折。1960 年贝尔实验室的布莱 (Boyle) 和汤姆逊提出用半导体晶体平行解理面直接用做谐振腔面。1960 年红宝石固体激光器和 1961 年 He-Ne 气体激光器相继问世，自然将催生半导体激光器。然而，实现这些激光器的粒子数反转条件似乎不适合半导体材料中的受激发射。在 1961 年，伯纳德 (Bernard) 和杜拉福格 (Duraffourg) 利用半导体准费米能级的概念推导出半导体增益介质中实现粒子数反转的条件。以上这些探索为 1962 年半导体激光器的出现奠定了理论和器件结构的基础。

1962年9月底到10月间，美国通用电气（GE）的两个实验室、IBM公司和麻省理工学院的林肯实验室几乎同时报道用GaAs半导体研制出同质结半导体激光器。因是同质结，这种激光器的阈值电流密度高达 $10^4\text{A}/\text{cm}^2$ ，只能在液氮温度下以脉冲方式勉强工作。这种状态一直持续到1967年仍未能突破。在这种考验人们攀登科学高峰耐力和洞察力的关键时期，正当一些半导体激光器的先行者一筹莫展而退却时，以通信著称于世界的美国贝尔实验室固体研究室主任高尔特（Golt）却从正在酝酿的光纤通信的需求出发，高瞻远瞩地认为，若半导体激光器能实现室温下连续工作，将在光纤通信中发挥巨大作用。为此，他们组织物理化学、晶体物理等跨学科的专家攻关，于1967年一举实现GaAlAs/GaAs单异质结半导体激光器在室温下脉冲工作。仅隔三年后的1970年又实现基于GaAlAs/GaAs材料的双异质结半导体激光器在室温下连续工作，使阈值电流密度由单异质结激光器的 $10^3\text{A}/\text{cm}^2$ 又一次降到双异质结激光器的 $10^2\text{A}/\text{cm}^2$ 量级。这一成就恰与同年康宁公司光纤损耗突破 $20\text{dB}/\text{km}$ 一道推动了光纤通信的发展，成为光纤通信史上的第一个里程碑。

一个只能在显微镜下才能看到的半导体激光器芯片，却成就了美国和前苏联的多位诺贝尔奖获得者。他们的研究成果和后来无数科技工作者的努力使包括半导体激光、半导体光放大、半导体发光和光探测在内的半导体光电子学得以迅速发展，至今仍方兴未艾。仍以对光纤通信和光信息存储不断更新换代提供动力的半导体激光器为例，它的发射波长已覆盖了从紫外到近红外的一个很宽的光谱范围，其量子效率之高，应用范围之广也是其他激光器不能比拟的。基于半导体有源材料的发光二极管已在光显示和“白光照明”方面发挥巨大的社会效益。仅对目前半导体光发射器件的工作波长及其应用的一个不完全归纳，如下图所示。图中列举了半导体光发射器件的一些主要应用和相应的半导体材料。



除了需不断提高现有半导体光电子材料与器件性能外，半导体光电子学还面临一些需要进一步研究的课题，例如：

(1) 充分开发能带工程的潜力，进一步提高导带与价带的对称性，进一步完善对轻/重空穴带简并度的调控。若能通过减少重空穴的有效质量，对提高半导体光发射和光放大器器件的内量子效率、改善增益动力学性能将有大的积极影响。

(2) 低维（特别是一维和零维）量子材料的进一步完善和利用，特别是量子点材料在尺寸、位置和分布的可控生长，通过对量子点的排列与组合，实现一些特殊的器件功能。

(3) 需突破曾被称为“死亡之谷”的绿光波段的半导体光发射材料，填补该波段高量子效率半导体激光器和发光器件的空白，实现完全基于半导体光电子器件的三基色（RGB）。

(4) 相对于边发射激光器，垂直腔表面发射激光器（VCSEL）不只是简单地改变腔型和激光发射方向，它还具有单片集成同种器件的能力、较低的生产成本、圆对称光斑输出、超低阈值、高张弛振荡频率等优势和特点。然而，对于长波长 VCSEL，还需要提高其 DBR（即分布布拉格反射器）的两组成材料的折射率差值以减少 DBR 对数。

(5) 光子集成（PIC）和光电子集成（OEIC）是半导体光电子学发展的制高点和永恒的研究命题。参照微电子学的发展经历，有待集成的半导体光电子器件以平面工艺实现；探索采用半导体光电子材料和器件来取代目前某些基于其他介质材料的光电子器件的可能性；需特别重视半导体光放大器在光子集成和全光信号处理中的作用，促进其发展；探索像微电子学那样在同一半导体材料不同部位进行材料的微观处理（而非宏观加工）以实现器件功能集成的途径。

(6) 将现有半导体光电子器件的性能进一步朝极限提高。例如，半导体激光器的线宽加强因子减少至零乃至负值，从而突破肖洛-唐斯极限线宽；半导体激光器直接调制带宽达到 40 GHz 以上或半导体外调制器的调制带宽达到目前铌酸锂光调制器的水平；可调谐半导体激光器的连续和稳定调谐范围达 40~80nm，满足目前光纤通信 C+L 波段的需要，且其成本接近单个同性能的半导体激光器；以掺铒光纤放大器（EDFA）为参照实现具有高饱和输出功率、低偏振相关增益或低噪声指数的半导体光放大器；实现低量子噪声和高增益-带宽积的雪崩光电二极管；等等。

多年来人们都简单地将电导率介于金属导体和绝缘体之间来定义半导体，但这是不全面的。随着半导体科学和技术的发展，又挖掘出更能科学地区分导体和绝缘体、更全面地表征半导体的一些特点。诸如，半导体对来自外部光辐射存在一个由半导体材料禁带宽度所决定的吸收波长阈值，此称为吸收限（也称“长波限”或“红限”）；与金属导体不同，半导体有负的电阻温度系数，在绝对零度时，半导体也成了绝缘体；与衡量电子在能带中占据几率的费米能级处在带内的金属不同，半导体的费米能级位于导带与价带之间的带隙内。可以相信，随着对半导体的不断深入研究，更不能只给半导体一词以简单的定义，而应可能赋予其更多的内涵。

当年被不雅地称之为“不良导体”的半导体成就了半导体微电子学，也成就了后来的半导体光电子学。二者成为信息科学与技术的共同基础，共同改变着人类的生存环境和命运。它们利用了电子在半导体中的不同行为能力。半导体微电子学主要研究和控制电子在能带内的输运，而半导体光电子学则着重研究和利用电子在能带之间的跃迁。电子和光子是一对极具活力、有很强互补性和发展规律并行性的微观粒子。由电子和光子共同开拓的半导体光电子学虽历经半个多世纪的快速发展，但其内容仍在不断丰富之中，这是任何一部教材或专著所不能概括和预期的。

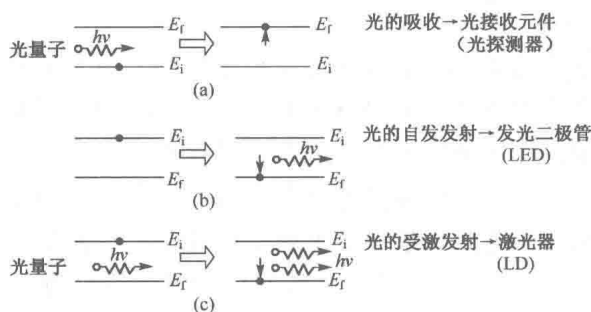
# 第 1 章 半导体中光子-电子的相互作用

## 1.1 半导体中量子跃迁的特点

在光电子学中，一切与光有关的现象从本质上都可以认为是量子现象，或者说是物质中有关量子相互作用和能量相互转换的结果，都是与量子跃迁联系在一起。与通常两能级系统中跃迁发生在分立能级的单个电子态之间的情况不同，在半导体中与光有关的量子（电子或空穴，统称为载流子）跃迁一般发生在导带与价带之间。与这种跃迁相联系的光现象有以下三种。

(1) 受激吸收：当适当能量的光子与半导体相互作用，并把能量传递给价带中的电子，使之跃迁到导带，从而在半导体中产生电子-空穴对，这就是受激吸收，也是光电导、光探测器的的工作原理，如图 1.1-1(a)所示。

(2) 自发发射：在热平衡下，如果在半导体的导带与价带中分别有一定数量的电子与空穴，导带中电子以一定的几率与价带中空穴复合并以光子形式放出复合所产生的能量，则称这一过程为自发发射跃迁，这是半导体发光二极管（LED）的工作原理，如图 1.1-1(b)所示。即使在半导体激光器中也可能存在一定比例的自发发射分量。



( $E_i$  为跃迁初态能量,  $E_f$  为跃迁终态能量)

图 1.1-1 在半导体中与跃迁有关的三种光效应

( $E_i$  为跃迁初态能量,  $E_f$  为跃迁终态能量)

(3) 受激发射：若上述导带电子与价带空穴复合过程不是自发的，而是在适当能量的光子激励下进行的，则由复合产生的光子就与激发该过程的光子有完全相同的特性（包括频率、相位和偏振等），这种跃迁过程称为受激发射。这是半导体激光器（LD）、半导体光放大器（SOA）的工作原理，如图 1.1-1(c)所示。

显然，上述三种过程是相互联系但又有区别的。受激吸收与受激发射是互逆的跃迁过程，而受激发射与自发发射的区别在于这种辐射跃迁中是否有外来光子的参与。而且，在实际的光电子器件中，有可能存在上述一种或并存两种、三种跃迁过程，只是在一定条件下某一跃



迁过程占主导地位罢了。以后还将看到，一些常用的半导体激光器、发光二极管和半导体光探测器在材料和结构上有一些共同的基础。事实上，半导体激光器在一定工作条件下（例如在零偏压下）可用来作光探测器；而在半导体激光器芯片解理面完全增透的情况下，依偏置电流的大小将呈现出自发发射或超辐射的特性。

正是由于半导体中的量子跃迁不是发生在分立的、有限的电子态之间，而是发生在（准）连续能级的导带与价带之间，因而使半导体在光电子学中有异于通常两能级激光模型的突出特点和重要地位：

(1) 半导体能带中存在高的电子态密度，因而在半导体中有可能具有很高的量子跃迁速率。可以得到比其他气体或固体激光工作物质高几个数量级的光增益系数（如体材料可达  $10^2 \text{cm}^{-1}$ ，量子阱材料可达  $10^3 \text{cm}^{-1}$  量级）。

(2) 在半导体同一能带内处在不同激励状态的电子态之间存在相当大的相互作用（或共有化运动），这种相互作用碰撞过程的时间常数与辐射过程的时间常数相比是很短的，因而能维持每个带内激励态之间的准平衡。一旦出现电子跃迁留下的空态，将迅速由其他原来未包括在跃迁过程中的电子所补充，这种载流子通过带内松弛的再分布过程几乎是瞬时完成的。因此，半导体激光器或其他半导体光电子器件有很高的量子效率和很好的高频响应特性。

(3) 半导体中的电子态可以通过扩散或漂移运动在材料中传播，可以将载流子直接注入发光二极管或激光器的有源区中，因而有很高的能量转换效率。

(4) 在两能级的激光系统中，每一处于激发态的电子有它唯一返回的基态（即某一特定的原子态）。在理想的本征半导体（或电离能非常小的杂质半导体）中，这一跃迁选择定则还能成立，即每一被激发到导带的电子，存在唯一允许它返回的价带态。而实际上，由于半导体材料本身不纯或在载流子之间存在互作用，跃迁选择定则受到扰动而变得不严格，电子跃迁发生在大量的导带电子与价带空穴之间。这种结果所造成的影响之一是使半导体激光器的光谱线宽较宽。

以上所述的只是半导体中与量子跃迁有关的一些特点。至于跃迁所需遵守的定则、跃迁速率及其影响因素将在以下各节详细分析。

## 1.2 直接带隙与间接带隙跃迁<sup>[1]</sup>

### 1.2.1 概述

1.1 节所述的电子在半导体能带之间的跃迁过程，实质上是非平衡载流子的产生与复合过程。跃迁速率取决于与跃迁有关的初态、终态的细节。按照量子力学原理，半导体中的电子态是用与晶格周期有关的波函数来描述的，其电子的波矢量  $k$  是一个重要的状态变量。一般来说，半导体能带中电子的能量  $E$  和波矢量  $k$  之间是一个非常复杂的、多极值的关系，并表现出复杂的能带结构，参见附录 B：半导体的电子能带结构。半导体的能带结构因材料而异，图 1.2-1 表示出 Ge、Si 和 GaAs 三种半导体的能带结构 ( $E \sim k$  图)。电子的带间跃迁发生在导带和价带之间，如果电子跃迁的初、终态对应着布里渊区的同一波矢量  $k$ ，则在能带图上表现为竖直方向的跃迁，故称这种跃迁为竖直跃迁，如同电子在 GaAs 等多数 III~



V 族和 II-VI 族化合物半导体中跃迁的情况；相反，若跃迁所涉及的初、终态不对应同一波矢量  $k$ ，且其差值大于晶格常数的倒数，则由能带图可以看出，电子在导带极小值与价带极大值之间的跃迁为非垂直方向，因而得名非垂直跃迁，电子在 Ge、Si 中的跃迁就属于这种情况。GaAs 等多数半导体中的垂直跃迁对应着布里渊区的中心点 ( $\Gamma$ )，此处的  $k = 0$ 。而另一些垂直跃迁半导体（如 IV-VI 族化合物）则有多个导带能量最小值和价带能量最大值与布里渊区中心呈对称分布，这种简并态使同一  $k$  值的态密度增加。

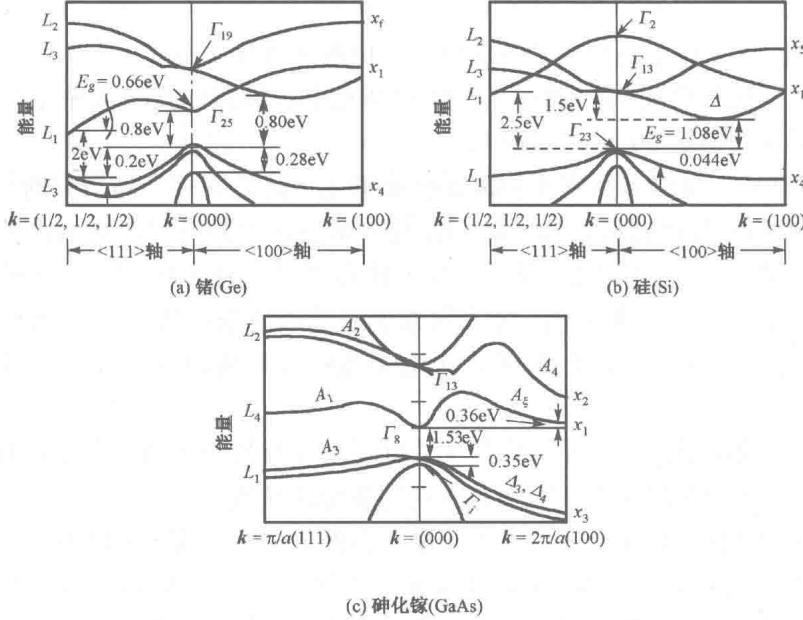


图 1.2-1 Ge, Si 和 GaAs 的能带图

不管是垂直跃迁还是非垂直跃迁，也不论是吸收光子还是发射光子，量子系统总的动量和能量都必须守恒，这就叫跃迁的  $k$  选择定则。设与电子跃迁有关的初态能量和动量分别为  $E_i$  和  $hk_i$ ，而终态的能量和动量分别为  $E_f$  和  $hk_f$ ，进一步假设跃迁过程只涉及一个光子，以  $E_i > E_f$ （电子从导带高能态跃迁到价带低能态）为例，上述能量和动量守恒定律可表示为

$$E_i - E_f - h\nu = 0 \tag{1.2-1}$$

$$\hbar(k_i - k_f - k_p) = 0 \tag{1.2-2}$$

式中， $h\nu$  为光子的能量， $hk_p$  为光子的动量。光子的波数是很小的，如波长为  $1\mu\text{m}$  时， $k_p \approx 6 \times 10^4 \text{cm}^{-1} \ll \pi/a$  ( $\pi/a$  为布里渊区边界的波数， $a$  为晶格常数)，因而可以将光子的动量忽略不计。由式 (1.2-2) 有  $k_i = k_f$ ，这正是垂直跃迁的表述。由式 (1.2-1) 和式 (1.2-2) 所表示的能量和动量守恒定律只适合于仅有电子、空穴和光子这三种量子参与的垂直跃迁。因为这种守恒是它们之间直接的、自持的平衡，故又称垂直跃迁为直接带隙跃迁或直接跃迁。从量子力学的观点来看，这种跃迁属一级微扰过程，因而有较高的跃迁几率，所有高效率半导体光辐射器件 (LD 和 LED) 的有源区材料必须选用直接带隙半导体材料。

对于间接带隙半导体材料，其导带底与价带顶的位置对应不同的  $k$  值，则发生在导带底与价带顶之间的跃迁就不遵守由式 (1.2-2) 所表示的准动量守恒，但实验上却观察到电子由价带顶到导带底跃迁所引起的吸收，所以一定有另外的过程存在，它使得电子跃迁的初态和