 光电信息科学与工程类专业规划教材

半导体光电子学

(第2版)

黄德修 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

光电信息科学与工程类专业规划教材

半导体光电子学

(第2版)

黄德修 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1989年原版基础上经过修改和较大篇幅的内容更新与拓展而成的,将半导体中电子与光子的相互作用、光能与电能的相互转换贯穿始终,重点关注各种光电子器件在材料、结构上的兼容性和实现集成功能的可能性,力求反映半导体光电子学的一些主要和最新的进展。全书共分10章,第1~5章和第9章是原版内容的修改和扩充,包括半导体中光子-电子的互作用、异质结、平板介质光波导理论、异质结半导体激光器、半导体激光器的性能、半导体中的光吸收和光探测器;其余4章是依据半导体光电子学的最新进展而编写的,包括低维量子半导体材料、半导体光放大器(SOA)、可见光半导体光发射器件、半导体光电子器件集成。

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/黄德修编著. —2版. —北京:电子工业出版社,2013.1

光电信息科学与工程类专业规划教材

ISBN 978-7-121-18765-0

I. ①半… II. ①黄… 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(2012)第246820号

责任编辑:竺南直

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

装 订:北京中新伟业印刷有限公司

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:19 字数:486千字

印 次:2013年1月第1次印刷

印 数:3000册 定价:45.00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。

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

服务热线:(010)88258888。

前 言

早在 1985 年,当时的电子工业部教材编审委员会征集高等学校教材选题时,我就意识到当时正在崛起的光纤通信中半导体光电子器件是其关键,其中充分体现了半导体中光子与电子的相互作用,因此我提出《半导体光电子学》这一选题,随即被由周炳琨教授领导的电子工业部教材编审委员会认可,但需在全国范围内招标后确定其作者。我作为投标者之一,在截止日前匆匆递交了还未来得及打印的手写稿。所没料到的是教材编审委员会对我的手稿给出了较高的评价而被选中,并指定在电子科学大学出版社出版。由于当时还没有基于计算机的激光照排系统而只能铅印。待 1989 年正式出版后发现印刷错误百出,出现错字、漏字、上下窜行等一些不能容忍的错误。尽管如此,该教材在一些重点大学和研究所使用后,得到了广大教师和读者的包容和谅解,还于 1992 年被评为电子工业部优秀教材一等奖。

1962 年问世的半导体激光器徘徊了 5 年才实现室温下脉冲工作。直至 1970 年终于实现了室温下连续工作。可以毫不夸张地说,没有半导体激光器就没有今天以光纤通信网为核心的整个信息网络。随着光纤通信发展的需要,半导体激光器,在材料、器件结构、性能都得以大的提高,其应用范围不断扩大。与此同时包括各种半导体光探测器、半导体光调制器和半导体光放大器在内的其他一些半导体光电子器件也不断涌现和发展。除了光纤通信外,高密度光信息存储、高性能计算机和“绿色照明”等的需求又相继拉动了半导体光电子学的发展,不断丰富其内涵。

面对半导体光电子学在内容上不断深刻变化和应用上不断迅速扩大,20 多年前所出版的《半导体光电子学》显然不可能客观反映其快速发展的步伐,因而拟用该书的第 2 版来弥补原书的不足。该书第 2 版曾被列为“九五”国家级规划教材,但由于教学、科研工作繁忙而未能如愿;后又将其列为国家“十五”规划教材,又恰因全力投入武汉光电国家实验室的筹建,使该书撰写再次落空,甚至对能否完成该第 2 版一度失去信心。2010 年,得到电子工业出版社的鼓励,决心完成该书第 2 版的撰写工作。这绝非名利所驱使,一本教材无名利可谈,更何况我早已将个人名利置之度外,只是深感有愧于曾热爱该书的读者。常遇到一些未曾相识的年青朋友,他们谈及曾在《半导体光电子学》书中受益;直到今年还有几位学生来询问何处能得到该书;去年一位曾读过该书在美国深造的年青学者还特地到办公室来见我;有的学校在该书早已脱销情况下自行将该书翻印作为教材;以研究半导体科学著称的中科院半导体所长时间以该书作博士生入学考试参考书,然而却又得不到该书。面对这些,我只有责任来完成该书的第 2 版。

《半导体光电子学》第 2 版与原书相比内容有较大增删,力求能反映半导体光电子学的一些主要进展。然而,即使如此,也难以跟上其快速发展的客观现实。本书由原版的 8 章扩展成 10 章。第 2 版对原版的第 1-5 章和第 7 章(现第 9 章)只作了少量增删,第 6、7、8、10 章是根据半导体光电子学的进展,对原书第 8 章“发展中的半导体光电子学”中的相关节所作的扩展。鉴于可见光发射器件(激光器、发光二极管)在“白光照明”、光存储和光显示等方面的重要性,将原书 4.6 节“可见光半导体激光器”改为“可见光发射器件”,并列入第 8 章。考虑到垂直腔表面发射激光器相对于通常的法布里-珀洛腔端面发射是另一种谐振腔型和光发射方式,具有一些独特优点,而将其新增为 4.6 节。

和原版相同,将半导体中电子与光子的相互作用、光能与电能的相互转换贯穿全书始终。

半导体光电子器件的功能是光子作用下电子在能带之间的跃迁的结果。因此在第 1 章中围绕这种“跃迁”展开，包括电子跃迁的形式、影响跃迁速率的诸多因素，不同跃迁方式产生的结果。如读者有半导体物理、量子力学的基本知识，就能很自如地理解和掌握。

第 2 章所介绍的异质结是增强电子与光子相互作用的一种基本结构，将电子和光子进行双重限制在作用区内，是半导体激光器能实现室温连续工作的突破口，现已成为绝大多数半导体光电子器件获得高量子效率的基础。因异质结涉及到晶格匹配问题，第 6 章还谈到晶格失配应变对能带结构和光子-电子互作用的影响。如有一定的固体物理或晶体物理的背景知识，对该章的理解会更深入。

第 3 章所介绍的平面光波导看起来似乎是光学的范畴。然而，由半导体异质结形成的光波导是限制光子行为的通道，在半导体光电子学中有着举足轻重的作用。它不但是绝大多数半导体光电子器件的功能作用区，而且是各器件间的互连光波导，在光子集成和光电子集成中起重要作用。

鉴于半导体激光器对整个半导体光电子学的发展起着重要作用和它在光信息技术各个领域应用的广泛性，第 4 章和第 5 章分别阐述其结构和性能，从而可了解器件结构对性能的影响。不同器件结构都是基于加强光子和电子的相互作用而有利于提高器件的性能。

低维量子材料已成为目前半导体光电子器件的基础，是对电子自由度的限制，为当今许多高性能半导体光电子器件得以实现的前提。其所以安排在第 6 章是考虑承前启后，“有比较才有鉴别”。此前各章所涉及的是体材料，即异质结所限制的电子仍有三个自由度，对电子的限制只考虑了扩散长度而未计及对其自由度的限制，这种限制线度的量变将对第 5 章半导体激光器性能产生质的变化，该章也成为后面几章的基础。

相对光发射器件，光探测器显得较成熟，故对光探测器一章未作大的修改。第 7、8、10 章是当今半导体光电子学最具活力的几个方面，与之前面各章相互关联。须强调的是第 10 章阐述的光子集成或光电子集成始终是半导体光电子学发展的制高点，是关系到半导体光电子学器件的优化组合和兼容。该章所列仅为作者主观认为的相关潜在技术，仅供参考。恳望广大读者极尽创新思维，勇攀光子集成高峰。

半导体光电子学的发展，既有本书各章涉及的一些理论问题，还有赖于半导体光电子材料的加工工艺。正如没有先进的外延设备和工艺，超晶格和量子阱的理论将无法得到证实，也就没有今天的高性能半导体光电子器件。当今在半导体光电子学所取得的一些创新性成就，无不以其独特或完善的加工工艺为前提。本书未涉及半导体光电子工艺的细节，是为遗憾之处。

《半导体光电子学》第 2 版最终问世，只能说了却了作者多年来的心愿。虽力求将该书表现得更完善一些，尽量能反映出半导体光电子学的最新成就，但限于作者的学术水平，定有许多不足和偏见之处，只能留下我此生难以弥补的遗憾。请读者予以谅解。

最后我要感谢所有曾阅读过原版《半导体光电子学》和关心第 2 版出版的读者和朋友们！是他们对我工作的肯定和鼓励才使我有完成这一夙愿的决心。

感谢严莎女士、赵茗副教授为我手稿的计算机输入和整理所给予的无私帮助！

感谢华中科技大学对我从教 50 年的一贯支持和爱护！

感谢电子工业出版社、责任编辑竺南直博士的热情支持与配合！

作者于华中科技大学

2012 年 11 月

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 电子在能带之间跃迁的几率	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 重掺杂下带-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 净受激发射速率与增益系数的关系	24
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	43
参考文献	43
第 2 章 异质结	45
2.1 异质结及其能带图	45
2.1.1 pN 异型质结	46
2.1.2 突变同型异质结	48
2.1.3 渐变异质结	49
2.2 异质结在半导体光电子学器件中的作用	50
2.2.1 在半导体激光器中的作用	50
2.2.2 异质结在发光二极管 (LED) 中的作用	51
2.2.3 异质结在光电二极管探测器中的应用	51
2.3 异质结中的晶格匹配	52
2.4 对注入激光器异质结材料的要求	57
2.4.1 从激励波长出发来选择半导体激光器的有源材料	57
2.4.2 从晶格匹配来考虑异质结激光器材料	59

2.4.3	由异质结的光波导效应来选择半导体激光器材料	59
2.4.4	衬底材料的考虑	65
2.5	异质结对载流子的限制	65
2.5.1	异质结势垒对电子和空穴的限制	65
2.5.2	由泄漏载流子引起的漏电流	69
2.5.3	载流子泄漏对半导体激光器的影响	72
	思考与习题	73
	参考文献	73
第 3 章	平板介质光波导理论	75
3.1	光波的电磁场理论	75
3.1.1	基本的电磁场理论	75
3.1.2	光学常数与电学常数之间的关系	76
3.2	光在平板介质波导中的传输特性	81
3.2.1	平板介质波导的波分析方法	81
3.2.2	平板介质波导的射线分析法	87
3.3	矩形介质波导	94
	思考与习题	98
	参考文献	98
第 4 章	异质结半导体激光器	100
4.1	概述	100
4.2	光子在谐振腔内的振荡	101
4.3	在同质结基础上发展的异质结激光器	104
4.3.1	同质结激光器	104
4.3.2	单异质结半导体激光器	105
4.3.3	双异质结激光器	106
4.4	条形半导体激光器	108
4.4.1	条形半导体激光器的特点	108
4.4.2	条形激光器中的侧向电流扩展和侧向载流子扩散	109
4.5	条形激光器中的增益光波导	115
4.5.1	概述	115
4.5.2	增益波导的数学分析	116
4.5.3	增益波导激光器中的象散、K 因子	120
4.5.4	侧向折射率分布对增益波导的影响	121
4.6	垂直腔表面发射激光器 (VCSEL)	123
4.6.1	概述	123
4.6.2	VCSEL 的结构	124
4.6.3	布拉格反射器	126
4.7	分布反馈 (DFB) 半导体激光器	129
4.7.1	概述	129

4.7.2	耦合波方程	130
4.7.3	耦合波方程的解	132
4.7.4	阈值增益和振荡模式	133
4.7.5	DFB 激光器结构与模选择	135
	思考与习题	138
	参考文献	138
第 5 章	半导体激光器的性能	140
5.1	半导体激光器的阈值特性	140
5.1.1	半导体激光器结构对其阈值的影响	140
5.1.2	半导体激光器的几何尺寸对阈值电流密度的影响	141
5.1.3	温度对阈值电流的影响	145
5.2	半导体激光器的效率	146
5.3	半导体激光器的远场特性	149
5.3.1	垂直于结平面的发散角 θ_{\perp}	150
5.3.2	平行于结平面方向上的发散角 θ_{\parallel}	152
5.3.3	波导结构对远场特性的影响	152
5.4	半导体激光器的模式特性	153
5.4.1	纵模模谱	154
5.4.2	影响纵模谱的因素	155
5.4.3	激光器的单纵模工作条件	157
5.4.4	“空间烧洞”效应对单模功率的限制	159
5.4.5	温度对模谱的影响	160
5.4.6	单纵模激光器	161
5.5	半导体激光器的光谱线宽	162
5.5.1	肖洛-汤斯 (Schawlow-Townes) 线宽 $\Delta\nu_{ST}$	162
5.5.2	半导体激光器的线宽	164
5.5.3	与输出功率无关的线宽	165
5.5.4	增益饱和与线宽	166
5.6	半导体激光器的瞬态特性	166
5.6.1	瞬态响应的物理模型	166
5.6.2	速率方程	167
5.6.3	延迟时间 t_d	169
5.6.4	对半导体激光器直接调制	169
5.6.5	张弛振荡	172
5.6.6	自持脉冲	175
5.7	半导体激光器的退化和失效	176
5.7.1	半导体激光器的工作方式	176
5.7.2	半导体激光器的退化	178
5.7.3	欧姆接触的退化	180

5.7.4 温度对半导体激光器退化的影响	180
思考与习题	181
参考文献	181
第 6 章 低维量子半导体材料	183
6.1 概述	183
6.2 量子阱的基本理论和特点	185
6.2.1 量子阱中的电子波函数	185
6.2.2 量子阱中电子的态密度	187
6.2.3 量子阱中的激子性质	189
6.2.4 应变量子阱	190
6.3 基于量子阱材料的半导体激光器	193
6.3.1 概述	193
6.3.2 单量子阱 (SQW) 半导体激光器	193
6.3.3 多量子阱 (MQW) 半导体激光器	194
6.4 量子线与量子点	196
思考与习题	199
参考文献	199
第 7 章 半导体光放大器 (SOA)	201
7.1 概述	201
7.2 半导体光放大器的性能要求	203
7.2.1 半导体光放大器的增益特性	204
7.2.2 半导体光放大器的噪声特性	209
7.2.3 半导体光放大器的耦合特性	211
7.3 半导体光放大器应用展望	211
7.3.1 半导体光放大器在光纤通信传输网上的应用	212
7.3.2 半导体光放大器在全光信号处理中的应用	213
思考与习题	216
参考文献	217
第 8 章 可见光半导体光发射器件	218
8.1 概述	218
8.2 红光半导体发射器件	221
8.2.1 红光半导体材料	221
8.2.2 红光半导体激光器	223
8.2.3 红光发光二极管	225
8.3 蓝光半导体光发射器件	227
8.3.1 概述	227
8.3.2 III-N 化合物半导体光发射材料	228
8.3.3 绿光半导体光发射材料	231

思考与习题	232
参考文献	233
第 9 章 半导体中的光吸收和光探测器	235
9.1 本征吸收	235
9.1.1 直接带隙跃迁引起的光吸收	236
9.1.2 间接带隙跃迁引起的光吸收	238
9.2 半导体中的其他光吸收	242
9.2.1 激子吸收	242
9.2.2 自由载流子吸收	246
9.2.3 杂质吸收	248
9.3 半导体光电探测器的材料和性能参数	249
9.3.1 常用的半导体光电探测器材料	249
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	253
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)	264
9.5.4 APD 的响应速度	264
9.6 基于量子阱材料的光探测器	265
9.6.1 量子阱雪崩倍增二极管	265
9.6.2 量子阱中远红外探测器	266
思考与习题	268
参考文献	268
第 10 章 半导体光电子器件集成	270
10.1 概述	270
10.2 制约光子集成和光电子集成发展的某些因素	273
10.3 某些推动光子集成发展的潜在科学技术	277
10.3.1 基于纳米光子学的器件集成	277
10.3.2 基于表面等离子体的光子集成	281
10.3.3 光子晶体	285
10.3.4 微环谐振腔	287
思考与习题	289
参考文献	290

绪 论

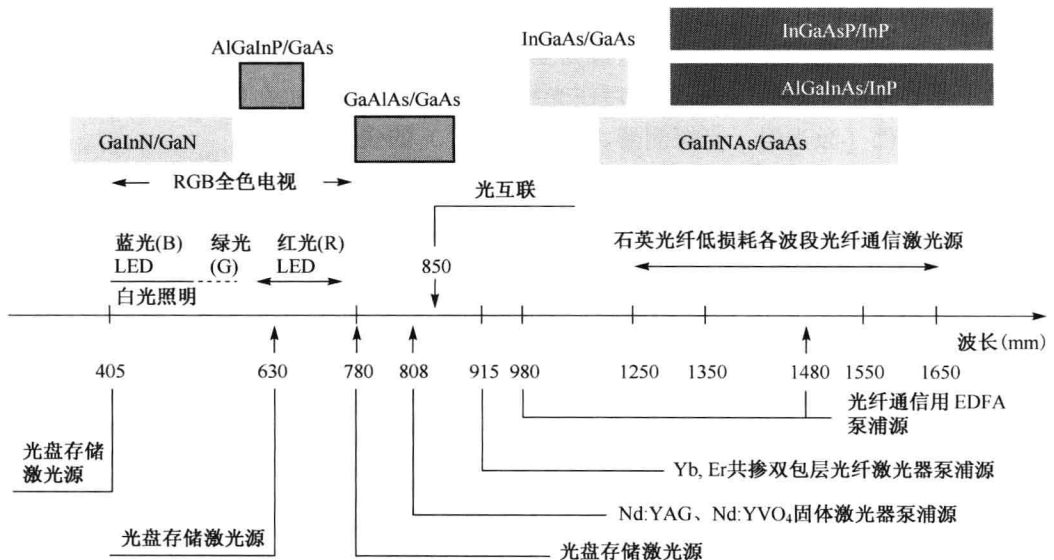
半导体光电子学是研究半导体中光子与电子相互作用、光能与电能相互转换的一门科学，涉及量子力学、固体物理、半导体物理等一些基础物理，也关联着半导体光电子材料及其相关器件。因此，半导体光电子学的内涵远超出半导体光学或半导体中的光学性质，即不是简单地研究将光作用到半导体上所产生的物理现象而忽略半导体中电子对光子的反作用和能动性。

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 年汤姆逊首先发现电子，1905 年爱因斯坦又提出光子学说，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，及其后在光纤通信需求的强烈拉动下对半导体光电子材料、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。1958 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 10^4A/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 10^3A/cm^2 又一次降到双异质结激光器的 10^2A/cm^2 量级。这一成就恰与同年康宁公司光纤损耗突破20dB/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，相继涌现出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。仍以为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和经济效益。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，进一步提高导带与带价的对称性，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，填补该波段高质量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) 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；探索目前某些基于其他介质材料的光电子器件功能用相关半导体光电子材料和器件取代的可能性；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，通过对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）实现器件功能的途径。

(5) 将现有半导体光电子器件的性能提高到极限。例如光发射器件的内量子效率提高到80%以上；半导体激光器的线宽提高因子减少至零而突破肖洛-唐斯极限线宽；半导体激光器直接调制带宽达到40GHz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以上，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EDFA为参照实现半导体光放大器的高饱和输出功率、低偏振相关增益或低噪声指数的半导体光放大器；低量子噪声和高增益-带宽积的雪崩光电二极管；等等。

半导体光电子学仍在不断快速发展之中，这是任何一部教材或专著难以概括和预期的。

第 1 章 半导体中光子-电子的互作用

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的。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，并统称为载流子）跃迁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，从而在半导体中出现电子-空穴对，这就是受激吸收，也是光电导、光探测器的工作原理，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。

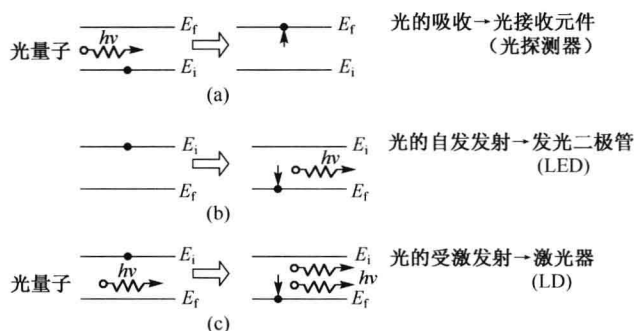


图 1.1-1 在半导体中与跃迁有关的三种光效应
(E_i 为跃迁初态能量, E_f 为跃迁终态能量)

(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。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，而是发生在非局部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 10^2cm^{-1} ，量子阱材料可达 10^3cm^{-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（或大的公有化运动），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。一旦由于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传导在材料中传播，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相互作用，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^[1]

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含有与晶格周期有关的波函数来描述的，其电子波函数的波矢量 \mathbf{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 \mathbf{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。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)。电子的跃迁发生在导带能量极小值和价带电子能量极大值之间，如果电子跃迁的初、终态对应着布里渊区的同一波矢 \mathbf{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 \mathbf{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 等大多数半导体中的垂直跃迁对应着布里渊区的中心点 (Γ)，此处的 $k=0$ 。而另一些垂直跃迁半导体（如IV-VI族化合物）则有多于一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。

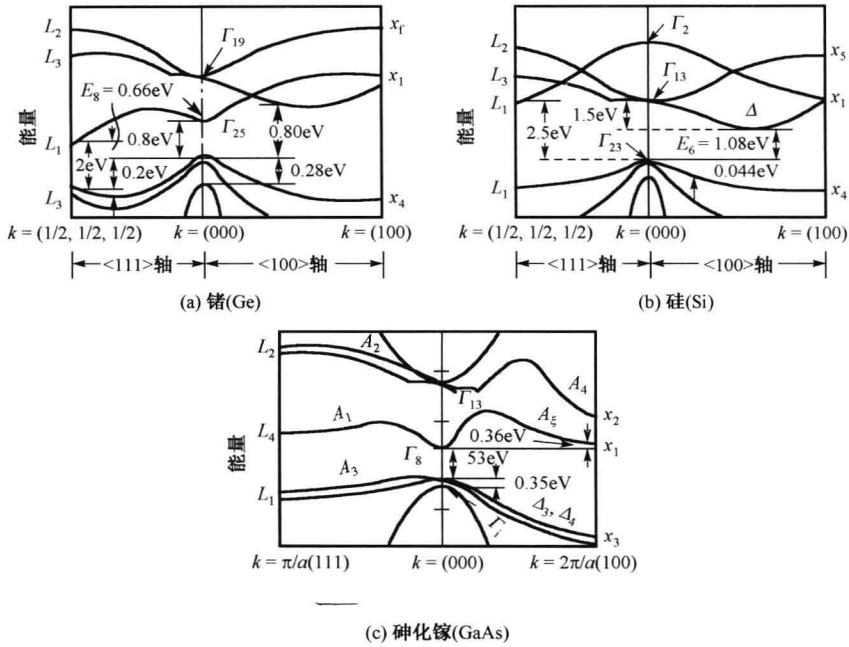


图 1.2-1 Ge, Si 和 GaAs 的能带图

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，量子系统总的动量或能量必须守恒，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 $\hbar k_i$ ，而终态的能量和动量分别为 E_f 和 $\hbar k_f$ ，进一步假设跃迁过程只涉及一个光子，则上述能量和动量守恒定律可表示为

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

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

式中， $\hbar\nu$ 为光子的能量， $\hbar k_p$ 为光子的动量。光子的波数是很小的，如波长为 $1\mu\text{m}$ 时， $k_p \approx 6 \times 10^4 \text{ cm}^{-1} \ll \pi/a$ (π/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，所有用做半导体光辐射器件 (LD 和 LED) 的有源区材料必须选用直接带隙跃迁半导体。

如果半导体中电子跃迁的初态和终态的 k 值不相等， $k_i \neq k_f$ ，这时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使得跃迁的初态和终态不为同一 k 值时仍能满足准动量守恒，这就是有声子参与的吸收与发射过程。由于多声子过程较单声子过程发生的几率小得多，故在此只考虑单声子参与的跃迁过程。如果令声子的波矢为 k_s ，这时的准动量守恒变为

$$\hbar(k_i - k_f + k_p \pm k_s) = 0 \quad (1.2-3)$$

如果略去光子的动量，则有

$$\hbar(k_i - k_f \pm k_s) = 0 \quad (1.2-4)$$

与此过程相对应的能量守恒为

$$(E_i - E_f - hv \pm \hbar\omega_s) = 0 \quad (1.2-5)$$

式中， $\hbar\omega_s$ 表示声子的能量，实质是晶格热振动能量的量子化形成的微观粒子。符号“±”有双重意义，若由吸收光子所激发的电子由价带顶到导带底的跃迁（受激吸收），则式中的正号代表吸收声子而负号代表发射声子，如图 1.2-2(a)所示。若跃迁过程是导带底的电子跃迁到价带顶并发射光子，则上式中的正号表示发射声子，负号表示吸收声子，如图 1.2-2(b)所示。与前面的直接带隙跃迁相比，这种有声子参加才满足准动量守恒的跃迁被称为间接带隙跃迁或间接跃迁，这种有四种量子参与的跃迁过程属二级微扰过程，其跃迁几率比前面所述的一级微扰过程小得多。因此，不能用间接带隙跃迁半导体来作半导体激光器或发光二极管的有源材料。无疑，对理想的半导体光电探测器，其吸收区也宜用直接带隙跃迁材料。但对于声子 $\hbar\omega_s$ 所参与的跃迁过程，只要入射光子的能量 $\hbar\omega > E_g$ (E_g 为半导体材料的禁带宽度或带隙)，那么价带内距价带顶能量范围为 $(-\hbar(\omega \pm \omega_s) - E_g)$ 的电子以及导带内距导带底能量范围为 $(\hbar(\omega + \omega_s) - E_g)$ 的电子空态都能参与跃迁，这就使参与跃迁的状态范围扩大，这在一定程度上弥补了间接带隙跃迁几率小的因素，而使总的跃迁几率并不太小。基于这点，目前硅是在短波段 ($0.6 \sim 1.0 \mu\text{m}$)、锗是在长波段 ($1.0 \sim 1.7 \mu\text{m}$) 常用的光探测器的光吸收材料。

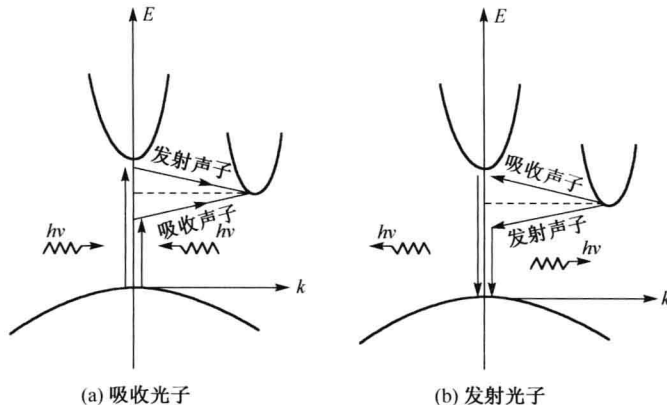


图 1.2-2 间接带隙跃迁

1.2.2 电子在能带之间跃迁的几率^[2, 3]

为了更深刻地理解电子在半导体能带之间跃迁的特点，有必要了解电子在上述两种跃迁类型中产生跃迁的几率，它是决定电子在半导体能带之间产生受激跃迁和自发辐射跃迁速率