



半导体激光器设计理论 I

半导体激光器 速率方程理论 (上册)

郭长志 编著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

半导体激光器设计理论 I

半导体激光器 速率方程理论

(上 册)

郭长志 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

速率方程理论是从微观唯象观点,以唯象参数为工具,以粒子数守恒为依据的速率方程为分析手段的半导体激光器件物理理论,从全局上揭示半导体激光器的激射阈值相变、模式的竞争、谱系结构等静态行为和激射延迟、过冲、振荡过渡等瞬态行为,大小信号调制的方式方法及其速率、动态频谱结构、动态单模化、光模注入锁定、激光的双稳态、自脉动、分叉、混沌、量子噪声和谱线展宽,载流子在量子阱、量子线、量子点等量子低维结构中的捕获和逃逸等动力学行为及其物理机制。其任务是挖掘激光器件的潜能,发现和提出可能的器件或新性能新应用,提出优化器件现有性能等的器件设计方案。

全书论述既重基础又涉前沿,既重物理概念又重推导编程演算,适合有关专业的大学高年级学生、研究生、研究人员和教师作为教材、参考书或自修读物。

图书在版编目(CIP)数据

半导体激光器速率方程理论.上册/郭长志编著. —北京:科学出版社,2016.3
(半导体激光器设计理论.第1辑)

ISBN 978-7-03-047812-2

I. ①半… II. ①郭… III. ①半导体激光器—速率—方程 IV. ①TN248.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第056491号

责任编辑:钱 俊 周 涵/责任校对:邹慧卿

责任印制:肖 兴/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年4月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016年4月第一次印刷 印张:24 1/2

字数:484 000

定价:148.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

总 序

任何激光器都由三个主要部分组成：一是增益材料，二是波导光腔，三是激发机制。半导体激光器的增益材料主要是直接带隙半导体，包括高折射率的体半导体和低维半导体（量子阱、量子线、量子点），或低折射率的掺饵（Er） SiO_2 、掺饵 Si_3N_4 等；其波导光腔可由介电波导或等离子体波导构成，其激发机制可为光注入、pn 结注入或量子隧穿注入等。

1948 年提出半导体激光器的设想，1961 年在理论上肯定了在半导体中实现粒子数反转的可能性，并于 1962 年在发光二极管中偶然观测到激光发射现象之后，制成同质结激光器。从此不断为其提高工作寿命、降低阈值（首先是为了实现室温连续工作）、控制激光模式、提高出光功率、提高调制速率、提高工作温度、拓宽激光波长范围、微型化和集成化以及某些特殊用途等的目标而迅速发展。

在半导体激光器的发展过程中，理论和实验之间，或先或后、互相促进、共同得到重大发展。其中富有活力的设计理论，往往因其开创性和前瞻性，在思想上起着开路先锋的作用。半导体激光器的设计理论大体可分为：工艺理论、速率方程理论、模式理论和量子理论四个方面。

（1）工艺理论在继承传统半导体工艺理论，例如，熔体拉晶、杂质扩散、离子注入、掩膜刻蚀、熔焊烧结等的基础上，着重发展了液相外延、分子束外延、金属有机气相沉积外延生长和自组织生长等化学热力学和晶体生长动力学的设计理论。其任务是根据半导体激光器件的结构和性能要求，设计出合理可行的制作工艺方法、条件和流程。

（2）速率方程理论是从微观唯象观点，以唯象参数为工具，以粒子数守恒为依据的速率方程为分析手段的半导体激光器件物理理论，从全局上揭示了半导体激光器的激射阈值相变、多模之间的模式竞争、模式谱系结构等静态行为，延迟、过冲、振荡过渡等瞬态行为，调制方式方法及其速率、动态频谱结构、动态单模化、光模注入锁定、激光的双稳态、自脉动、分叉、混沌、量子噪声和谱线展宽，载流子在量子阱、量子线、量子点等低维结构中的捕获和逃逸等动力学行为及其物理机制。所涉及的有关唯象参数的数值大小则由实验估测，而其物理机制、内涵、导出和理论估算等，则由下述宏观和微观理论分别解决和提供。其任务是挖掘器件的潜能，发现和提出可能的新器件或新性能、提出优化器件现有性能等的器件设计方案。

（3）模式理论是研究激光在波导光腔中的传播规律，各种波导结构中可能存在的各种光模类型和模式结构特点，揭示激光模式结构与波导结构的内在联系，从而

发现控制波导结构和模式结构的途径。由于光在传播过程中主要突出其波动性,因而量子场论和经典场论导出基本上相同的结果,因此完全可以从麦克斯韦方程组出发进行分析。其任务是找出器件性能所需的最佳激光模式结构和设计出其合理的波导光腔结构方案。

(4) 量子理论是研究半导体激光器中体半导体、量子阱、量子线、量子点等增益介质的电子能谱结构及其电子与辐射光场的相互作用,包括光的产生、吸收、放大和散射等涉及不同能带之间、能带以内不同子带或各种晶格缺陷和杂质能级之间的光跃迁和非光跃迁、带内散射和弛豫等决定半导体激光器涉及光电性能的重要量子行为。其处理所涉及的电子系统与光子系统相互作用的理论基础或出发点,有经典理论、半经典理论、全量子理论三个层次。经典理论是将电子的运动服从牛顿力学,光波及其与电子的相互作用服从经典场论,即麦克斯韦方程组。这对众多的电子与光波之间弱相互作用的折射率现象和自发发射因子现象都可得出相当成功的理论结果。半经典理论是将电子的运动服从量子力学,但对光波采用经典场论近似,即近似服从麦克斯韦方程组。这在受激辐射和散射问题都获得非常成功,但无法直接处理自发辐射问题。全量子理论是将电子和光子的运动皆统一服从量子力学,即将电磁辐射场量子化,这样的量子场论与量子电动力学或量子电子学或光子学的差别只在一般可忽略相对论效应。至于光和非光跃迁所涉的增益介质中的电子能级则由半导体能带的量子理论得出。因此,现行的半导体激光器发光过程的理论大多是以半导体能带结构理论和半经典光跃迁的量子理论为基础。其任务是研究半导体激光材料的光增益和激光的量子效率及其光增益谱结构,如增益谱的峰值增益及其相应的峰值能量和增益谱宽与半导体能带结构的关系,以及影响增益的可能因素,提出拓宽激光波段和提高激光增益的新材料及其受到增益介质的尺寸和维数的影响。这对半导体激光器的激射阈值、激光功率、调制速率、器件结构和激光波段等都有根本性的意义。

这套《半导体激光器设计理论》丛书或系列书是作者 20 世纪六七十年代迄今的几十年间,在北京大学物理系、国内有关院校和研究所以及加拿大多伦多大学和美国亚利桑那州立大学的研究生和研究人員、部分教师 and 大学高年级本科生讲授这方面由《半导体激光器工艺理论》《半导体激光器速率方程理论》《半导体激光器激光波导模式理论》和《半导体激光器能带结构和光增益的量子理论》的四个学期研究生系列课程的自编讲义,并在教学和科研实践过程中不断修改、更新、补充的后三部分整理成相对独立但密切联系的三卷集组成。第 1 卷 (LT1)《半导体激光器速率方程理论》分三章,先在第 1 章中详细讨论半导体异质结构的注入(激发)及其电流的机制、能带图表述及其绘制,并着重探讨与新近垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 的发展密切相关的多层同型异质结理论。同时也为速率方程理论的建立提供坚实的物理和理论背景,并打好编程计算的基础。第 2 章中建立光子和电子相

互作用所应服从的微观唯象粒子数速率方程组, 并讨论其静态解, 即电子和光子相互作用动平衡时的静态现象。第 3 章则深入探讨半导体激光器的瞬态行为、小信号和大信号简谐调制和脉码调制的行为、自脉动忽然分岔等不稳定现象和双稳态现象、随机过程等动力学行为及其设计应用。

第 II 卷 (LT2)《半导体激光器激光波导模式理论》分上下册各分两章。上册在开始的引言中总结了光波导腔在激光形成中的作用之后, 第 1 章从经典场论和经典电子论的观点系统分析光与半导体和金属介质相互作用产生的介质光学性质及其形成的各种光波导和相应的各种模式。第 2 章深入探讨作为波导理论“基元”的突变三层平板波导腔内外模式的空间结构和频谱结构。在此基础上进而推广讨论多层平板、圆柱、圆盘和矩形直柱等突变波导及其模式结构, 并建立三层平板波导和微盘自发发射因子的经典场论。下册在第 3 章中详细分析由于注入非平衡载流子和非平面外延晶体层形成的非自建和自建缓变波导及其腔内外的模式结构。至此主要讨论的都是各种横截面直柱波导的横模 (x 方向) 和侧模 (y 方向) 的形成和控制问题。第 4 章集中系统分析光波近平行光腔层面的端面发射激光器和光波近垂直光腔层面的表面发射直柱激光器纵模 (z 方向) 的形成和控制问题。

第 III 卷 (LT3)《半导体激光器能带结构和光增益的量子理论》系统论述激光产生和控制过程的量子性质及其量子理论, 共分三章。第 1 章系统论述半导体由单电子近似算出的电子能带结构及其图谱, 即电子能量随电子波矢 k 的变化, 特别是比较成功和比较精确计算 k 空间极值点附近能带结构的 $k \cdot p$ 微扰论、处理应变对能带结构的影响的皮库斯-毕耳哈密顿量、估算异质结界面能带阶量的模型固体理论、计算量子阱中电子态和子带结构的包络函数理论和有效质量方程。第 2 章深入论述半导体中光跃迁过程的半经典理论及其费米黄金定则, 并在此基础上建立半导体及其量子阱光增益的半经典理论。第 3 章系统论述半导体带内的子带间光跃迁的半经典理论和量子光学即辐射场的全量子理论一些基本概念的概述作为本分卷的结束。

本系列课程的开设是在半导体激光器的诞生和发展的初期, 为了助力我国迎头赶上, 争取与世界同步开拓这新领域而努力开展研究和培养提高这方面的人才, 因而教学对象不只是本校学生, 而是面对各个院校开始从事这新领域的学习和研究的朝气蓬勃负有重任的人员, 他们和她们多么渴望高效迅速获得这新领域的核心知识、技能和设备。

郭长志

2014 年 11 月 16 日于北京

目 录

第 1 章 异质结构的能带图及其电流机制	1
引论	1
1.1 突变异质结的耗尽区近似理论	10
1.1.1 基本模型和规律	10
1.1.2 费米能级	19
1.1.3 异型异质结准费米能级随空间位置的变化和电流密度	30
1.1.4 能带边的弯曲和能带图的绘制	38
1.2 缓变和突变同型异质结	59
1.2.1 缓变同型异质结的理论	60
1.2.2 泊松方程的数值解法——弛豫法	67
1.2.3 突变同型双异质结的精确计算	78
1.2.4 关于欧哈姆-米纳斯理论的讨论	80
1.3 突变同型异质结的库莫理论	92
1.3.1 n - N 同型异质结	92
1.3.2 对有电流情况的推广	102
1.4 同型异质结电流	114
1.4.1 热电子发射模型	117
1.4.2 热发射理论推广到半导体情况	128
1.4.3 扩散-漂移理论对同型异质结的推广	133
1.4.4 数值结果和讨论	140
第 2 章 速率方程组的建立及其静态行为	148
2.1 微观唯象理论的基本方程	148
2.1.1 载流子的连续方程和双极性扩散方程	148
2.1.2 电子和光子的耦合速率方程组	152
2.1.3 光限制因子的全量子理论	159
2.2 单模半导体激光器的静态行为和阈值条件	172
2.2.1 归一化表述	173
2.2.2 阈值行为和阈值电流密度的定义	177
2.3 半导体激光器在光模注入下的静态行为	201
2.3.1 光模注入的作用——有电流注入和光模注入的速率方程组	201

2.3.2	半导体激光器在电流和单模光子流注入下的静态行为	205
2.3.3	数值结果和讨论	213
2.4	半导体激光器的多模行为	231
2.4.1	从光波在光腔中传播谐振过程到半导体激光器的激射条件	232
2.4.2	多模行为的速率方程理论	235
2.4.3	总模描述 —— 总模增益与总模速率方程组	258
2.4.4	单模化速率方程组	266
2.4.5	阈值的技术定义和自发发射因子的测定	268
第 3 章	半导体激光器的动力学行为	283
	概述	283
3.1	结型器件延迟过程的理论	287
3.1.1	注入延迟	288
3.1.2	半导体激光器的激射延迟	303
3.1.3	数字 (脉码) 信号及其图形效应	311
3.2	单模半导体激光器的激光过冲及其抑制	331
3.2.1	激光过冲方程的建立	331
3.2.2	激光过冲方程的解析解	333
3.2.3	激光过冲的抑制	336
3.2.4	单模半导体激光器光模阶跃注入的瞬态过程	339
3.3	张弛振荡过程	339
3.3.1	定性理论	339
3.3.2	多模半导体激光器的瞬态过程	346
3.4	多模半导体激光器中光注入的锁模作用	349
3.4.1	注入光锁模现象及其过程的基本方程	352
3.4.2	增益谱的作用及其模型的改进	361
3.4.3	分模自发发射因子的波谱模型	376
3.4.4	超速超短相位锁模激光脉冲	379

第 1 章 异质结构的能带图及其电流机制

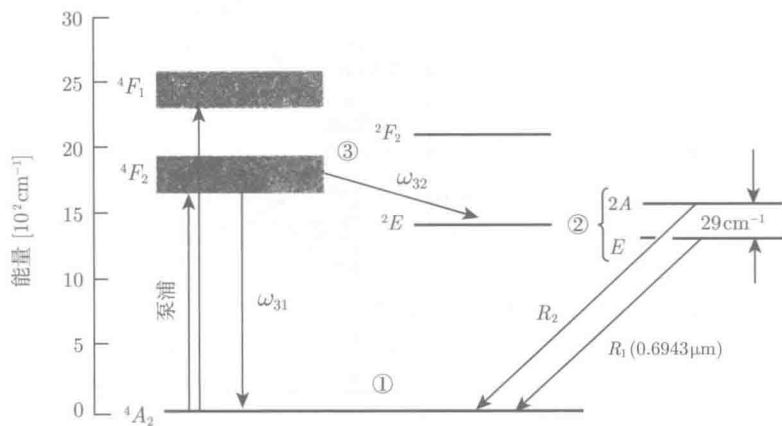
引 论

半导体激光器是以半导体为激光材料的一种激光器,是紧接 1960 年制成的固体(红宝石)激光器(图 1.1-1A)和 1961 年制成的气体(氦氖)激光器(图 1.1-1B)之后,在 1962 年偶然在 GaAs 发光二极管发现并发展起来的(图 1.1-1C,D),与前两种激光器的差别主要有三个方面。

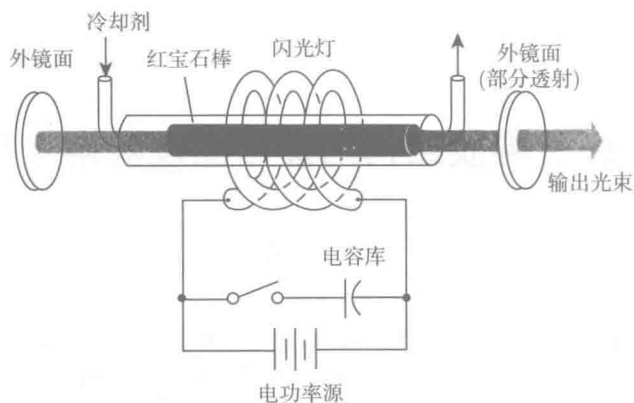
(1) 前两者依靠分立能级间的辐射跃迁因而相干性很好,谱线很窄;半导体激光器依靠的是能带间的辐射跃迁,因而相干性差些,谱线宽些。

(2) 前两者分别主要依靠闪光灯照射间接光激发和放电管内气体分子碰撞激发。半导体激光器的激发主要依靠 p-n 结电流注入或光流直接注入或量子隧穿注入。

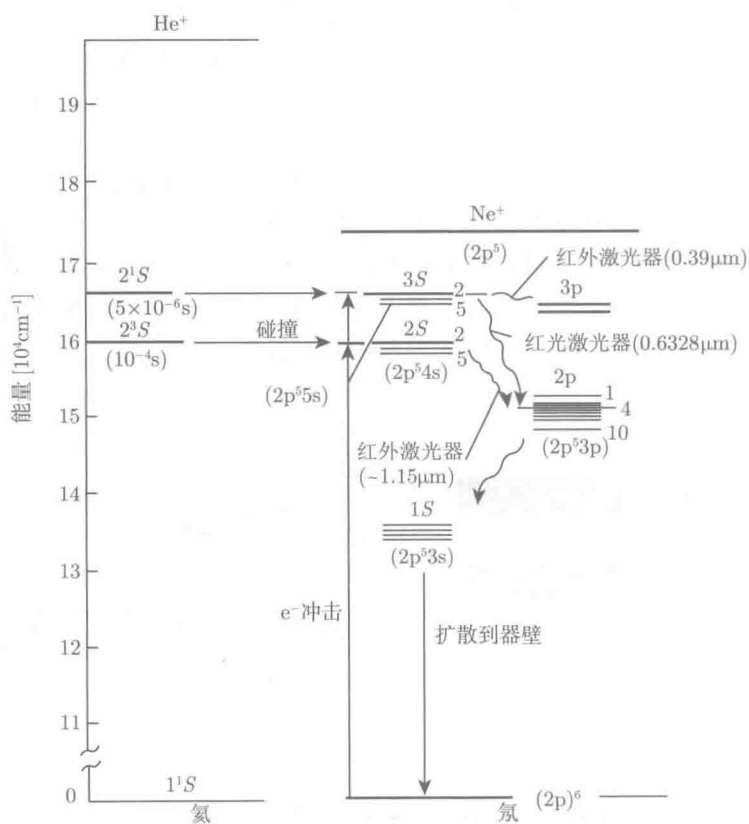
(3) 前两者的器件单元体积较大,甚至非常庞大,但可有很大的脉冲功率,可制成激光炮发死光;半导体激光器体积微小,响应速度快并可与半导体电子器件集成,但功率不很大,最宜用于光纤通信中作为最便于高速调制载波和信号光发射器,而得到飞速发展,最近正率先向量子计算和量子通信等充满希望和挑战的新领域开拓。这些差别主要源自各自所用激光材料的不同特性。



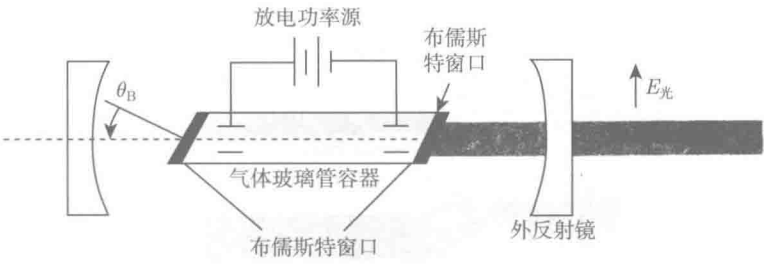
(a) 红宝石激光器在强闪光灯照射激发下的分立能跃迁



(b) 红宝石激光器的器件结构装置

图 1.1-1A 红宝石激光器^[1,1]

(a) 氦氖激光器的碰撞激发和分立能级辐射跃迁



(b) 氦氖激光器的器件结构和装置

图 1.1-1B 氦氖气体激光器^[1.1]

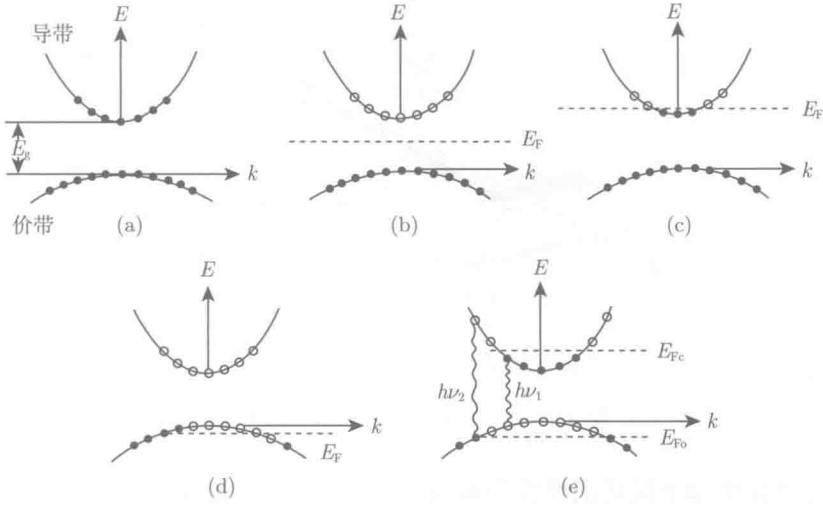
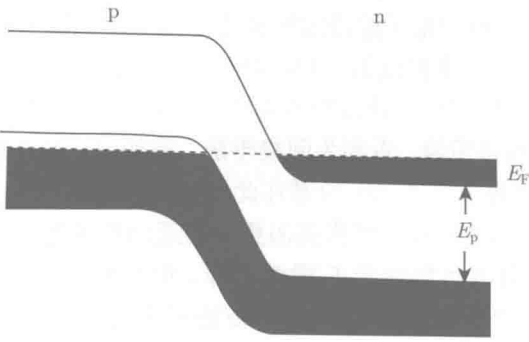
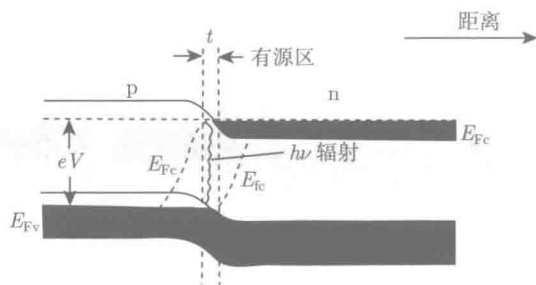


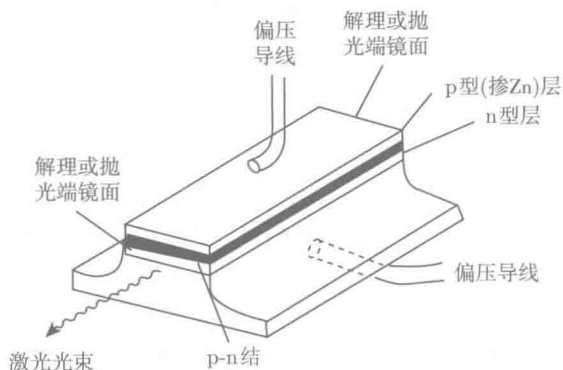
图 1.1-1C 半导体能带之间的竖直辐射跃迁^[1.1]



(a) 平衡 p-n 结无电流



(b) 加偏压 p-n 结产生电流



(c) 砷化镓同质结激光器的器件结构

图 1.1-1D 最初的半导体激光器^[1.1]

半导体是由原子按周期性排列组成的晶体, 因原子的内层电子受周期场作用分裂成被电子占满的窄能带, 决定半导体性质及其器件性质的主要是由原子最外层价电子占满的最高一个能带称为价带和其上许多空能带中最低的一个能带称为导带的结构所决定, 并可由电子能带结构和能带图描述。图 1.1-1E(a), (b) 分别是 GaAs 晶体和辐射跃迁几率极低的 AlAs 晶体的电子能带结构 $E(k)$ 。导带电子主要聚集在最低能谷 (极小值), 价带空穴主要聚集在最高能峰 (极大值), 这两者出现在同一 k 处称为直接带隙, 否则为间接带隙。例如, GaAs 导带在布里渊区中心 $k=0$ 处有单独一个最低的 Γ 能谷, 价带在此同一波矢 ($k=0$) 处有单独一个 Γ 最高能峰, 因而是可实现辐射跃迁几率极高的竖直跃迁的直接带隙半导体。反之, AlAs 价带虽然也在 $k=0$ 处有单独一个 Γ 最高能峰, 但其导带在布里渊区边界 ($k \neq 0$) 以内附近有 6 个 X 最低能谷, 与 Si 相似, Ge 在布里渊区边界上有 8 个 L 能谷 [见图 1.1-1E(d)], 因而都是只能作辐射跃迁几率极低的非竖直跃迁的间接带隙半导体。GaAs 和 AlAs 的合金同构晶体 $(\text{AlAs})_x(\text{GaAs})_{1-x} = \text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 在约为 $x \leq 0.44$ 范围内为直接带隙, 其余为间接带隙。

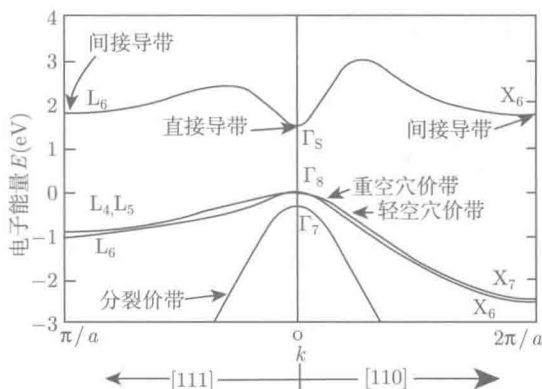


图 1.1-1E(a) 具有闪锌矿晶体结构的砷化镓 (GaAs) 能带结构

Γ 、X 和 L 是其极值 (极大值或极小值) 在波矢空间的能量位置^[1,2]

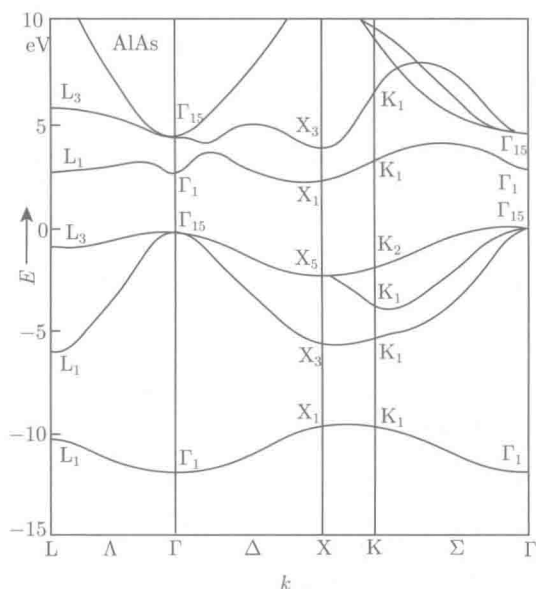


图 1.1-1E(b) 具有闪锌矿 (zinc blende) 晶体结构的砷化铝 (AlAs) 能带结构^[1,3]

能带是由电子可能存在的具有一定能量的量子态 (简称能态或能级) 所组成, 在绝对零度以上一定温度 $T[K]$ 时, 电子在各个能带的占据情况多少都可能有些变化, 电子是费米子, 其占据规律服从费米-狄拉克统计分布函数 $f_{FD}(T, E_k)$ 。例如, 在室温 $T = 300K$, 价带中有一部分电子获得足够越过带隙 (禁带宽度) E_g 的动能而得以激发到导带能态呈现 $f_{FD}(T, E_k)$ 所规定的分布, 导致导带出现电子, 同时价带出现空穴。如果半导体掺有提供导带电子的施主杂质或提供价带空穴的受主杂质, 则

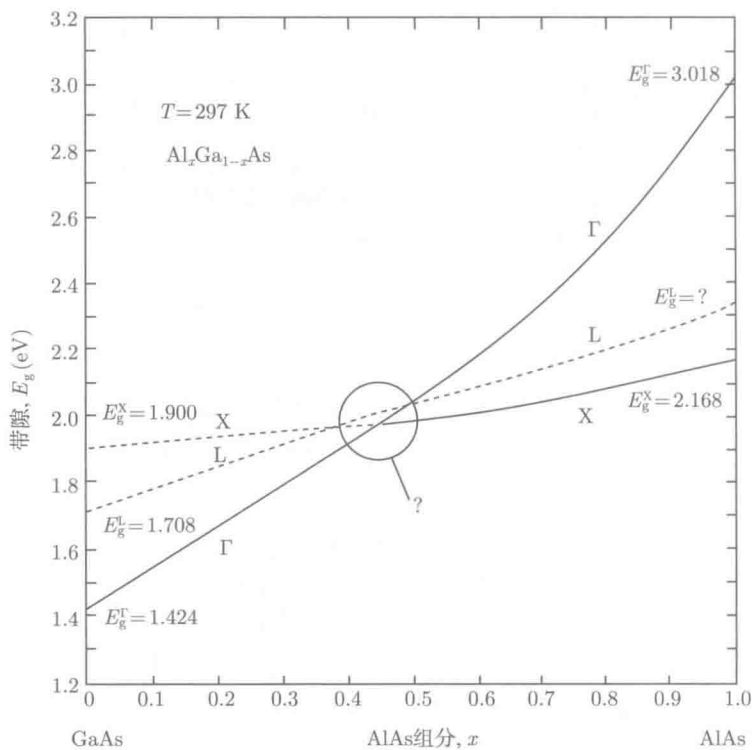


图 1.1-1E(c) 铝镓砷 $[(\text{AlAs})_x(\text{GaAs})_{1-x} = \text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}]$ 的极值 Γ , X, L 随克分子比 x 的变化^[1,2]

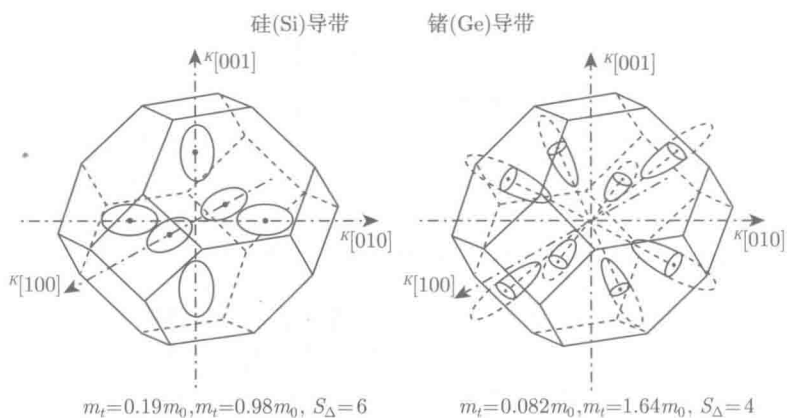


图 1.1-1E(d) 半导体硅和锗导带电子的等能面^[1,4]

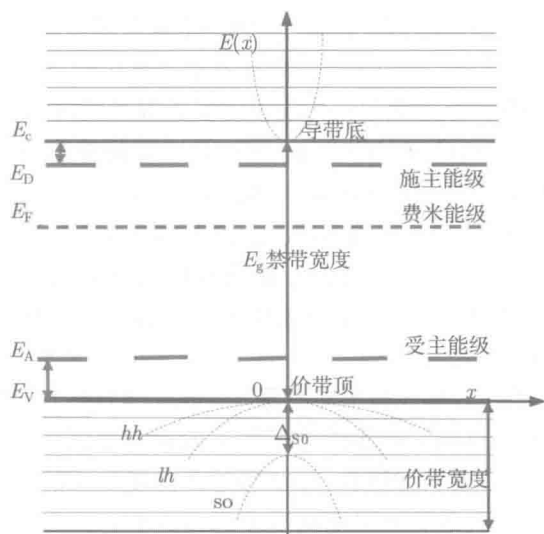


图 1.1-1E(e) 半导体的能带图

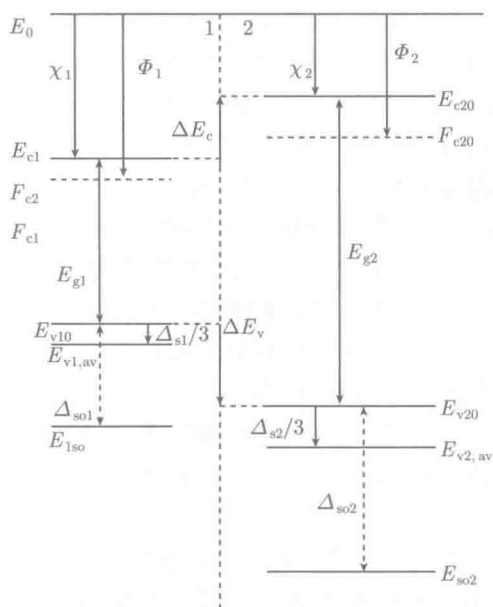


图 1.1-1E(f) n-N 异质结的三种公共能量坐标系

在导带和价带之间的禁带宽度 (简称带隙) 中将可能出现相应的施主能级或受主能级, 如图 1.1-1E(e) 中的半导体能带图 $E(x)$ 所示。图中还比较了能带图 $E(x)$ 与

能带结构图 $E(k)$ 的异同, 能带图 $E(x)$ 中的**导带底**是能带结构图中的导带最低能谷, 其他能谷隐含在导带内一般不画出, 如注入不太高可按非能级简并的能带处理, 否则必须计及。价带的带顶是能带结构图中电子的最高能峰 (相当于空穴的最低能谷), 并同时具有重空穴和轻空穴的能态, 因而是**二重简并能级**, 而且在其下 ΔE_{so} 处是能带结构图中的自旋分裂能带的最高峰, 这里及其以下每个能级都是**三重简并能级**。因此, 即使在小注入时, 仍须考虑其二重能级简并性, 除非在粗略的计算中, 认为重空穴的有效质量较轻空穴大得多, 而将其作为重空穴的非能级简并带处理。在器件分析中采用能带图是为了便于表述能带, 特别是能带边和准费米能级随不同尺寸空间位置的变化。

另一方面, 即使将作为激光材料即**有源 (active) 材料**的半导体制成激光器, 这些来自价带和杂质能级热激发产生的电子和空穴在室温下作热平衡分布只能发出波长很长的热平衡辐射, 要其发激光, 还必须注入激发足量的非平衡载流子才能够提供所需的光增益。注入激发非平衡载流子的方式有光注入、结型注入、电场注入、量子隧穿注入等, 但最先得以实现室温连续工作的半导体激光器, 并且迄今仍为主流的是**异型异质结注入**, 例如掺有受主杂质带隙较窄的 p 型半导体材料与掺有施主杂质带隙较宽的 N 型半导体材料接触在一起形成的异质 p-N 结在正向偏压下向有源区注入激发非平衡载流子, 直至达到激射阈值发出激光。

异质结的科学技术^[1.4~1.6]是现代半导体光电子学器件的新基础^[1.2, 1.7~1.13], 它在半导体激光器领域中的应用是一个突破。异质结的理论要点有如下几方面

(1) 假设每个半导体在一个公共能量坐标系中都有各自的能量位置, 作为能量标度的公共零点有如图 1.1-1E(f) 所示的三种:

① **电子亲和势 χ** 是半导体**导带底**(E_c) 到该能量零点 (E_0) 的能量距离, 或将在导带底 (E_c) 处的一个电子移到无穷远处所做的功值的零点为公共零点 (E_0)。

② **电子脱出功 ϕ** 是半导体**导带费米能级**(F_c) 到该能量零点 (E_0) 的能量距离, 或将在费米能级 (F_c) 处的一个电子移到能量零点 (E_0) 的能量值。这个概念源自费米能级在半占满导带内费米面上的金属。

③ **价带平均能量 $E_{v,av}$** 是半导体价带的轻、重空穴带和自旋-轨道分裂带的全部电子的平均能量, 并以所有半导体中的这一能量 ($E_{v,av}$) 的零点作为所有半导体的公共能量零点。

安德森 (Anderson) 的异质结理论中的能量是以电子亲和势 χ 的零点作为公共零点的, 但这个量实际上难以具体确定, 而电子脱出功在半导体中不是常数, 因为其费米能级是随掺杂情况而变的。现在用**模型固体理论 (model solid theory)**^[1.12]可以确定**价带平均能量 $E_{v,av}$** , 虽然这种理论还必须不断与实验结果比较和互相校准。这里将量子本质的带阶作为微观唯象参数处理。

(2) 由同质结的理论和方法推广到异质结情况, 采用相同的电子唯象方程, 如

电荷守恒和连续方程、泊松方程、扩散方程、费米分布和准费米分布、耗尽层假设、准中性区假设、准平衡假设、热电子发射、漂移、扩散、量子隧穿等电子输运机制等,但计及掺杂半导体异质结两边(例如左边 n 型,右边 N 型)材料的带隙 E_{g1} , E_{g2} , 介电常数 ε_1 , ε_2 , 准费米能级 F_{c1} , F_{c2} , F_{v1} , F_{v2} , 电子亲和势 χ_1 , χ_2 等的差别。

(3) 从之得出许多与同质结相似的概念和结果,但由于考虑到异质结的结构特点,因而也得出不同于同质结的许多特性,如带阶 (band offset) ΔE_c , ΔE_v 及其引起的带边尖峰和低谷效应、I、II、III 类异质结 [图 1.1-1E(g)]、量子阱和更低维结构、超注入 (superinjection) 等。

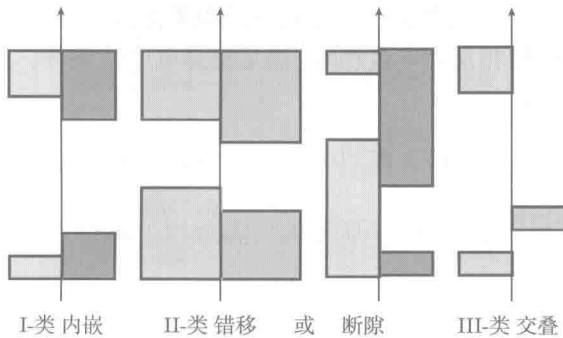


图 1.1-1E(g) 三类异质结的能带连接方式

异质结是现代电子和光电子技术的关键结构,半导体激光器迄今在很大程度上是依靠异质结构而迅速得到不断发展的。因为异质结可以不必像同质结那样必须作单边高掺杂才能实现单边注入,比同质结提高了将电子和光子一起限制在一定的有源区内的作用,从而极大地降低了激射的阈值,实现了室温激射和更低的阈值。

异质结的研究,早期重点在异型 (p-n 或 n-p) 异质结和欧姆结 (无整流结),在某些晶体管 (如 HEMT 或 MODFET) 中也涉及 n-n 结^[1-8]。近来垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 的发展,当今正受到其中 P-型掺杂的分布布拉格反射体 (DBR) 的串联电阻太大使器件的总电压太高,限制了其应用和发展,为此需要研究涉及同型异质结的下述问题:

① 为何电流经过涉及多个 p-p 结的 P-DBR 比经过涉及多个 n-n 结的 N-DBR 时电阻大得多?

② 有何办法使 P-DBR 电阻降低到 N-DBR 的量级?例如曾经提出的用缓变结或数字等价 (分层逼近)等方法是否即可实现?原因何在?

③ 用量子隧穿结代替 P-n 结注入,以避免电流经过 P-DBR 的方法是否有效?如何进行优化设计?

这些课题都涉及同型异质结输运过程,同时低维异质量子微结构的发展也提出