

半导体激光器和 异质结发光 二极管

[美]亨利 克雷歇尔 J. K. 巴特勒 著

黄史坚 译 郭长志 校

国防工业出版社

半导体激光器和 异质结发光二极管

〔美〕 亨利 克雷歇尔 著
J. K. 巴特勒

黄史坚 译
郭长志 校

国防工业出版社

内 容 简 介

本书系统地叙述半导体激光器和发光二极管的工作原理、制造工艺和应用,对器件的工作模式、瞬态效应和可靠性也做了比较详尽的讲解。开卷几章还讲述了有关固体物理概念和电磁场理论,使本书成为完整的专著。

本书可供从事半导体激光技术和应用的高等院校教师、学生、科研和生产技术人员阅读和参考。

Semiconductor Lasers and Heterojunction LEDs

Henry Kressel

J. K. Butler

Academic Press 1977

*

半导体激光器和异质结发光二极管

亨利 克雷歇尔 著

〔美〕 J. K. 巴特勒

袁史康 译

郭长志 校

责任编辑 刘树兰

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张 20¹/₂ 525 千字

1983年1月第一版 1983年1月第一次印刷 印数: 0,001—3,800册

统一书号: 15034·2427 定价: 2.50元

译 者 序

半导体激光器自从1962年诞生并经过了七、八年的建立基础理论和工艺探索阶段之后,于1969~1970年间制成室温连续工作条形双异质结构激光器,在结构和工艺上取得重大突破,从而得到全面的飞速发展和应用。迄今,不管在工艺方面和器件物理方面,都积累了相当丰富的经验和知识。本书正是以异质结结构为技术背景,也是最近美国出版的关于半导体激光器方面的专著。作者亨利·克雷歇尔是实现上述突破的最主要人物之一。由于他的发明与创造,曾担任过IEEE量子电子学委员会主席和IEEE量子电子学和应用学会会长,现任美国无线电公司材料和工艺研究室领导。他与本书另一作者J.K.巴特勒在这一领域中都很活跃,积极参与实践。

本书特点是内容比较广泛,涉及到异质结激光器和发光二极管。有关工艺技术介绍得比较具体,数据资料尤为丰富,考虑问题的线索比较清楚。器件物理中模式(第四~七章)和瞬态效应(第十七章)的叙述也比较详尽。同时,作者还为读者设置了阅读本书必须具备的基础理论知识,使本书成为一本系统的读物。因此,本书对我国半导体激光技术的科研、生产和教学都有较高的参考价值。

原书中个别印刷差错、概念不明确和错误之处,译文尽量作了纠正,但恐尚有遗漏和不足之处,希读者指正。

序

经过十多年的研究，半导体激光器已经发展成为光电系统的重要器件。也许，这种器件最重要、锋芒毕露的应用场合莫过于光纤通信领域了。激光二极管、发光二极管和光导纤维三者并驾齐驱的进展，终将使人们有可能研制成信道成本很低而竞争能力却很强的光纤通信系统。

本书可以作为半导体激光器和异质结发光二极管这一课题的导论。发光二极管是一种高亮度器件，它通常不用于以可直接观察作为重要要求的系统。在这本书中，虽然不能对这类器件做到包罗万象的讲解，但也已选择了它的理论、材料生长、制造工艺和应用等方面进行叙述。我们认为，这几个方面对实用器件来说，是最重要的。

上述这些方面，有的已经达到相当成熟的程度了；而有的，例如外延工艺，则正在急速发展之中。书中，我们尽可能强调叙述器件的基本原理，以便为读者了解器件的发展趋势时提供一个有用的轮廓。

首先，开卷几章便叙述有关的基本固体物理和电磁场理论。这些引导性的知识目的是使本书能够完全自成体系。

目 录

引言	1
1.1 技术背景	1
1.2 本书梗概	5
第一章 简要固体物理概念	8
1.1 晶格结构	8
1.2 价键和能带结构	9
1.3 掺杂剂	15
1.4 电子分布和能态密度	21
1.5 电子-空穴对的形成和复合	27
1.6 少数载流子扩散	35
1.7 其它辐射复合过程	36
1.8 非辐射复合过程	46
第二章 P-n 结和异质结	52
2.1 电流-电压特性	52
2.2 P-n 结电容	61
2.3 异质结	63
2.4 自发发射中的光强-电流关系	73
2.5 受载流子寿命限制的二极管频率响应	76
第三章 受激发射和增益	80
3.1 引言	80
3.2 二能级原子系统的光增益	85
3.3 直接带隙半导体中的光增益	88
3.4 法布里-珀罗谐振腔和阈值条件	102
3.5 激光跃迁	108
第四章 有关电磁场理论的概念	124
4.1 引言	124

VI

4.2	麦克斯韦方程组	126
4.3	复数介电常数	127
4.4	边界条件	129
4.5	玻印廷定理	131
4.6	矢量波动方程	132
4.7	平面波	135
4.8	平面波在平面边界上的反射和透射	138
第五章 激光器结构中的模式: 主要理论		146
5.1	激光器的拓扑结构和模式	146
5.2	波导方程	152
5.3	波的定义	154
5.4	介质板波导	155
5.5	介质板波导模式的特征	166
5.6	在耗散/增益介质中的传播	173
5.7	实际结构中的三维模式	177
5.8	五层介质板波导模式	185
5.9	模式在端面上的反射率	187
5.10	激光器结构中的模式选择	193
第六章 激光辐射场		199
6.1	引言	199
6.2	介质板波导的辐射	200
6.3	辐射场的边界解	205
6.4	介质板波导的模式辐射图形	210
6.5	三层介质板波导的辐射	214
6.6	二维波导的辐射	215
第七章 激光器结构中的模式: 主要实验		221
7.1	引言	221
7.2	双异质结激光器	222
7.3	四异质结激光器	238
7.4	非对称结构—单异质结(紧密限制)激光器	245
7.5	对称和非对称的大光腔激光器	247
7.6	实验和理论辐射图形(横模)	250
7.7	水平侧向的“S”模	254

7.8 小结	263
第八章 激光二极管的电学特性和光学特性之间的关系	265
8.1 载流子限制和注入载流子的利用	265
8.2 阈值电流密度和微分量子效率	278
8.3 J_{th} 值与温度的关系	293
8.4 非对称异质结激光器中的反常光学现象和光限制的丧失	299
第九章 外延技术	306
9.1 液相外延 (LPE)	306
9.2 气相外延	313
9.3 分子束外延	316
9.4 晶格失配效应	317
9.5 衬底考虑	339
第十章 二元 III-V 族化合物	347
10.1 砷化镓	347
10.2 磷化镓	370
10.3 锑化镓	376
10.4 砷化铟	376
10.5 磷化铟	377
10.6 砷化铝和磷化铝	378
第十一章 三元和四元 III-V 族化合物	381
11.1 一般考虑	381
11.2 相图——引论	389
11.3 基本三元合金	394
11.4 四元化合物	419
第十二章 激光二极管的制造及其有关问题	426
12.1 结的形成和外延层特性的测定	428
12.2 $Al_xGa_{1-x}As$ 的一些与器件设计有关的关键性质	445
12.3 有源结面积的定义	454
12.4 激光二极管的热耗散	462
第十三章 除 GaAs-AlAs 以外的异质结器件	471
13.1 引言	471
13.2 II-III 族化合物激光器	473
13.3 III-V 族化合物激光器	484
13.4 小结	488

第十四章 特殊用途的器件	491
14.1 高峰值功率的激光二极管	491
14.2 与光纤通信有关的光纤概念	502
14.3 (AlGa)As 近红外连续工作激光二极管	511
14.4 高亮度发光二极管	525
14.5 发射可见光的激光二极管	542
14.6 一般应用的异质结发光二极管	554
第十五章 分布反馈激光器	566
15.1 引言	566
15.2 耦合模式的分析	566
15.3 耦合模的解	570
15.4 GaAs-(AlGa)As 分布反馈激光器	571
第十六章 器件的可靠性	576
16.1 端面突发退化	576
16.2 内损伤机理	582
16.3 可靠器件的工艺	593
第十七章 激光二极管的瞬态效应	600
17.1 引言	600
17.2 接通效应	601
17.3 连续振荡	614
17.4 与非均匀粒子数反转有关的振荡	620
17.5 激光二极管的调制过程	622
17.6 小结	626
附录	628
附录 A 物理常数	628
附录 B 强场中的增益和水平侧向多模	632
B.1 引言	632
B.2 增益和多模的空间调制	632
B.3 跃迁几率的光致饱和	633
B.4 激光区中的自发辐射功率	636
B.5 小结	637
附录 C 关于异质结激光二极管的压力效应	638
C.1 单轴应力	638
C.2 流体静力学(均匀)应力	639
附录 D GaAs 激光器发射的大气衰减	643
附录 E 单模发射的线宽	644

引 言

I.1 技术背景

半导体激光二极管把许多半导体器件共有的 $p-n$ 结与一切激光器共有的量子电子学概念结合起来。同 HeNe 气体激光器和掺钕的钇铝石榴石 (YAG 型) 固体激光器比较, 半导体激光器的主要特点是体积小, 成本可能比较低, 同时, 也是唯一能够简单地改变通过器件的电流就能将光输出进行千兆赫量级的高速调制的器件。这就使它能够发展成为光导纤维通信系统的重要器件。

半导体激光器与低功率、发射可见光的二极管 (LED) 属于同一类, 但是发光二极管的发射光谱比较宽, 辐射的方向性比较差, 并且调制容量也受到限制。此外, 只有某些类型的半导体材料 (即直接带隙半导体) 才可以用来制作激光器, 同时, 这种激光二极管还必须有一个用来有效地作为模式波导 (光限制) 和电子-空穴复合区 (载流子限制) 的窄小区域。现代半导体激光器的这些要求, 是用单异质结或多异质结来实现的, 因为这些异质结器件中引进了介电突变和限制少数载流子的势垒。

图 I.1 表示由两个平行解理面和二个锯出的 (粗糙) 侧面组成的激光二极管的管芯。其中, 两个解理面组成了法布里-珀罗光腔。正如第十二章所详细叙述的一样, 目前, 许多激光器都制成条形电极结构, 此时, 二极管的有源区面积受电极条形的限制, 所以不须要把激光二极管的侧面弄粗。改变二极管的几何尺寸, 就可以使激光器的发射面宽度从 $1\mu\text{m}$ 变化到 $1000\mu\text{m}$ 以上。对于 $300\mu\text{m}$ 长的典型二极管, 有源区面积只有 $10^{-5}\sim 10^{-4}\text{cm}^2$, 这与其

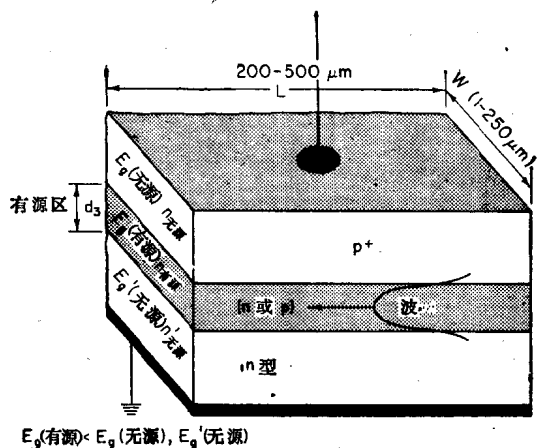


图 I .1 用解理二个平行端面而使两侧面变粗的方法制成的二极管管芯示意图。 d_3 表示有源区的厚度

他类型的激光器相比，确实是很小的。

这种内腔式激光二极管结构，基本上是一个很薄 ($1\mu\text{m}$ 量级)、具有少数载流子注入表面的有源平面波导，正是由于有这一内部波导，才能将光限制在产生光放大作用的电子-空穴的复合区内。在同质结激光二极管中，光波导效应所需的折射率微小变化是依靠掺杂浓度的微小变化来实现的。但是在异质结激光二极管中，正如图 I .1 所示的双异质结激光二极管（这只是第五章所讨论的许多可能结构中的一种）一样，各层之间的折射率突变是由相邻两层之间的能隙差控制的。

在异质结激光器中，有源区（即电子-空穴复合区）的厚度 d_3 ，也是由能隙的突变（即能隙台阶高度）来控制的，因为它产生了足以限制少数载流子的势垒。“紧密限制激光器”这一术语最初就是应用于专门设计到使有效的载流子和光都被限制在一个界限分明的有源区内的异质结激光二极管的。随着异质结这一概念被人们所广泛接受，即使它设计得不正确时，其性能会比同质结激光

器还差,但异质结激光器这一术语仍然意味着,它的性能是可以按人们的要求来进行控制的。目前,在半导体激光器领域中,异质结激光器已占居支配地位,因此,本书主要讨论这类激光器。但当认为内部结构与所讨论的结果无关时,也涉及了早期的同质结激光器的实验结果。

本书也讨论了非激光型的异质结发光二极管(LEDs)。它的制作工艺和激光二极管相似。这种结构的发光二极管,由于具有高亮度和可对其光输出进行高频调制,故特别适宜作为光纤通信系统的光源。虽然它的工作频率不能达到激光二极管那么高,但也能满足许多光纤通信系统的要求,因此其应用正日见扩大。

关于激光二极管的发展历史,可以追溯到1962年首次证明工作于低温下的同质(扩散的)结GaAs器件发出激光^(1~3)开始。此后,各国便相继进行广泛研究,以进一步探讨半导体中的受激发射理论,并且,通过探索许多Ⅲ-V族和Ⅳ-V族化合物而使半导体的激光波长扩展到可见光区和红外光区。此外,还用Ⅲ-V族化合物小薄片研究了电子束激励的激光作用(Ⅲ-V族材料不能制作p-n结)。到了1968年,尽管仍然仅有一些类型的材料可以在室温下工作,有实际意义的GaAs工作波长为9000Å左右,但激光波长范围已从约20μm扩展到约0.5μm。

当然要使GaAs激光器得到实际应用仍有十分严重的问题:
(1)室温下,GaAs激光器的阈值电流密度一般都超过50,000 A/cm²,这样,由于功率耗散太大,脉冲占空比被限于1%以下;
(2)激光器的可靠性不规则,其工作寿命的变化范围很宽,可以从几分钟到可能最佳时的几百小时,这样,当要求在环境温度工作(这是最常使用的温度)时,激光二极管就不能胜任了。

激光二极管的退化是一个特别麻烦的问题,其原因正是和以前对GaAs隧道二极管有过的不愉快经验一样,不管怎么样加倍努力来克服其寿命短的缺点,但总是不能使它达到实际应用要求。而且还弄不清,比前者还要工作于大电流密度的激光二极管,究

竟是不是由于很不清楚但又非常根本的原因而落到与前者（指GaAs隧道二极管）相似的命运。首先有希望说明退化过程并不是由于根本原因引起的，那就是证明了两个基本损坏原因——一个是与光能流密度有关的端面损伤^[4,6]，另一个是既与器件的原始工艺质量有关，又与工作电流密度（实际上是在有源区中的电子-空穴复合率）有关的内部缺陷的形成^[6]。根据这些研究工作可以肯定，通过规定安全工作条件和设计出提高器件的材料纯度，特别是消除位错的办法，就可以使激光二极管的可靠性得到根本的改进。

但是GaAs激光器基本性能的改进不

能依靠这种渐进的发展过程。幸好在退化过程得到进一步明确的同时，实现了采用晶格匹配的AlAs-GaAs合金制成了异质结激光器，这就大大地降低了阈值电流密度和提高了器件的总效率。

异质结激光器的实现是由三个实验室分别独立完成的。第一个室温工作的异质结激光器是一个单异质结器件^[7,8]（阈值电流密度 $8,000 \sim 10,000 \text{ A/cm}^2$ ），接着就出现了低阈值（ $\sim 4,000 \text{ A/cm}^2$ ）的双异质结激光器^[9-11]（图I.2）。

要指出的是，双异质结这一概念早在1963年就提出来了，当时是为了（比同质结）提高载流子注入有源区的效率而设计的。可是，具有明显优点的异质结激光器结构，在当时还有待合适的

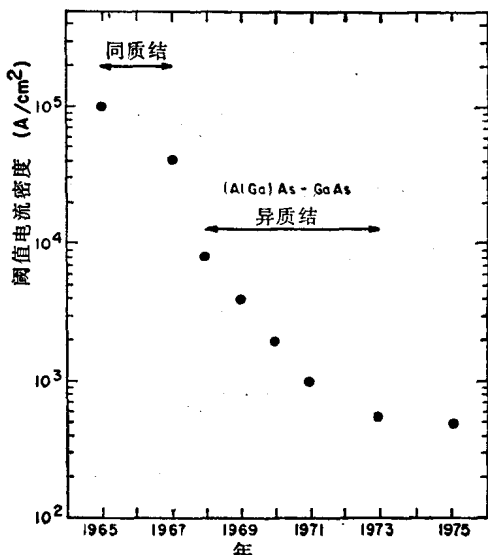


图 I.2 GaAs激光二极管的
阈值电流密度现状

半导体材料和外延技术的发展。后来,人们终于用 (AlGa)As 合金制成了这种器件,因为这种材料具有几乎是独一无二的优异性能,即它的能带间隙可以在宽广的范围内变化,而晶格常数却只有极其微小的变化,这就有可能用它制成低缺陷的异质结结构。

自从 1970 年以来,激光二极管工艺、可靠性和理论研究工作都得到进一步的发展。特别是,目前已可以用光波导作用的明确定义和复合区的明确界限来对激光二极管的可以与理论作精确比较的模式性质进行详细的分析了。

随着室温下阈值电流密度可经常地降低到 4000 A/cm^2 以下,激光二极管已适于连续工作 (CW), 或者可以调制到千兆赫级了。除了用于通信之外,这种激光二极管还可以代替低功率气体激光器而应用于发射光谱在近红外区的场合。虽然人们感兴趣的连续工作的

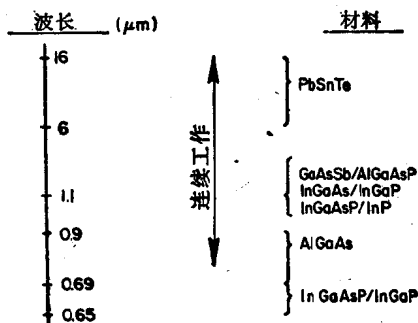


图 1.3 光谱范围和用于制作异质结激光器的材料

器件已经制成了,但是脉冲工作的大功率激光二极管 (主要是单异质结激光器和称为大光腔 (LOC)^[14] 结构的各种四层异质结的改进型) 也已问世了。这样,随着这些器件的工作寿命已提高到几年的数量级,以 (AlGa)As-GaAs 异质结为基础的这两个激光二极管分支的实际应用也就不断扩大。

人们已在借助这些器件的成功经验,将异质结激光器这一概念推广到其他材料上去,以便制成光谱范围在 AlAs-GaAs 合金材料以外的激光器。图 1.3 表示现在已经制成的异质结激光器的波长范围。

1.2 本书梗概

本书的目的在于提出一种对各种材料制作的器件的主要工作

原理都适用的分析方法,并借此给读者提供一些主要器件和材料的广泛工艺资料。书中,作者尽可能通过实验例子来说明器件的关键理论结果,并进一步指出目前所存在的矛盾或者有待进一步改进的地方。

书中包括一些指导性材料。我们认为,简要地提出一些已广泛采用的方程和概念,对读者仍将是有益的。例如在第一章中,简单地提出一些半导体概念,特别是与我们所讨论的器件的工作过程有关的发光现象;第四章叙述了与模式波导问题有关的麦克斯韦方程。

第二章回顾了有关 $p-n$ 结和异质结概念。第三章通过简单的二能级原子系统,介绍了受激发射的一般原理,进而,就将这一原理应用到半导体材料,特别是 GaAs 材料上。

紧接着,就在第四章中回顾了电磁场的基本理论。在第五章中,适当考虑垂直和水平几何结构,分析了激光二极管的辐射模式。然后,第六章又分析了远场辐射图形及其与内部激光结构的关系。第四至第六章是理论性材料。第七章对理论进行了验证,并介绍了一些有代表性的激光器的观察结果。第八章集中讨论了异质结激光器的激光输出与注入电流之间的关系,包括阈值与温度的关系;交界面的复合作用;载流子从复合区中漏掉等关键方面。

第九、十、十一章叙述了对广大光谱范围的激光二极管和发光二极管的工作过程和结构很有意义的半导体材料的基本性质和外延合成方法。讨论的重点放在液相外延技术上,因为它已很广泛地应用于 III-V 族化合物的异质结二极管结构了。

第十二章主要介绍了有关的工艺资料,包括制作条形接触二极管的各种方法,其中有许多是与 III-V 族化合物有关的激光二极管的工艺。

第十三章主要叙述 IV-VI 族化合物制作的器件以及除 (AlGa)As 器件以外的其他 III-V 族化合物二极管。

第十四章的目的是要突出有重要用途的主要二极管,讨论的重点放在光纤通信系统用的激光器上。同时也简单介绍了与这种

器件的要求有关的一些光纤概念。

第十五章专门叙述激光二极管系列的最新增加的器件——采用内部刻痕以获得单纵模辐射的分布反馈激光器。

第十六章详细地讨论了激光二极管的可靠性和有关模型。

最后，在第十七章讨论了瞬态现象。这里，发展和采用了基本速率方程，使之具有统一的说法。

书末的附录讨论了几个放在任何一章中讨论都不合适的问题。

我们根据所讨论的内容和我们认为那种是最常用而采用了 cgs 和 MKS 两种单位制。例如，有关电磁场理论的部分，我们采用的是 MKS 单位制。

书中所采用的符号有一些是重复的，不过作者已努力使差不多每一章中相同的符号都具有相同的涵义。主要符号列于附录 A 中。

参 考 文 献

1. R. N. Hall, G. E. Fenner, J. D. Kinglsey, T. J. Soltys, and R. O. Carlson, *Phys. Rev. Lett.* **9**, 366 (1962).
2. M. I. Nathan, W. P. Dumke, G. Burns, F. H. Dill, Jr., and G. Lasher, *Appl. Phys. Lett.* **1**, 63 (1962).
3. T. M. Quist, R. H. Rediker, R. J. Keyes, W. E. Krag, B. Lax, A. L. McWhorter, and H. J. Ziegler, *Appl. Phys. Lett.* **1**, 91 (1962).
4. C. D. Dobson and F. S. Keeble, *Proc. Int. Symp. GaAs, Reading, England*, Inst. Phys. and the Phys. Soc., 1967.
5. H. Kressel and H. P. Mieroff, *J. Appl. Phys.* **38**, 5419 (1967).
6. H. Kressel and N. E. Byer, *Proc. IEEE* **38**, 25 (1969);
H. Kressel *et al.*, *Met. Trans.* **1**, 635 (1970).
7. H. Kressel and H. Nelson, *RCA Rev.* **30**, 106 (1969).
8. I. Hayashi, M. B. Panish, and P. W. Foy, *IEEE J. Quantum Electron.* **5**, 211 (1969).
9. Zh. I. Alferov, V. M. Andreev, E. L. Portnoi, and M. K. Trukan, *Fiz. Tekh. Poluprov.* **3**, 1328 (1969) [*English transl.: Sov. Phys. Semicond.* **3**, 1107 (1970)].
10. I. Hayashi, M. B. Panish, P. W. Foy, and S. Sumski, *Appl. Phys. Lett.* **17**, 109 (1970).
11. H. Kressel and F. Z. Hawrylo, *Appl. Phys. Lett.* **17**, 169 (1970).
12. H. Kroemer, *Proc. IEEE* **51**, 1782 (1963).
13. H. Rupprecht, J. M. Woodall, and D. G. Pettit, *Appl. Phys. Lett.* **11**, 81 (1967).
14. H. F. Lockwood, H. Kressel, H. S. Sommers, Jr., and F. Z. Hawrylo, *Appl. Phys. Lett.* **17**, 499 (1970).
15. G. H. B. Thompson and P. A. Kirkby, *IEEE J. Quantum Electron.* **9**, 311 (1973).

第一章 简要固体物理概念

1.1 晶 格 结 构

可以说,制作电子器件的半导体材料,都是由晶格常数为 a_0 的周期性排列的原子组成的晶体,这里, a_0 也称晶格参数,它是原胞大小的度量。要叙述固体中电子行为的基本概念,可以从孤立原子说起:在这种原子中,周围有足够多的电子围绕着一个带正电荷的核旋转,从而形成一个中性原子。虽然,经典理论认为粒子有无限多个可能的轨道,但是事实上,与其说电子具有粒子性,倒不如说电子表现出了约束波动行为,从而使它只具有有限个可能的轨道和能级。当电子从一个轨道过渡到下一个轨道时,原子不是吸收就是发射一个能量子,这决定于电子是跳到较高的能量轨道还是落入到较低的能量轨道上。

已经最广泛研究的 Ge 和 Si 半导体的晶体结构,属于金刚石点阵,其中,每个原子都位于由四个最近邻的原子构成的四面体的中心。用于制作发光器件的最重要的二元化合物,例如 GaAs 和 GaP,则属于闪锌矿结构,它除了最近邻的二个原子位置分别由不同原子,即 Ga 和 As,或 Ga 和 P 占据之外,其他形状和金刚石点阵相似。每种元素的原子,都可以部分地被适当的元素的原子所替换,例如, P 原子可替换 As 原子,以形成三元化合物,即 Ga(AsP)。同样地,部分 Ga 原子可以被 Al 原子所替换,形成 (AlGa)As,而保留基本点阵结构不变,按照这种道理,还可以进行更多的替换,以得到更复杂的化合物。通常我们假定,这些化合物中,部分元素的替换,都是属随机性质的。

图 1.1.1 表示从(111)方向所观察到的 GaAs 点阵;虚线 PQ 和 RS 表示以不同平面切割晶体时,所观察到的差别。通过 RS