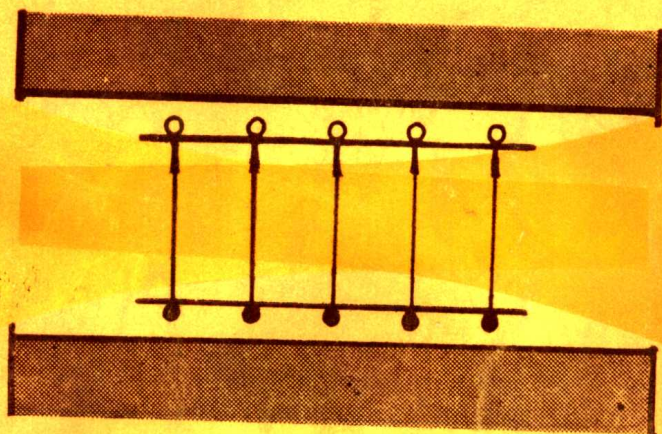


异质结构激光器

下册 (制作工艺和工作特性)

[美] H. C. 凯西 M. B. 帕尼什 著

郭长志 译 杜宝勋 校



国防工业出版社

异质结构激光器

下 册

(制作工艺和工作特性)

〔美〕 H. C. 凯 西 著
M. B. 帕尼什
郭长志 译
杜宝勋 校

国防工业出版社

内 容 简 介

本书是半导体光电子学领域内水平较高的专著。它较全面较深入地论述了半导体激光器的基本原理、制作工艺和工作特性。

全书分为上、下两册。上册属基本原理部分，主要内容包括半导体激光器中的光波导、受激发射和载流子限制。下册属制作工艺和工作特性部分，主要内容包括半导体激光器的材料工艺、制作工艺、工作特性和可靠性等问题。

本书可供光通信、半导体光电器件等专业的科技人员及有关院校师生参考。

HETEROSTRUCTURE LASERS PART B MATERIALS AND OPERATING CHARACTERISTICS

H. C. Casey, Jr.

M. B. Panish

Academic Press 1978

*

异质结构激光器

下 册

(制作工艺和工作特性)

H. C. 凯 西
〔美〕 M. B. 帕尼什 著

郭长志 译

杜宝勋 校

责任编辑 王细李

*

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

*

850×1168 $1/32$ 印张 $10\frac{1}{4}$ 270千字

1985年4月第一版 1985年4月第一次印刷 印数：0,001—1,850册

统一书号：15034·2747 定价：1.30元

前 言

先前 GaAs 同质结构激光器演变成各种异质结构激光器, 现在这些器件能够批量生产, 均依靠物理界有关科学家和工程师的合作。只有许多学科相结合, 才能了解这些器件的基本原理、制作工艺和工作特性。将来要把研究工作扩展到其它材料和结构, 也继续要求具有这方面的边缘学科知识。本书是为研究生编写的专著, 它强调边缘学科的性质。应当指出, 我们这里只论述研究生应当充分了解的那些问题, 而没有考虑应用方面的问题。

每个大问题均与支配有关现象的基本规律一起论述。根据基本规律推导出有关异质结构激光器的公式, 并列举出数值计算的实例。晶体生长专家可能不了解激光器中电磁辐射的传播和增益, 而对这些课题感兴趣的物理学家又可能不熟悉相平衡和晶体生长。因此, 我们边推导边解释, 而且特别详细, 以利于读者学习自己不熟悉的课题。

本书给出了严格解和近似解。在绝大多数情况下得到的公式容易用袖珍计算器或简单计算机程序计算。使用具有输出打印图形的微型计算机, 容许我们用图形来表示数值结果。因此, 读者既能领会一些公式的详细推导, 又能直接得到数值计算的简明结果。数值计算均以 $\text{GaAs-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 异质结构为例。现在, 唯独 $\text{GaAs-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 异质结构拥有充足的数据, 可以利用得到的公式进行数值计算。

就迅速发展的边缘学科而言, 在写一本书的过程中是有若干特殊困难的。第一是采用相同符号表示不同问题的记法。我们不是故意违反惯例, 而是在可能之处采用不同的字体或加上简单的标志。例如, 电子浓度和折射率的常用符号都是 n , 为了区别这两种情况, 采用加上一横的符号 $\bar{n}$ 表示折射率。为了与空间坐标

x 、 y 和 z 相区别, 采用斜体 x 、 y 和 z 表示固溶体组分。在其它情况下, 仍按惯例采用同一个符号。第二是几乎每天都发表论述异质结构激光器的文章。这些文章不仅能提供新的数据, 而且还经常对具体概念的解释提出修正。例如, 当 GaAs 的 Γ 、 L 和 X 导带的正确位置给定时, 就要对第四章作出修正。我们试图论述最基本的原理, 以使这里介绍的原理成为在这方面继续发表文章的基础。当然, 以后的工作肯定还会修正我们介绍的某些概念。第三是有关半导体激光器的文献特别多, 本书不能全部罗列, 而是指出最有代表性的文献, 以利于感兴趣的读者去查阅具体的内容。最后是在工业实验室环境里没有学生, 我们无法根据学生读者的意见来提炼有关的论述。然而, 贝尔 (Bell) 实验室有许多精通器件问题的专家, 这是我们征询意见的广阔天地。结果, 使本书加强了边缘学科性质的论述, 并编入了在别的书上被忽略的一些问题。

目 录

第五章 异质结构材料	1
§ 5.1 引言	1
§ 5.2 III-V 族二元化合物	6
§ 5.3 III-V 族三元固溶体	13
§ 5.4 异质结构激光器用的晶格匹配的 III-V 族二元和 三元系统	23
§ 5.5 异质结构激光器用的晶格匹配的 III-V 族二元和 四元系统	32
§ 5.6 异质结构激光器的组分渐变	49
§ 5.7 IV-VI 族二元化合物及其固溶体	60
§ 5.8 结语	67
参考文献	67
第六章 相平衡和异质外延	71
§ 6.1 引言	71
§ 6.2 III-V 族系统中的相平衡	73
§ 6.3 III-V 族化合物中的掺杂	93
§ 6.4 IV-VI 族系统中的相平衡	106
§ 6.5 液相外延	109
§ 6.6 分子束外延	133
§ 6.7 化学汽相沉积	145
§ 6.8 结语	150
参考文献	151
第七章 器件工艺和工作特性	157
§ 7.1 引言	157
§ 7.2 器件工艺	159
§ 7.3 单异质结构宽面激光器	163
§ 7.4 双异质结构宽面激光器	176

§ 7.5	分别限制宽面激光器	200
§ 7.6	条形激光器工艺	211
§ 7.7	条形激光器的阈值电流	221
§ 7.8	条形激光器的热特性	237
§ 7.9	增益系数的测量	242
§ 7.10	条形激光器中的增益波导	246
§ 7.11	条形激光器的发射特性	260
§ 7.12	分布反馈激光器	273
§ 7.13	结语	278
参考文献		279
第八章 退化		285
§ 8.1	引言	285
§ 8.2	灾变损坏	286
§ 8.3	暗线缺陷 (DLD)	295
§ 8.4	GaAs-Al _x Ga _{1-x} As 条形激光器的缓慢退化	308
§ 8.5	结语	318
参考文献		320

第五章 异质结构材料

§ 5.1 引言

最广泛用来制作异质结构注入型激光器的半导体材料是Ⅲ-V族化合物的组合。为了得到更长波长的发射,也采用了Ⅳ-V族化合物的组合。室温阈值电流密度低和工作寿命长的异质结构激光器是用 $\text{GaAs}-\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 异质结构作成的,这正是第1~4章所举的例子。但是,还有重要的波长范围是不能靠改变 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ DH激光器中有源区的Al组分 x 来得到的。由于光纤在 $1.0\sim 1.4\mu\text{m}$ 之间的损耗^[1]和材料色散最低^[2],所以对这一波长范围很感兴趣。多模光纤的损耗和材料色散随波长的变化如图5.1-1所示。图5.1-1(a)表明,用掺锗的二氧化硅($\text{GeO}_2-\text{SiO}_2$)作芯子和掺硼的二氧化硅($\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$)作包层的光纤,目前的水平已非常接近于由散射损耗和Si-O键的吸收损耗所决定的基本极限。用掺磷的二氧化硅($\text{P}_2\text{O}_5-\text{SiO}_2$)作芯子也可作出低损耗的光纤^[3]。图5.1-1(b)是芯子为 $\text{GeO}_2-\text{SiO}_2$ 和包层为 $\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 的光纤的材料色散,并表明这种光纤在 $1.25\mu\text{m}$ 附近的材料色散为零。科恩(Cohen)-林(Lin)^[2]也考虑过材料色散为零时波长与掺杂的关系。目前认为,由各个模式的传播常数的波长关系引起的单个模式的波导色散可以忽略,而在渐变折射率的多模光纤中,由各个模式的渡越时间之差引起的模间色散可能非常小^[2]。由于估计到通常可以获得低损耗的光纤,故大量工作集中于发射波长在 $1.0\sim 1.4\mu\text{m}$ 范围内的材料。这一努力的结果,得到了室温连续工作的波长大约为 $1.1\mu\text{m}$ 的 $\text{GaAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}-\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$ ^[4]、 $\text{InP}-\text{Ga}_{0.12}\text{In}_{0.88}\text{P}_{0.77}\text{As}_{0.23}$ ^[5]和 $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}-\text{Ga}_y\text{In}_{1-y}\text{P}$ ^[6] DH激光器。除了这些系统之外,还希

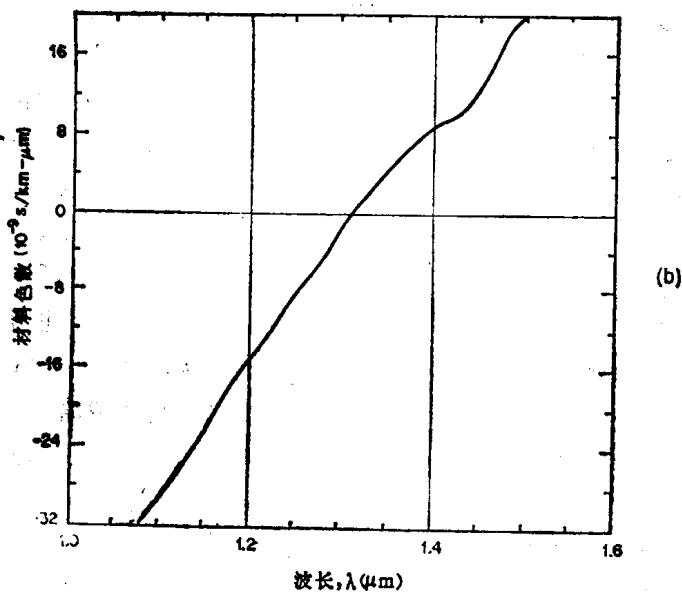
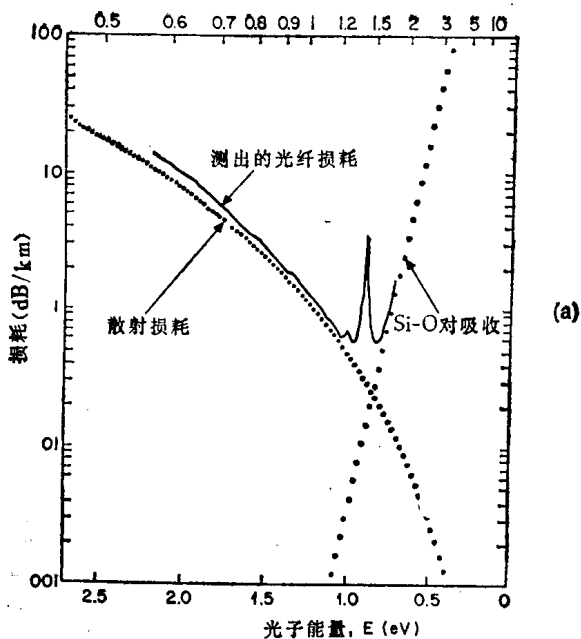
波长, λ (μm)

图5.1-1 目前水平的芯子为 $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$ 和包层为 $\text{B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 的光纤的传输性质

(a) 数值孔径 (NA) 为0.23、芯径为 $60\mu\text{m}$ 的光纤的传输损耗⁽¹⁾;
 (b) 数值孔径 (NA) 为0.26、芯径为 $50\mu\text{m}$ 的光纤的材料色散⁽²⁾。

望研究Ⅲ-V族化合物的二元、三元或四元的其它组合,以便适合于各种光纤的传输性质,获得可见光受激发射和满足各种应用上的需要。在Ⅳ-V族系统中,异质结构激光器主要是用 $\text{PbTe-Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ 异质结构制成的。

对于Ⅲ-V族异质结构激光器,器件性能不仅与起载流子限制和光限制作用的异质结处的带隙 E_g 的阶跃和折射率 $\bar{n}$ 的阶跃有关,而且还与异质结界面和外延层结构的质量好坏有关。一个突出的问题是由构成异质结的两种半导体之间的晶格失配引起的各种晶格缺陷,这些缺陷(特别是位错)可能降低辐射复合效率,并且如第八章所述可能降低器件的工作寿命。就Ⅲ-V族系统而言,能获得质量足够好的异质结以产生有用的异质结构激光器的能力,似乎与能否获得异质结材之间严格的晶格匹配有很大关系。事实上,能否生长出质量好的异质外延层,这与在生长温度下是否有足够严格的晶格匹配有关。这一章将讨论可能对异质结构激光器有用的各种二元、三元和四元系统。

这种Ⅲ-V族固溶体的例子如图5.1-2和图5.1-3所示。这些图说明本章要讨论的许多三元和四元固溶体的带隙(发射波长)随晶格常数变化的情况。光子能量 E 和波长之间的变换关系为

$$E(\text{eV}) = 1.2398/\lambda(\mu\text{m}) \quad (5.1-1)$$

连接两个二元化合物的边界线给出其三元系统的带隙和晶格常数。画阴影的部分是间接带隙材料。必须指出,直接和间接带隙材料对异质结构激光器都是有用的。有源区需要直接带隙的材料,而其两侧的宽带隙区则可以是直接或间接带隙的材料。图中的点线给出了与所示的二元系统晶格匹配的材料。

图5.1-2中的无阴影区和有阴影区分别表示 $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_y\text{As}_{1-y}$ 和 $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_y\text{In}_{1-y}\text{P}$ 四元固溶体;点线表示与GaAs或InP晶格匹配的固溶体。正如图中所示,与InP晶格匹配的固溶体可以有从大约0.85eV ($1.46\mu\text{m}$)到1.2eV ($1.03\mu\text{m}$)的发射能量(波长),而与GaAs晶格匹配的固溶体则具有从1.4eV ($0.89\mu\text{m}$)到2.1eV ($0.59\mu\text{m}$)的发射能量(波长)。同样,图5.1-3表示的是

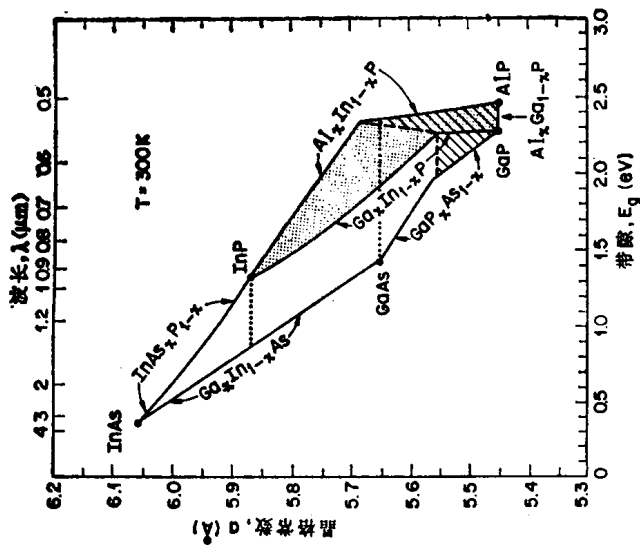


图5.1-2 $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_y\text{As}_{1-y}$ (无阴影区) 和 $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{1-y}\text{P}$ (有阴影区) 的带隙和晶格常数
虚线把直接带隙和间接带隙分开, 阴影表示间接带隙区; 点线表示与二元系统晶格匹配的材料。

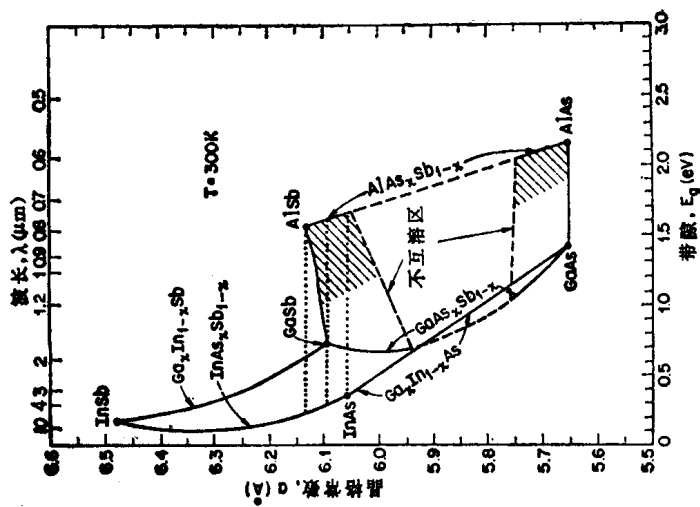


图5.1-3 $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ 和 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ 的带隙和晶格常数

虚线表示在 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ 系统中范围不明确的不互溶区的边界, 沿 $\text{GaAs}_2\text{Sb}_{1-x}$ 的不互溶区应扩展进 $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ 系统, 因其范围不明确而在图中没有画出; 点线表示与二元化合物晶格匹配。

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ 和 $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ 系统。图中点线表示与 AlSb 、 GaSb 和 InAs 晶格匹配的固溶体。 GaAs 和 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 沿 $\text{GaAs}-\text{AlAs}$ 边界也是晶格匹配的。这些晶格匹配的系统可以发射大约从 0.4eV ($3.0\mu\text{m}$) 到 1.1eV ($1.1\mu\text{m}$) 的激光。图 5.1-3 还表示有一个可能不存在固溶体的不互溶区的组分范围。这一章的许多节是用来详细描述这些固溶体以及其它 III-V 族系统和 IV-VI 族系统的。图 5.1-4 综合了在这一章中讨论的许多激光器材料的目前或将来可能的发射波长。

§ 5.2 给出了与异质结构激光器有关的 III-V 族二元化合物的性质。如图 5.1-2 和图 5.1-3 所示，需要用二元化合物作为单晶衬底，供以后生长异质结构外延层之用。§ 5.3 把 III-V 族二元化合

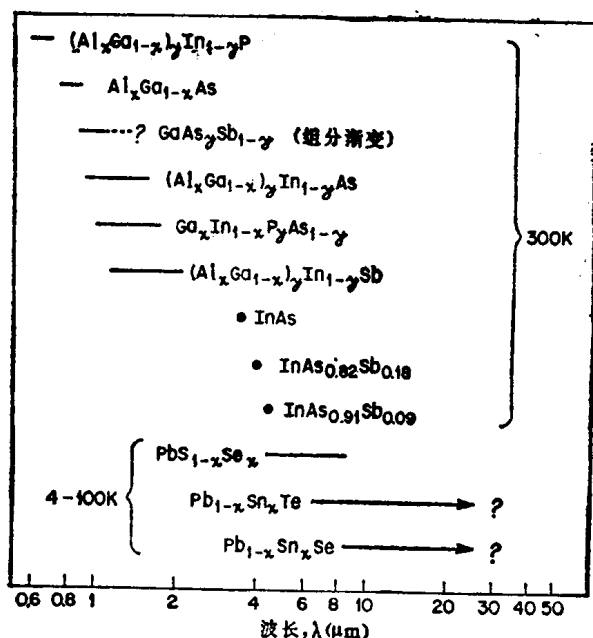


图 5.1-4 III-V 族和 IV-VI 族异质结构激光器现在或将来可能的发射波长

除了 $\text{GaAs}_y\text{Sb}_{1-y}$ 和 $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ 是用组分渐变来获得低阈值的激光器之外，所有列出的 III-V 族系统都是晶格匹配的异质结构激光器的有源区。这里包括的二元和三元有源区在某些情况下是三元和四元系统组分范围的端点。

物推广到 III-V 族三元固溶体, 并着重讨论带隙与组分的关系。§ 5.4 讨论异质结构激光器用的各种晶格匹配的 III-V 族二元和三元系统。相当详细地讨论了 $\text{GaAs-Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$ 晶格匹配的 DH, 以说明 ΔE_c 为 0 时的载流子限制。§ 5.5 讨论可能用晶格匹配的 III-V 族二元和四元系统的其它异质结构激光器。 $\text{InP-Ga}_{0.12}\text{In}_{0.58}\text{P}_{0.77}\text{As}_{0.23}$ 是一个成功的例子。其它异质结构激光器则由于采用在衬底上生长组分渐变的外延层使三元或四元有源层与相邻外延层具有相同的晶格常数的方法而成为可能。§ 5.6 讨论在组分渐变的外延层中和用这些外延层作成的异质结构激光器中位错的产生。虽然在每一节中都给出相当完全的例子, 但对于许多 III-V 族固溶体仍未很好了解其对定量描述异质结构激光器所需的一切性质。

§ 5.7 给出供异质结构激光器用的 IV-VI 族二元化合物及其推广成三元固溶体的性质。这些材料相对于 III-V 族化合物来说是处于发展的初期阶段。对 $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ 和 $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}$ 算出的带隙和实验数据表明, 当 x 从 0 增加和 x 从 1 减小时, 带隙宽度是减小的, 所以带隙在三元组分范围内必然经过 0 点。这一不寻常的特性使异质结构激光器有可能发出远红外激光。另一个不寻常的特性是其带隙 E_g 随温度的变化与在 III-V 族化合物中观察到的行为相反。与 III-V 族异质结构不同, 晶格匹配对于外延生长或对于非辐射复合中心的形成似乎不是一个严重的问题。但是, 一些困难的消除又被出现的另一个困难所抵消, 在生长过程中达到平衡的晶格空位在晶体冷却时仍保存下来, 并影响 IV-VI 族激光器在工作温度下的晶体电导率。

§ 5.2 III-V 族二元化合物

I. 晶体结构和晶格常数

这里感兴趣的 III-V 族化合物是 Al、Ga、In (III 族) 和 P、As、Sb (V 族) 的化合物, 它们结晶成闪锌矿结构。如图 5.2-1 所示, 这种结构是由两个互相穿插的原子在四面体位置上的面心

结构构成的。该结构的一个原胞如图5.2-2所示。符号 $\{ \}$ 表示一组晶面，符号 $(\)$ 表示一个具体的晶面。在图5.2-2中，表示晶格常数为 a 的立方体原胞的六个平面是六个等价的 $\{100\}$ 晶面。包含Ga和As原子的对角平面是四个 $\{110\}$ 晶面，它们是Ⅲ-V族化合物的自然解理面。原胞中切割As原子的三角形表示八个 $\{111\}$ 晶面之一。采用Ga原子在角上的等价原胞时，可以穿过Ga原子画出两组 $\{100\}$ 和 $\{111\}$ 等价晶面。通常用晶体中的方向来描述晶体取向。对于闪锌矿晶体，晶体方向垂直于晶面，并在一般情况下用角括号 $\langle \rangle$ 表示，故在图5.2-1中有一个箭头表示具体的 $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ 方向。对于一切 $\langle 110 \rangle$ 方向，一般写法是 $\langle 110 \rangle$ 。

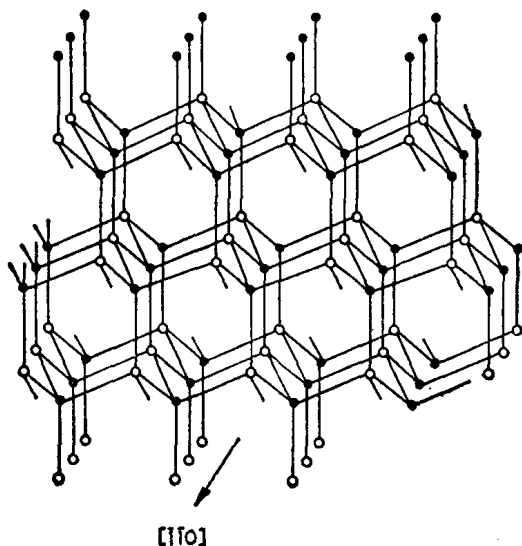


图5.2-1 闪锌矿结构

表5.2-1列出了Ⅲ-V族二元化合物的晶格常数。显然，Ⅲ-V族化合物的理想化学比是每有一个V族原子就有一个Ⅲ族原子。因受晶体生长条件的影响而出现空位和填隙原子，结果偏离了这个化学比^[7]。GaAs退火的实验结果^[8]表明，晶格常数随化学比的变化小于约 10^{-8} Å，故根据这一章的目的可以忽略。杂质对晶格常数的影响就更小了^[9]。

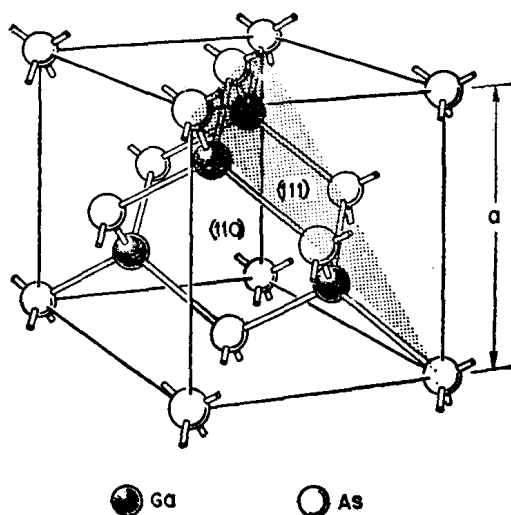


图5.2-2 GaAs中闪锌矿结构的一个原胞
晶格常数是 a ，立方体的六个面是六个等价的 $\{100\}$ 平面。

表5.2-1 III-V族二元化合物的晶格常数

化 合 物	晶格常数 a (Å)	T (°C)	文 献
AlP	5.451	—	(a)
AlAs	5.6605	0	(b)
AlSb	6.1355	18	(c)
GaP	5.45117	25	(d)
GaAs	5.65325	27	(e)
GaSb	6.09593	—	(f)
InP	5.86875	18	(c)
InAs	6.0584	18	(c)
InSb	6.47937	25	(f)

- (a) A. Addamiano, J. Am. Chem. Soc. 82, 1537 (1960).
 (b) M. Ettenberg and R. J. Paff, J. Appl. Phys. 41, 3926 (1970).
 (c) G. Giesecke and H. Pfister, Acta Crystallogr. 11, 369 (1958).
 (d) R. L. Barns, Private Communication. This value represents the average for Vapor-grown (5.45114 Å) and Solution-grown (5.45120 Å) Samples.
 (e) C. M. H. Driscoll, A. F. W. Willoughby, J. B. Mullin, and B. W. Straughan, "Gallium Arsenide and Related Compounds, 1974," p. 275, Inst. of Phys., London, 1975.
 (f) M. E. Straumanis and C. D. Kim, J. Appl. Phys. 36, 3822 (1965).

2. 帶隙

绝大多数Ⅲ-V族二元化合物的能带结构是熟知的，而且一

表5.2-2 Ⅲ-V族二元化合物的带隙

化合物	带隙类型	实验带隙 E_g (eV)				带隙的温度关系 $E_g(T)$ (eV)	文献
		0 K	文献	300K	文献		
AlP	间接	2.52	a	2.45	a	$2.52 \sim 3.18 \times 10^{-4} T^2 / (T + 588)^r$	n
AlAs	间接	2.239	b	2.163	b	$2.239 \sim 6.0 \times 10^{-4} T^2 / (T + 408)^r$	b
AlSb	间接	1.687	c	1.58	d	$1.687 \sim 4.97 \times 10^{-4} T^2 / (T + 213)$	c
GaP	间接	2.338	e	2.261	e	$2.338 \sim 5.771 \times 10^{-4} T^2 / (T + 372)$	o
GaAs	直接	1.519	f	1.424	g	$1.519 \sim 5.405 \times 10^{-4} T^2 / (T + 204)$	o
GaSb	直接	0.810	h	0.726	i	$0.810 \sim 3.78 \times 10^{-4} T^2 / (T + 94)^r$	p
InP	直接	1.421	j	1.351	j	$1.421 \sim 3.63 \times 10^{-4} T^2 / (T + 162)^r$	j
InAs	直接	0.420	k	0.360	l	$0.420 \sim 2.50 \times 10^{-4} T^2 / (T + 75)^r$	q
InSb	直接	0.236	m	0.172	i	$0.236 \sim 2.99 \times 10^{-4} T^2 / (T + 140)^r$	p

- (a) M. R. Lorenz, R. Chicotka, G. D. Pettit, and P. J. Dean, Solid State Commun. 8, 693 (1970).
- (b) B. Monemar, Phys. Rev. B8, 5711 (1973). This Value in Table 5.2-2 includes an exciton binding energy of 0.010eV.
- (c) N. N. Sirota and A. I. Lukomskii, Sov. Phys. -Semicomd. 7, 140(1973) [Translated from, Fiz. Tekh. Poluprov. 7, 196 (1973)].
- (d) K. -Y. Cheng, Stanford Electron. Lab., Tech. Rep. No. 5111-5(August 1975).
- (e) M. R. Lorenz, G. D. Pettit, and R. C. Taylor, Phys. Rev. 171, 876 (1968).
- (f) D. D. Sell, S. E. Stokowski, R. Dingle, and J. V. DiLorenzo, Phys. Rev. B7, 4568 (1973).
- (g) D. D. Sell and H. C. Casy, Jr., J. Appl. Phys. 45, 800 (1974).
- (h) E. J. Johnson, I. Filinski, and H. Y. Fan, Proc. In. Conf. Phys. Semiconduct., Exeter, 1962 P. 375. Inst. of Phys. and Phys. Soc., London, 1962.
- (i) D. Auvergne, J. Camassel, H. Mathieu, and A. Joullie, J. Phys. Chem. Solids 35, 133 (1974).
- (j) W. J. Turner and W. E. Reese, "Radiative Recombination in Semiconductors, Paris, 1964," P. 59. Dunod, Paris, 1965.
- (k) C. R. Pidgeon, D. L. Mitchell, and R. N. Brown, Phys. Rev. 154, 737 (1967).
- (l) S. Zwerdling, B. Lax, and L. M. Roth, Phys. Rev. 108, 1402 (1957).
- (m) S. Zwerdling, W. H. Kleiner, and J. P. Theriault, J. Appl. Phys. 32, 2118 (1961).
- (n) B. Monemar, Solid State Commun. 8, 1295 (1970). The technique used to assign E_g in this paper will give a value less than E_g . Therefore, $0.030 + 4 \times 10^{-8} T$ has been added to the values in this paper to agree with values in Lorenz et al^a.
- (o) C. D. Thurmond, J. Electrochem. Soc. 122, 1133 (1975).
- (p) J. Camassel and D. Auvergne, Phys. Rev. B12, 3258 (1975).
- (q) J. R. Dixon and J. M. Ellis, Phys. Rev. 123, 1560 (1961).
- (r) The parameters α and θ were assigned from the experiment data by, C. D. Thurmond, Private Communication.

一般都相当类似。GaAs 的能带结构如图4.2-1所示。感兴趣的Ⅲ-V族化合物的带隙列在表5.2-2中。如§3.8所述, 为了获得净受激发射, 必须用直接带隙材料; 但是, 带隙较宽的限制层可以是直接或间接带隙的材料。在§4.2中, 式(4.2-1)给出了直接带隙的温度关系。这一关系具有如下一般的形式^[10]:

$$E_g(T) = E_g(0) - \alpha T^2 / (T + \theta) \quad (5.2-1)$$

式中, $E_g(0)$ 是 0 K 的带隙; α 是约 $5 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$ 的经验参数; θ 是经常接近于德拜温度的经验参数。表5.2-2中也给出了类似于式(5.2-1)的公式。 E_g 的温度关系很有用, 因为它近似代表激光的光子能量随温度的变化。带隙与温度的关系也出现在给出本征载流子浓度的式(4.3-43)之中。

3. 与异质结有关的性质

已报导了Ⅲ-V族二元化合物的许多性质。纽伯格 (Neuberger)^[11] 给出了一个有用的综述。列在表5.2-3中的只是限于对异质结构激光器有用的性质。

式(4.3-1)给出的导带阶跃 ΔE_c 是窄带隙半导体的电子亲合力 χ_1 减去宽带隙半导体的电子亲合力 χ_2 。因此, 对于正的 ΔE_c , χ_1 应大于 χ_2 。可惜不清楚现有电子亲合力的数值能代表实际到多好的程度, 并且能否用 χ 来确定 ΔE_c 尚未得到证明。如第四章所述, 只给出了 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的测出的 ΔE_c 值。所以, 估算其它情况的 ΔE_c 值, 必须根据目前已有的电子亲合力的数据。表5.2-3中的 χ 值是考虑到最近的 E_g 值对原始文献给出的值作了修改的数据。注意, Ⅲ-V族化合物的电子亲合力随Ⅲ族元素的原子量增加而增加。

如表4.3-3所示, 要得出异质结的自建电势, 需要算出费米能级。因为有效质量会通过有效态密度影响费米能级, 所以在表5.2-3中有两行列出了电子的态密度有效质量 m_n 和空穴的有效质量 m_p 。电势在异质结两边的分配决定于充分电离的杂质浓度和介电常数。介电常数已在表5.2-3中给出。

§2.4中的式(2.4-44)表明, 对于波导模式, 有源层的折