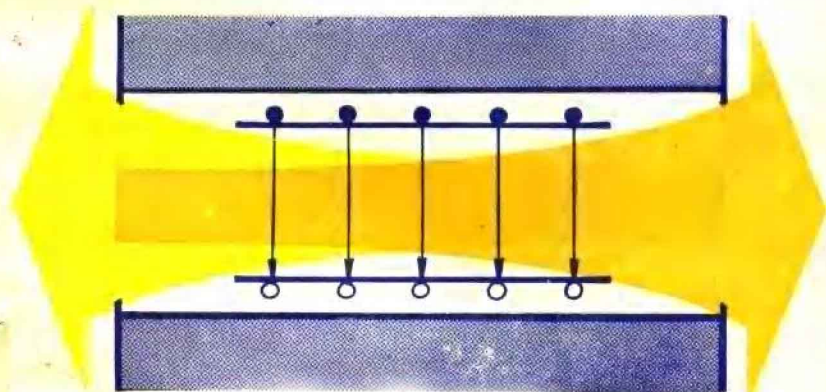


异质结构激光器

上册(基本原理)

[美] H.C.凯西 M.B.帕尼什 著

杜宝勋 译 郭长志 校



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、器件工艺、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 A FUNDAMENTAL PRINCIPLES

H. C. Casey, Jr

M. B. Panish

ACADEMIC PRESS 1978年

*

异 质 结 构 激 光 器

上 册

(基本原理)

H. C. 凯 西

〔美〕 M. B. 帕尼什 著

杜宝勋 译

郭长志 校

*

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8¹/₂ 214千字

1983年6月第一版 1983年6月第一次印刷 印数：0,001—2,600册

统一书号：15034·2483 定价：1.10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 , 为了区分这

IV

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，采用草体 $\mathscr{x}$ 、 $\mathscr{y}$ 和 $\mathscr{z}$ 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

第一章 绪论	1
§ 1.1 引言	1
§ 1.2 注入型激光器的受激发射和室温连续工作	1
§ 1.3 注入型激光器的工作原理	10
§ 1.4 注入型激光器	13
§ 1.5 材料	15
参考文献	18
第二章 光场和波传播	20
§ 2.1 引言	20
§ 2.2 基本原理	22
§ 2.3 平板介质波导	31
§ 2.4 对称三层平板介质波导中的波传播	34
§ 2.5 对称三层平板波导的本征值方程的解	42
§ 2.6 曲折光线模型和非对称三层平板波导	58
§ 2.7 光束的发散	72
§ 2.8 端面反射率	80
§ 2.9 四层和五层异质结构波导	84
§ 2.10 分布反馈激光器	92
§ 2.11 结语	108
参考文献	108
第三章 半导体中的受激发射	112
§ 3.1 引言	112
§ 3.2 吸收、受激发射和自发发射的关系	114
§ 3.3 跃迁几率	123
§ 3.4 半导体中的光吸收和发射率	129
§ 3.5 与浓度有关的态密度	133
§ 3.6 矩阵元	146

VI

§ 3.7 计算的光谱	153
§ 3.8 阈值电流密度	166
§ 3.9 结语	186
参考文献	187
第四章 异质结	191
§ 4.1 引言	191
§ 4.2 GaAs-Al _x Ga _{1-x} As 的能带结构	192
§ 4.3 异质结的能带图	198
§ 4.4 渐变异质结	237
§ 4.5 电学性质	242
§ 4.6 载流子限制	252
§ 4.7 结语	261
参考文献	262

第一章 绪 论

§ 1.1 引 言

本章旨在介绍注入型激光器的早期研究工作，并引入异质结构激光器的基本概念。应当强调，上册的主要内容是介绍异质结构激光器中的波导（第二章）、增益（第三章）和载流子限制（第四章）的基础知识，并以 $\text{GaAs-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 为例来具体说明。下册讨论其它可用的材料系统（第五章）、外延生长工艺（第六章）和有关的化学热力学问题；叙述 $\text{GaAs-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 异质结构激光器的制作和实际工作特性（第七章）；介绍沿垂直于结平面方向有载流子限制和光限制的宽面激光器和沿平行于结平面方向还有电流限制的条形激光器；最后讨论影响工作寿命的机理和工作超过 10^5 小时的可能性（第八章）。

§ 1.2 注入型激光器的受激发射和室温连续工作

1. p - n 结受激发射

因为后面几章要详细说明半导体激光器的理论和工艺，所以本节只向读者介绍早期研究工作的情况。1958~1961年提出了用半导体作为激光材料的建议^[1~4]。然而，在伯纳德(Bernard)和杜拉福格(Duraffourg)^[5]给出半导体中受激发射的必要条件之前，人们对半导体中实现受激发射的条件尚无定量的了解。他们指出，对应非平衡电子和空穴浓度的准费米能级差必须大于受激发射能量。第三章推导了这个条件。他们还建议采用Ⅲ-V族化合物半导体，尤其是GaAs和GaSb。韦尔克(Welker)^[6,7]早就说过这些半导体是非常有用的材料。

1960年前后, 激光器的研究工作进展很快, 在电子技术领域中 $p-n$ 结器件的研究工作是进展最快的。这些研究工作的焦点是, 通过 $p-n$ 结注入非平衡载流子来产生受激发射。然而, 如巴丁 (Bardeen)^[8] 所述, 必须注意到冯纽曼 (Von Neumann) 在 1953 年完成但没有发表的工作成果, 他提出了利用 $p-n$ 结注入激发的半导体中的受激发射产生光放大的可能性。

斯克内克塔迪 (Schenectady) 通用电气实验室的霍尔 (Hall)^[9] 回顾了早期研究工作的情况, 提到了第一批报导注入型激光器的文章。1962 年夏之前, 他十分怀疑半导体激光器的可能性。当时, 他持怀疑态度似乎很有道理。普通激光器要求很长的光程, 这似乎与半导体激光器中很强的自由载流子吸收有矛盾。半导体中的跃迁在较宽的能量范围内。而普通激光器中的跃迁则有明确的谱线。然而, 总是发现半导体中的辐射复合效率很高, 这是最重要的一点。霍尔说, 因为伯纳德和杜拉福格^[5] 弄清了受激发射的概念, 并注意到 GaAs 中的辐射复合效率很高这一事实, 他改变了自己的态度。在 1962 年 7 月的固体器件研究会议上, 林肯 (Lincoln) 实验室的凯斯 (Keyes) 和奎斯特 (Quist)^[10] 报导了在 77K 的情况下 GaAs 电致发光的量子效率可能接近 100%。

另一方面^[9], 1961 年在国际商业机器公司 (IBM), 兰多尔 (Landauer)、拉谢尔 (Lasher)、杜姆克 (Dumke) 和凯斯讨论过获得半导体激光器的设想。拉谢尔考虑了波导模式对减小自由载流子吸收的重要性, 杜姆克^[11] 指出了采用直接带隙半导体的重要性。1962 年 3 月, 当通用电话和电子仪器公司 (GT & E) 的梅伯格 (Mayburg) 参观 IBM 实验室并介绍了自己的 GaAs 二极管的工作时, 他们晓得了在 77K 的情况下 GaAs 电致发光的效率可能很高。在 1962 年 3 月的美国物理学会议上, 梅伯格在一篇迟到的文章中介绍了自己的结果。但是, 他的报告显然没有引起科学界的注意。如霍尔^[9] 所述, IBM 的工作人员在听到固体器件研究会议的报告^[10] 之前, 并没有对采用 $p-n$ 结二极管作为半导

体激光器特别感兴趣。

潘科夫 (Pankove) 和马索利 (Massoulie)^[12]的报告、凯斯和奎斯特^[10]的报告和梅伯格的报告,显然是引起对注入型激光器感兴趣的关键,尽管这些报告讲的都是非相干的电致发光。当然,这些报告产生的影响大部分还是由固体器件研究会议的参加者之间的广泛讨论引起的。锡腊丘兹 (Syracuse) 通用电气实验室的霍伦雅克 (Holonyak) 是会议的参加者之一,他研究 $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ 固溶体单晶中的隧道效应,并在 77K 下看到了加正偏压的这种材料的 $p-n$ 结有可见光发射。霍伦雅克回到锡腊丘兹以后,设法用外腔为注入型激光器提供反馈^[18]。

当许多工作人员正在考虑注入型激光器的可能性时,1962年初纳斯莱多夫 (Nasledov) 等^[14]报导了 77K 下 GaAs 二极管的电致发光谱在电流密度为 $1.5 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$ 时变窄的现象。他们没有利用谐振腔,因而不清楚是否产生了受激发射。霍尔^[9]决定采用由两个镜面构成的谐振腔,镜面是在 GaAs 晶体上抛光的垂直于扩散 $p-n$ 结平面的端面。1962年9月霍尔等^[15]确实看到了加正偏压的 GaAs $p-n$ 结的相干光发射。根据波长约为 $0.84 \mu\text{m}$ 的发射光谱变窄和发射远场图的特点,断定是受激发射。习惯上把由单一半导体材料组成的激光器称为同质结构激光器。在国际商业机器公司,内森 (Nathan) 和他的同事们看到了腐蚀台面的 GaAs 二极管在 77K 的情况下谱线变窄的事实。内森向霍尔^[9]报告说,他们检查了第一个看到注入受激发射谱线变窄的二极管,发现该二极管具有谐振腔,此系纯属偶然。他们的文章是在10月发表的^[16]。

固体器件研究会议以后,霍伦雅克在衬底上化学汽相淀积 $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ 层,并向该层内扩散锌,制作了 $p-n$ 结二极管。他采纳了霍尔^[18]的意见,利用晶体本身形成的谐振腔。继霍尔等^[13]之后,霍伦雅克和贝瓦奎 (Bevacqua)^[17]在 77K 的情况下实现了时间暂短的注入受激发射。这项工作的特点是,首次制作了 III-V

族固溶体的注入型激光器，并采用了发射可见光 ($0.71\mu\text{m}$) 的组分。霍伦雅克和贝瓦奎的文章是在10月发表的，紧接着在11月初发表了林肯实验室的奎斯特和他的同事们的文章^[18]，他们报导了用光强-电流特性和光谱变窄表示的4.2K 和77K 的受激发射。

除内森等^[16]的二极管外，这些早期的注入型激光器都是矩形或梯形的小条，小条是由 GaAs 或 $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ 小片切成的，而小片具有两个抛光的平行的端面。在切成小片的材料内具有 $p-n$ 结，这是事先将 p 型杂质向 n 型材料内扩散形成的。抛光的端面垂直于 $p-n$ 结平面，这就形成了相当于小型法布里-珀罗 (Fabry-Perot) 干涉仪的谐振腔。这种谐振腔可以提供如普通激光器那样的反馈，因为在晶体上抛光的端面好象部分反射镜。通常是选择放大谐振腔内的一个或几个模式而产生受激发射。

霍伦雅克^[18]用更好的办法制作了法布里-珀罗腔，即沿平行的晶面解理成两个平行的平面反射镜。但是，他的材料难于解理，还是匆忙改用了抛光的端面，并在1962年夏第一次实现了注入受激发射。邦德 (Bond) 等^[19]在1963年最先报导了端面是解理面的注入型激光器。现在通常使结平面平行于晶体的 $\{100\}$ 面，故 $\{110\}$ 自然解理面垂直于结平面。端面是解理面的同质结构激光器如图1.2-1(a) 所示，这里给出的尺寸是同质结构和其它更复杂的注入型激光器的典型尺寸。

在证明了同质结构激光器中的 $p-n$ 结受激发射之后，紧接着是一个活跃的时期。在1963年6月的固体器件研究会议上，有一段时间专门讨论激光二极管，其中报导了 InAs 和 $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ ^[20] 及 InP ^[21] $p-n$ 结的受激发射，还有介绍效率^[22]和阈值^[23]的文章。梅伯格^[24]估计了温度对阈值电流的影响，恩格勒 (Engeler) 和加芬克尔 (Garfinkel)^[25]和皮尔库恩 (Pilkuhn) 等^[26]也研究了这个问题，发现实验的 T^8 关系与计算的 $T^{3/2}$ 关系不一致。1964年报导了 $\text{InP}_x\text{As}_{1-x}$ 的受激发射^[27]。1963年和1964年共有9篇评述文章^[28~36]。1964~1966年又增添了几种新材料的注入型激光

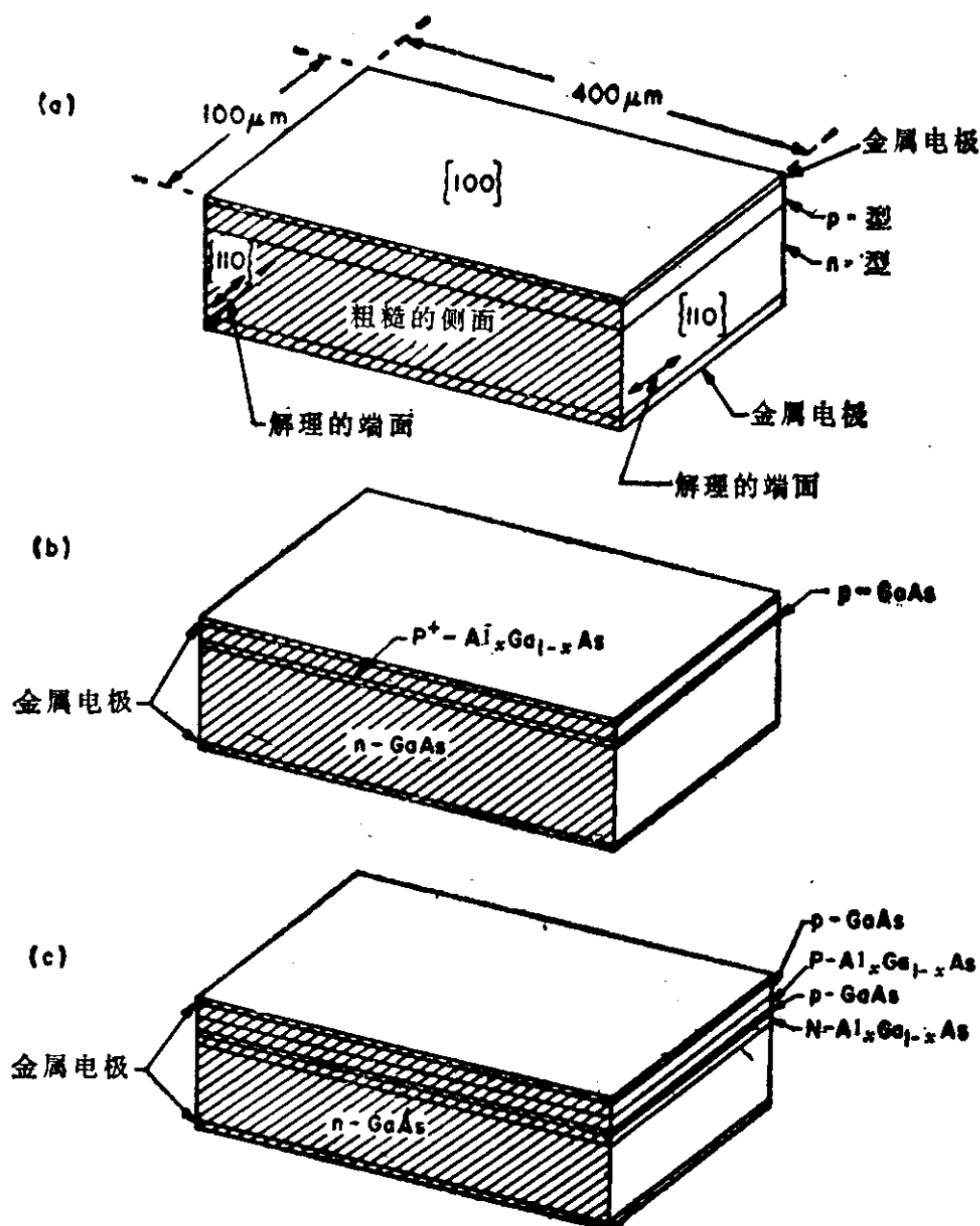


图 1.2-1

(a) 同质结构激光器，半导体上两个解理的端面作为法布里-珀罗腔的两个镜面，典型长度和宽度为 $400\mu\text{m}$ 和 $100\mu\text{m}$ ；(b) 单异质结构激光器， $p\text{-GaAs}$ 层的厚度约为 $2\mu\text{m}$ ；(c) 双异质结构激光器， $p\text{-GaAs}$ 有源层的厚度通常小于 $0.5\mu\text{m}$ 。

器，如IV-VI族化合物^[37]是令人感兴趣的新材料。另外，这个时期还有许多关于器件设计和诸参量对光学性质的影响的文章，以及讨论注入型激光器的潜在应用的文章。内森^[38]评述了这方面的工作。

同质结构注入型激光器有一个共同的致命弱点，即室温受激发射的阈值电流密度特别高，通常 $\geq 50000\text{A}/\text{cm}^2$ 。绝大多数研究

工作是在液氮温度 (77K) 或更低的温度下进行的。虽然戴门特 (Dymant) 和戴阿萨罗 (D'Asaro)^[39] 在1967年利用良好的热沉实现了温度高达 205K 的连续工作, 但是室温连续工作是没有希望的。可以把注入电流限制在沿激光器长度方向的一个窄条之内, 这个办法会降低工作电流, 并有利于散热。如第七章所述, 各种各样的条形结构后来成为几乎全部实际异质结构激光器的重要特点。同质结构激光器的工作方式是短脉冲 ($\leq 1 \mu\text{s}$) 和低占空比 ($< 0.1\%$) 工作。现在认识到室温阈值电流密度特别高是同质结构激光器的固有性质对以后是有好处的。

2. 室温阈值电流密度的降低

1962年蜂拥而上的同质结构激光器的工作, 1965年以后已接近尾声, 这些工作基本上没有实现阈值电流密度的降低。克罗默 (Kroemer)^[40] 在1963年建议, 把一个窄带隙半导体夹在两个宽带隙半导体之间, 利用这样的结构可以得到改进的结型激光器。这两种不同半导体的结称为异质结。希望在窄带隙半导体中产生高效率的辐射复合。克罗默的文章显然没有受到制作注入型激光器的人们重视。阿尔费略夫 (Alferov) 和卡扎里诺夫 (Kazari-nov)^[41] 在1963年也提出了相同的建议。他们的建议实际上从未发表, 故科学界无法知道。

当初建议在注入型激光器中采用异质结时, 并没有掌握足够的知识为选择一对合适的形成异质结的半导体材料提供依据。克罗默提出的一对半导体是, 宽带隙材料为 GaAs, 窄带隙材料为 Ge。阿尔费略夫^[42, 43] 提出 $\text{GaAs-GaP}_x\text{As}_{1-x}$ 异质结, 并进行了一系列的研究工作。但是, 这些努力没有得到低阈值的激光器。这些研究工作碰到的主要困难似乎是晶体质量不好, 这是由形成异质结的两种半导体的晶格失配引起的。不幸的是, 当磷浓度高到可以提供有用的宽带隙时, $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ 与 GaAs 的晶格匹配不好。

1967年6月, 国际商业机器公司的伍德爾 (Woodall) 和

他的同事们^[44]报导了用液相外延 (LPE) 在 GaAs 上生长 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 。这个生长工艺与美国无线电公司 (RCA) 的纳尔逊 (Nelson)^[45] 首先报导的在 GaAs 上生长 GaAs 相似, 但是在工艺上肯定要大改才行。因为 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的带隙随 AlAs 组分 x 增大, 所以 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 发光二极管的发射波长比 GaAs 二极管稍短。因为 GaAs 和 AlAs 的晶格常数近似相同, 所以能够得到高质量的外延层。几个月以后, 恰在 1967 年 11 月的电气和电子工程师协会 (IEEE) 半导体激光器会议之前, 鲁普雷希特 (Rupprecht) 等^[46] 报导了这项工作。在这次会议上发表的文章中, 没有一篇主要讨论降低阈值电流密度的文章。然而, 鲁普雷希特等^[47] 发表了由他们早期的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 发光二极管的工作发展到 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 同质结构激光器的文章。

虽然在两次会议上介绍的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的工作没有引起如 1962 年对电致发光的文章那样展开卓有成效的讨论, 但是国际商业机器公司的那个小组却一直没有放松自己的努力。贝尔实验室的帕尼什 (Panish) 和哈雅希 (Hayashi) 出席了激光器会议。他俩刚搞半导体的工作。帕尼什搞过化学热力学, 哈雅希搞过核测量仪器。帕尼什研究过杂质在溶液生长的 GaAs 中的特性, 并和他的同事们^[48] 在 1966 年报导了 LPE 生长的 GaAs 比熔体生长的材料光致发光效率高的结果。哈雅希和帕尼什决定合作研究注入型激光器, 旨在降低室温 (300K) 阈值电流密度 J_{th} 。这次合作曾蒙贝尔实验室的固体电子学研究室主任 J. K. 高尔特 (Galt) 的鼓励。充分降低 300K 的 J_{th} 可以实现室温连续工作, 高尔特坚决相信这样的成果对建立大容量光通信系统的可能性具有重要意义。

在 1967 年半导体激光器会议前的几周里, 哈雅希注意到在注入型激光器中利用异质结限制载流子可以得到好处。考虑了若干对 III-V 族半导体^[49], 但是没有意识到 GaAs 与 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的晶格常数基本相同。哈雅希还研究了 GaAs 中带尾的形状对注入载

流子分布的影响^[50]。为了降低室温阈值电流密度,哈雅希和帕尼什考虑的主要问题是通过掺杂来调整带尾的形状。

根据帕尼什等^[48]在1966年得到的结果,哈雅希和帕尼什决定采用液相外延。他们去出席激光器会议时还不知道有克罗默在1963年写的文章和鲁普雷希特刚发表的文章。鲁普雷希特在会议上的谈话中主要强调用 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 同质结构激光器可以得到较短的波长。但是,他也指出了 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 与 GaAs 的晶格匹配特别好。鲁普雷希特的谈话促使哈雅希和帕尼什修改了他们的降低激光器阈值电流密度的办法。他们精通液相外延,而且已经有了采用异质结可以得到好处的一些想法。有理由期望晶格匹配的 $\text{GaAs}-\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 异质结可以提供限制电子扩散的有效势垒。哈雅希根据注入载流子扩散和能量分布的考虑提出了载流子限制有助于降低激光器阈值的建议。

出席激光器会议的直接收获是,帕尼什和萨姆斯基 (Sumski)^[51]对未知的 $\text{Al}-\text{Ga}-\text{As}$ 液相与 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 固相的平衡关系的研究,以及利用这些关系在 GaAs 上生长 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 外延层。哈雅希和帕尼什合作的结果是得到了低阈值的激光器,室温阈值电流密度为 $8.6 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$ ^[52,53]。该激光器的结构如图 1.2-1(b) 所示,它有一个在 $n\text{-GaAs}$ 衬底上生长的重掺锌的 $P\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层。在生长或接着退火的过程中,锌扩散到 GaAs 衬底内,形成了离开异质结约 $2 \mu\text{m}$ 的 $p\text{-}n$ 结。正如以后各章详细介绍的那样,异质结提供的势垒把注入电子限制在 $\text{GaAs } p\text{-}n$ 结的 p 区之内。哈雅希和帕尼什在1968年中得到了比同质结构激光器低的室温阈值,到年底时他们觉得取得了突破,可以用锌扩散技术和选择适当的衬底材料来降低阈值电流密度。1969年1月他们写出了文章,相信自己最先提出并制作了异质结构激光器。事实上并非如此:第一,一位评论家指出,列举的参考文献遗漏了克罗默在1963年写的文章;第二,克雷塞尔 (Kressel) 和纳尔逊^[54]介绍了基本相同的激光器,文章已在3月出版的《美国无线电公

司评论》(RCA Review)上发表。哈雅希和帕尼什的文章^[52,53]是在1969年4月问世的,接着在1970年发表了更详细的文章^[55]。预计到以后还会有更复杂的结构,故他们建议把这种激光器称为单异质结构(SH)激光器^[55]。

当帕尼什和哈雅希及克雷塞尔和纳尔逊致力于SH激光器时,列宁格勒(Leningrad)约飞(Ioffe)物理研究所的阿尔费略夫和他的同事们也开展了GaAs-Al_xGa_{1-x}As的工作。他们在1968年报导了GaAs-Al_xGa_{1-x}As *p*-*N*异质结注入的研究结果^[56],并在1969年9月发表的文章^[57]中报导了300K的阈值电流密度为 $4 \times 10^3 \sim 13 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$ 。他们研究的激光器结构如图1.2-1(c)所示。该结构是在*n*-GaAs衬底上生长的,*p*-GaAs层夹在*N*-Al_xGa_{1-x}As层和*P*-Al_xGa_{1-x}As层之间,能够把光和载流子都限制在甚薄的*P*-GaAs层之内。

哈雅希和帕尼什在其1968年的SH激光器研究的最后阶段内,也独立开展了图1.2-1(c)所示的多层结构的工作。他们称这种激光器为双异质结构(DH)激光器。1970年初,他们把300K的阈值电流密度降低至 $2.3 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$ ^[58]。1970年春,他们又把300K的阈值电流密度降低至 $1.6 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$,并在利用热沉的情况下实现了热沉温度高达311K的连续受激发射。为了得到清楚证明实现了室温连续受激发射的光谱和光强-电流曲线,他们作了很大的努力。1970年6月,在西雅图(Seattle)和华盛顿(Washington)的器件研究会议上,哈雅希^[59]首次公开介绍了这项研究工作。6月初写出报导这项研究工作的文章^[60]寄给《应用物理通信》(Applied Physics Letters),刊登在8月1日出版的杂志上。哈雅希和帕尼什这次又以为他们取得了第一。然而,1970年9月出版的《半导体物理与技术》(Физика и Техника полупроводников)刊登了阿尔费略夫和他的同事们5月份写的文章^[61],他们在这篇文章中声称DH激光器实现了室温连续受激发射。

自首次证明注入型激光器实现了室温连续工作以来,直到1973年尚有一些非议的论调,说这种激光器因其功率太小而“不值得注意”^{〔62〕}。但是,在世界上的许多实验室里,仍然对 DH 和更复杂的异质结构激光器进行了大量的研究工作。后来,把这些激光器放在系统中进行了研究,以便在光纤通信系统中广泛应用。为了使器件的工作参量最佳化,对激光器的结构作了许多修改,但是概念保持不变。为了扩展激光器的波长范围,提供了许多新材料。改进 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 系统的生长和制作工艺以后,得到了寿命特别长的激光器。看来很清楚,在今后一段时间内,异质结构激光器仍然是研究工作的重心。

§ 1.3 注入型激光器的工作原理

1. 波导

在注入型半导体激光器中,光的限制和导行是用介质波导实现的。具有折射率 $\bar{n}_1$ 、 $\bar{n}_2$ 和 $\bar{n}_3$ 的三层介质波导如图1.3-1(a)所

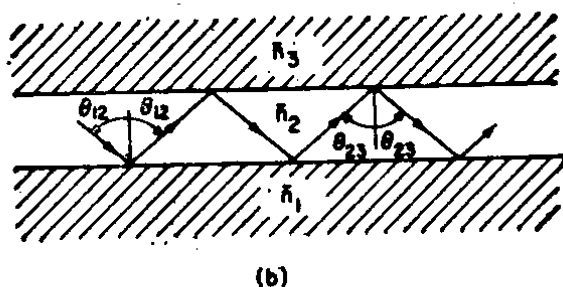
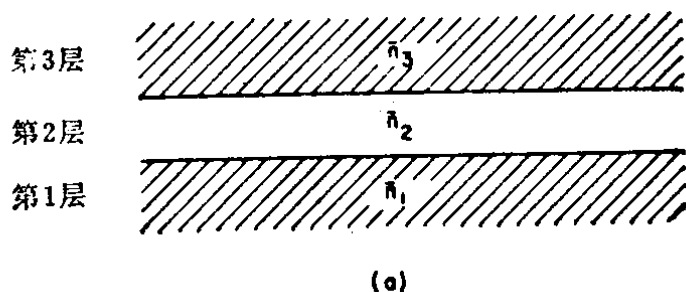


图 1.3-1

(a) 三层平板介质波导的示意图; (b) 导波光线轨迹,

光线角 θ 是光线轨迹与界面法线的夹角。

示。在第二章中可见，波导成立的条件是

$$\bar{n}_2 > \bar{n}_1 \geq \bar{n}_3 \quad (1.3-1)$$

根据这个条件，图1.3-1(b)所示的1-2层界面上的光线角 θ_{12} 大于临界角

$$\theta_c = \sin^{-1}(\bar{n}_1/\bar{n}_2) \quad (1.3-2)$$

对于2-3层界面，可以写出相似的公式。当满足式(1.3-1)表示的条件时，电磁辐射流沿平行于界面的方向导行。

在同质结构激光器中，中间波导层与低折射率的毗邻层的折射率差只有0.01~0.03，这个小的折射率差是由 n 区与 p 区的折射率差、温度梯度及注入载流子和增益引起的折射率变化决定的。在异质结构激光器中，每个异质结上的折射率阶跃可能很大，因而能够建立一个完全明确的波导。在这种情况下，可以根据波导的尺寸和折射率计算其中的光场分布。

2. 增益和阈值

通过 p - n 结注入的少数载流子，可以辐射复合，也可以非辐射复合。辐射复合产生的光子，可以与价带内的电子相互作用而被吸收，也可以与导带内的电子相互作用而受激发射相同的光子。注入载流子浓度高到足以使受激发射超过吸收时产生光增益。为了实现振荡，要求有一部分辐射正反馈，该反馈通常由垂直于波导轴线的一对解理面提供。两个解理面之间的单程增益等于该距离上的总损耗时产生振荡。内部损耗 α_i 通常是由自由载流子吸收和光学不均匀散射引起的。小于1的端面反射率 R 对损耗也有贡献，写作 $(1/L)\ln(1/R)$ ，其中 L 是腔长。在第七章中可见，室温 GaAs 的增益系数为

$$g(\text{cm}^{-1}) = 5.0 \times 10^{-2} [(J\eta/d) - 4.5 \times 10^3] \quad (1.3-3)$$

其中 J 是电流密度， η 是量子效率， d 是以 μm 为单位的均匀激发区厚度。阈值增益必须等于损耗，即

$$g\Gamma = \alpha_i + (1/L)\ln(1/R) \quad (1.3-4)$$

式中限制因子 Γ 是辐射在均匀激发区内的比率。将式(1.3-3)和