

当代科技重要著作·信息领域

半导体光电子技术丛书

半导体注入型激光器(II) 与发光二极管

〔美〕 W. T. TSANG 主编

杜宝勋 等译 江剑平 校



清华大学出版社
电子工业出版社

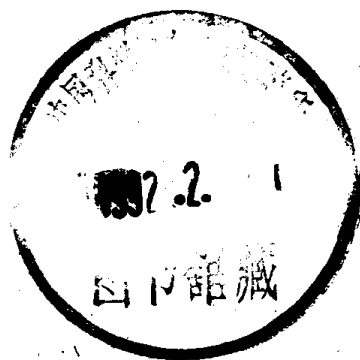
73.7717
393

半导体光电子技术丛书

半导体注入型激光器(II) 与发光二极管

[美] W. T. TSANG 主编

杜宝勋等译 江剑平校



清华大学出版社
电子工业出版社

9210033

DT11/08
内 容 摘 要

本书是《半导体光电子技术》丛书中的第二册，共七章。前四章介绍了半导体激光器的结构及性能、横模稳定方案，半导体激光器发射机的功能可靠性以及波长超过 $2\mu\text{m}$ 的半导体激光器。后三章介绍了发光二极管器件设计、发光二极管的可靠性及其在传输系统中的应用。第八章专门讲述了模式分配噪声。该书对我国从事半导体光电子技术的科研、教学及工程技术人员是一本有益的参考书。

半导体光电子技术丛书
半导体注入型激光器(I)与发光二极管

〔美〕 W. T. TSANG 主编

杜宝勋等 译 江剑平 校

☆

清华大学出版社 出版
电子工业出版社

北京昌平第一排版厂排版

中国科学院印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

☆

开本：850×1168 1/32 印张：11.75 字数：305 千字

1991年5月第1版 1991年5月第1次印刷

印数：0001~1500

ISBN 7-302-00838-8/ TN·25

定价：8.50 元

半导体光电技术丛书

编 审 组

王启明 周炳琨 杜宝勋

江剑平 孙宝寅 吴金生

出版前言

由美国AT&T贝尔实验室W.T.TSANG主编的《光通信技术》丛书是一套在世界享有声誉的学术专著。该套丛书共分七册，前五册讨论的是半导体光电子技术，载入《半导体与半金属》第22卷，后两册讨论的是光纤技术及传输系统，载入《光纤通信》论文集。现在我们出版了前五册的中文版，并将原书各册的顺序作了调整，旨在介绍国外光电子技术领域研究的新成果，并定名为《半导体光电子技术》丛书。它包括：

- 第一册 半导体注入型激光器（I）
- 第二册 半导体注入型激光器（II）和发光二极管
- 第三册 半导体光检测器
- 第四册 半导体集成光电子学
- 第五册 半导体材料生长技术

原书由美国、日本、法国的38位专家撰稿，全面、系统地总结了近20年来半导体光电子材料、器件与集成技术研究方面的重要成果，既有理论和技术的论述，又提供了大量的数据、资料，对我国从事半导体光电子技术的教学、科研及工程技术人员，将是一套具有借鉴和启迪作用的参考书。

本书得以出版，要感谢国家高技术光电子专家组的推荐与支持，感谢杜宝勋副研究员、江剑平副教授在组织这套丛书的翻译及审校方面所作的大量工作。欢迎读者对本书存在的缺点和错误给予批评指正。

1990年3月

原 书 序 言

当印第安人利用烟火传递信息时，便蕴育着现代光通信的想法。当时由一个山顶上放出断断续续的青烟就是一种数字信号；这信号是以青烟的出现与消失为编码，确实是二进制的。光是信息载体，空气是传输介质，人眼是光检测器。信号由一个山顶传向另一个山顶，其作用相当于是信号的再放大，正如今天的中继器。1880年，亚历山大·格拉汉·贝尔采用太阳光束作为载体将声音信号传递了200米以上的距离，称之为光话。远在这个历史性实验之前，人类就设计并使用了光通信。然而直到1977年才敷设了第一个商用光通信系统。这项新技术的完善，包括研制坚固耐用的近红外光源—可对信息进行调制，低损耗的传输介质，灵敏的光检测器—可无误地恢复并再现光源发出的信息。

1958年，激光器的问世及演示性实验在光通信方面立即引起了新的兴趣和广泛的研究，然而光通信实用化的美好前景，只有当三个主要技术问题日趋成熟后才展现出来。第一个技术问题是1962年研制成功电流注入型半导体激光器，1977年可做到其连续工作寿命达一百万小时以上；第二项技术是在1970年获得了光损耗为20dB/km的掺杂石英光纤，证实了高纯石英与同类介质相比具有最低的光损耗。1973年发现，经过适当热处理的掺硼石英的折射率低于高纯石英的折射率。最近又研制成功了超低损耗(0.12 dB/km)的掺铈石英光纤；第三项技术是在七十年代研制成功了低噪声光检测器，它使超高灵敏度光接收机变为现实。可以说，高可靠的注入型半导体激光器、低损耗光纤及低噪声光检测器的研究进展，促进了光波通信技术的实用化，并显示出了比普通的

• v •

9210033

电传输系统的优越性。

由于光纤通信涉及到许多技术问题，包括电通信系统、玻璃及半导体光电子技术等，在过去的20年内人们进行了大量的研究工作，我们试图在这套丛书中总结所积累的知识，并定名为《光波通信技术》。这套丛书由七册组成，前五册讨论半导体光电子技术；据其内容载入《半导体与半金属》；而后两册，一册是讨论光纤技术，另一册是讨论传输系统，他们被载入 T. Y. LI 和 W. T. TSANG 编著的《光纤通信》。

本卷第一册讨论半导体生长技术，详细说明了各种 III-V 族化合物半导体的外延生长技术和材料缺陷，包括液相外延、分子束外延、常压和低压金属有机化学汽相沉积、以及卤化物和氯化物输运汽相沉积。每种技术单独成章，而半导体材料缺陷则另有一章专门讨论。

本卷第二册和第三册讨论光谱范围为 $0.7-1.6\mu\text{m}$ 和 $2\mu\text{m}$ 以上的注入型激光器和发光二极管的制作、特性和应用。具体地说，第二册各章包括半导体激光器的动态特性与亚皮秒脉冲锁模、高速电流调制和光谱特性、动态单频分布反馈激光器和解理耦合腔半导体激光器。第三册各章介绍的有关内容是，半导体激光器方面的是评述激光器结构及其性能比较、横模稳定方案、半导体激光器发射机的功能可靠性以及波长超过 $2\mu\text{m}$ 的半导体激光器。发光二极管方面的讨论分为三章，即发光二极管器件设计、发光二极管的可靠性及它在传输系统中的应用。第二册和第三册应被视为一个整体，而不是分别独立的两册。

本卷第四册专门讨论光检测技术，详细地介绍了雪崩光二极管的原理，采用 Si、Ge 和 III-V 族化合物制作的雪崩光二极管及光晶体管。还有一章讨论用于高速率长波长光通信系统的雪崩光二极管接收机的灵敏度。

本卷第五册讨论集成光电子学和半导体光电子器件的其它应

用，详细说明可以集成的有源和无源光器件的原理和性能以及集成光电子器件的性能。还有一章讨论半导体激光器在光传输系统中作为光放大器的应用，这是其最新应用的一个示例。

由于题材不同，本丛书的后两册载入不同的论文集为宜。讨论光纤技术的一册，包括光纤的设计和制作、光学特性及非线性光学等。最后一册讨论光传输系统，包括光波系统基础，光发射机和光接收机设计理论，半导体激光器在相干光传输系统中的频率调制和相位调制。

所以，这套包括七册的丛书全面地讨论了整个光波通信技术。丛书的每位作者均来自从事该领域研究和发展的单位。

作为一名客座编辑，我衷心感谢 R.K. Willardson 和 A.C. Beer，他们给了我一个宝贵的机会，把这样一个重要的、具有爆炸性的技术在《半导体与半金属》上介绍给读者。我也衷心感谢诸位作者及其所在的单位，正是在他们的努力和支持下本丛书才得以问世。最后，我要向 AT & T. Bell 实验室为完成此项工作所提供的一切方便和必要的条件表示敬意，也向 C.K.N. Patel 为本丛书撰写前言表示敬意。

W. T. Tsang

目 录

| | |
|---|-----|
| 第一章 InGaAsP/InP 激光器的结构和特性 | 1 |
| I 引言..... | 2 |
| II 异质结构激光器的特性..... | 6 |
| III 阈值电流的温度关系..... | 14 |
| IV 增益波导激光器..... | 27 |
| V 折射率波导激光器..... | 35 |
| 参考文献..... | 59 |
| 第二章 模式稳定的半导体激光器 | 65 |
| I 引言..... | 65 |
| II 侧向模式控制..... | 66 |
| III 纵向模式控制..... | 78 |
| IV 结束语..... | 94 |
| 参考文献..... | 94 |
| 第三章 波长大于$2\mu\text{m}$的半导体激光器 | 99 |
| I 引言..... | 99 |
| II 半导体材料..... | 101 |
| III 晶体生长和激光器的制作..... | 109 |
| IV 激光二极管的特性..... | 128 |
| 参考文献..... | 156 |
| 第四章 半导体激光器光发射机的功能可靠性 | 164 |
| I 引言..... | 164 |
| II 实验条件..... | 168 |

| | | |
|------------|--------------------------------------|------------|
| III | 45Mbit/s 的 AlGaAs 系统寿命测试的结果····· | 171 |
| IV | 旨在改进设计的功能寿命测试····· | 183 |
| V | 用于空间通信的 AlGaAs 激光器发射机的功能可 靠性····· | 196 |
| VI | 结束语····· | 200 |
| | 参考文献····· | 202 |
| 第五章 | 发光二极管器件设计 ····· | 206 |
| I | 引言····· | 207 |
| I | 发光二极管的结构····· | 207 |
| II | 发光二极管的功率和调制带宽····· | 212 |
| IV | 发光二极管器件的特性····· | 226 |
| V | 发光二极管与光纤的耦合····· | 235 |
| VI | 双波长发光二极管····· | 247 |
| VII | MBE 和 VPE 制作的发光二极管····· | 249 |
| VIII | 结束语····· | 249 |
| | 参考文献····· | 250 |
| 第六章 | 发光二极管的可靠性 ····· | 256 |
| I | 引言····· | 257 |
| I | LED 的寿命试验····· | 261 |
| II | GaAs/GaAlAs LED 的加速老化结果····· | 262 |
| IV | GaAs/GaAlAs LED 的快速退化机理····· | 269 |
| V | GaAs/GaAlAs LED 的缓慢退化····· | 282 |
| VI | InP/InGaAsP LED 的加速老化结果····· | 286 |
| VII | InP/InGaAsP LED 的退化机理····· | 291 |
| VIII | 结束语····· | 300 |
| | 参考文献····· | 301 |
| 第七章 | 用于多模光纤系统的 LED ····· | 307 |
| I | 引言····· | 307 |

| | | |
|-------|------------------------------|-----|
| I | 多模光纤的特性····· | 308 |
| II | 系统设计的考虑····· | 313 |
| IV | 系统实验和现场试验····· | 319 |
| V | 结束语····· | 324 |
| | 参考文献····· | 325 |
| 第八章 | 半导体激光器的噪声：模式分配噪声····· | 329 |
| I | 引言····· | 329 |
| II | 模式分配噪声的简单模型····· | 330 |
| III | 模式分配噪声的分析····· | 331 |
| IV | 模式分配系数： k 值····· | 342 |
| V | 理论 k 值：各纵模之间有无相互作用的情况····· | 345 |
| VI | 模式分配噪声的统计测量····· | 353 |
| VII | 光注入锁模对模式分配噪声的影响····· | 356 |
| 附录 I | ····· | 360 |
| 附录 II | ····· | 361 |
| | 参考文献····· | 362 |

第一章 InGaAsP/InP 激光器的 结构和特性

R. J. Nelson and N. K. Dutta

美国贝尔实验室

杜宝勳 译

| | |
|--------------------------------|----|
| I. 引言 | 2 |
| 1. 1.3—1.6 μ^m 波段的材料 | 3 |
| 2. InGaAsP 的带隙-组分关系 | 4 |
| II. 异质结构激光器的特性 | 6 |
| 3. 异质结 | 6 |
| 4. 受激发射和增益 | 9 |
| 5. 光输出-电流特性 | 12 |
| III. 阈值电流的温度关系 | 14 |
| 6. 阈值温度关系的实验结果 | 15 |
| 7. 俄歇复合: 理论 | 18 |
| 8. 俄歇复合: 实验 | 25 |
| IV. 增益波导激光器 | 27 |
| 9. 电流扩展 | 29 |
| 10. 增益波导 | 29 |
| 11. 阈值电流 | 31 |
| 12. 最高工作温度 | 33 |
| 13. 光输出的非线性 | 34 |
| 14. 调制特性 | 35 |
| V. 折射率波导激光器 | 35 |

| | |
|----------------------|----|
| 15. 介质波导 | 38 |
| 16. 阈值电流 | 46 |
| 17. 最高工作温度 | 53 |
| 18. 光谱特性 | 54 |
| 19. 远场图: 与光纤耦合 | 56 |
| 20. 调制特性 | 57 |
| 21. 高功率激光器 | 58 |
| 参考文献 | 59 |

I. 引 言

全世界已经建立了许多光波通信系统,迄今建立的绝大多数系统采用短波长 ($\lambda=0.82-0.88\mu\text{m}$) 的 GaAlAs/GaAs 激光器作为光源。然而,已经研制成功了长波长 ($\lambda=1.3-1.55\mu\text{m}$) 的光源,这是为了利用石英光纤在该波段的低损耗和低色散。在实验系统中使用 $\lambda=1.3\mu\text{m}$ 的光源,已经实现了速率高达 432Mb/s 的中继距离 65km 的通信 (Cheung *et al.*, 1983)。使用发射波长为 $1.273\mu\text{m}$ 和 $1.330\mu\text{m}$ 的掩埋异质结构激光器,还成功地实现了波分复用 (Kaiser *et al.*, 1983)。使用发射波长为 $1.55\mu\text{m}$ 的单频激光器。光纤在该波长处的损耗最低,已经建立了速率为 420 Mb/s、中继距离为 119km 的通信系统 (Tsang *et al.*, 1983)。这些代表了过去几年内在使用 GaAlAs 激光器的速率 $\sim 90\text{Mb/s}$ 和中继距离 $< 10\text{km}$ 的商用系统之后取得的主要进展,这些进展均取决于石英光纤和 InGaAsP/InP 激光器的飞速发展。

在这一章里,评述 InGaAsP/InP 激光器的结构和性能。不便说哪一种结构是最佳的,因为要为一种具体的应用选择激光器的结构,不仅要考虑应用提出的要求,而且要考虑成本和生产问题。这里介绍各种 InGaAsP 激光器结构,包括增益波导器件和折射率波导器件。在短波长器件中广泛采用的增益波导结构,对于

长波长器件来说更难于最佳化，后面将阐述主要理由。在七十年代中期由日本公司为 GaAlAs 器件发展起来的折射率波导激光器的结构，现在已经成为占绝对优势的长波长激光器的结构。折射率波导激光器与增益波导器件相比，需要更高级的材料生长和制作技术。这里详细介绍这些器件及其工作特性，强调长波长激光器的工作特性与短波长激光器的差异，包括其阈值的温度灵敏度高于 GaAlAs 激光器。

1. 1.3—1.6 μm 波段的材料

一些化合物半导体在近红外波段内发光具有高效率（图1）。

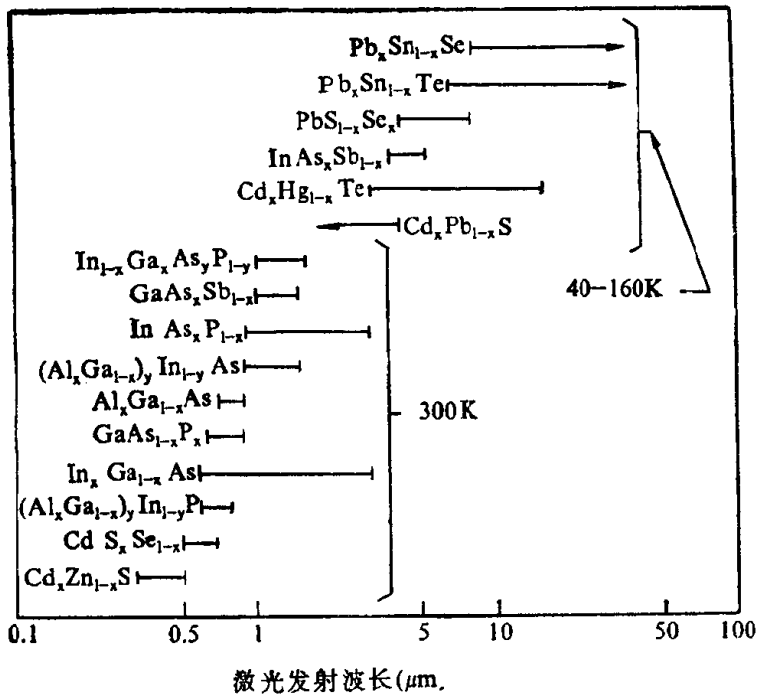


图 1 精选的一些 III-V 族和 IV-VI 族化合物半导体在 300K 下的发射波长。参量 x 和 y 属于 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 。〔引自 Casey and Panish(1978)〕

尤其是：Ⅳ-Ⅵ族和Ⅲ-Ⅵ族化合物材料分别适用于 $>2\mu\text{m}$ 和 $<0.8\mu\text{m}$ 的波长；Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体适用于 $\lambda=0.8-1.65\mu\text{m}$ 波段。虽然有几种Ⅲ-Ⅴ材料的发射波长在 $\lambda=1.3-1.55\mu\text{m}$ 波段内，但是InGaAsP材料是发展最快的。

2. InGaAsP的带隙-组分关系

图2表示InGaAsP材料的带隙-组分关系 (Wright *et al.*, 1977)。该图的四个角分别表示四个二元化合物的带隙；虚线是等晶格常数线，数字表示晶格常数 (\AA)；实线是等带隙能量线，数字表示带隙能量 (eV)。在阴影区外，InGaAsP具有直接带隙的能带结构。在这个直接带隙区内，导带最小值和价带最大值在布里渊区的同一点上，在动量守恒的电子-空穴复合过程中直接产生发射。在阴影表示的间接带隙区内，导带最小值和价

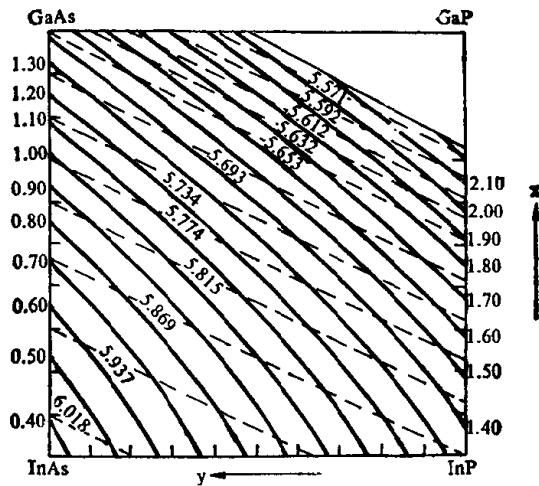


图2 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 的组分图。虚线是等晶格常数线，数字表示晶格常数 (\AA)^{*}；实线是等带隙能量线，数字表示带隙能量。〔引自Wright *et al.*, (1977)〕

* \AA 为非法定单位， $1\text{\AA} = 10^{-10}\text{cm}$ 。

带最大值不在布里渊区的同一点上,因而必须有声子参与电子-空穴复合过程。在间接带隙区内,由辐射复合过程决定的寿命比由杂质参与的无辐射复合过程决定的寿命长几个量级。因此,间接带隙材料的内部辐射复合效率通常低于百分之几。反之,在直接带隙区内,辐射寿命可能与无辐射寿命具有同一量级,甚至更短。因此,辐射效率有可能接近于100% (Nelson and Sobers, 1978b)。发射波长与带隙能量的关系是 $\lambda=1.24\mu\text{m eV}/E_g$ 。与InP晶格匹配的组分对应的发射波长是0.93—1.65 μm ,如图3所示。与数据点吻合的实线可以表示为 (Nahory *et al.*, 1978)

$$E_g(y) = 1.35 - 0.72y + 0.12y^2 \text{ eV.} \quad (1)$$

在1.3 μm 激光器中,通常采用的发光区组分是 $\text{In}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{As}_{0.6}\text{P}_{0.4}$;对于1.55 μm 的器件,则为 $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}_{0.9}\text{P}_{0.1}$ 。

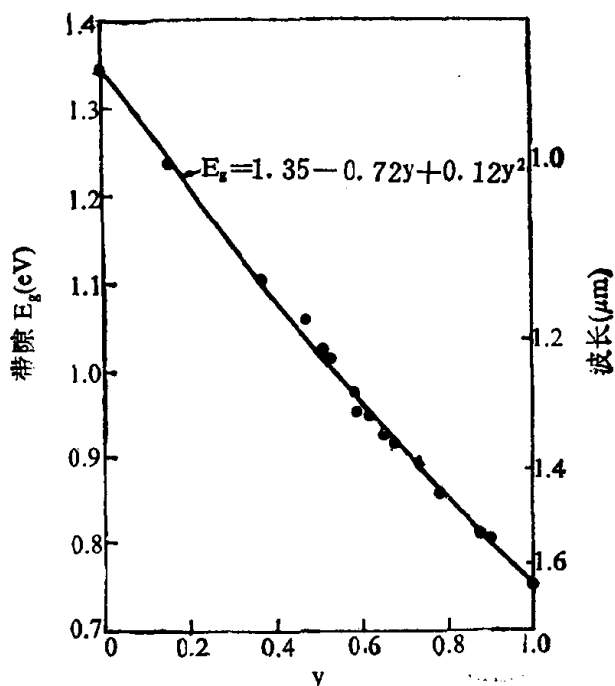


图3 与InP晶格匹配的 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 的带隙-组分图。
〔引自Nahory, *et al.*, (1978)〕

II. 异质结构激光器的特性

典型的 InGaAsP 激光器具有两个异质结，在发光的有源区上下形成边界，提供适当的折射率阶跃以形成介质波导，同时还提供把注入的载流子限制在有源区这个小体积之内的势垒。因此，可以在低电流密度下保持激光作用所必需的高载流子浓度。

3. 异质结

图4表示一个典型的双异质结构激光器，它具有两个不同类型的异质结 (Casey and Panish, 1978)。异型异质结是由两种不同带隙和不同掺杂类型的材料构成的，它与具有相同掺杂水平的 $p-n$ 同质结相比，由宽带隙层向窄带隙层注入少数载流子的注入效率高 $\exp(\Delta E_g/kT)$ 倍， ΔE_g 是异质势垒高度。同型异质结是由两种不同带隙而相同掺杂类型的材料构成的，它提供一个使注入的载流子局域化的势垒，因而在给定的注入电流下形成很高的载流子浓度。同型异质结提供的载流子限制的效果，与异质结势垒高度、宽带隙层厚度、宽带隙层内的少数载流子扩散长度和漂移场强度有关 (Casey and Panish, 1978)。在电子或空穴分布的高能尾内的载流子，其能量大于异质势垒高度，因而不受异质势垒的限制。这些载流子可以漏出有源层，形成一个对有源

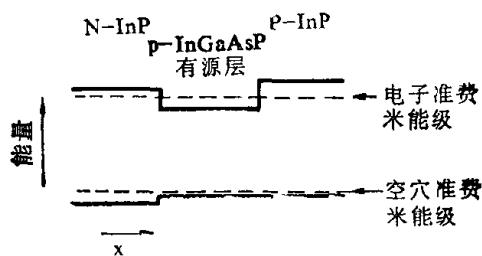


图 4 正向偏置的 InGaAsP/InP 双异质结构的能带图。