

工学硕士学位论文

**垂直腔面发射激光器模式模型的建立
及其特性分析**

杨 浩

北京工业大学

2008 年 4 月

国内图书分类号: TN248.8

单位代码: 10005

学 号: S200502036

密 级: 内 部

北京工业大学硕士学位论文

题 目 垂直腔面发射激光器模式模型的建立及其特性分析

英文并列 STUDY ON THE MODEL AND CHARACTERISTICS OF MODE
题 目 FOR VERTICAL CAVITY SURFACE EMITTING LASERS

研究生姓名: 杨 浩

专 业: 微电子学与固体电子学 研究方向: 半导体光电子学

导师姓名: 沈光地 职 称: 教 授

论文报告提交日期 2008 年 4 月

学位授予日期 2008 年 6 月

授予单位名称和地址 北京工业大学 北京市朝阳区平乐园 100 号 (100124)

独 创 性 声 明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的科研成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京工业大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签名：_____ 日期：_____

关于论文使用授权的说明

本人完全了解北京工业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

签名：_____ 导师签名：_____ 日期：_____

摘 要

垂直腔面发射激光器 (Vertical Cavity Surface Emitting Laser, 缩写为 VCSEL) 在半导体激光器历史中发展虽然较晚, 但是凭借其多方面的优势, 自问世以来便跻身于光通讯、光互联、光交换、光存储以及光打印等诸多领域并在其中发挥着重要的作用。与传统的边发射激光器相比, VCSEL 最特别之处是发射的光束垂直于衬底, 而非传统的侧面发射。VCSEL 独特的物理结构使其具有了许多优点, 如: 阈值低, 效率高, 调制速率快, 单纵模工作, 圆形光斑, 易与光纤耦合, 易于高密度大规模集成, 可实现在片检测等。

然而, 由于自身结构的特殊性, 对这种新兴的优良器件而言, 许多问题仍然亟待解决。首先, VCSEL 谐振腔横向相对较宽, 对光场限制能力较弱, 致使其中常存在多个横模, 不同横模的空间分布不同, 彼此间存在交叠, 从而导致模式间强烈的竞争, 对器件的模式噪声、开关特性等产生较大不利影响。其次, 随偏置电流的增大, 更多高阶模式满足阈值条件而激励, 由其引起的载流子分布变化、空间烧孔现象以及热透镜现象, 都将对激光器的横模特性产生影响。在实际应用中, 由于基横模拥有发散角小、光场强度大等优势, 大部分场合 (光存储、光打印等) 需要 VCSEL 稳定的工作在单模条件下。因此, 为了更好的提高垂直腔面发射激光器的实用性能, 我们必须对其光学输出模式方面的内容进行研究。

本论文在国家“973”项目 (批准号: 2006CB604902)、国家自然科学基金 (批准号: 60506012) 和北京市自然科学基金 (批准号: KZ200510005003) 等项目支持下, 针对 980、850nm 内腔接触式氧化物限制型 VCSEL 的模式特性, 进行了深入的实验研究和理论探索, 最终成功地归纳了 VCSEL 模式方面的相关概念, 建立二维、三维模式分布模型及其交互化界面, 有效折射率模型, 并从半导体激光器的理论上分析, 推导速率方程, 有效地描述出了器件动态的载流子、光子分布以及它们的相互作用, 得到注入孔径、折射率、注入电流、输出波长等因素对垂直腔面发射激光器模式特性的影响, 为 VCSEL 器件性能、结构的优化提供了一定的理论依据。

本论文的具体研究工作概括如下:

- 1、掌握垂直腔面发射激光器的横模、纵模等相关理论, 并概括、总结其与边发射激光器在模式方面的主要区别和存在的主要问题。从模式偏振的角度出发, 深入分析 VCSEL 所特有的 LP(Linearly Polarized)模式理论, 并定义了圆柱弱波导的线性偏振模式。同时从实验和理论的角度分析了频率分裂等重要激光特性问题。
- 2、首次从理论上推导垂直腔面发射激光器的模式分布数学表达式, 对其中涉及

到的第一类贝塞尔函数、第二类变型贝塞尔函数进行模拟计算，分别利用三层波导结构、圆柱弱折射率导引结构建立垂直腔面发射激光器的模式分布模型，并使用 MATLAB 软件编写了圆柱弱折射率导引结构的可操作界面，为直观的观测注入孔径、折射率等因素对模式分布的影响提供了有力的帮助。

- 3、利用传输矩阵法推导有效折射率模型，实现在模拟输出激光器驻波场分布的同时准确的计算出芯层、包层折射率值，为分析折射率对模式分布的影响提供了理论依据。本文首次利用有效折射率模型，计算得到单有源区 980nm 以及双有源区 980nm VCSEL 的折射率值，提出截止频率的概念，证明了隧道级联多有源区结构不仅仅有效地降低了阈值电流，提高了输出功率，而且改善了 VCSEL 的模式特性。
- 4、深入分析注入孔径、注入电流、芯层和包层折射率、输出波长等因素对 VCSEL 模式特性的影响。通过推导时空分离的速率方程，有效地描述出了器件动态的载流子、光子分布以及它们的相互作用，以此对空间烧孔现象、热透镜现象以及模式分布变化进行了有效的分析与证明，同时实验和模拟结果吻合的非常好。
- 5、分析在实验测试 VCSEL 远场、近场分布时所遇到的模式问题。由于之前制造的 VCSEL 器件主要改善、针对的是激光器阈值电流、输出功率等方面的性能，所以实验室目前存在的 VCSEL 氧化限制型注入孔径相对较大，这对研究 VCSEL 模式特性造成了一定的难度。本章对测试过程中遇到的问题进行分析，如模式光场分瓣不清楚等情况，提出解决问题的方法，并从理论上提出了例如多有源区、光子晶体等改善 VCSEL 模式特性、实现单横模激射的方法。

通过本论文的工作，全面完成了国家“973”、国家自然科学基金和北京市自然科学基金等科研任务中 VCSEL 模式方面的研究工作，理论上建立了有效折射率、模式分布、速率方程等多个模型，实验上对照模拟结果分析了模式的分布情况，并对影响模式分布的相关因素进行总结，为改善 VCSEL 模式特性提供了理论上的依据。此期间共发表论文 5 篇，以第一作者发表论文 SCI 收录 1 篇，另外有 1 篇 SCI 论文已接收，以第一作者编写了“垂直腔面发射激光器光场分布模拟软件 V1.0”，获得软件著作权（登记号 2008SRBJ0974）

关键词：模式；垂直腔面发射激光器；有效折射率；速率方程；

Abstract

Vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) is researched as the promising application for many advantages and it is a potential device for optical communication, laser printing, optical sensing and so on. Compared with the conventional edge emitting lasers, the unique point of VCSEL is that the lasing light emits outside perpendicular to the substrate. This special physical structure provides VCSEL with many advantages, such as low threshold current, high efficiency and high modulation velocity, small and circular divergence angle. It is easily coupled with fibers, integrated in big scale and could be tested on wafer level.

However, there are several problems to this novel device because of the particularity of structure. First of all, the transverse size of resonant cavity is wide and the restriction of the optical field is so weak that much more modes can exist at the same time, while the distributions of modes are different and they usually have an area or a range in common with each other, so the strong competition of modes will be caused and it is bad for the switching characteristic. Secondly, most of the high-order modes will be enhanced with the injection current increased, and the change with distribution of carrier density results to the phenomena such as spatial hole burning or thermal lensing effects, which deteriorate the property of mode. Generally speaking, most of devices of the VCSEL need the higher output power in single mode for better performance, so we must do some research about the mode in order to improve their practicability.

Supported by 973 project (Grant No:2006CB604902)、National Natural Foundation of China and Beijing (Grant No: 60506012), the mode of VCSEL was investigated and several models were founded such as the spatial distribution of mode, effective indexes and so on. Depending on the theoretics of laser, the spatio-temporal rate equation was solved and the distribution of carrier can be explained effectively. Then we discussed the factors that affect the mode characteristic, and some measures were hold about the optimization for structure.

The main work can be summarized as following:

1. The conceptions of mode were summarized and the difference of mode between VCSEL and the conventional edge emitting lasers was discussed, then according to the theoretics of polarization, we acquired the conception about LP mode that belong to VCSEL, and the weakly index

guiding structure was defined. At last, some problems about the mode were solved such as the split of frequency.

2. The expression of mode for VCSEL was calculated and the contents of it referred as the Bessel functions were simulated at the same time. Then the model of the distribution of mode was founded using the weakly index guiding structure and three slabs waveguide structure, then we build the operable interface in order to observe the factors that affect the distribution of mode.
3. The indexes of the core and cladding regions also play important roles to the characteristic of mode for VCSEL, and according to the transfer matrix method, the values of indexes can be calculated accurately. The effective indexes of the single-active-region 980nm VCSEL and double-active-region 980nm VCSEL were simulated and we found that the double-active-region structure took advantage of mode.
4. The factors that affect the mode were discussed in this part, such as the injection current, resonant wavelength and so on. Basing on the spatio-temporal rate equation, the injection parameters dependences of the transverse mode characteristics of weakly index guiding vertical cavity surface emitting lasers were theoretically researched by integrating the spatially dependent part, furthermore, the phenomena such as spatial hole burning or thermal lensing effects were explained at the same time.
5. The problems which occurred to the measurement about the far-field and near-field were analysed. Because the large oxidated aperture take disadvantage of the mode, so the mode of devices in our lab is difficult to measure. At last, we put forward some methods to improve the mode characteristic such as the photonic crystal structure and so on.

By these research jobs on the thesis, the job of mode for VCSEL, which is part of National “973” and National Nature Foundation of China and Beijing, has been completed well. Several model were founded and the factors the affect the mode were discussed accurately. And five papers have been published, which published as the first author has been embodied by SCI, and the copyright of software about the mode is being applied.

Key words: mode; vertical cavity surface emitting laser; effective index; rate equation;

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
第 1 章 绪 论.....	1
1.1 VCSEL的发展过程	1
1.2 VCSEL及其模式的优点	3
1.3 VCSEL模式的研究现状及主要应用.....	6
1.3.1 VCSEL的研究现状及主要应用.....	6
1.3.2 VCSEL模式的研究现状.....	9
1.4 VCSEL模式研究中存在的问题及解决方案.....	11
1.4.1 VCSEL模式研究中存在的问题.....	11
1.4.2 解决方法	12
1.5 本论文的研究工作	12
第 2 章 垂直腔面发射激光器模式的理论基础	15
2.1 模式的相关概念及理论基础	15
2.1.1 VCSEL的纵模特性	15
2.1.2 VCSEL的横模特性	18
2.1.3 VCSEL的偏振特性	20
2.2 LP模式的概念	23
2.3 VCSEL与边发射激光器模式上的区别及主要问题.....	26
2.4 本章小结	27
第 3 章 垂直腔面发射激光器场分布的模拟与测试	29
3.1 利用修正的三层波导结构算横模场分布	29
3.1.1 传统的三层波导结构算法	29
3.1.2 修正的三层波导结构算法	30
3.1.3 存在的问题	31
3.2 利用柱坐标方法算横模场分布	32
3.2.1 理论推导及分布模拟	32
3.2.2 对模拟结果的优化	39
3.3 横模光场分布的测试.....	41
3.3.1 测试结果同模拟结果的对比	41
3.3.2 误差分析	42
3.4 可视化界面的编写及连续性分析	43
3.5 本章小结	45

第 4 章 有效折射率模型的建立	47
4.1 垂直腔面发射激光器纵向光场分布	47
4.1.1 求解纵向光场分布的原因	47
4.1.2 纵向光场分布的理论推导	48
4.1.3 不同结构VCSEL的纵向光场分布	49
4.2 有效折射率的计算	50
4.2.1 有效折射率的理论推导	50
4.2.2 不同结构VCSEL的有效折射率计算	51
4.2.3 不同结构VCSEL的性能对比	51
4.2.4 实验测试	58
4.3 本章小结	59
第 5 章 影响模式特性的诸因素分析	61
5.1 注入电流对垂直腔面发射激光器模式特性的影响	61
5.1.1 速率方程的建立	61
5.1.2 载流子分布对模式的影响	64
5.1.3 实验测量	65
5.2 注入孔径对垂直腔面发射激光器模式特性的影响	66
5.2.1 注入孔径对载流子分布以及模式的影响	66
5.2.2 有源区尺寸很小的情况	68
5.3 折射率对垂直腔面发射激光器模式特性的影响	70
5.4 激射波长对垂直腔面发射激光器模式特性的影响	71
5.5 本章小结	72
第 6 章 模式测试中遇到的问题及改善模式特性的方法分析	73
6.1 模式测试中遇到的问题及分析	73
6.2 改善模式特性的方法	80
6.2.1 改变折射率分布法	80
6.2.2 改变注入孔径法	83
6.3 本章小结	83
结 论	85
参考文献	87
攻读学位期间发表的论文	91
致 谢	93

第1章 绪论

随着信息技术飞速发展，人们对信息的获取和发布、交换的需求呈几何级数上升，对高速信息处理和通信能力的要求越来越高。现在光通信系统点到点的传输已满足不了巨大信息量的传输，要实现充分利用光的并行性系统，大规模二维集成的光电器件就变得十分重要。半导体激光器的出现导致了以光纤通信、光纤传感、光信息处理与显示等为代表的光信息技术的蓬勃发展，然而传统的边发射激光器无论是 F-P 腔 (Fabry-Perot) 激光器或是分布反馈 (Distributed Feedback, DFB) 激光器，出光方向平行于衬底，因此无法实现面对面自由空间的光互连，光交换和各种并行处理，更难实现二维集成，且其在芯片解理前不可能进行单个器件的基本性能测试，光束发散角过大等问题限制了边发射激光器的使用价值。为克服这一系列缺点，人们提出了垂直于衬底方向出光的垂直腔面发射激光器 VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser, 简称 VCSEL)。

1.1 VCSEL 的发展过程

VCSEL在半导体激光器历史中发展虽然较晚，但其在 30 年左右的时间里发展速度令人震惊。早在 1962 年就有人提出了制造垂直腔二极管激光器的建议，但是当时没有办法实现^[1]。77K下，脉冲激射的第一只VCSEL是在 1977 年由索达(Soda)、伊贺(Iga)等人研制出来的，它采用液相外延技术首次实现了InGaAsP/InP材料系列的VCSEL，这也是世界上第一个VCSEL器件。器件的激射波长 1.3 μm ，阈值电流为 900mA，反射镜采用金锌合金，具有完全的衬底吸收，因此反射率很低 (<80%)。1982 年，伯纳姆(Burnham)、塞弗莱(Scifres)和斯特莱佛(Streifer)等提出了VCSELs不同外延设计的专利，其中的某些部分与当今所用的结构已十分相似，但当时的外延生长工艺还不足以精确制造这种结构。1983 年提出了第一个外延生长的反射镜。以后的大多数工作就是致力于改进体有源区内载流子的限制结构和多层介质的反射镜或外延生长半导体反射镜，以便获得高的反射率，在这一年Iga教授研制出GaAs/AlGaAs材料系列的VCSEL在 77K下的脉冲工作，阈值电流为 350mA。同年实现了室温激射，阈值电流为 1.2A，次年降到了 310mA^{[2][3]}。1985 年开始采用MBE生长VCSEL，并将脉冲工作下的阈值电流降低为 150mA，而且首次制备出VCSEL列阵。

1988 年对于垂直腔面发射激光器来说是举足轻重的，因为在这一年里VCSEL取得了突破性的进展，通过采用圆形掩埋异质结来有效的限制电流，波长为 850nm GaAs/AlGaAs材料系列VCSEL的室温连续工作得到首次实现，同年AT&T贝尔研究室的J.L.Jewell(现在Pico Light Inc.)等人将VCSEL中应变超晶格有源层的层厚缩

小到单一量子阱（80 埃）的极限厚度，利用激励光实现了室温下的连续工作^[4]。这一系列成果的取得，激励着VCSEL的研究得到快速发展并不断取得鼓舞人心的成就。1991 年实现 980nm GaAs/InGaAs系列VCSELs室温连续工作^[5]；1993 年实现 1.3 μm 的InGaAsP/InP VCSELs的室温连续工作^[6]；1994 年实现 1.55 μm 的InGaAsP/InP VCSELs室温连续工作^[7]；1994 年光泵浦蓝绿光VCSEL实现室温连续工作^[8]；1995 年实现可见光(红光)VCSELs的室温连续工作；1996 年Honeywell公司将VCSELs推向市场，实现其商品化^[9]；1999 年桑迪亚国家实验室利用反传导耦合，研究制作了发射 868nm波长的两个强烈耦合锁相阵列VCSELs，这一发展为以高功率VCSELs为基础的发射器铺平了道路^[10]；2000 年 5 月实现 1300nm GaInNAs/GaAs量子阱VCSELs的室温连续工作^[11]。对于VCSEL来说，其已经具备了应用于波分复用（WDM）光纤通信及计算机内部、计算机之间的高速并行数据光互连的现实性，就其本身而言，2006、2007 年进一步的工作朝着开发新的波长、新结构，改进和简化制造工艺，改善横模和偏振特性等方面继续努力势在必行。

由于 VCSEL 的商业和研究价值，近些年来，大量的光电子公司和美日欧一些高校、研究所都对 VCSEL 的研究和发展进行了大量的工作，如美国 EMCORE 公司、Honeywell 公司、Motorola、HP、E20 公司、Nova Crystals 公司、美国 Lucent 技术研究所（原 AT&T Bell Lab.）、California 大学（UCSB）、Texas 大学、伊利诺依大学、南加州大学、Cornell 大学、Sandia 国家实验室；日本的东京工业大学、AXT 公司、三洋电气公司、NEC 公司、Seiko 公司、Epson 公司；德国 Infineon 公司和 Ulm 大学；英国 BTL 公司等，其研究范围涉及从紫外到红外各个波段的材料组分、器件结构、器件性能等诸多方面，2005 年以后，由于对 VCSEL 应用需求的近一步加强，国外关于垂直腔面发射激光器模式、光学特性等方面的研究不断丰富，如何在不影响其他性能指标的前提下有效的控制 VCSEL 的横模特性成为研究的热点，光子晶体等新型结构的提出为 VCSEL 实现单模大功率出射提供了有力的保证。

我国在VCSELs方面的研究也取得了很大进展，目前国内从事VCSELs研究的单位主要是中科院半导体所、长春光机所、吉林大学、北京大学、武汉电信器件公司、武汉大学和北京工业大学等单位。1999年，中科院半导体所成功研制了双面氧化限制型红光VCSEL，阈值电流0.25mA，最大输出功率超过0.3mW，波长为 650—670nm^{[12][13]}。2003年武汉电信器件公司研制出高性能的850nm 氧化限制型VCSEL，9 μm 氧化孔径VCSEL斜效率0.82mW/mA，室温最大输出功率16mW；5 μm 氧化孔径VCSEL，阈值电流为570 μA ，最大输出功率5.5mW；12 μm 和16 μm 氧化孔径器件微分电阻分别为35 Ω 和25 Ω ，具有良好的温度特性和可靠性，可应用于1.25Gbit/s 数据通信^[14]。在980nm高功率VCSEL方面取得了重大突破，2004年

中科院物理所和长春光机所联合首次研制出高功率VCSEL，室温连续输出功率1.95W，200 μm 直径器件，10ns条件下峰值光功率10.5W，300 μm 直径器件连续波光功率输出1.11W，上述指标据称均高于国际报道的同类器件。与此同时，通过高温快速老化实验，测得器件寿命达到4500小时，相信相关产品很快会推向市场^{[15][16]}。尽管如此，我们同国外VCSEL的发展还存在一定的差距，无论是电学性能上的提升还是光学特性上的改进，最终目标都是要为其应用服务的，对于模式理论的研究国内比较少，但它也是必须考虑的重点。

目前我们实验室已研制出氧化限制结构980nm波段和850nm波段的VCSEL。980nm波段器件特性为：氧化孔径为26 μm 的器件室温脉冲最大输出功率可达13.1mW，室温连续输出功率最高可达9mW；850nm波段器件特性为：22 μm 氧化孔径的器件室温脉冲最大输出功率可达17.6mW，室温连续输出功率最高可达10.7mW，阈值电流密度为0.395KA/cm²，特征温度 $T_0=333\text{K}$ 。氧化孔径为10 μm 的器件在11.5mA室温脉冲条件下，输出功率8.1mW，阈值电流0.1mA，在5mA室温直流条件下连续工作935个小时后，其光功率等参数基本保持不变，器件性能居国内领先、国际先进水平。为了进一步提高本实验室的VCSEL性能指标，我们从其偏振、横模特性出发，分析解决模式方面的问题，提高VCSEL的使用价值。

1.2 VCSEL 及其模式方面的优点

垂直腔面发射激光器是出光方向垂直于衬底的一种新型的半导体激光器，通常由有源区和上下两个分布布拉格反射镜(DBR)构成。与传统的边发射激光器相比，VCSEL产生激光的谐振腔位于外延生长的上下反射镜之间，所以发射的光束垂直于衬底，而非传统的侧面发射，正是由于VCSEL独特的物理结构使其具有了许多优点：

1. 谐振腔体积很小，易于产生微腔效应，自发辐射因子较普通端面发射激光器高几个数量级，可实现极低阈值电流激光，其功耗和发热都比传统半导体激光器要小得多，器件的温度敏感性也比边发射激光器低。

2. VCSELs出光方向垂直于衬底，便于高密度2-D面阵集成，特别适于平行光互连、光信息处理和光传输，同时可实现“在片”测试，极大地降低了成本，并且容易模块化和封装^[17]。

3. VCSEL可获得较长的寿命，可靠性较高。VCSEL的主要生产商Honeywell公司对VCSEL进行的可靠性试验数据表明，若把寿命定义为输出光功率的2dB衰减，则在25℃和10mA工作电流下，VCSEL的平均无故障寿命(MTFF)达到 3.3×10^7 小时，而在50℃和10mA工作电流下，VCSEL的MTFF达到 1.4×10^6 小时，性能明显优于传统的边发射激光器^[18]。

4. 调制速率高, 且发光效率很高。VCSEL 工作时的载流子和光子数很少, 动态调制特性可以大大提高, 具有快速调变功能, 传输速率很高, 其速度极限大于 3Gbit/s, 而且损耗很低, 利于高速网路传输。

5. 易于光电集成(OEIC), 并且与大规模集成电路在工艺上具有良好的兼容性。

VCSELs研究的一个重要方向是降低阈值电流, 一方面可以通过MOCVD或MBE精确控制外延生长得到具有高增益系数的有源区和高反射率的上下DBR方法实现, 另一方面从器件结构角度考虑, 通过对载流子、光子进行有效限制, 减小有源区的有效体积, 以实现降低阈值、增大功率转换效率的目的。图1-2示意了VCSEL中形成限制结构的几种典型制备工艺, 下面简要说明:

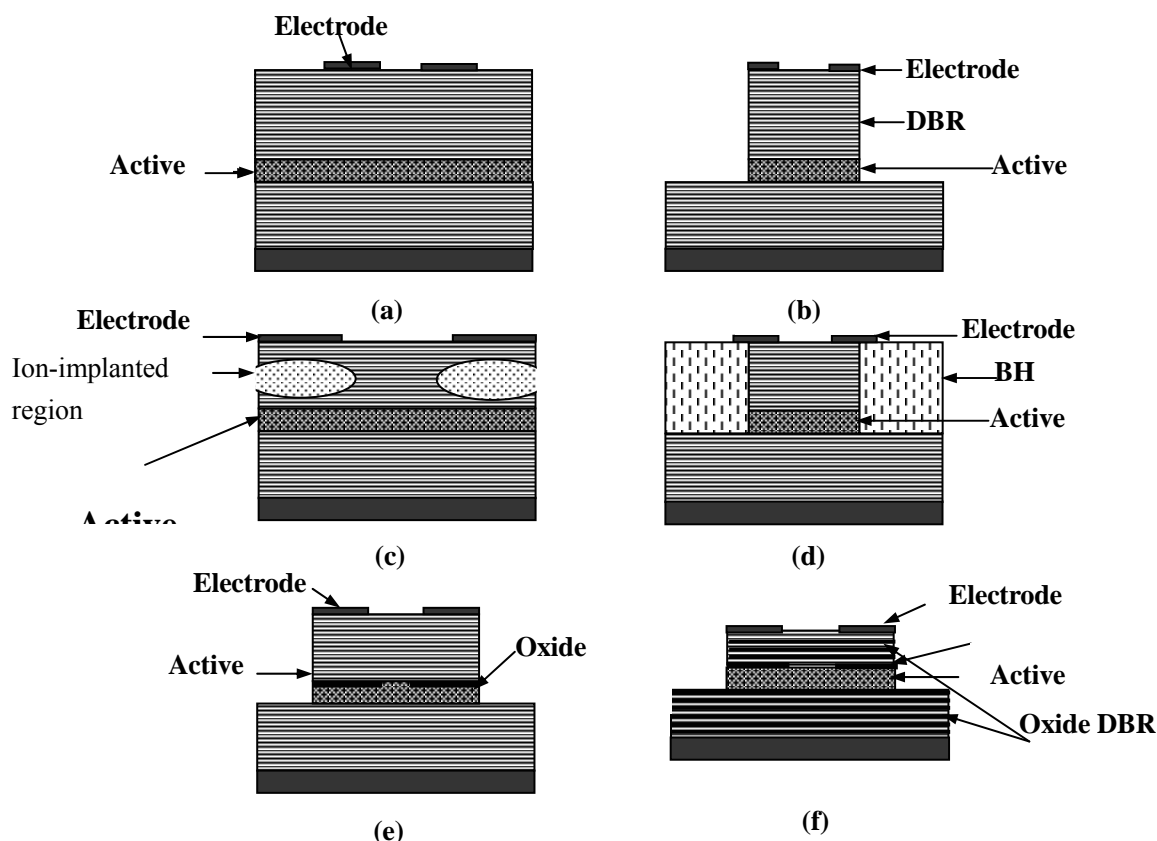
(a) 环形电极型: 这种结构电流从环形电极注入, 光束从中心的窗口输出, 制备简单, 但是由于扩散的影响, 电流不能完全限制在极小的区域内。

(b) 空气柱型: 通过干法刻蚀技术, 如化学辅助离子束刻蚀(CAIBE)或反应离子刻蚀(RIE), 形成柱形圆台面或方台面, 同时利用半导体与空气间较大的折射率差, 形成强折射率波导。这样做的优点是方法简单, 第一个成功的VCSELs器件采用的就是这一结构, 此结构的电流限制特性很好, 可获得极低阈值电流。但由于侧壁处载流子表面复合严重, 侧壁的损伤也会引起光的衍射及散射增加, 影响器件性能, 一般这种结构均为多横模工作。此外, 这种非平面结构使得接触层的制造很困难, 因未与一个有效的热沉直接接触, 热阻很高。

(c) 离子注入型: 过离子注入方法在平面结构中实现横向电流的限制。通过选择性注入离子至半导体中形成一个高阻区, 限制电流的注入。离子注入可采用不同的离子(O^- , N^- , F^+ , H^+)。需要的注入能量由离子质量及希望达到的注入深度决定。这一结构具有很好的可靠性, 成品率高, 容易制作金属接触。目前大部分顶发射的VCSELs是用这种工艺做的。但是, 因离子注入造成的有源区的损耗及离子的侧向散射, 使得其电流注入窗口不能太小。另外, 这种结构属于增益波导, 不提供本征的光波导。只是在直流工作时, 由热引入的折射率渐变(热透镜)形成折射率波导, 限制了光模式。这对阻止由于空间烧孔引起的多侧向模式是不够的。

(d) 掩埋异质结型: 将包含有源区台面掩埋宽带隙和较低的折射率的材料中, 实现了横向的电、光限制, 提供折射率波导。此结构的 VCSELs 可实现单模工作, 但主要缺点是制备工艺复杂。

(e) 氧化物限制型: 对靠近有源区的AlAs或高Al组分的 $Al_xGa_{1-x}As$ 进行选择性氧化, 形成性能稳定, 电绝缘性好, 折射率远低于半导体材料的 Al_xO_y 的氧化物, 可以方便地在VCSELs中形成电流限制和折射率波导。选择氧化技术已经成为目前VCSEL及阵列研制中最为广泛的工艺, 氧化限制VCSELs也成为挑战极小尺寸和极低阈值电流VCSELs的主要途径。我们选取的结构也为氧化物限制型结构。



(a) 环形电极型 (b) 空气柱型 (c) 离子注入型 (d) 掩埋异质结型
(e) 氧化限制型 (f) 氧化 DBR 型

图 1-2 六种 VCSEL 载流子限制结构示意图

- (a) Ring or circular electrode (b) Air-post (c) Ion-implanted (d) Buried heterostructure
(e) Oxide-confinement (f) Oxide DBR

(f)氧化DBR型：对高低折射率交替生长的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ DBR进行选择氧化，利用氧化后折射率差变大，只需几对DBR就能满足反射率的要求。

除上述优势外，垂直腔面发射激光器在模式方面的优势主要体现在它的输出光束对称性、发散角以及纵模特性上。

1. 极易获得单色性极好的单纵模光输出，腔的两个相邻纵模频率之差称为纵模的频率间隔，其满足下列关系式：

$$\Delta\gamma_q = \gamma_{q+1} - \gamma_q = \frac{c}{2L'} \quad (1-1)$$

式中 L' ——谐振腔等效长度

可见，频率间隔只与腔长以及腔内介质的折射率有关，腔长和折射率越小，纵模间隔越大。这里我们可以看到，VCSEL 的等效光腔长度极短，导致其纵模间距较大，不易发生跳模现象，在光互连、光通讯等应用中非常重要。

2. 输出光束的方向性和对称性好。VCSEL 腔内的横向光场限制一般为圆形，使输出光束具有圆形对称的远近场分布，光束发散角小，方向性好，易于与光纤耦合（从细单模光纤到 1mm 左右的塑料光纤都可以），现已证实与多模光纤

的耦合效率大于 90%。

1.3 VCSEL 及其模式的研究现状及主要应用

1.3.1 VCSEL 的研究现状及主要应用

VCSEL 的众多优点赋予了它很大的发展潜力，在自由空间光互连，光交换，光通信，光信息处理以及各种高速并行网络应用中占有十分重要的地位，而且也非常适合在激光打印、气体检测、高密度光存储、显示和照明方面应用，与不同的光电子器件集成，可以实现很多功能，如调谐，放大和滤波等。

在短短几十年时间内，VCSELs 取得了巨大的进展，并展现很好的应用前景。其波长从紫外到 $2.5\mu\text{m}$ 较宽波长范围内，各种应用目的 VCSELs 正在被开发，其中 $0.85\text{-}0.98\mu\text{m}$ 的 GaAs, InGaAs 系列的 VCSELs 较为成熟，已被用于简易光互

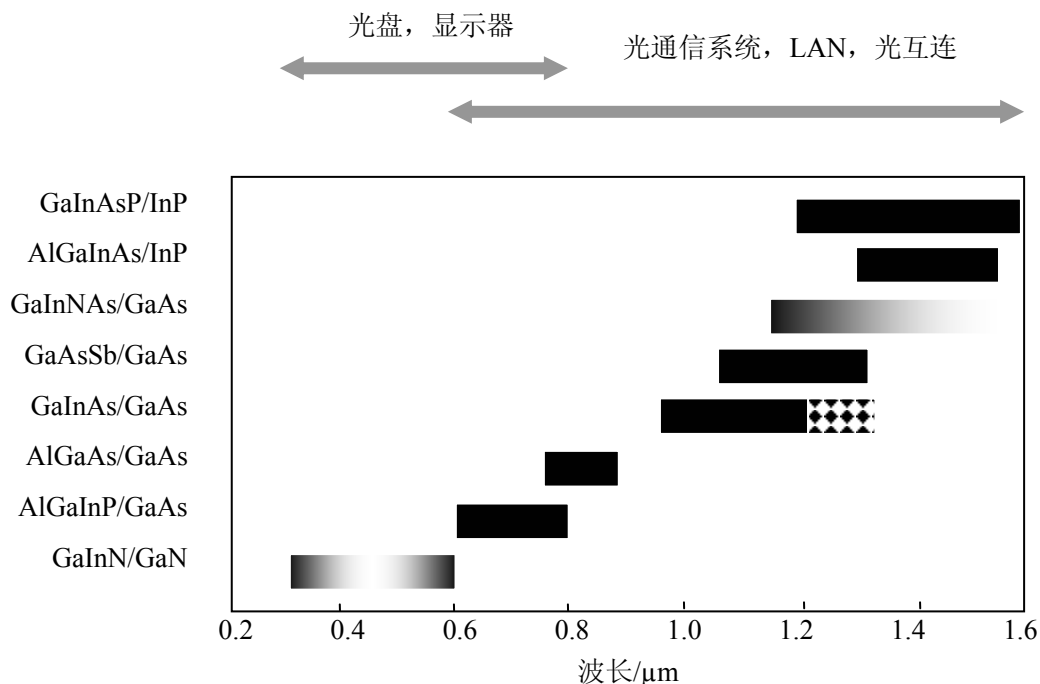


图 1-1 面发射激光器用半导体材料及其发射波长

Fig.1-1 Semiconductor material systems used for VCSELs and output wavelengths

连中，其模块化，系统化的工作正在进行，已经实现了商品化。用于长距离光纤通讯的长波长VCSELs 仍然处于研制阶段， $1.3\mu\text{m}$ 及 $1.5\mu\text{m}$ 波长VCSEL是光并行处理、光识别系统及光互联系统中的关键器件，极具市场潜力。今后如何提高长波长VCSELs 的输出光功率，仍然是将来一段时间所需要关注的主要课题。在光记录技术方面， $0.78\mu\text{m}$ 和红光AlGaInP VCSELs的研究开发也在进展中。采用氮化物的紫外、蓝光VCSELs及采用铋化物的 $2.0\text{-}2.5\mu\text{m}$ 波段的VCSELs也开始起步，它

们分别在高密度存储和环境监测方面被寄予厚望。图1-1给出了不同发射波长 VCSELs有源层材料及相应的应用领域。

1. 长波长 VCSEL

1.3 μm 和 1.55 μm 波长处于光纤的低色散和低衰减窗口,使得 1.3 μm 和 1.55 μm InGaAsP/InP VCSEL 在中长距离超高并行度光纤通信方面具有短波长 VCSEL 无法比拟的优点,加上这两个波段已有的通信标准和成熟技术,使长波长 VCSEL 在并行光传输、光通信和波分复用(WDM)系统中应用前景十分广阔,极具市场前潜力,但是其研制存在许多问题,如:价带间吸收较大;体系 DBR 折射率差太小,需要多层,热导率也很小,难以高温操作;批量生产工艺复杂等,通过引入各种技术和开发新材料、新工艺,器件性能水平有了很大提升。2003 年美国加利福尼亚大学首次把非平面熔合技术用于长波长的 VCSEL 中,这些器件在 1532-1565nm 波长范围内具有高质量的单模发射。

2-2.5 μm 波段的VCSEL主要应用于环境监测,高分辨率的气体光谱研究,高精度的外科手术等。水蒸气对2-2.5 μm 波段吸收特别弱,而一些污染气体,如CO、CH₄、NO₂、NH₃吸收特别强,因此极为适合环境监测。

2. 630-808nm 波段

近几年来,由于人们对高密度光存储的迫切需要,使短波长 VCSEL 得到了空前的发展。

650nm AlGaInP 系列的 VCSEL,由于具有大于 50 μm 的大孔径,且多模工作状态较好,因此能输出较大功率。但当以数 Gbit/s 的速度在 300m 以上距离传输时,从技术上来讲比较困难,所以目前还是以短距离为应用中心。

630-670nm 波段 AlGaInP /GaInP VCSEL 主要应用于 DVD 读写头,条形码扫描,葡萄糖监测,塑料光纤的数据通信,光学传感等方面。目前研究主要集中在提高器件输出功率和使用温度方面。随着在位监测技术和选择氧化技术的引入,器件的输出功率和温度特性得到极大改善,激射波长为 650nm 的器件最高输出功率超过 4mW,最高工作温度 65 $^{\circ}\text{C}$;激射波长 670nm 的器件最高输出功率 10mW,最高工作温度 87 $^{\circ}\text{C}$ 。

780nm VCSEL 和红光的 AlGaInP/GaAs VCSEL 在光记录技术和光盘读写中有重要的应用前景。采用 780nm 的激光光盘拾音器正在开发之中,最终目标是利用小尺寸的面发射激光器的近场达到和衍射极限无关的高密度存储器的存储效果。最近器件特性得到很大改善,目前,已报道的 780nm 的 AlGaAs/GaAs 面发射激光器最低阈值已达 200 μA 。

808nm的VCSEL列阵很适于泵浦板条固体激光器,不但能与固体激光材料之间能高效率地耦合,而且由于其具有均匀的远场特性、单横模工作,有利于提高泵浦的均匀性。

3. 紫外和蓝光波段

采用氮化物的紫外~蓝色波段 VCSEL 的研究已经取得了很大的进展, 这个系列的 VCSEL 是解决未来图像显示的有力技术, 而且在阵列构造的光盘存储器的多光束磁头方面的应用被寄予很大的期望。大规模的阵列面发射激光器应用于激光打印机方面的应用正在研究之中, 相比过去的单个激光管, VCSEL 的阵列集成结构可以同时进行多行的扫描。这可以大大提高激光打印机的扫描速度并相应延长其使用寿命。InGaN/GaN 蓝光 VCSEL 是目前研究的一个热点, 采用蓝光 VCSEL 二维阵列能够获得更高的存储密度和更短的读取时间。

4. 980波段

980nm InGaAs/GaAs VCSEL作为固体激光增益介质和掺铒光纤放大器的重要泵浦光源, 在短距离数据传输和光互连中有广泛的应用, 其研制受到高度的重视。目前已报道的InGaAs VCSEL最低阈值为8.7 μ A。国外, 德国ULM大学的研究人员, 利用金刚石热沉散热, 制备了320 μ m孔径器件, 室温连续输出功率高达890mW; 用10ns脉宽、67KHZ脉冲激励, 峰值功率达到10W; 19个单管组成的蜂窝二维面阵, 热沉温度18 $^{\circ}$ C, 输出功率1.08W, 热沉温度10 $^{\circ}$ C, 输出功率1.4W, 光功率密度1kW/cm²。国内, 在980nmVCSEL高功率的研究方面也取得了突破, 2004年中科院研制出980nm大功率垂直腔表面发射激光器, 单管室温连续波输出光功率达1.95W, 为VCSEL目前最高输出光功率。在10ns条件下, 200 μ m直径器件的峰值光功率10.5W。

5. 可调谐与多波长VCSEL阵列

波长可调谐的VCSEL阵列和多波长列阵在局域网、长距离光纤通信网以及计算机之间的光互连等应用领域极其重要, 它不仅提供了更多的自由度波长, 使VCSEL的光空间并行性和波长特性实现良好的结合, 大大降低系统的运营成本和备份成本, 极大地提高系统的容量和传输速率, 而且波长可实现实时可调, 以避免网络中的波长阻塞, 从而为实现可升级、可重组的网络结构提供了可能, 在现代高速与大容量通讯传输系统中有重要意义, 是用于波分复用(WDM)网络和全光网建设的最佳选择。此外, 它与光栅或全息衍射相结合可应用于自由空间的无光纤互连和通讯。

1.3.2 VCSEL 模式的研究现状

经过对最近几年国内外 VCSEL 方面工作的整理, 我们可以发现目前 VCSEL 偏振、模式理论是一个相对比较热门的话题。从国外的文章来看, 因为模式的好坏影响到 VCSEL 的应用, 所以大部分的工作都集中在对 VCSEL 模式稳定性的控制上, 人们利用不同的方法实现垂直腔面发射激光器单纵模、单横模输出的工作

状态,对于模式的研究国外已经进入了一个比较成熟的阶段。而国内发展 VCSEL 相对比较落后,对模式理论的研究应该说还是处于刚刚起步的阶段,从整体来看,国内模式方面的研究还保持在对其现象的观测以及对模式理论分析的阶段上,大部分的模式内容都是涉及到基本理论的物理分析,因此加大对 VCSEL 模式方面的研究相当必要且任重道远。下面我们从偏振、横模稳定性两个方面分析一下模式的研究现状:

1. VCSEL 偏振理论的研究内容

模式和偏振有着十分紧密的联系,为了深入的了解模式的振动和分布情况,我们必须从偏振开始入手,利用偏振概念来宏观的理解模式理论。所谓偏振,指的是用一个场矢量来描述空间某一个固定点所观测到的矢量波(电场、应变、自旋)随时间变化的特性。关于这方面的研究国外有很多,大致可以分为偏振稳定性控制、利用速率方程等理论推导偏振特性、影响偏振特性的因素分析等内容,其中涉及到利用不同的方法实现对偏振的控制,如利用微小地对称腔结构(菱形、矩形)、均匀氧化尺寸、在表面反射镜上刻蚀光栅等等^{[19][20]}。在对影响偏振特性的因素分析中,注入电流、光反馈、表面应力等经常被作为主要影响因素来研究,以光反馈因素举例,图 1-2 反映了 VCSEL 偏振特性随光反馈的变化规律^[21]:

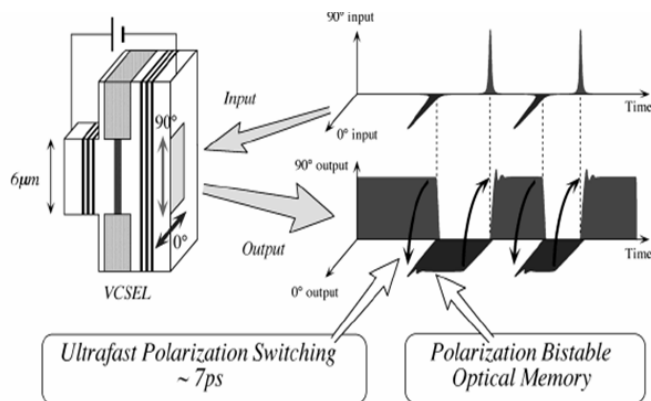


图 1-2 VCSEL 偏振特性随光反馈的变化规律

Fig.1-2 The characteristic of polarization with the optical feedback changed.

从图中我们可以看出,起初 VCSEL 沿着 90 度方向振动,在不改变其他因素的条件下,当输入一个光信号后, VCSEL 的偏振方向从 90 度跳变到 0 度的方向上,可见,光反馈对 VCSEL 偏振特性存在比较明显的影响。相比国外,目前国内在偏振方面的研究主要针对其基本概念以及研究偏振的价值等等,例如双折射现象对 VCSEL 偏振特性的影响等等。我们知道了一般的偏振情况,都可以分解为两个互相垂直的线性偏振来表示,那么两线性偏振产生的缘由、它们各自随不同因素的变化情况也就成为了我们随后的研究重点。我们发现双折射现象是产生不同偏振情况的主要原因。实验表明,当一束光从空气入射到晶体上时,一般会在晶体内部

产生两束折射光，不论入射的偏振状态如何，这两束光都是线偏振光，这种现象叫做双折射，这种双折射现象主要是由各向异性造成。提高VCSEL出射光的偏振稳定性可以提高信噪比、避免偏振的开关和涨落效应；由于光信号在传输时以两种偏振态存在，在大信号调制下，不同偏振模式的能量分配将导致数据链路中信噪比SNR的下降和误码率BER的上升；当带有偏振不稳定性的VCSEL光束耦合如光纤或光纤链路中，各个模式由于偏振方向不同而承受不同的衰减，最坏的情况是一些模式被完全阻断而另一些则完全通过，这种模式选择衰减带来许多不良的影响，比如选择引起的开启抖动和偏振模式分配噪声都将导致误码率升高、偏振选择造成脉冲畸变等^[22]。

2. VCSEL 模式理论的研究内容

对于模式理论来说，国外对其研究已经进入相对成熟的阶段，最近几年的工作重点主要是在提出新型的VCSEL结构以及有效折射率的计算上，使其实现单基模、大功率的工作状态。举例来说，利用带应力的反射镜、双氧化孔径结构改变注入孔径、折射率分布，从而实现对模式特性的优化。在后面的章节中，我们将具体说明影响模式的因素以及改善模式的方法。图 1-3(a)(b)分别是带应力反射镜VCSEL以及双氧化孔径VCSEL的结构示意图^{[23][24]}。

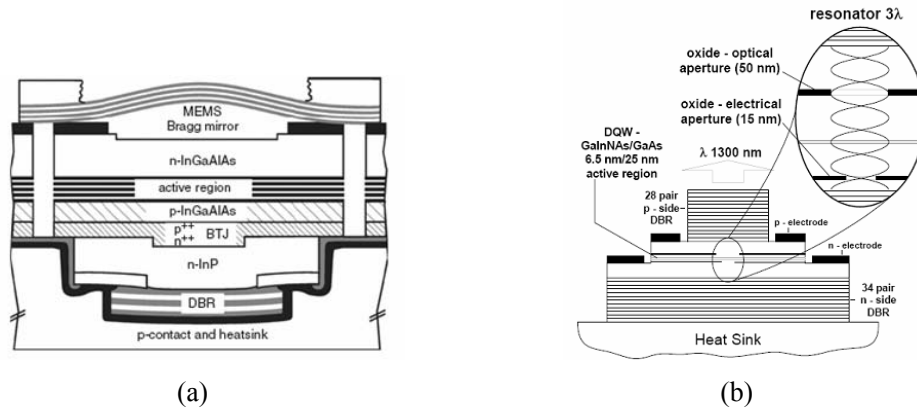


图 1-3 优化横模特性的特殊结构 VCSEL(a) 带应力的反射镜 VCSEL(b) 双氧化孔径 VCSEL

Fig1-3. The peculiar VCSELs for improving the characteristic of mode.

(a) MEMS DBR (b) double oxidation apertures

国内对模式的研究主要针对影响模式的因素，模式的基本概念等内容。如注入电流对载流子分布、模式的影响等等。由激光原理可知，一台激光器的谐振腔中可能有若干个稳定的振荡模，只要某一个模的单程增益大于单程损耗，即满足激光振荡条件，该模式就可以被激发而起振^[25]。初始光强为 I_0 的某个横模 TEM_{mn} 的光在谐振腔内经过一次往返后，由于增益和损耗两种因素的影响，其光强变为：

$$I = I_0 r_1 r_2 (1 - \delta)^2 \exp(2GL) \quad (1-2)$$

式中 G ——单程增益系数

L ——激光工作物质长度

δ ——单程损耗

现在考察两个最低阶次的横模 TEM_{00} 和 TEM_{10} 模的情况，它们的单程损耗分别为 δ_{00} 和 δ_{10} ，并认为激活介质对各横模的增益系数相同，但同时满足下列两个不等式：

$$\sqrt{r_1 r_2} (1 - \delta_{00}) \exp(GL) > 1 \quad \sqrt{r_1 r_2} (1 - \delta_{10}) \exp(GL) < 1 \quad (1-3)$$

激光器即可实现单横模运转。总体说来，本实验室对 VCSEL 模式方面的工作还处于初步阶段，我们首先要利用国内外的理论知识建立模式分布、有效折射率等若干模型，通过模拟分析各阶模式产生的条件以及影响模式的主要因素，然后通过实验验证模拟结果的正确性。

1.4 VCSEL 模式研究中存在的问题及解决方案

1.4.1 VCSEL 模式研究中存在的问题

由于 VCSEL 的独特结构，使得 VCSEL 在模型建立、理论依据、实验测试上存在以下几个问题：

1. 相比边发射激光器来说，垂直腔面发射激光器对模式研究的重点从纵模转变成了横模，谐振腔横向相对较宽，对光场限制能力较弱，致使其中常存在多个横模，不同横模的空间分布不同，彼此间存在交叠，从而导致模式间强烈的竞争，对器件的分噪声、开关特性等产生较大不利影响。对于典型的氧化限制垂直腔面发射激光器而言，氧化限制层的厚度一般取在 30nm 左右。因此在圆柱波导内部折射率和包层折射率差大约在 10^{-2} ， $\Delta n < 1$ 。满足所谓的弱导波近似^[26]。与传统边发射激光器不同，在描述 VCSEL 的模式特性时，将模式 TE 、 TM 改成了 LP 模式。

2. 由于 VCSEL 和边发射激光器在模式方向上存在区别，在建立模式分布、有效折射率模型时，不能套用边发射激光器传输矩阵法得到的驻波场分布模拟，需要对其进行一定的修改，且如何将文献中给出的有效折射率、场分布公式应用到我们的结构中，模拟出可视化图形是我们研究的一个重点^[27]。

3. 由于以往实验室生产的 VCSEL 注重的主要是阈值电流、输出功率等性能参数，所以一般现有的 VCSEL 器件的注入孔径都比较大，这就为模式是实验测量提出了一定的难度，我们很难在实际测试中找到单模、低阶模情况的出现。

1.4.2 解决方法

针对以上问题，我们在讨论 VCSEL 模式特性时，采用了以下解决方法：

1. 通过参考垂直腔面发射激光器模式方面的书籍准确把握 LP 模式的真正含义，理解其与边发射激光器 TE 、 TM 的联系，其次根据相关理论建立模式分布模型，模拟各阶模式的空间分布，从图形上理解 LP 模式的定义。
2. 掌握关于传输矩阵法算驻波场的具体方法，将之应用到 VCSEL 中去，在编写好驻波场分布的基础上，将有效折射率公式添加的其中，计算不同有源区、激光波长的 VCSEL 的折射率值。
3. 选取注入尺寸相对较小的 VCSEL 器件进行测试 ($11\mu\text{m}$)，找到模式特性比较理想的器件同大尺寸的 VCSEL 进行对比，以此实验得出各个因素对模式特性的影响。

1.5 本论文的研究工作

本论文针对 980、850nm 内腔接触式氧化物限制型 VCSEL 的模式特性，进行了深入的实验研究和理论探索，归纳了 VCSEL 模式方面的相关概念，建立二维、三维模式分布模型及其交互化界面，有效折射率模型，并从半导体激光器的理论上分析，推导速率方程，有效地描述出了器件动态的载流子、光子分布以及它们的相互作用，得到注入孔径、折射率、注入电流、输出波长等因素对垂直腔面发射激光器模式特性的影响，为 VCSEL 器件性能、结构的优化提供了一定的理论依据。本论文主要工作内容概括如下：

1. 概括、总结模式横模、纵模等相关概念，垂直腔面发射激光器与边发射激光器模式方面的主要区别及其存在的主要问题。从偏振的角度出发，得到 VCSEL 所特有的 LP (Linearly Polarized)模式理论，对圆柱弱波导的线性偏振模式进行了定义，并从实验和理论的角度分析了关于频率分裂等相关问题。
2. 从理论上推导垂直腔面发射激光器的模式分布表达式，分别利用三层波导结构、圆柱弱折射率导引结构建立垂直腔面发射激光器的模式分布模型，并使用 MATLAB 软件编写了圆柱弱折射率导引结构的可操作界面。
3. 利用传输矩阵法推导有效折射率模型，实现在模拟输出激光器驻波场分布的同时准确的计算出芯层、包层折射率值，为分析折射率对模式分布的影响提供了理论依据。本文中利用有效折射率模型，计算得到单有源区 980nm、850nm 以及双有源区 980nm VCSEL 的折射率值，证明了多个有源区结构不仅仅有效地降低了阈值电流，提高了输出功率，而且改善了 VCSEL 的模式特性。
4. 分析注入孔径、注入电流、芯、包层折射率、输出波长等因素对 VCSEL

模式特性的影响，提出截止频率的概念。通过推导时空分离的速率方程，有效地描述出了器件动态的载流子、光子分布以及它们的相互作用，以此对空间烧孔现象、热透镜现象以及模式分布变化进行了有效的分析与证明，验证实验和模拟结果得到吻合。

5. 分析在实验测试 VCSEL 远场、近场分布时所遇到的问题。通过大量的测试找到模式特性比较理想的器件进行分析，对测试结果不好的器件提出改进措施，并从理论上提出了例如双氧化孔径、多有源区、光子晶体等改善 VCSEL 模式特性的方法。

第2章 垂直腔面发射激光器模式的理论基础

垂直腔面发射激光器由于出光方向垂直于衬底，其器件结构、激射条件和工作方式与边发射激光器相比都有很大的变化。图 2-1 是 VCSEL 结构示意图，VCSEL 主要由谐振腔和上、下两个高反射率反射镜构成，谐振腔又由量子阱有源区和上、下限制层组成。其基本工作原理与其他的半导体激光器相类似，都是通过将电流注入到有源区，并在有源区内提供足够的增益，将光模式激发出来，与边发射激光器不同的是其极短的腔长以及反射率极高的反射镜。也正是由于 VCSEL 结构与边发射激光器存在很大变化，其在模式特性上同边发射激光器也存在着非常明显的区别。下面我们对垂直腔面发射激光器模式方面的概念进行一下总结并找出区别与问题。

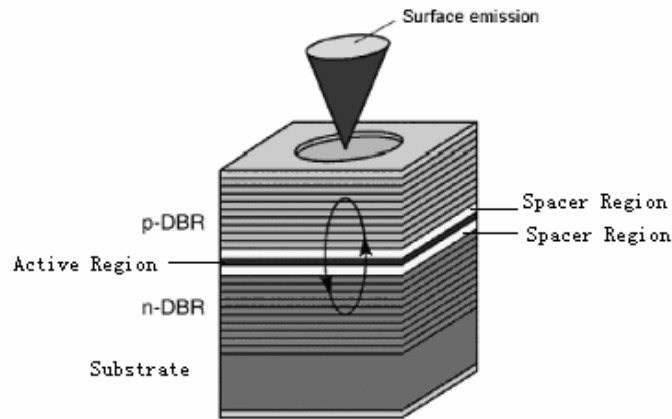


图 2-1 垂直腔面发射激光器的结构示意图

Fig2-1 Schematic illustration of Vertical cavity surface emitting

2.1 模式的相关概念及理论基础

2.1.1 VCSEL 的纵模特性

模式是满足光腔边界条件而可能在腔内存在的驻波长分布。光谐振腔是开放式光腔，其模式可以理解光在反射镜间多次衍射传播所形成的稳定场分布。不同模式有不同的光波场分布空间。这种分布又分为沿着轴向的纵模和垂直于轴向的横模两种类型，下面我们先来介绍纵模。图 2-2 是由两个平行平面反射镜所构成的谐振腔^[28]，其中A是全反射镜，B是部分反射镜。当一定波长的平面光波在腔内来回传播时，在某一时刻到达B镜的光线中，只有一部分是直接到达的，另

一些则可能已经走了一个来回、两个来回或更多次来回。显然对于到达B镜的光线来说，只当他们的光程差为该光波长的整数倍时，才能产生干涉加强而形成激光。

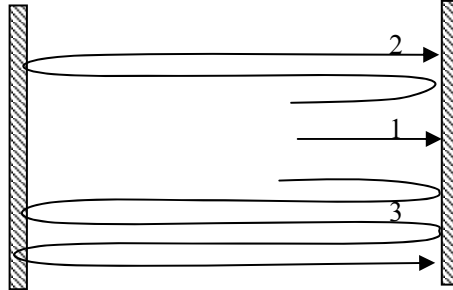


图 2-2 纵模形成示意图

Fig2-2 The form of the longitudinal mode

相干加强的条件可写出：

$$2\eta L = q\lambda \quad (q=1, 2, 3, \dots) \quad (2-1)$$

式中 η ——工作物质的折射率

L —— 激光器腔长

当 L 确定后，只是某些波长的光波才能满足在腔内传播时加强的条件，这些光波的频率是：

$$\nu = qc/2\eta L \quad (2-2)$$

(2-1) 式称为谐振腔中沿轴向传播的平面波的谐振条件，又称为驻波条件。由此可见，谐振腔具有选频作用。它从分子（原子）发出频率很宽的光波中，仅选出某些满足谐振条件的频率，为产生激光创造条件，这正是激光单色性好的一个原因。

据 (2-2) 式，谐振腔所允许存在的每种光波表示一种电磁振荡，叫做纵向模式，简称纵模。纵模频率是分离的，相邻纵模频率之差 $\Delta\nu$ 成为纵模间隔，根据 (2-2) 式可得到：

$$\Delta\nu = c/2\eta L \quad (2-3)$$

实际上能在腔内传播的纵模数比由 (2-2) 式决定的谐振频率要少很多，这是因为，为了产生激光，还需要其他条件得到满足。例如除了在入射光中有相应的频率满足谐振条件外，谐振腔允许的纵模频率还要落在介质原子谱线的线宽增益曲线之内，以及光在谐振腔中传播时，有透射、散射、衍射等损耗，而只有当增益大于损耗时，才能实际产生振荡。以图 2-3 中 ν_{q-2} 、 ν_{q-1} 、 ν_q 、 ν_{q+1} 、 ν_{q+2} 为例，这些频率满足谐振条件且落在介质原子谱线的线宽增益曲线之内，同样他们在虚线之上（虚线代表增益等于损耗时的 $g(\nu)$ 值），满足增益大于损耗的要求，这些频

率是可以激射的。

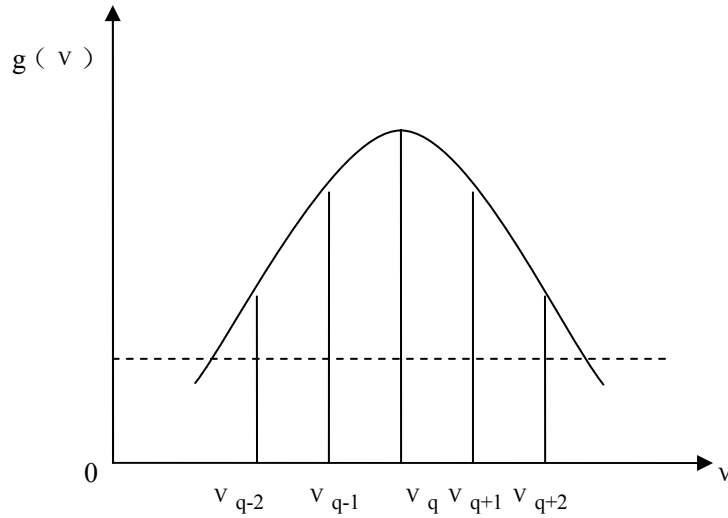


图 2-3 纵模个数与 $g(\nu)$ 关系

Fig2-3 The relationship between the number of longitudinal modes and $g(\nu)$

从 (2-3) 式我们可以看出，如果 L 减小， $\Delta\nu$ 就会增大，这就可能使图 2-3 中虚线以上的频率数更少，甚至可能达到只有一个纵模的情况，这种激光器输出的光很纯，对精密测量很有利，而垂直腔面发射激光器正是利用了其自身腔长极小（一般 VCSEL 的腔长尺寸为一个输出波长的大小，近似等于 $1\mu\text{m}$ ）的优势，实现了单纵模的工作状态。图 2-4 是通过实验测得的输出波长 850nm 垂直腔面发射激光器纵模分布的情况。

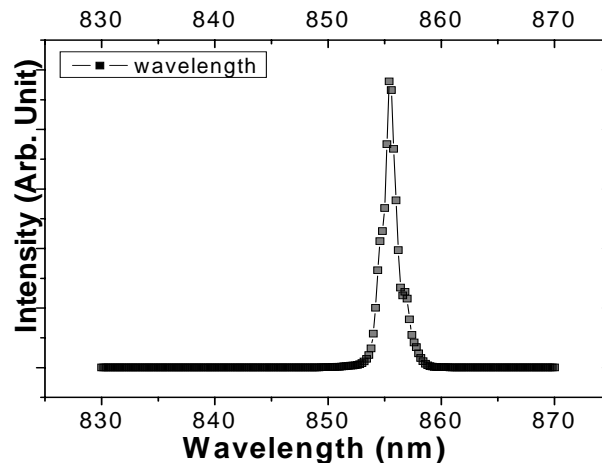


图 2-4 850nm 垂直腔面发射激光器纵模分布示意图

Fig2-4 The distribution of longitudinal mode for VCSELs

当然，虽然 VCSEL 具有良好的纵模特性，但是其中仍然存在着一一定的问题。从 (2-2) 式可见，激光频率 ν 与激光工作介质的 η 及腔长 L 有关^[29]。在产生激光时，由于各向异性的存在，使得在谐振腔中的驻波在通过有源区时产生了频率分裂，

双折射元件对两正交偏振方向的光有不同的折射率,所以原本唯一的谐振腔长“分裂”为光学长度不同的两个腔长,两个谐振腔长有不同的谐振频率,即发生了频率分裂^[30]。图 2-5 显示了出现频率分裂情况下的纵模测试结果:

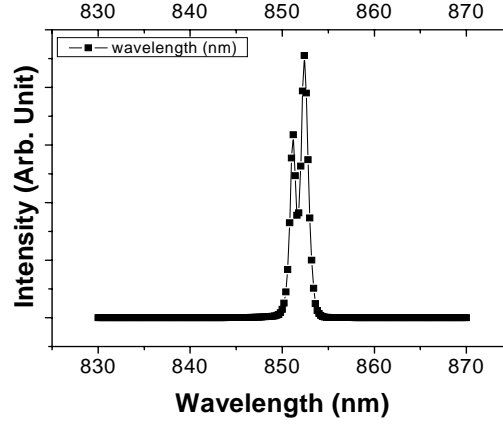


图 2-5 出现频率分裂的纵模分布图

Fig2-5 The distribution of longitudinal mode for VCSELs when the split occurred

从图中我们可以清晰地看出,以前 VCSEL 的单纵模情况发生了分裂现象。对公式 (2-2) 两面进行微分,得:

$$d\gamma = \frac{-cq}{2L^2} dL = \frac{-\gamma}{L} dL \quad (2-4)$$

dL 可以改写为 δ , 且相位差为 $\Delta\varphi$ 即

$$\Delta\gamma = \frac{\gamma}{L} \delta \quad (2-5)$$

$$\delta = \frac{\Delta\varphi}{360^\circ} \lambda = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \lambda \quad (2-6)$$

经过推导,得到分裂频率之间的间隔为:

$$\Delta\gamma = \frac{c}{L} \cdot \frac{\Delta\varphi}{360^\circ} = \frac{c}{L} \cdot \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \quad (2-7)$$

分裂频率间隔 $\Delta\gamma$ 与纵模间隔 $\Delta\nu$ 的比值叫做相对频率分裂量 K 。从 (2-7) 式可知,由于光学长度不同的两个腔长 L 和 L' 在大小相差很少,所以两个纵模之间距离非常接近。总体说来,这种现象对于我们观测 VCSEL 的纵模频率值没有太大影响,由于温度、应力等因素是造成“双光学腔长”的主要原因,有效地控制它们,寻找合适的工作状态,频率分裂的问题便可得以解决。

2.1.2 VCSEL 的横模特性

在谐振腔内除了在纵向形成光强分布外,在垂直于波传播方向的截面上(横

向)也存在稳定的分布,也就是说有不同的电磁振荡形式,即有不同的模式,这种横向模式叫做横模,垂直腔面发射激光器复杂的横模分布是它的主要问题,也是我们需要研究的重点,由于VCSEL谐振腔横向尺寸较大,对光场限制能力较弱,所以单横模状态在VCSEL中很难实现。不同的纵向模式只有频率的区别,而不同的横向模式不仅频率不同而且垂直于其传播方向上的场强分布也是不同的。一般来说,激光的模式可以用 TEM_{mnq} 或者 TEM_{plq} 来表示“Transverse Electromagnetic Wave”。其中 TEM_{mnq} 是用来表示矩形光学谐振腔横模的符号,也就是对矩形谐振腔在笛卡尔坐标系里的描述。下标 m 和 n 分别表示在光轴垂直的任意截面内横向光场模式沿 x 和 y 坐标方向上光场振幅为零的数目。下标 q 表示纵向模式的光场沿光轴分布的节点个数。 TEM_{plq} 则是柱坐标系内用以描述圆形光学谐振腔横向模式的符号^[31]。与直角坐标系一样, q 表示为纵向模式的光场沿光轴分布的节点数,模阶数 p 则对应于光场在极坐标中半径方向上为零的个数,而另一个模阶数 l 对应于极坐标中辐角方向上光场强度为零的个数的一半。一般情况下,激光器常常输出多横模,因此实际中看到的光斑可能是不同横模叠加的结果。

与微波的谐振腔不同,激光器谐振腔主要是由两块反射镜组成,在腔的侧面是敞开式的,电磁波并没有受到明显的限制,但是在横截面上仍能形成稳定的分布,其主要原因是反射镜的衍射作用。光在反射镜之间来回传播时,可以将光看成连续地通过一系列间距为 L (腔长)直径为 $2a$ (反射镜的直径)的圆孔。每经过一次圆孔,就会由于圆孔(反射镜)边缘的衍射效应而损耗掉一部分光能量。

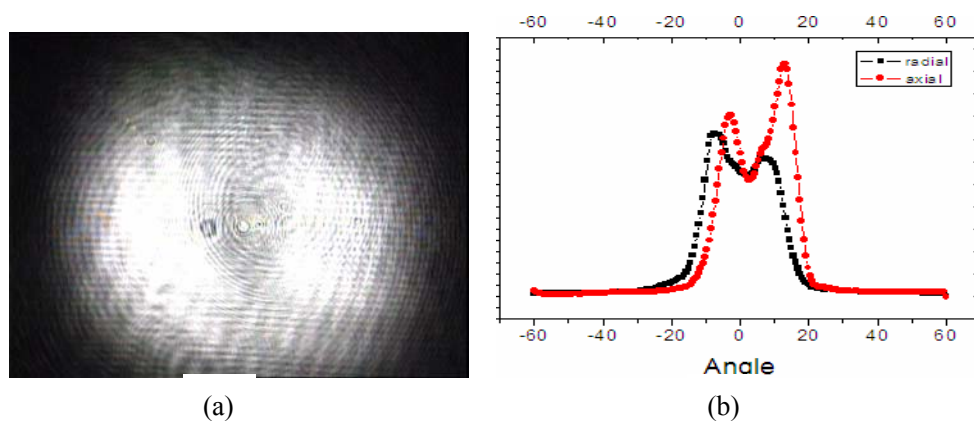


图 2-6 VCSEL 横模分布实验测试结果 (a) 近场图 (b) 远场图
Fig2-6 The distribution of transverse mode for VCSELs (a)near-field (b)far-field

经过许多次的反射,边缘处的光强越来越弱,而越靠近轴线方向传播的光束的光强越大,导致波阵面形成了高斯球面波的光强分布,并能保持场的分布稳定不变。腔内除了这部分光线外,还有部分稍微偏离轴线方向传播的光线,走的是Z形路线。这些光线虽经多次反射仍没有跑出腔外,在偏离光轴一定方向上还存在着干涉加强,因而产生了高次模,当然也有一些其他因素造成了高次模的出现。关于

垂直腔面发射激光器的 LP 模式表达方式，我们将在后面的章节作进一步说明。图2-6 为实验测得的垂直腔面发射激光器横模分布的近场图和远场图（ LP_{11} ）。

2.1.3 VCSEL 的偏振特性

从上面的内容中我们可以知道，模式分布实际上指得就是光通过振动、传播在某一截面内形成的光场分布。这里所说的光振动就是光的偏振。所谓偏振，指的是用一个场矢量来描述空间某一个固定点所观测到的矢量波（电场、应变、自旋）随时间变化的特性。它是各种矢量波共有的一种性质。完整描述光波需要用到四个基本的场矢量：电场强度 E ，电位移密度 D ，磁场强度 H 和磁通量密度 B 。其中选用 E 来定义光波的偏振态，因为当光与物质发生相互作用时，光波的电场对电子的作用力比磁场对电子的作用力大得多。只要求出 E 的偏振态就可以求出其余三个场矢量 D 、 H 、 B 的偏振态，这是因为他们之间的关系由麦克斯韦方程及其有关的物质方程给出。从宏观上看，我们用近场图观测到的横模是一个亮度很高的光斑，它实际上是纵向振动光矢量沿横向传播的结果，同样的纵模是横向振动的光矢量沿纵向传播的结果。具体的方程从麦克斯韦方程组得出^[32]：

$$E(z,t) = E_0 e^{-i(\omega t - k_z z + \psi_0)} \quad (2-8)$$

式中 k ——波矢， $k = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{\lambda} = \omega\sqrt{\epsilon\mu}$

对于平面偏振光可用两个相位相同，振动方向垂直的两列光列的叠加来描述即：

$$\begin{aligned} E(z,t) &= e_x E_x + e_y E_y \\ &= \exp(-i\omega t) \{ e_x E_{ox} \exp[i(kz - \psi_{ox})] + e_y E_{oy} \exp[i(kz - \psi_{oy})] \} \end{aligned} \quad (2-9)$$

式中 E_x , E_y —— x , y 方向的电场分量

E_{ox} , E_{oy} —— x , y 方向的单位电场强度

$$E_x = E_{ox} \cos(\omega t - kz + \psi_{ox}) \quad E_y = E_{oy} \cos(\omega t - kz + \psi_{oy}) \quad (2-10)$$

消去参数 t ，并令 $\delta = \Psi_{oy} - \Psi_{ox}$ ， E 末端轨迹方程如下：

$$\frac{E_x^2}{E_{ox}^2} + \frac{E_y^2}{E_{oy}^2} - 2\left(\frac{E_x}{E_{ox}}\right)\left(\frac{E_y}{E_{oy}}\right)\cos\delta = \sin^2\delta \quad (2-11)$$

$$2\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{2E_{ox}E_{oy}\cos\delta}{E_{ox}^2 - E_{oy}^2}\right) \quad (2-12)$$

根据上式，我们可以得到如下几种典型的偏振情况：

1. 当 $\delta=0$ 或 2π 、 -2π 时，代入上式（2-11）（2-12），即线偏振：

$$E_y = \frac{E_{oy}}{E_{ox}} E_x, \text{ 线偏振 } \theta = \tan^{-1} \left(\frac{E_{ox}}{E_{oy}} \right) \quad (2-13)$$

2. 当 $\delta = \pi$ 或 $2m\pi + \pi$ ($m=0, 1, 2, \dots$) 时, 代入上式 (2-7) (2-8), 即反向线偏振:

$$E_y = -\frac{E_{oy}}{E_{ox}} E_x \quad (2-14)$$

3. 当 $\delta = \pi/2$ 或 $2m\pi + \pi/2$ ($m=0, 1, 2, \dots$) 时, 代入上式 (2-11) (2-12), 即椭圆偏振:

$$\frac{E_x^2}{E_{ox}^2} + \frac{E_y^2}{E_{oy}^2} = 1 \text{ 标准椭圆} \quad (2-15)$$

由 (2-15) 可知, 当 $E_{ox} = E_{oy}$ 时, 为标准的圆偏振情况。下面, 我们从偏振的琼斯矩阵表示法进行分析, 以便对偏振的格式有更加深刻的了解:

对 (2-9) 式进行整理得:

$$E_x = E_{ox} \exp[-i(\omega t - kz + \psi_{ox})] = E_{ox} e^{-i\omega t} e^{i\psi_{ox}} \quad (2-16)$$

$$E_y = E_{oy} \exp[-i(\omega t - kz + \psi_{oy})] = E_{oy} e^{-i\omega t} e^{i\psi_{oy}} \quad (2-17)$$

略去上式中的 $e^{-i\omega t}$, 得到:

$$E_x = E_{ox} e^{i\psi_{ox}}, E_y = E_{oy} e^{i\psi_{oy}} \quad (2-18)$$

$$E = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{ox} e^{i\psi_{ox}} \\ E_{oy} e^{i\psi_{oy}} \end{bmatrix} \quad (2-19)$$

(2-19) 式所反应出的矩阵模型即琼斯矩阵:

1. 光矢量沿 x 轴振幅为 E_{ox} 的平面偏振光:

$$E_x = E_{ox} e^{i\psi_{ox}}, E_y = 0 \quad (2-20)$$

经过归一化得:

$$E = \frac{1}{E_{ox}} \begin{bmatrix} E_{ox} e^{i\psi_{ox}} \\ 0 \end{bmatrix} = e^{i\psi_{ox}} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-21)$$

略去公共因子:

$$E = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-22)$$

(2-22) 反应出的结果为琼斯矩阵法表示的平面偏振光形式。

2. 光矢量与 x 轴成 θ 角, 振幅为 E_0 的平面偏振光:

$$E_x = E_0 e^{i\psi_{ox}} \cos\theta, E_y = E_0 e^{i\psi_{oy}} \sin\theta \quad (2-23)$$

若 $\psi_x=\psi_y$ ，得：

$$E = \frac{I}{E_0} \begin{bmatrix} E_0 \cos\theta e^{i\psi_x} \\ E_0 \sin\theta e^{i\psi_y} \end{bmatrix} = e^{i\psi_x} \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} \quad (2-24)$$

略去公共因子：

$$E = \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} \quad (2-25)$$

(2-25) 式为与轴成夹角的平面偏振光表达形式。举例来说，将 $\theta = \pi/4$ 代入到 (2-25)：

$$E_{\frac{\pi}{4}} = \frac{I}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-26)$$

3. 右旋圆偏振光

$$E_x = E_0 e^{i\psi_x}, E_y = E_0 e^{i(\psi_x - \frac{\pi}{2})} \quad (2-27)$$

经过归一化得：

$$E = \frac{I}{\sqrt{2}E_0} e^{i\psi_x} \begin{bmatrix} E_0 \\ E_0 e^{-i\frac{\pi}{2}} \end{bmatrix} \quad (2-28)$$

略去公共因子：

$$E = \frac{I}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \quad (2-29)$$

(2-29) 为右旋圆偏振光的琼斯矩阵表达法，同理求解左旋圆偏振光表达式如公式 (2-30) 所示：

$$E = \frac{I}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} \quad (2-30)$$

VCSEL的偏振特性受到多方面因素的影响，总结起来就是腔的特性和材料的特性随着电流的变化，出光模式会从一个状态转换到另一个状态，还可能激射高阶模^[33]，外加应力也会使内腔产生双折射（当一束光从空气入射到晶体上时，一般会在晶体内产生两束折射光，不论入射的偏振状态如何，这两束光都是线偏振光，这种现象叫做双折射）和二色性（指各向异性材料对不同偏振方向的光线有不同吸收系数的特性。在垂直腔面发射激光器中，材料对折射率不同的方向的吸收不同，使不同方向的光的增益不同，导致不同的出光模式），从而使光模式发生转变^[34]，温度效应也会对出光的模式有影响，VCSEL出光的偏振特性就是由各向异性效应引起的。

2.2 LP 模式的概念

在前面的章节中，我们谈到了对模式的定义以及一般情况下模式的符号表示。而对于垂直腔面发射激光器而言，通常我们采用 LP 模式来分析其横模空间分布，那么边发射的 TE 、 TM 、 HE 、 EH 模式同 LP 存在怎么样的联系呢？

对于典型的氧化限制垂直腔面发射激光器而言，氧化限制层的厚度一般取在 30nm 左右。因此在圆柱波导内部折射率和包层折射率差大约在 10^{-2} ， $\Delta n < 1$ ^{[35][36]}。满足所谓的弱导波近似。在弱导条件下，在波导芯层中各模式在界面处的全反射临界角都很小，各模式的横向相位常数都远小于纵向常数，这样就使得一些不同模式具有相同的相速度，产生简并，形成模组。由于同组模式相互叠加，使原来复杂的 HE 、 EH 模式变成了线形偏振模，即 LP （Linearly Polarized）模式。

下面我们通过波动方程的数学推导来分析一下这些模式定义上的关系。在多层平面波导中，可将麦克斯韦方程分解为各个坐标分量，并且可以将方程组的六个联立方程分为 3 元联立方程组，因此平板波导的模也可以分为 TE 模式和 TM 模式。然而，在圆柱坐标弱波导中的模式是一种混合模式的形式存在，也就是除特解（假设 $E_z=0$ 或 $H_z=0$ ）情况外， TE 、 TM 是不可分的，要严格求解模式场就必须求解柱坐标边界条件下的麦克斯韦方程。通过对柱坐标特征方程分析可以知道，相同特征值对应的不同特征函数简并^[37]，相互简并的特征函数可以经过线形耦合形成新的特征函数，这些特征模将在横截面内一些方向上产生线形偏振，这样的模式成为 LP 模式，不同的模可以表示为 $LP_{v,m}$ 。

用圆柱坐标 (r, θ, z) 表示麦克斯韦方程式，经若干计算后，可得出如下圆柱坐标系中的波动方程式^[38]：

$$\begin{aligned} E_r &= -\frac{j}{\beta_t^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial r} + \omega \mu \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \theta} \right), & E_\theta &= -\frac{j}{\beta_t^2} \left(\beta \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \theta} - \omega \mu \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} \right) \\ H_r &= -\frac{j}{\beta_t^2} \left(\beta \frac{\partial H_z}{\partial r} - \omega \varepsilon \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \theta} \right), & H_\theta &= -\frac{j}{\beta_t^2} \left(\beta \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \theta} - \omega \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial r} \right) \\ \frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \theta^2} + \beta_t^2 E_z &= 0, & \frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \theta^2} + \beta_t^2 H_z &= 0 \end{aligned} \quad (2-31)$$

式中 ω ——光的角频率

ε ——介质的介电常数

μ ——磁导率

β ——传输常数

β_t ——横向波数

利用 (2-31) 后两个方程式先求出 $E_z=0$ 和 $H_z=0$ ，然后代入到前面四个式子里

面求解其他四个分量，求解方法是利用分离变量方法，分解出一个单一谐振方程式和一个贝塞尔微分方程式：

$$E_z(\text{或}H_z) = R_z(r)\Theta_z(\theta) \quad (2-32)$$

$$\frac{\partial^2 \Theta_z}{\partial \theta^2} + n^2 \Theta_z = 0 \quad \frac{\partial^2 R_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial R_z}{\partial r} + (\beta_t^2 - \frac{n^2}{r^2}) R_z = 0 \quad (2-33)$$

解得： $\Theta_z(\theta) = \cos(n\theta + \varphi), \sin(n\theta + \varphi) \quad \varphi \text{ 为常数} \quad (2-34)$

$$R_z(r) = AJ_n(\beta_t r) + A'N_n(\beta_t r) \quad \beta_t \text{ 为实数} \quad (2-35)$$

$$R_z(r) = CK_n(|\beta_t| r) + C'I_n(|\beta_t| r) \quad \beta_t \text{ 为虚数} \quad (2-36)$$

利用芯层包层的不同可以通过公式（2-32）—（2-36）得到两种类型的解：

TM 解： $E_z = AJ_n(\beta_{t1} r) \sin n\theta \quad (r \leq a) \quad E_z = AJ_n(|\beta_{t2}| r) \sin n\theta (r \geq a)$

$$H_z = 0 \quad (2-37)$$

TE 解： $H_z = BJ_n(\beta_{t1} r) \cos n\theta \quad (r \leq a) \quad H_z = DK_n(|\beta_{t2}| r) \cos n\theta (r \geq a)$

$$E_z = 0 \quad (2-38)$$

光纤和金属波导的情况不同，光纤的 TE 模、 TM 模只存在轴对称的模式（即 $n=0$ 的解）， n 不为 0 时，通过两模适当比率的线形耦合，才能满足边界条件，把这种合成模称为混合模。另外，之所以假定 TM 解正比于 $\sin(n\theta)$ ， TE 解正比于 $\cos(n\theta)$ ，这是因为在后面导入混合模时，芯层和包层之间的解才能平滑地连接起来的缘故。之后代入初始的式子就可以分别求得芯层和包层的 E 和 H 总共六个分量。

传输常数由芯子、包层之间的边界 $r=a$ 处的电磁场连续条件决定，把边界条件代入之前求得的六个解取 $r=a$ ，得到 A 、 B 、 C 、 D 之间四个关系式。将上面四个关系式写成矩阵形式：

$$[M] \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{bmatrix} = 0 \quad (2-39)$$

$$\left[\frac{J'_n(\mu)}{\mu J_n(\mu)} + \frac{K'_n(\omega)}{\omega K_n(\omega)} \right] \left[\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \frac{J'_n(\mu)}{\mu J_n(\mu)} \frac{K'_n(\omega)}{\omega K_n(\omega)} \right] = n^2 \left(\frac{1}{\mu^2} + \frac{1}{\omega^2} \right) \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \frac{1}{\mu^2} + \frac{1}{\omega^2} \right) \quad (2-40)$$

TM 模：由于 $n=0$ ，所以（2-40）式右边为零，考虑 $B=D=n$ ，得到

$$\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \frac{J'_0(\mu)}{\mu J_0(\mu)} \frac{K'_0(\omega)}{\omega K_0(\omega)} = 0 \quad (2-41)$$

TE 模：由于 $n=0$ ，所以 (2-40) 式右边为零，考虑 $A=C=n$ ，得到

$$\frac{J'_0(\mu)}{\mu J_0(\mu)} + \frac{K'_0(\omega)}{\omega K_0(\omega)} = 0 \quad (2-42)$$

n 大于等于 1 的情况，弱导波近似：

$$\frac{J'_n(\mu)}{\mu J_n(\mu)} + \frac{K'_n(\omega)}{\omega K_n(\omega)} = \pm n \left(\frac{1}{\mu^2} + \frac{1}{\omega^2} \right) \quad (2-43)$$

由 (2-43) 推出 EH、HE 模：

$$-\frac{J_{n+1}(\mu)}{\mu J_n(\mu)} = \frac{K_{n+1}(\omega)}{\omega K_n(\omega)} \quad \frac{J_{n-1}(\mu)}{\mu J_n(\mu)} = \frac{K_{n-1}(\omega)}{\omega K_n(\omega)} \quad (2-44)$$

以上提出了不同模式的本征方程式，可以整理它们用一个方程式表示：

$$m = \begin{cases} 1 & (TM \text{ 模和 } TE \text{ 模}) \\ n+1 & (EH \text{ 模}) \\ n-1 & (HE \text{ 模}) \end{cases}$$

$$\text{统一表达式：} \quad \frac{\mu J_{m-1}(\mu)}{J_m(\mu)} = -\frac{\omega K_{m-1}(\omega)}{K_m(\omega)} \quad (2-45)$$

LP 模	原有模名称	简并度
LP_{01}	HE_{11}^*2	2
LP_{11}	$TE_{01}, TM_{01}, HE_{21}^*2$	4
LP_{21}	EH_{11}^*2, HE_{31}^*2	4
LP_{02}	HE_{12}^*2	2
LP_{31}	EH_{21}^*2, HE_{41}^*2	4

表 2-1 LP 模式的简并模式对照

Table2-1 Comparison of LP mode with HE、EH、TM、TE

在弱波导近似的范围内，具有共同参数 m （和 l ）的模式能用同一形式的本征方程式表示，换言之，近似地表示它们具有相同的传输常数。这种模式称为

LP 模式。表 2-1 为不同 LP 模式的简并情况表示：

应当注意的是，在圆柱坐标系统中模式阶数的表示和平面波导中的是有区别的。这里采用的 $LP_{\nu,m}$ 模式阶数的 ν 对应于圆柱坐标中方位角方向光场强度分布为零的个数的一半，它的取值从零开始，且为整数；模阶数 m 将对应于圆柱坐标中半径方向的光场强度分布出现极大值的位置数， m 是取从一开始的整数。

2.3 VCSEL 与边发射激光器模式上的区别及主要问题

相比边发射激光器，由于垂直腔面发射激光器结构上的特殊之处，导致其模式特性同普通激光器也存在一些本质的区别：

1. VCSEL 在横模、纵模的方向上同边发射激光器存在差别。相比边发射激光器，VCSEL 具有更好的纵模特性和比较复杂的横模特性。
2. VCSEL 不能使用不同的边发射激光器平面波导的方法来求解电场分布，其需要建立圆柱弱折射率导引的模型结构进行求解。
3. 边发射激光器横模模型主要由传输矩阵法建立^[39]，由于其横模的传播方向与器件的生长方向一致，所以可以直接利用材料各层的折射率计算每一层的电场分布，采用平面波导理论求解。然而，VCSEL 横模的传播方向与器件生长方向垂直，无法直接使用各层的折射率计算横模场分布，我们只有采用有效折射率的方法，首先利用 VCSEL 传输矩阵法求出驻波场，得到生长方向每一层的电场分布，然后根据有效折射率模型带入方程，算出芯层、包层折射率值，之后采用圆柱弱折射率导引结构求得横模电场分布。
4. 在模式的表示上，边发射激光器通常采用 TEM 、 TE 、 TM 、 EH 、 HE 的表达方法。这里， TEM 表示模式只有横向分量，而无纵向分量，即 $E_z=0$ 且 $H_z=0$ 。 TE 或 TM 模表示模式只有一个纵向分量，对于 TE 模有 $E_z=0$ 但 H_z 不等于 0，对于 TM 模有 $H_z=0$ 但 E_z 不等于 0。 HE 模或 EH 模表示模式的两个纵向分量都不等于 0。而对于垂直腔面发射激光器而言，其常常使用 LP 对模式进行描述，相互简并的特征函数可以经线形耦合形成新的特征函数，这些特征模将在横截面内一些方向上产生线性偏振，这样的模式称为 LP 。前面我们已经证明了它与边发射激光器通常模式表述之间的关系。

2.4 本章小结

详细概括和总结了垂直腔面发射激光器模式方面的理论和概念，包括纵模的定义及优越性阐述、频率分裂现象，横模的定义以及复杂性分析，偏振特性等等。其次，本章对 LP 的表达方式进行了理论分析及数学推导，得出 LP 模式同普通边发射激光器 TE、TM 等模式表达的相互关系，用表格的形式说明线性偏振模的简并关系。最后，本章说明了垂直腔面发射激光器同边发射激光器模式方面上特性、计算方法上的区别，为之后建立空间分布模型、有效折射率模型提供理论依据。

第3章 垂直腔面发射激光器场分布的模拟与测试

对于 VCSEL 的模式特性来说,研究其横模二维、三维空间分布是我们研究的重点。与边发射激光器相比,圆柱弱折射率导引的垂直腔面发射激光器不能用传统的平面波导模型进行计算。由于 VCSEL 具有类光纤结构,中间折射率高,两边折射率低,所以我们分别采用了修正的三层波导方法、柱坐标方法分别对其进行研究,找到最优化的模拟结果,并建立可视化模型,以便随时调整输入参数,得到比较理想的输出结果。这项工作对于验证模拟结果的正确性,以及分析影响模式的因素等问题上起着十分重要的作用。

3.1 利用修正的三层波导结构算横模场分布

3.1.1 传统的三层波导结构算法

根据垂直腔面发射激光器横向中心高,两边低的折射率分布,我们可以粗略的定义它平面上的三层分布形式,取经过圆柱中心剖开的纵向界面,其折射率分布如图 3-1 所示:

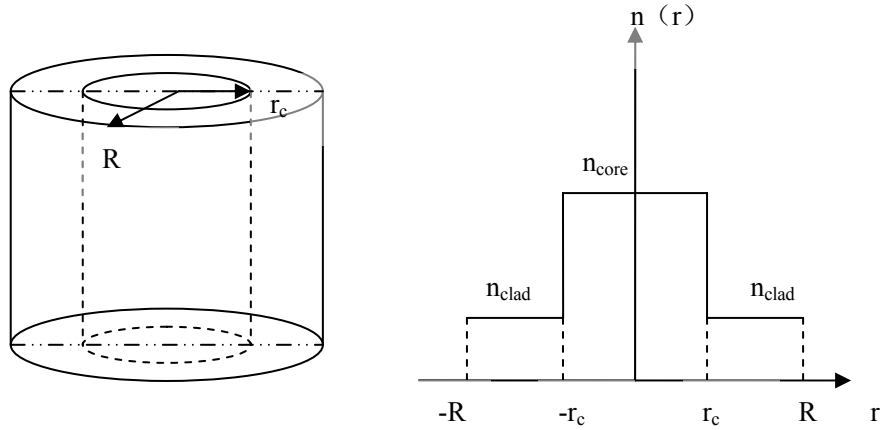


图 3-1 VCSEL 剖面折射率分布

Fig3-1 The distribution of the refractive indexes for VCSEL

图中 R 表示的是从圆柱中心到器件边缘的距离,而 r_c 代表VCSEL的注入孔径。传统的三层波导结构假设 R 为无穷大^[40],利用波导公式(3-1)

$$\begin{aligned} \nabla^2 E(r,t) &= \frac{n_i^2}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 E(r,t)}{\partial t^2} \\ \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) E(x,y) + (k_0^2 n_{i(r)}^2 - \beta^2) \cdot E(x,y) &= 0 \end{aligned} \quad (3-1)$$

式中, n_i 为各层的折射率, k_0 为真空传播常数, β 为平面波在介质中的相位常数。将三层波导三个区域的折射率代入到 (3-1) 式中, 得到公式 (3-2):

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial x^2} E(x) + (k_0^2 n_1^2 - \beta^2) \cdot E(x) &= 0 & E_y(x) &= A \exp(-\gamma_1 x) \quad 0 \leq x \leq \infty \\ \frac{\partial^2}{\partial x^2} E(x) + (k_0^2 n_2^2 - \beta^2) \cdot E(x) &= 0 & E_y(x) &= B \cos(kx) + C \sin(kx) \quad -d \leq x \leq 0 \\ \frac{\partial^2}{\partial x^2} E(x) + (k_0^2 n_3^2 - \beta^2) \cdot E(x) &= 0 & E_y(x) &= D \exp[\gamma_3(x+d)] \quad -\infty \leq x \leq -d \end{aligned} \quad (3-2)$$

式中 x 方向为垂直于器件生长方向的横向位置, y 方向为器件的生长方向, E_y 为光场沿生长方向上的光场分布。 $k^2 = (\omega n_2/c)^2 - \beta^2$, $\gamma_1^2 = \beta^2 - (\omega n_1/c)^2$, $\gamma_3^2 = \beta^2 - (\omega n_3/c)^2$ 。利用边界条件的连续性我们得到了如下的整理公式 (3-3):

$$\begin{aligned} E_y(x) &= C' \exp(-\gamma_1 x) \exp(-i\beta z) \quad 0 \leq x \leq \infty \\ E_y(x) &= C [\cos(kx) - (\gamma_1/k) \sin(kx)] \exp(-i\beta z) \quad -d \leq x \leq 0 \\ E_y(x) &= C [\cos(kd) + (\gamma_1/k) \sin(kd)] \exp[\gamma_3(x+d)] \exp(-i\beta z) \quad -\infty \leq x \leq -d \end{aligned} \quad (3-3)$$

根据磁场分量方程组的边界条件, 我们可以得到公式 (3-4)

$$\tan(kd) = \frac{k(\gamma_1 + \gamma_3)}{k^2 - \gamma_1 \gamma_3} \quad (3-4)$$

根据上述公式以及 $k^2 = (\omega n_2/c)^2 - \beta^2$, $\gamma_1^2 = \beta^2 - (\omega n_1/c)^2$, $\gamma_3^2 = \beta^2 - (\omega n_3/c)^2$, 若已知折射率 n_1 , n_2 , n_3 , 输出波长 λ , 根据磁场分布边界条件 (3-4) 式, 我们可以计算得到 k 值, 将 k 值代入到 γ_1 , γ_3 中求解, 这样公式 (3-3) 中的全部参数已知, 利用 MATLAB 软件我们就可以绘制利用传统三层波导结构得到的光场分布图形。

3.1.2 修正的三层波导结构算法

对于图 3-1 实际的 VCSEL 剖面来说, R 并不是无穷大, 通常 $2r_c = 4 \sim 10 \mu\text{m}$, 包层直径实际上为 $2R = 125 \mu\text{m}$, 但是由于在边界上的场已迅速衰减, 外边界的存在对场分布影响很小, 故可将它看成只有两层的圆光波导。对传统三层波导 (3-2) 式进行修正, 得到公式 (3-5)

$$\begin{aligned} E(x) &= C_1 \exp(\gamma_1 x) + C_2 \exp(-\gamma_1 x) \quad 0 \leq x \leq (D-d)/2 \\ E(x) &= A_1 \cos(kx) + A_2 \sin(kx) \quad -d \leq x \leq 0 \\ E(x) &= B_1 \exp[\gamma_3(x+d)] + B_2 \exp[-\gamma_3(x+d)] \quad (-D-d)/2 \leq x \leq -d \end{aligned} \quad (3-5)$$

式中, d 为芯层直径, D 为包层直径。为根据边界连续性条件, 我们可以将上式的 A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 、 C_1 、 C_2 求出, 这样便得到了修正后的三层波导场分布。下面我们假设 $n_{\text{core}} = 3.3$, $n_{\text{clad}} = 3.29$, $\lambda = 0.9$, $d = 3 \mu\text{m}$ 时的横模光场分布图, 以 LP_{01} 、

LP_{11} 、 LP_{21} 为例，图 3-2 为利用修正三层波导结构求得的 LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{21} 二维、三维空间分布：

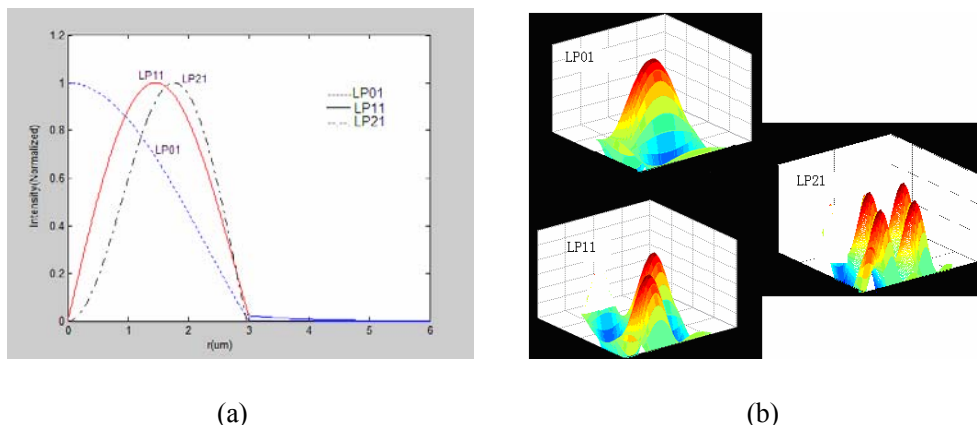


图 3-2 LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{21} 模式分布 (a) 沿半径方向的分布情况 (b) 3-D分布图

Fig 3-2 The distribution of LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{21} for VCSEL (a)2-D (b)3-D

表面看，这种利用修正的三层波导结构模拟光场分布的方法模拟出的结果没有问题，但是实际上将平面波导应用到圆柱结构的 VCSEL 中还是存在问题的。

3.1.3 存在的问题

我们在利用修正后的三层波导结构时，分析的是经过圆柱中心的剖面，这样的假设不能真正反映出VCSEL柱状结构的空分分布，以 LP_{31} 模式为例，如图 3-3 所示：

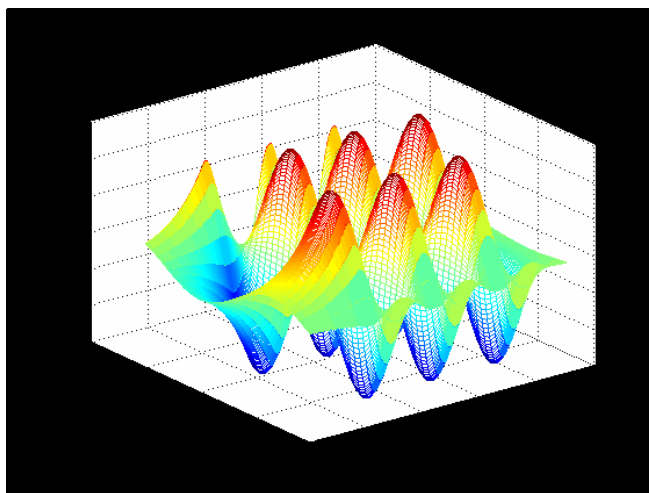


图 3-3 利用修正三层波导结构求得的 LP_{31} 分布

Fig3-3 The distribution of LP_{31} for VCSEL.

上图中 LP_{31} 的分布显然是错误的，利用平面波导结构算VCSEL是不可能得到轴对称的环状分布的，所以我们仍然要尝试利用柱坐标法对VCSEL横模分布进行计算与模拟。

3.2 利用柱坐标方法算横模场分布

3.2.1 理论推导及分布模拟

圆均匀光波导既然是均匀光波导，它就具有均匀光波导的 3 个基本特征：

(1) 存在着传输模，即场分布可分离成模式场和波动项 $\exp(j\beta z)$ ，即

$$\begin{pmatrix} E \\ H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e \\ h \end{pmatrix} (x, y) e^{j\beta z} \quad (3-6)$$

其中模式场又可进一步分解为纵向分量和横向分量的和，即

$$\begin{aligned} e &= e_t + e_z \\ h &= h_t + h_z \end{aligned} \quad (3-7)$$

横向分量 (e_t, h_t) 按什么坐标系分解尚需进一步确定。我们知道，不同的坐标系将导致不同的方程，从而得到不同的模式序列。如果将它们按柱坐标系分解（在平面域内为极坐标系），可得

$$\begin{aligned} e_t &= e_r + e_\varphi \\ h_r &= h_r + h_\varphi \end{aligned} \quad (3-8)$$

这种分解方法得到的模式场。可与边界形状（圆）相一致，称为矢量模。

(2) 模式场 (e, h) 满足齐次波动方程：

$$\{\nabla_t^2 + (k^2 n^2 - \beta^2)\} \begin{pmatrix} e \\ h \end{pmatrix} = 0 \quad (3-9)$$

该方程可按纵向分量和横向分量进行分解，即有

$$\{\nabla_t^2 + (k^2 n^2 - \beta^2)\} e_z = 0 \quad (3-10a)$$

$$\{\nabla_t^2 + (k^2 n^2 - \beta^2)\} h_z = 0 \quad (3-10b)$$

$$\{\nabla_t^2 + (k^2 n^2 - \beta^2)\} e_t = 0 \quad (3-10c)$$

$$\{\nabla_t^2 + (k^2 n^2 - \beta^2)\} h_t = 0 \quad (3-10d)$$

方程 (3-10) 中的前两个为标量方程，后两个为矢量方程。标量方程 (3-10a) 和 (3-10b) 中的纵向分量可直接求解，在柱坐标系下，将两个矢量方程 (3-10c) 和 (3-10d) 分解成只含单一分量 ($e_r, e_\varphi, h_r, h_\varphi$) 的标量方程是不可能的，这 4 个分量的求解只能求助于纵向分量和横向分量的关系，故这种解法称为矢量法。因此，矢量法的求解只能从纵向分量满足的标量方程出发。考虑到圆对称性，将纵向分量对 (r, φ) 进行分离变量，可得到贝塞尔方程，以 e_z 为例：

$$\frac{d^2 e_z}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{de_z}{dr} + \left[k^2 n_i^2 - \beta^2 - \frac{m^2}{r^2} \right] e_z = 0 \quad (3-11)$$

(3) 对于矢量模, 在圆柱坐标系下, 模式场的纵向分量与横向分量的关系, 可根据波动方程, 得:

$$\begin{aligned} e_r &= \frac{j}{\omega^2 \mu_0 \varepsilon - \beta^2} \left\{ \beta \frac{\partial e_z}{\partial r} - \frac{\omega \mu_0}{r} \frac{\partial h_r}{\partial \varphi} \right\} \\ e_\varphi &= \frac{j}{\omega^2 \mu_0 \varepsilon - \beta^2} \left\{ \frac{\beta}{r} \frac{\partial e_z}{\partial \varphi} + \omega \mu_0 \frac{\partial h_z}{\partial r} \right\} \\ h_r &= \frac{j}{\omega^2 \mu_0 \varepsilon - \beta^2} \left\{ \beta \frac{\partial h_z}{\partial r} + \frac{\omega \varepsilon_0}{r} \frac{\partial e_z}{\partial \varphi} \right\} \\ h_\varphi &= \frac{j}{\omega^2 \mu_0 \varepsilon - \beta^2} \left\{ \frac{\beta}{r} \frac{\partial h_z}{\partial \varphi} - \omega \varepsilon_0 \frac{\partial e_z}{\partial r} \right\} \end{aligned} \quad (3-12)$$

对于 VCSEL 来说, 其具有类光纤结构, 属于二层均匀光波导范畴, 即其模式场具有圆对称性。综上所述, 其矢量法归结于解两个方程 (3-10a) 和 (3-10b), 其他分量由纵向分量和横向分量关系式 (3-12) 求出。

对于横模而言, 我们希望知道的是 $e_z(r)$ 的分布, 所以利用 (3-10a) 式, 我们得到了电场分布的二维分布形式:

$$e_z(r) = \begin{cases} a_0 J_m\left(\frac{U}{a}r\right) & r < a \\ b_a K_m\left(\frac{W}{a}r\right) & r > a \end{cases} \quad (3-13)$$

式中 m ——模式阶次

J ——第一类贝塞尔函数

K ——第二类变型贝塞尔函数

a_0, b_a ——待定系数

a ——注入孔径

$U^2 = (k^2 n_1^2 - \beta^2) a^2$, $W^2 = (\beta^2 - k^2 n_2^2) a^2$, $U^2 + W^2 = V^2$ 。由 $V^2 = k^2 (n_1^2 - n_2^2) a^2$ 可知, 当光波导结构参数 (n_1, n_2, a) 已知时, V 正比于真空中的波数 k , 故 V 是一个表征频率的量, 称为归一化频率, 或称为截止频率^[40]。根据边界连续性条件, 我们可以得到 $b_a = (U/W) a_0$ 。这样, 如果我们知道光波导结构 n_1, n_2, a , 输出波长, 截止频率 V , 模式阶次 m , 我们就可以模拟出 VCSEL 横模二维分布。同理, 利用相同的方法, 我们可以得到三维横模光场分布:

$$\begin{aligned} E_z &= A(J_m(Ur)/J_m(U))f_m(\varphi) & r < a \\ E_z &= B(K_m(Wr)/K_m(W))f_m(\varphi) & r > a \end{aligned} \quad (3-14)$$

式中, φ 为角度变量, 其中 $fm(\varphi) = \cos(m\varphi)$ 偶模, $fm(\varphi) = \sin(m\varphi)$ 奇模, 径向电场分量是 φ 的偶函数或奇函数的模式, 称为偶模或奇模。

在之前的章节中, 我们已经推导了特征方程, 如式 (2-18) 所示, 根据特征方程, 我们可以得到不同模式的截止条件, W 趋于 0 时, U 趋于 V :

1. 当 m 不为 0 时, 截止条件为 $J_{m-1}(V) = 0$
2. 当 m 为 0 时, 截止条件为 $J_1(V) = 0$ (包括 $V=0$)

将线偏振模以 m 之次序和根从小到大的次序 n 进行排列, 即可对线形偏振模 LP_{mn} 进行排序。它们的截止条件分别为

$$m=0 \quad J_1(V) = 0, 3.83, 7.01$$

$$m=1 \quad J_0(V) = 0, 2.4048, 5.5201$$

$$m=2 \quad J_1(V) = 0, 3.83, 7.01 \quad \dots\dots\dots$$

从而 LP_{mn} 依次出现的顺序为 $LP_{01}, LP_{11}, LP_{02}, LP_{21}, LP_{12}, \dots\dots\dots$

由于 $m=0$ 时, 存在一个截止频率为零的模式 LP_{01} , 它是二层圆均匀光波导的基模, 于是得到单模条件为 $V < 2.4048$ 。下图 3-4 描述了以零阶、一阶第一类贝塞尔函数为例得到的不同阶次 LP 模式对应 V_c 的取值范围:

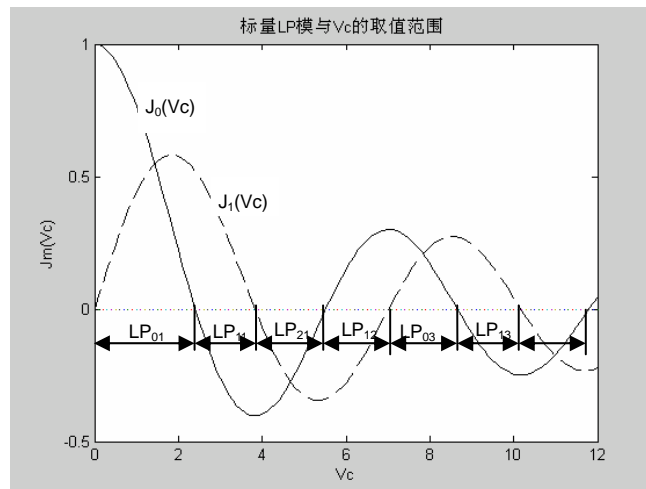


图 3-4 标量 LP 模对应 V_c 的取值范围

Fig 3-4 The relationship between the different modes and the different positions of the Bessel function

下表 3-1 显示了不同阶次模式对应的 V 值取值范围:

截止条件	V	模式阶次	截止条件	V	模式阶次
$J_1=0$	0	LP_{01}	$J_3=0$	6.380	LP_{41}
$J_0=0$	2.405	LP_{11}	$J_1=0$	7.016	LP_{03}
$J_1=0$	3.882	LP_{21}	$J_4=0$	7.688	LP_{51}
$J_2=0$	5.136	LP_{31}	$J_2=0$	8.417	LP_{32}
$J_0=0$	5.520	LP_{12}			

表 3-1 不同阶次模式对应的 V 值取值范围

Table3-1 The relationship between the V-parameter and the mode

通过上述内容的归纳与总结，我们可以得到所有需要代入到公式的输入参数值，芯层、包层折射率 n_1 ， n_2 （在后面的有效折射率章节中，我们将得到这方面的计算方法），注入孔径 a ，输出波长 λ ，模式阶次 m ，截止条件 V 。下面需要做的就是将所有已知代入到公式中进行模拟。

从公式（3-13）和（3-14）中我们发现，要模拟垂直腔面发射激光器的横模光场分布，首先必须了解第一类贝塞尔函数以及第二类变型贝塞尔函数的分布规律。通过推导，我们可以获得第一类贝塞尔函数、第二类变型贝塞尔函数的数学表达式^[41]，如公式（3-15）和（3-16）所示：

$$J_m(z) = \frac{i^m}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp(-i * z * \cos(\theta)) * \cos(m * \theta) d\theta \quad (3-15)$$

$$K_m(z) = \int_0^{\infty} \exp(-z * \cosh(t)) * \cosh(m * t) dt \quad (3-16)$$

从上述两个公式中我们可以看出，模式阶次 m 以及括号内的变量 z （实际上是前面提到的截止条件 V ）对贝塞尔函数的取值都存在着极其重要的影响，不同的 m 以及 V 值可以得到不同分布情况的模式。图 3-5（a）（b）分别描绘了不同阶次的贝塞尔函数、第二类变型贝塞尔函数的部分情况。这样，在所有条件都已知的情况下，我们对垂直腔面发射激光器的横模分布进行模拟。

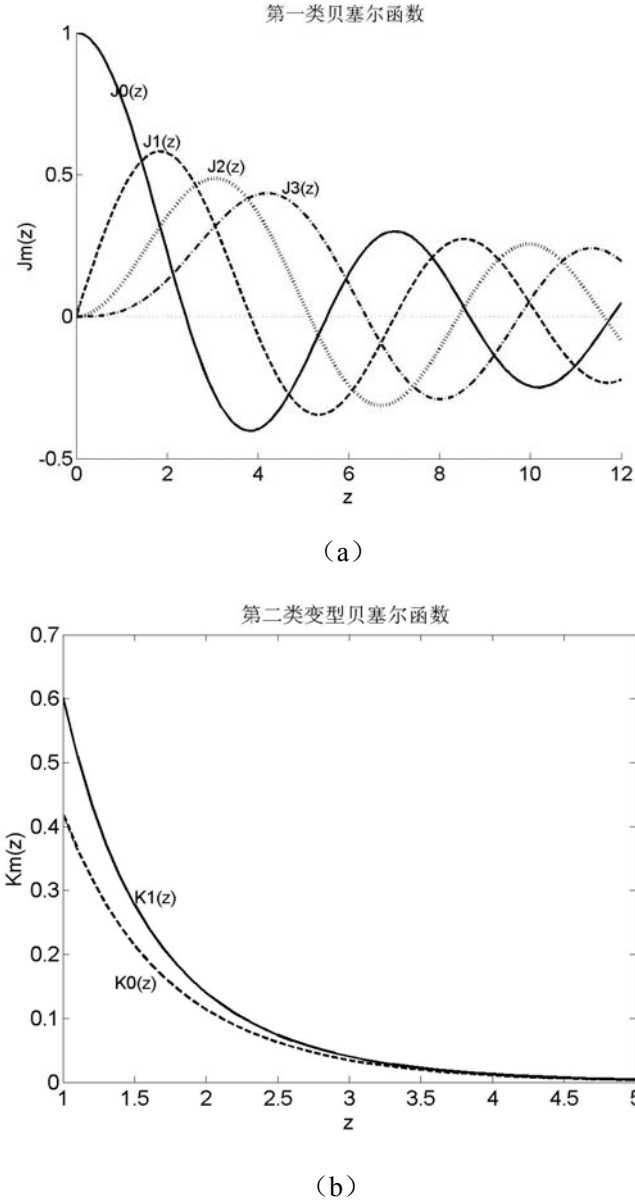


图 3-5 不同阶次贝塞尔函数的分布情况 (a) 第一类贝塞尔 (b) 第二类变型贝塞尔

Fig3-5 The distribution of Bessel with different stages

(a) Bessel function of the first kind (b) Modified Bessel function of the second kind

这里我们假设激光波长 $0.85\mu\text{m}$ ，芯层折射率 n_{core} 为 3.3，包层折射率 n_{clad} 为 3.29，注入孔径 a 为 $3\mu\text{m}$ ，根据 $V^2 = k^2 (n_1^2 - n_2^2) a^2$ 我们可以得到此结构的 V 为 5.6，即所有截止频率小于 5.6 的模式都有可能从此结构中激射出来，根据不同的工作条件，它们彼此间存在强烈的模式竞争，谁获得较大的增益，谁就将在此刻占据主导地位而显现出来。

下面我们分别针对不同阶次的模式检验一下模拟结果，举例说明：

(1) 基模 LP_{01} ， $m=0$ ，截止条件 $V=2.2$

由前面的推导可知，只要 $V < 2.4048$ ，VCSEL 都是单基模工作。当 V 为 2.2

时，基模的输出特性最好，如图 3-6 所示：

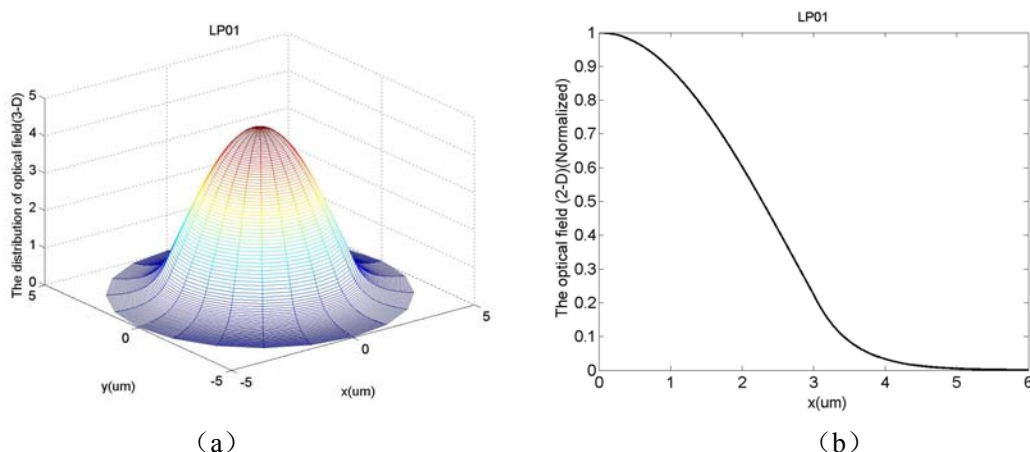


图 3-6 基模 LP_{01} 的光场分布示意图 (a) 3-D (b) 2-D

Fig3-6 The distribution of LP_{01} (a)3-D (b)2-D

我们看看这个模拟结果是否符合前面我们对 LP 模式的定义， $LP_{m,n}$ 模式阶数的 m 对应于圆柱坐标中方位角方向光场强度分布为零的个数的一半，它的取值从 0 开始，且为整数；模阶数 n 将对应于圆柱坐标中半径方向的光场强度分布出现极大值的位置数， n 是取从 1 开始的整数。此时的 $m=0$ ，即方位角方向上不存在光场强度为零的位置， $n=1$ ，即半径方向上只有一个光场强度分布极大值，模拟结果符合定义。

(2) LP_{11} 模 $m=1$ ，截止条件 $V=3.2$

从表格 3-1 中我们可以得出，只要 $2.4048 < V < 3.882$ ， LP_{11} 模就会激射。现在我们取 $V=3.2$ ，其模拟结果如图 3-7 所示：

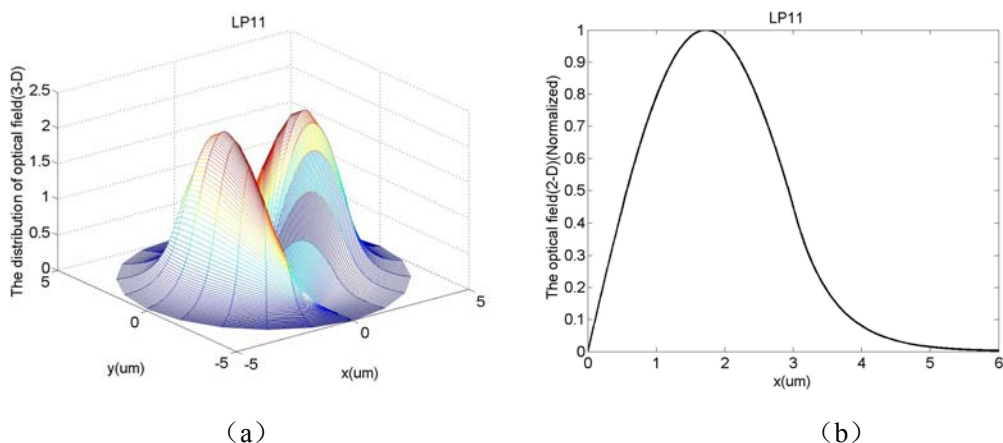


图 3-7 模式 LP_{11} 的光场分布示意图 (a) 3-D (b) 2-D

Fig3-7 The distribution of LP_{11} (a)3-D (b)2-D

从图中我们可以看出， LP_{11} 沿半径方向只有一个极大值 $n=1$ ，而在角坐标方向

出现了两个分布为零的最小值位置，所以 $m=2/2=1$ ，符合定义结果。

(3) LP_{21} 模， $m=2$ ，截止条件 $V=4.5$

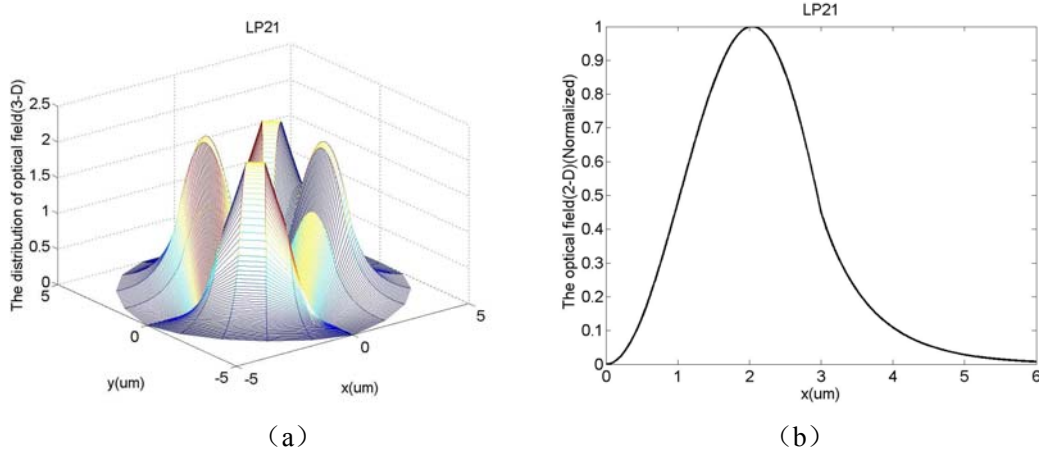


图 3-8 模式 LP_{21} 的光场分布示意图 (a) 3-D (b) 2-D

Fig3-8 The distribution of LP_{21} (a)3-D (b)2-D

从表格 3-1 中我们可以得出，只要 $3.882 < V < 5.136$ ， LP_{21} 模就会激射。现在我们取 $V=4.5$ ，其模拟结果如图 3-8 所示，从图中我们可以看出， LP_{21} 沿半径方向只有一个极大值 $n=1$ ，而在角坐标方向出现了四个分布为零的最小值位置，所以 $m=4/2=2$ ，符合定义结果。

(4) LP_{02} 模， $m=0$ ，截止条件 $V=4.0$

现在我们取 $V=3.8$ ， $m=0$ ，其模拟结果如图 3-9 所示：

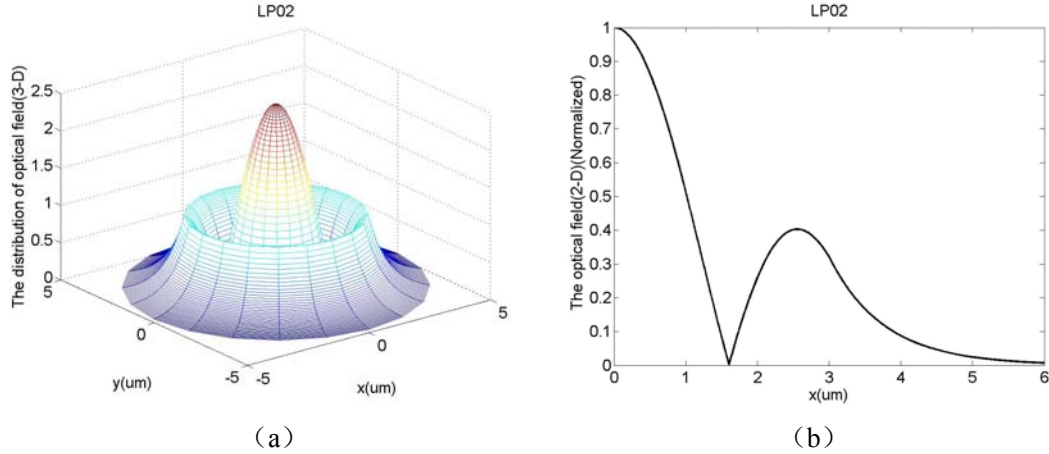


图 3-9 模式 LP_{02} 的光场分布示意图 (a) 3-D (b) 2-D

Fig3-9 The distribution of LP_{02} (a)3-D (b)2-D

从图中我们可以看出， LP_{02} 沿半径方向有两个极大值 $n=2$ ，而在角坐标方向没有出现分布为零的最小值位置，所以 $m=0$ ，符合定义结果。

(4) LP_{12} 模， $m=1$ ，截止条件 $V=5.52$

从表格 3-1 中我们可以得出，只要 $5.52 < V < 6.38$ ， LP_{12} 模就会激射。现在我们取 $V=5.52$ ，其模拟结果如图 3-10 所示：

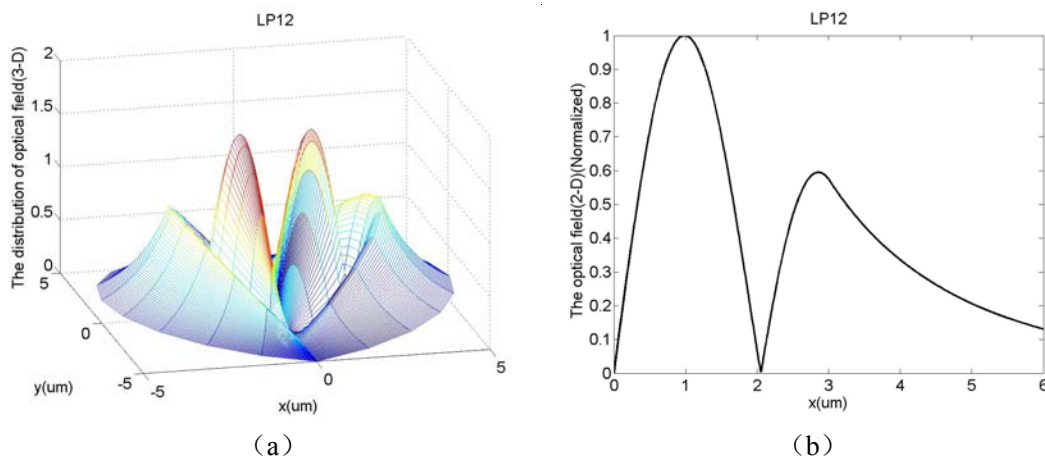


图 3-10 模式 LP_{12} 的光场分布示意图 (a) 3-D (b) 2-D

Fig3-10 The distribution of LP_{12} (a)3-D (b)2-D

从图中我们可以看出， LP_{12} 沿半径方向有两个极大值 $n=2$ ，而在角坐标方向出现了两个分布为零的最小值位置，所以 $m=2/2=1$ ，符合定义结果。

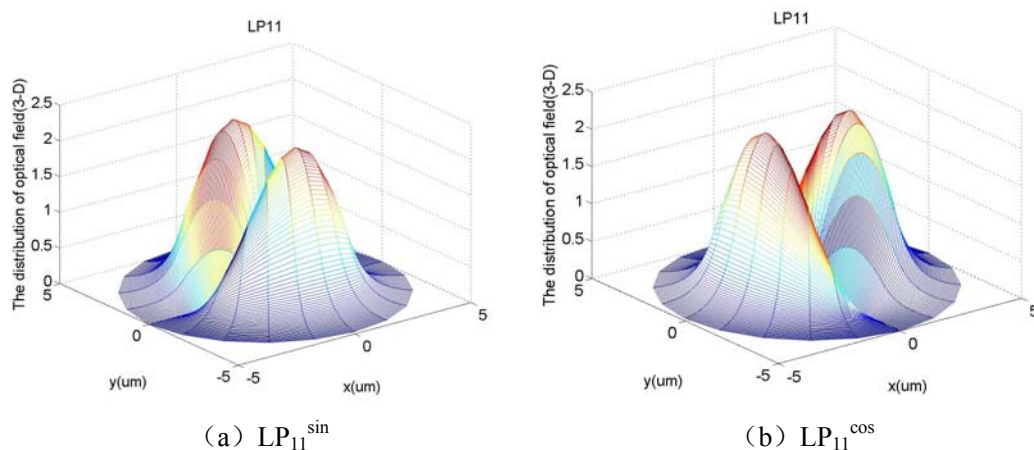
综上所述，我们通过将 LP 定义与模拟结果对比，验证了二者的统一。在下面一节中我们将谈谈其模拟结果的优化。

3.2.2 对模拟结果的优化

要得到理想的模式分布模拟图，不光是要设置好结构参数，准确地选择截止条件 V 以及奇模、偶模对于图形的优化起着至关重要的作用。

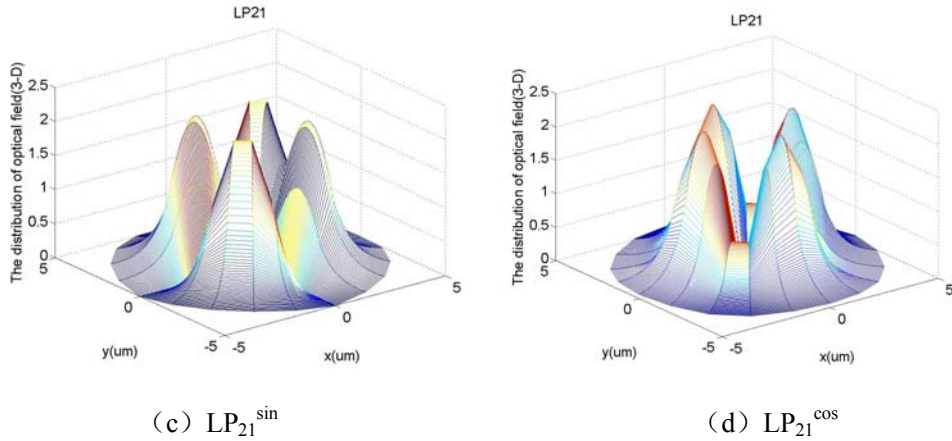
1. 奇模、偶模造成图形上的区别

前面在推导模式公式 (3-14) (3-15) 时，我们已经接触到了关于奇模、偶模的概念，径向电场分量是 φ 的偶函数或奇函数的模式，称为偶模或奇模^[42]。对于



(a) LP_{11}^{\sin}

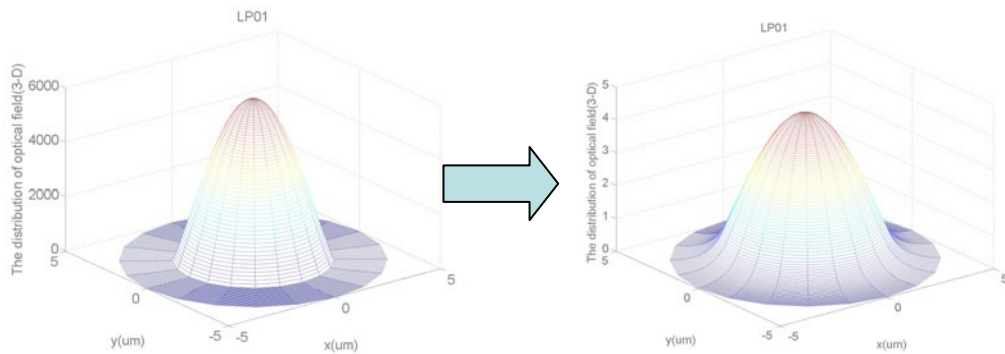
(b) LP_{11}^{\cos}

图 3-11 LP_{11} 、 LP_{21} 奇模、偶模空间分布Fig3-11 The distribution of LP_{11} 、 LP_{21} (a) LP_{11}^{\sin} (b) LP_{11}^{\cos} (c) LP_{21}^{\sin} (d) LP_{21}^{\cos}

LP_{11} 、 LP_{21} 这类既可以实现中心对称又可以实现轴对称的模式来说，偶模或奇模所模拟出来的结果不尽相同。从图 3-11 可观测到 LP_{11} 、 LP_{21} 奇模、偶模在图形分布上的区别。

2. 截止条件 V 对模式分布的影响

虽然我们可以得到不同阶次模式的截止频率 ν ，但是，代入方程的 ν 值并不是唯一固定值，以基模 LP_{01} 为例，通过截止方程的求解，我们可以得到 $\nu=2.4048$ ，即当 ν 处于 0 至 2.4048 时，都可以认为激光器工作在单基模的状态下^[40]，求出的 ν 值只是一个临界条件，为了使二维、三维模拟曲线光滑，根据不同的输入参数，我们需要调整适当的 ν 值进行带入，从而达到最佳的模拟效果。图 3-12 为 $m=0$ ， $n_{core}=3.3$ ， $n_{clad}=3.29$ ，激光波长 $0.85\mu\text{m}$ ，注入孔径 a 为 $3\mu\text{m}$ ，截止条件 ν 分别为 2.405 和 2.2 时的光场三维分布图：

图 3-12 不同截止条件下 LP_{01} 模式分布 (a) $\nu=2.4048$ (b) $\nu=2.2$ Fig3-12 The distribution of LP_{01} (a) $\nu=2.4048$ (b) $\nu=2.2$

3.3 横模光场分布的测试

上面的章节中，我们已经分析了各阶模式的模拟结果，为了进一步验证模拟的正确性，我们还需要对实际的 VCSEL 器件进行测试，对比试验测试的结果。

3.3.1 测试结果同模拟结果的分析

首先我们来测试阈值电流 $I_{th}=0.67\text{mA}$ ，最大工作电流 $I_f=19\text{mA}$ ，最大输出功率 $P_{max}=3.3\text{mW}$ ，注入孔径为 $11\mu\text{m}$ 的VCSEL器件的横模近场分布。图 3-13 为该器件随注入电流变化横模近场分布，当注入电流为 1mA 时，横模光场分布如图 3-13

(a) 所示，此时为 LP_{01} 基模出射。随着注入电流增大到 2mA 时，横模光场分布如图 3-13 (b) 所示，光斑分裂成两个区域，即此时对应于载流子位置的 LP_{11} 模激励出来。随着注入电流的继续增大，光斑的分裂情况会进一步加剧，如图 3-13 (c) 所示，光斑逐渐分裂成四个区域，即 LP_{21} 模显现出来。

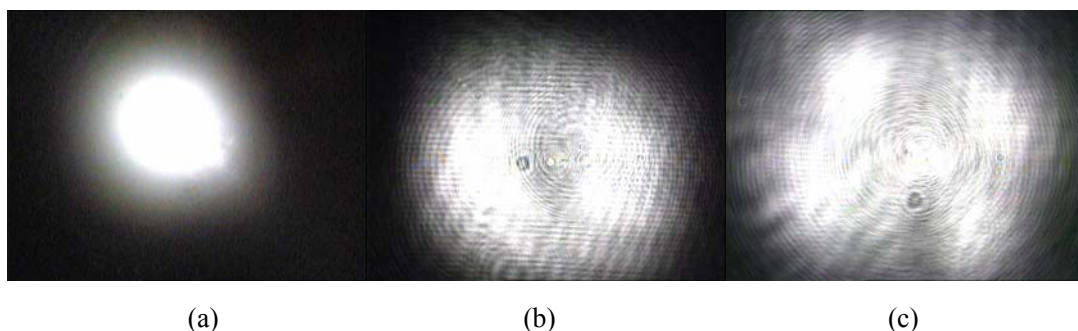


图 3-13: 横模光场随注入电流变化的分布图(a)1mA (b)2 mA (c) 15 mA

Fig3-13 The near-field of VCSEL with the current changed (a) 1mA (b) 2 mA (c) 15 mA

图 3-14 是对上述器件远场图进行测试的结果。测试电流分别为 1mA 、 2mA 、 15mA ，其中圆点标记曲线表示出射面水平方向上的场分布，而三角标记曲线则表示出射面垂直方向上的场分布。

从中我们可以看出，图 3-14 (a)到图 3-14 (b)的过程是一个从自发辐射向受激辐射过渡的过程，当注入电流为 0.5mA 时，此器件没有达到阈值条件而荧光发射，其半高全宽(FWHM)为 38.8nm ，且输出功率很低。随着注入电流逐渐增大到 1mA 后，此器件满足阈值条件而受激辐射，其FWHM为 0.6nm ，可见辐射出的光束为激光，且由于此时注入电流较低，只有基模满足激励条件，光场分布呈现出单一的峰值分布。当注入电流增大到 2mA 后，其光场分布如图 3-14(c)所示，出射面垂直和水平方向上的光场均出现了明显的分裂现象，此时激光器已经不是单基模工作了，对照图 3-13 的相应位置，我们可以看出此时 LP_{11} 模已经激励，此时的FWHM为 1.2nm 。当注入电流进一步增大到 15mA 以后，其光场分布如图 3-14 (d)所示，

此时出射面水平以及垂直方向上的分裂现象更加剧烈，说明更高阶次的模式 LP_{21} 满足阈值条件而激射出来。

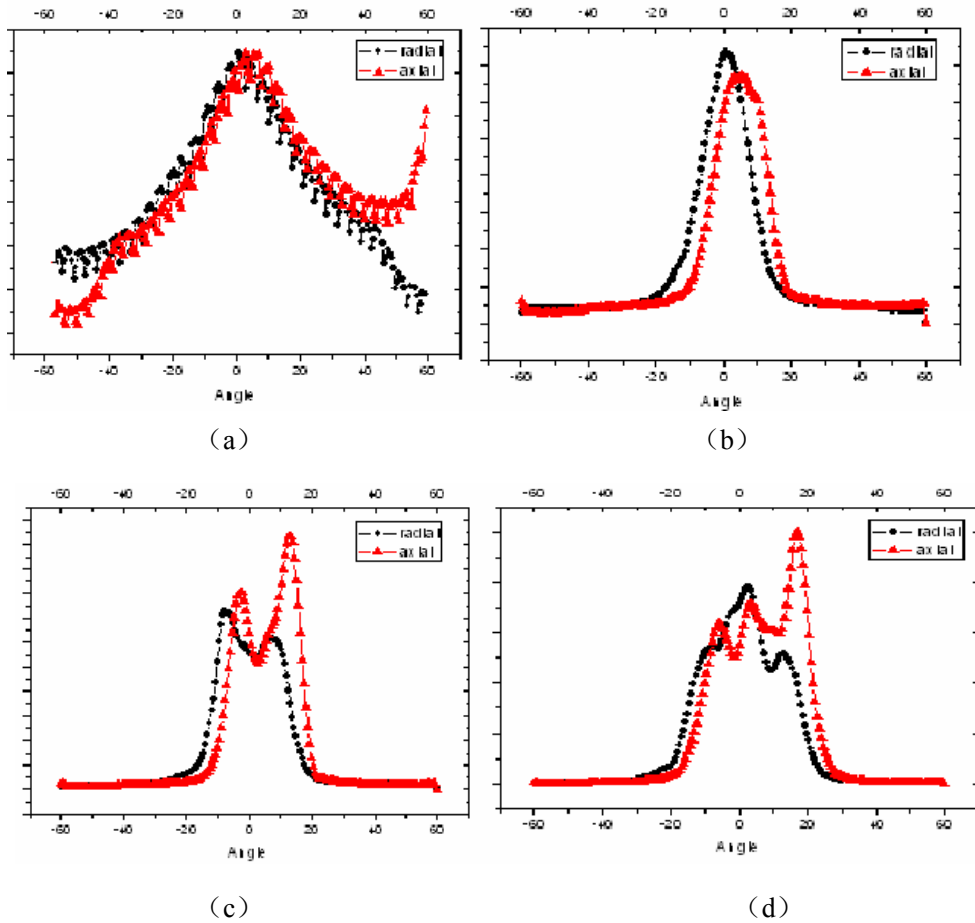


图 3-14: 横模光场分布随注入电流变化的远场图(a)0.5mA (b)1 mA (c)2 mA (d) 15mA

Fig3-14 The far-field of VCSEL with the current changed(a)0.5mA (b)1 mA (c)2 mA (d) 15mA

与图 3-6、3-7、3-8 对比，我们可以发现，实验测得的VCSEL近场分布、远场分布与模拟结果基本一致，只是在图 3-13 (c) 中，我们看到的 LP_{21} 模式没有模拟结果分瓣那么清晰，具体原因将在下面一节中讨论。

3.3.2 误差分布

在对横模进行定义时，我们曾经谈到，一般情况下，激光器常常输出多横模，因此实际中看到的光斑可能是不同横模叠加的结果。让我们把 LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{21} 的二维分布画在同一张图中，看看它们的分布关系，如图 3-15 所示。从图中我们可以看出，由于 LP_{01} 、 LP_{11} 彼此交叠程度较小，所以在 LP_{11} 激射的时刻，由于二者之间的模式竞争相对较弱， LP_{01} 被抑制的比较彻底，故从实际测试结果，我们可以得到比较理想的双瓣图像^{[43][44]}，如图 3-13 (b) 所示。

相反地，由于 LP_{11} 模与 LP_{21} 模的交叠程度相比 LP_{01} 和 LP_{11} 的交叠程度强很

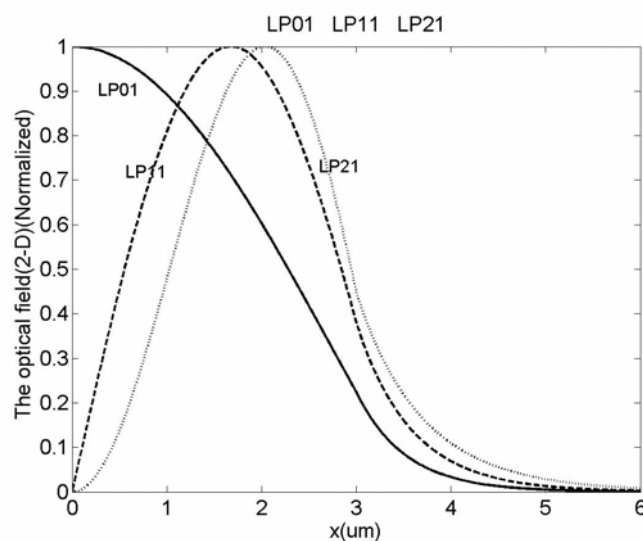


图 3-15 LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{21} 光场二维分布示意图

Fig3-15 The distribution of LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{21} for VCSEL (2-D)

多，二者共享相同区域的载流子而出现强烈的竞争，所以从图 3(c)看，我们并不能看到非常明显的分裂成四个区域的 LP_{21} 模图形，其中必定存在受到抑制的 LP_{11} 模的分布，故得到的图像如 3-13 (c) 所示。依此类推，随着电流的不断增加，更高阶模式将会产生，横模的光场分布将变得十分复杂。

3.4 可视化界面的编写及连续性分析

为了更加便捷的得到各阶模式的横模分布以及随着注入参数的变化可以随时观测模式的分布变化，我们利用 MATLAB 编写可视化界面，如图 3-16 所示：

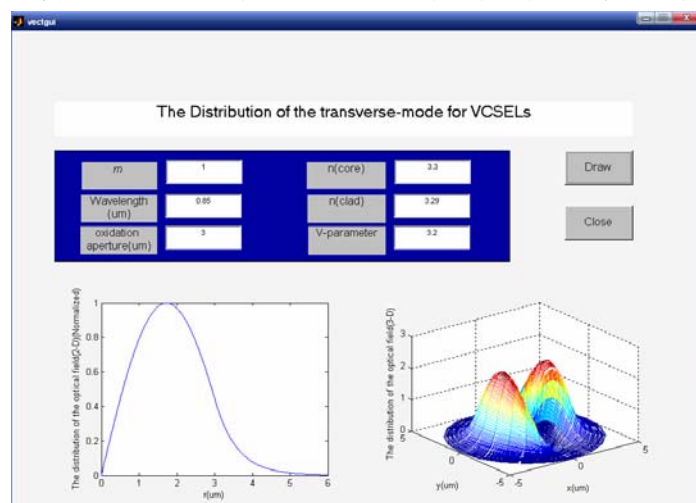


图 3-16: 使用 MATLAB 编写的可视化横模分布程序

Fig3-16 The manipulative interface of mode using MATLAB

所有的输入参数均反映在界面上，修改任意参数都可以直接进行操作并且点击“Draw”，图形同步进行修改，无需反复修改程序，提高了效率也便于观测模式的连续性变化。

利用时时监控的可视化操作界面我们还可以得到不同模式之间的瞬态转变过程，图 3-17 反映了相同 m 值的 LP_{01} 向 LP_{02} 过渡的图形变化情况，即 v 值从 0 向 3.8 过渡，从图中我们可以清晰地看到模式 LP_{01} 的边缘随着 v 值的增大不断升高。

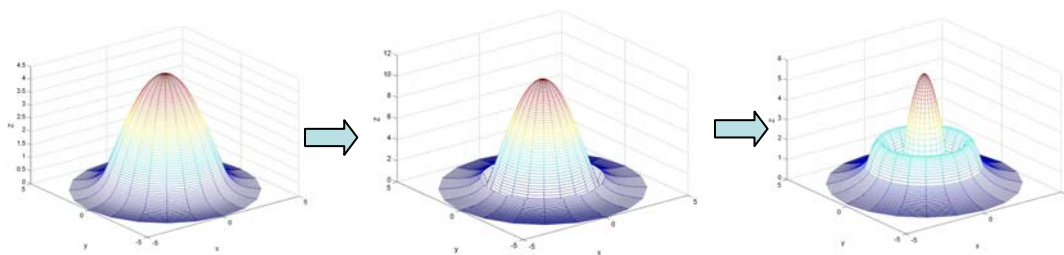


图 3-17: 模式从 LP_{01} 向 LP_{02} 过渡的分布情况

Fig3-17 The changing process from LP_{01} mode to LP_{02}

3.5 本章小结

数学推导模式分布表达式，详细分析了平面波导、圆柱波导结构的横模光场分布情况，找出其中存在的问题并提出改进措施。对类光纤结构弱折射率导引 VCSEL 结构的二维、三维分布进行模拟，将模拟结果同 LP 模式的定义进行对比，验证结果。接下来，对若干 VCSEL 实际器件进行测试，对照模拟结果，分析误差存在的原因。最后，建立模式可视化操作界面，方便快捷地得到各阶模式的横模分布以及随着注入参数的变化随时观测模式的分布变化，讨论模式变化的连续性情况。

第4章 有效折射率模型的建立

在前一章中，我们已经建立了模式光场分布模型，并对影响模式的若干因素有了初步的了解。其中，折射率作为影响横模光场分布的重要因素之一，在我们分析模式变化时起着至关重要的作用。只有准确地计算出垂直腔面发射激光器的折射率值，才能将之代入到光场分布模型中去，进行后续的模拟工作。本章将针对 VCSEL 的折射率建立模型，提出计算方法，将结果代入到不同结构的 VCSEL 中验证其是否正确。

4.1 垂直腔面发射激光器纵向光场分布

4.1.1 求解纵向光场分布的原因

从图 3-1 中我们可以看出，垂直腔面发射激光器是具有同轴圆柱的类光纤结构，这里 R 并不是无穷大，通常 $2r_c=4\sim 10\mu\text{m}$ ，包层直径实际上为 $2R=125\mu\text{m}$ ，但是由于在边界上的场已迅速衰减，外边界的存在对场分布影响很小，故可将它看成只有两层的圆光波导（两层分界由氧化尺寸决定）。因此，我们讨论 VCSEL 的折射率时通常将两层的折射率称为芯层、包层折射率^[45]，即 n_{core} 、 n_{clad} 。芯层、包层的位置以图 4-1 所示截面为例：

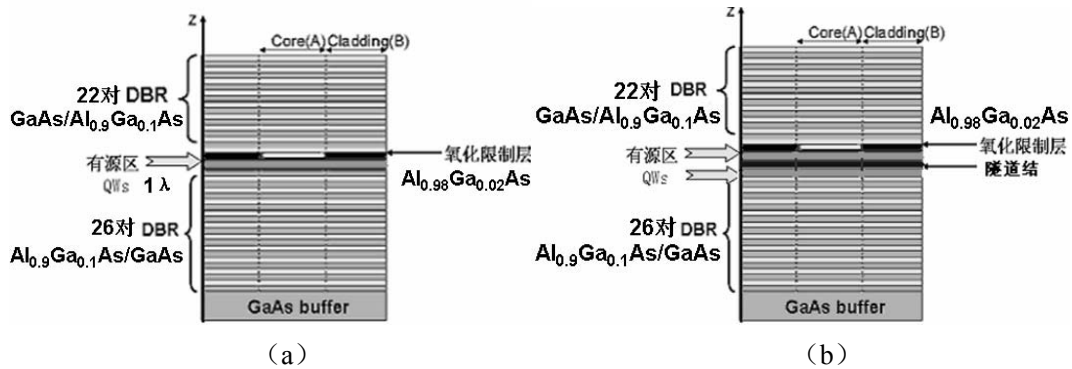


图 4-1：980nm 氧化限制型 VCSEL 生长结构示意图 (a) 单有源区 (b) 双有源区

Fig4-1 The structure of 980nm oxide-confined vertical cavity surface emitting lasers

(a) single-active-region (b) double-active-region

图 4-1 (a)、(b) 分别展示了 980nm 单有源区、双有源区氧化限制型 VCSELs 的生长结构，主要由上、下 DBR、氧化限制层、量子阱有源区、隧道结(双有源区 VCSELs)组成，由于 n_{core} 、 n_{clad} 数值相差很小，所以 VCSEL 常被定义为弱折射率导引的圆柱波导结构。通过资料我们可以查询到，一般情况下，计算 VCSLEs 芯层、

包层折射率有如下公式 (4-1):

$$n_{core}^2 = \frac{\sum_i \int_{z_i}^{z_{i+1}} n_i^{(A)^2} |\phi_z|^2 dz}{\int |\phi_z|^2 dz}, n_{clad}^2 = \frac{\sum_i \int_{z_i}^{z_{i+1}} n_i^{(B)^2} |\phi_z|^2 dz}{\int |\phi_z|^2 dz} \quad (4-1)$$

式中 n_i ——对应器件每层材料的折射率值, A 代表芯层范围, B 代表包层范围

$\phi(z)$ ——沿生长方向上每一层的电场分布

从公式中我们可以看出, 只有将生长方向上每一层的电场分布准确计算出来, 才能代入到公式中进行积分, 求解折射率值, 而这里所说的 $\phi(z)$ 实际上就是 VCSEL 的纵向光场分布。

4.1.2 纵向光场分布的理论推导

我们采用黄永箴教授^{[46][47]}提出的一种新方法对垂直腔面发射激光器的纵向光场分布进行模拟计算。可以把在波导中传播的波函数写成:

$$\psi(z, t) = E(z) \exp(-i\omega t) \quad (4-2)$$

设第 j 层中的电场强度 $E(z)$ 为:

$$E(z) = A_j \exp(iK_j z) + B_j \exp(-iK_j z) \quad (4-3)$$

其中第 j 层 ($j=1, 2, 3, \dots, m$) 的复传播常数 K_j 与复折射率 n_j 的关系为:

$$K_j = k_0 n_j = k_0 (n_{jr} + ik_j) \quad (4-4)$$

其中, $k_j = -g_j/2k_0$, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 。

式中 λ ——中心波长

k_0 ——真空波矢

n_{jr} ——实折射率

k_j ——消光系数

g_j ——增益系数

A_j 和 B_j 为沿 $+z$ 和 $-z$ 方向传播的光场振幅。要注意在这里 λ 是一个未知参数。常理可知, 在外层只有朝外传播的光场, 因此 $A_l=0$ 和 $B_m=0$ 。假设第 j 层与 $j-1$ 和 $j+1$ 层的界面为 z_{j-1} 和 z_j , 而且在 j 层中传播的光入射到界面 z_{j-1} 和 z_j 感受到的反射系数为 $R_{j,l}$ 和 $R_{j,m}$, 从光场在这两个界面的反射可以得到:

$$A_j \exp(iK_j z_{j-1}) = R_{j,l} B_j \exp(-iK_j z_{j-1}) \quad (4-5)$$

$$B_j \exp(-iK_j z_j) = R_{j,m} A_j \exp(iK_j z_j) \quad (4-6)$$

由上述两式相乘可以得到下述本征方程:

$$R_{j,1}R_{j,m}\exp(2iK_jd_j)=1 \quad (4-7)$$

其中 $d_j=z_j-z_{j-1}$ 为第 j 层的厚度。反射系数 $R_{j,1}$ 包括 z_{j-1} 界面, $j-1, j-2, \dots, 1$ 层的作用, $R_{j,m}$ 包括 z_j 界面, $j+1, j+2, \dots, m$ 层的作用。采用 s 偏振模式的边界条件 E_z 和 $dE(z)/dz$ 在界面连续, 得到 z_{j-1} 界面的边界条件为:

$$A_{j-1}\exp(iK_{j-1}z_{j-1})+B_{j-1}\exp(-iK_{j-1}z_{j-1})=A_j\exp(iK_jz_{j-1})+B_j\exp(-iK_jz_{j-1}) \quad (4-8)$$

$$K_{j-1}(A_{j-1}\exp(K_{j-1}z_{j-1})-B_{j-1}\exp(-iK_{j-1}z_{j-1}))=K_j(A_j\exp(K_jz_{j-1})-B_j\exp(-iK_jz_{j-1})) \quad (4-9)$$

由(4-9)式除以(4-8)式可以导出下述递推关系:

$$R_{j,1}=\frac{R_{j,j-1}+R_{j-1,1}\exp(2iK_{j-1}d_{j-1})}{1+R_{j,j-1}R_{j-1,1}\exp(2iK_{j-1}d_{j-1})} \quad (4-10)$$

其中反射系数 $R_{j-1,1}$ 和 $R_{j,1}$ 都满足(4-7)式, 而 z_{j-1} 界面的反射系数为:

$$R_{j,j-1}=\frac{K_j-K_{j-1}}{K_j+K_{j-1}} \quad (4-11)$$

对 $R_{j,m}$ 也可以得到类似的递推关系, 如下所示:

$$R_{j,m}=\frac{R_{j,j+1}+R_{j+1,m}\exp(2iK_{j+1}d_{j+1})}{1+R_{j,j+1}R_{j+1,m}\exp(2iK_{j+1}d_{j+1})} \quad (4-12)$$

由(4-7)式、(4-10)式、(4-11)式及(4-12)式, 通过求解(4-7)式的本征值就可以得到不同垂直腔面发射激光器波导结构中的模式波长和所需的阈值增益。然后由(4-5)式、(4-6)式、(4-8)式和(4-9)式求出光场振幅 A_j 和 B_j , 则可得到器件纵向光场分布^[48]。

4.1.3 不同结构 VCSEL 的纵向光场分布

根据上述公式, 我们可以模拟得到不同结构垂直腔面发射激光器的驻波场表达式和分布示意图。

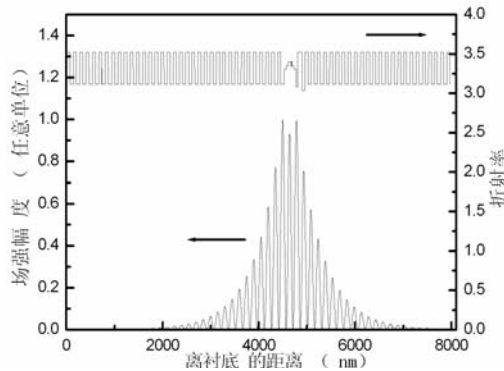


图 4-2 850nm VCSEL 中光场强度和折射率随厚度的分布

Fig 4-2 Optical standing wave field and Index of 850nm VCSEL with

图 4-2 是对包括 21 对顶 DBR、36 对底 DBR、AlGaAs 欧姆接触层、 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 氧化限制层和 1λ $\text{AlInGaAs}/\text{AlGaAs}$ 量子阱有源区的 850nm VCSEL 模拟计算得到的折射率和纵向光场驻波分布图。从图中可以看出量子阱处于驻波的波峰位置，有源区与光场有最大的重叠，阱中增益得到最有效的利用；光波能量主要集中在中心区域，波峰的强度以有源区为中心快速向两边衰减，衰减因子近似与 $(n_L/n_H)^2$ 成正比，在靠近有源区的第 3 对 DBR 处光强已衰减至有源区与 DBR 边界处光强大小的一半，因此器件中纵向光场有效振荡范围的光学长度约为 $4\lambda_0$ 。由于光场在靠近有源区的前三对 DBR 中分布较强，因此对靠近有源区的前三对 DBR 轻掺杂，不仅对器件的串联电阻影响不大，而且可有效地降低吸收损耗，提高器件性能。

利用相同的方法，我们还对图 4-1 所示的单有源区、双有源区 980nm VCSEL 进行了纵向光场分布模拟，其结果如图 4-3 所示：

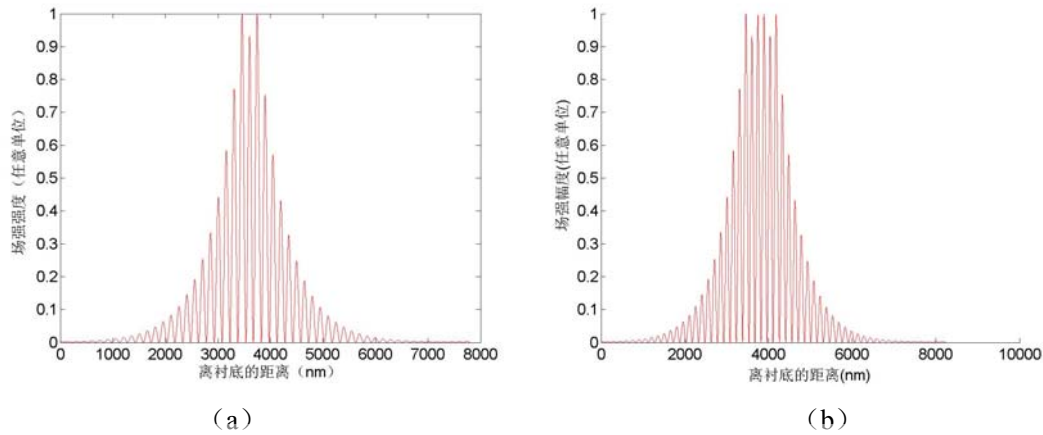


图 4-3 980nm VCSEL 中光场强度随厚度的分布 (a) 单有源区 (b) 双有源区

Fig 4-3 Optical standing wave field of 980nm VCSEL with thicknesses

(a) single-active-region (b) double-active-region

因此，我们可以利用上述公式求解任意结构 VCSEL 的纵向光场分布，为准确计算折射率值提供前提条件。

4.2 有效折射率的计算

4.2.1 有效折射率的理论推导

前面如公式 (4-1) 所示，我们已经得到了 VCSEL 标准的芯层、包层计算公式，如果器件结构分布超过两个区域，那么我们将对其他区域使用此类有效折射率方法做相应计算。我们知道，氧化层是造成芯、包层折射率不同的主要原因，如果薄氧化层位于 z 向电场的零值位置，那么这时候由于氧化而引起的衍

射可以被忽略，此情况下 $n_{\text{core}}=n_{\text{clad}}$ 。故我们对氧化后的氧化层折射率，进行修正^[49]：

$$n_{i(\text{new})}^{(B)} = (1-\omega) \cdot n_i^{(A)} + \omega n_i^{(B)} \quad (4-13)$$

式中 $n_{i(\text{new})}^{(B)}$ ——修正后被氧化的氧化层折射率

$n_i^{(A)}$ ——芯层的氧化层折射率

$n_i^{(B)}$ ——包层的氧化层折射率

其中，权重 ω 反映了氧化层内电场分布与 z 向整体场分布的比例关系，即：

$$\omega = \frac{\int_{z_1}^{z_2} |\phi_z| dz}{\int_0^{z_n} |\phi_z| dz} \quad (4-14)$$

将新的氧化层折射率代入到公式 (4-1) 中，我们便可以得到修正后 VCSEL 的芯层、包层折射率值。

4.2.2 不同结构 VCSEL 的有效折射率计算

为了分析折射率对 VCSEL 模式特性的影响，我们分别选取图 4-1 单有源区、双有源区的 980nm VCSEL 结构进行模拟。首先，我们计算双有源区 980nm VCSEL 的折射率值，通过式 (4-14) 计算得到权重 $\omega=0.0427$ ，将其代入公式 (4-13)，得到 $n_{i(\text{new})}^{(B)}=3.01392$ ，将之与 z 向其余各层电场表达式代入公式 (4-1)，即可计算出芯层和包层的折射率 $n_{\text{core}}=3.3069$ ， $n_{\text{clad}}=3.3038$ ，二者相差 0.0031。对于氧化限制层的厚度在 30nm-60nm 之间的垂直腔面发射激光器而言，其圆柱波导内部折射率和包层折射率差大约在 10^{-2} - 10^{-3} 量级左右，可见模拟的结果基本符合理论计算的范围。

为了对比、分析双有源区 VCSELs 的模式，我们利用相同方法模拟计算了图 4-1 (a) 所示单有源区 980nm VCSELs 的芯层、包层折射率值。通过计算，我们得到单有源区 980nm VCSELs 的权重 $\omega=0.0463$ ，修正后包层的氧化层折射率 $n_{i(\text{new})}^{(B)}=3.00858$ ，芯层和包层的折射率 $n_{\text{core}}=2.9942$ ， $n_{\text{clad}}=2.9880$ ，二者相差 0.0062。相比新型双有源区 980nm VCSELs 的芯层、包层折射率差，此实验结构的单有源区 980nm VCSELs 折射率差要大很多。

4.2.3 不同结构 VCSEL 的性能对比

通过对有效折射率的计算，我们可以发现单有源区 VCSEL 同多有源区

VCSEL的不同,那么这方面的差别是否对于VCSEL的性能有益呢?首先,我们先了解一下多源区VCSEL,图4-4为隧道再生多源区能带结构示意图。其基本思想是:通过反向偏置的隧道结将多个有源区串连起来,实现工作电流以串联方式流经各有源区,使得在前一有源区中辐射复合的载流子通过反向隧道结获得再生,并在下一有源区继续辐射复合发光^{[50][51]}。激光器两电极注入的每一对电子空穴可以在多个有源区中经多次复合产生多个光子,使得微分量子效率大于1,单程光增益大大提高。其隧道再生多源区纵向光耦合机构可使VCSEL具有极高的量子效率、极高的单程光增益和性能更优的光束质量,大大降低VCSEL的阈值电流,大大提高其输出功率,极大地降低VCSEL的工艺复杂性与难度,全面提高VCSEL的整体性能,推动VCSEL器件的实用化进程。

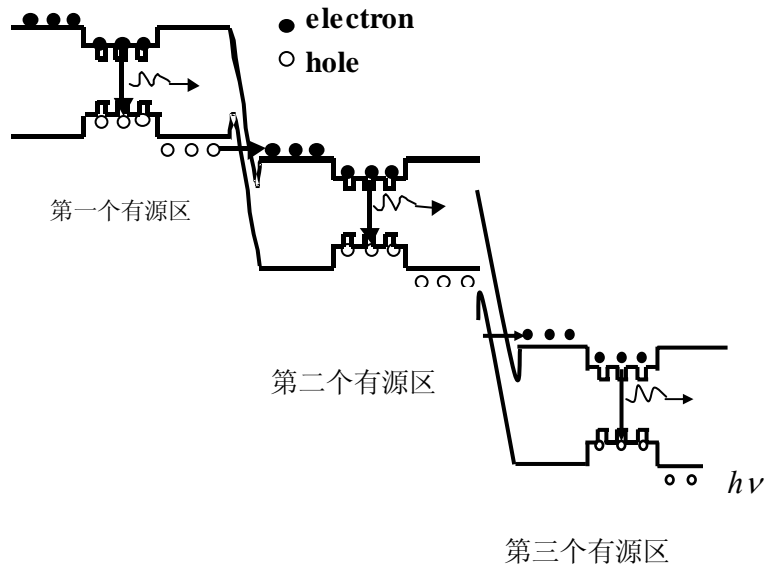


图 4-4 隧道再生多源区 VCSEL 能带示意图

Fig4-4 The energy schematic of tunnel junction regenerated multiple active regions VCSEL

1. 隧道结的隧穿几率

隧道结利用的是隧穿输运机制,在简并的重掺杂半导体中,n型半导体的费米能级进入导带,p型半导体的费米能级进入价带,二者就形成了隧道结。

从电学角度考虑,应尽量提高隧穿几率,隧穿几率可由下式表示^[52]:

$$P = \exp \left[- \left(\frac{8\pi}{3} \right) \left(\frac{2m_n^*}{h^2} \right)^{1/2} (E_g)^{1/2} \Delta x \right] \quad (4-15)$$

式中 E_g ——带隙能量

m_n^* ——电子有效质量

由(4-15)式可知,采用具有比较小的带隙和电子有效质量较小的半导体

材料，可增大隧穿几率，以减小反向隧道结引起的串联电阻的增大。另外，提高隧道结两侧的掺杂浓度，掺杂浓度越高，简并度越大，势垒厚度越薄，隧道结的隧穿几率越大，隧穿电流越小，由隧道结带来的反向偏压和电阻越小。

从光学角度考虑，要求其在激射波长处吸收要小，并能提供适当的光耦合作用，以求最大限度降低器件阈值。隧道结的重掺杂将导致自由载流子的吸收严重，应尽量降低掺杂浓度，这与电学要求相矛盾；重掺杂还会导致材料产生能带收缩效应，对能量略低于材料带隙的光子产生吸收，造成吸收损耗严重。当考虑到重掺杂隧道结带隙收缩效应后，隧道结材料仍必须满足对激射波长的光透明，隧道结厚度应尽可能薄，理想情况下，在生长厚度内载流子全部耗尽，以减小自由载流子的吸收，但厚度也不易过薄，会给材料生长带来困难；且选择的隧道结材料要作为无源波导层，必须要具有较高的折射率。除此以外，隧道结生长位置设计在驻波节点处，可有效地减少光吸收。

根据以上的考虑，对于 980nm 波长，我们选择 GaAs 材料作隧道结材料。对于掺杂剂的选取，不仅要求杂质具有较小的电离能以便得到较高的掺杂浓度，而且要求杂质具有较低的扩散系数，以保证在材料生长和工艺处理过程中仍能维持较好的突变结和良好的隧穿特性。在这些考虑的基础上，选择 C 和 Si 分别作为 p 型和 n 型掺杂剂，它们在 GaAs 中的电离能分别为：0.026eV 和 0.0052eV。

2. 掺杂浓度的设计

要保证重掺杂 p-n 结的载流子输运方式为隧穿，而不是热载流子扩散模型，其必要条件是两边的半导体材料简并化，即 n 型半导体的费米能级进入导带，p 型半导体的费米能级进入价带。只有在掺杂浓度很高时，导带底附近的量子态基本上已被电子占据，价带顶的量子态基本上已被空穴占据，这样才能保证隧道结的形成。

我们以 n 型半导体为例，对其发生简并所需的载流子浓度进行计算。N 型半导体达到简并时的基本条件为：

$$E_F = E_C \quad (4-16)$$

由电中性条件可知：

$$n_0 = n_D^+ \quad (4-17)$$

$$\text{其中} \quad n_0 = N_C \frac{2}{\sqrt{\pi}} F_{1/2} \left(\frac{E_F - E_C}{k_0 T} \right) \quad (4-18)$$

$$n_D^+ = \frac{N_D}{1 + 2 \exp \left(- \frac{E_D - E_F}{k_0 T} \right)} \quad (4-19)$$

式中 n_0 ——导带电子浓度

n_D^+ ——电离施主浓度

N_D ——施主杂质浓度

N_C ——导带的有效状态密度

E_D ——施主能级

k_0 ——波尔兹曼常数

E_F ——费米能级

$F_{1/2}(\varepsilon)$ ——费米积分

由以上式子，可以推出 n 型半导体材料发生简并时的杂质浓度为：

$$N_D = \frac{2N_C}{\sqrt{\pi}} [1 + 2\exp(\frac{DE_D}{k_0T})] F_{1/2}(0) \quad (4-20)$$

其中 $\Delta E_D = E_C - E_D$ ，把 $F_{1/2}(0) = 0.6$ 代入上式得：

$$N_D = 0.68N_C [1 + 2\exp(\frac{\Delta E_D}{k_0T})] \quad (4-21)$$

其中，导带的有效状态密度 $N_C = 2 \frac{(2\pi m_n^* k_0T)^{3/2}}{h^3}$ 。

同理，可以推导出 p 型半导体材料的简并条件为：

$$p_0 = p_A^- \quad (4-22)$$

$$N_A = 0.68N_v [1 + 2\exp(\frac{\Delta E_A}{k_0T})] \quad (4-23)$$

其中价带有效状态密度 $N_v = 2 \frac{(2\pi m_p^* k_0T)^{3/2}}{h^3}$ 。由于 GaAs 中 N_C 比 N_v 小得多，所以导带电子比价带空穴更容易发生简并，对于 p 型 GaAs 材料发生简并时，受主杂质浓度约在 10^{18}cm^{-3} 以上，而对 n 型 GaAs 材料，施主浓度只要超过 10^{17}cm^{-3} 就开始发生简并。

3. 耗尽层宽度和最大电场强度

同普通 p - n 结一样，隧道结的耗尽层中存在着自建电场，而且在平衡突变结势

垒区中，电场强度是位置 x 的线性函数，电场方向从 n 区指向 p 区，在 p - n 结交界处，电场强度达到最大值 $|E_m|$ 。隧道结的耗尽层宽度和耗尽层中最大电场强度的研究对于进一步分析和设计隧道结是十分必要的。下面我们使用经典的耗尽近似的方法推导掺杂浓度与耗尽层宽度以及最大电场强度之间的关系，并计算出了一定的掺杂浓度下耗尽层的宽度。

热平衡状态下隧道结的总耗尽层宽度， n 型和 p 型半导体中的耗尽层宽度以及最大电场强度通常可以表示为^[36]：

$$x_D = \sqrt{V_D \frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r}{q} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D}} \quad (4-24)$$

$$x_n = \frac{N_A x_D}{N_A + N_D} \quad (4-25)$$

$$x_p = \frac{N_D x_D}{N_A + N_D} \quad (4-26)$$

$$|E_m| = \left| \frac{q N_D x_n}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \right| = \left| \frac{q N_A x_p}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \right| \quad (4-27)$$

式中 V_D ——接触电势差， $V_D = \frac{k_0 T}{q} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$

ε_0 ——真空介电常数

ε_r ——电解质的介电常数

q ——电子电量

k_0 ——波尔兹曼常数

N_A ——受主杂质浓度

N_D ——施主杂质浓度

n_i ——本征载流子浓度，对于 GaAs 材料， $n_i = 1.1 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$

由以上公式可以看出，重掺杂会使 pn 结势垒变薄，电场强度提高，当势垒薄到一定的程度时，半导体材料中的电子就有一定的几率穿过势垒。而且随着掺杂浓度的增加，势垒变得更薄，电场强度也更高，导致隧穿几率变大。

根据电中性条件可知：

$$N_A x_p = N_D x_n \quad (4-28)$$

势垒区主要向杂质浓度低的一边扩展,由于GaAs材料达到简并时所要求的受主浓度远大于施主浓度, p 型一侧由于掺杂浓度很高,GaAs隧道结 p 型一侧其耗尽层厚度较 n 型一侧小得多,可以认为隧道结的耗尽区绝大部分落在了 n 型GaAs一侧。由上面分析也可以看出,GaAs隧道结中,施主杂质浓度对总耗尽层宽度 x_D 影响很大, x_D 与 N_D 成正比,而受主杂质浓度对 x_D 影响较小。从公式 4-26 中可以看出, p 型一侧耗尽层宽度 x_p 随着施主浓度的增加而增大,随着受主浓度的增加而减小。因此,在设计隧道结时,我们可以通过控制隧道结两侧的掺杂浓度来控制耗尽层的宽度,以满足实际应用的需要。例如在隧道级联的半导体激光器中,就可以通过此种方法,使隧道结的生长厚度接近耗尽区的宽度,从而减小由于自由载流子吸收带来的光吸收损耗。

4. 隧道结可能对器件的影响

隧道结引入的光吸收过程可能对激光器产生较大的影响。一方面,隧道结处存在的较强的光吸收将直接影响激光器的光场模式分布。另一方面,由于隧道结的光吸收引起的损耗将会直接影响激光器的阈值、效率等特性。由于我们最终要实现光场通过隧道结的耦合,因而在器件设计时必须考虑尽可能地减少隧道结引入的光损耗。减少自由载流子吸收的方法为在保证隧道结完整的情况下尽可能减少隧道结的厚度,使在这一厚度内,载流子尽可能耗尽。

从过去的研究内容来看,对于这种新型多有源区结构的研究主要针对VCSELs 电学性能的提高,而对光学模式分布的优劣分析并不多,事实上,这种新型的垂直腔面发射激光器结构,在模式方面也起到了优化的作用。

通过有效折射率模型,可以从数值上准确计算出VCSELs的芯、包层折射率差,这对了解垂直腔面发射激光器横模光场分布有着非常重要的意义。我们知道,每一个模式具有唯一的传播常数 β ,对给定的自由空间波长 λ 和折射率剖面 $n(x,y)$, β 只能取某些特定的数值,设 n_{core} 、 n_{clad} 分别为芯层的最大折射率和均匀包层的折射率,则折射率剖面满足 $n_{core} \geq n(x,y) \geq n_{clad}$,于是,最小相速度等于光线在波导中的最低速度 c/n_{core} 。虽然模式的相速度也可以超过光在包层中的最大速度 c/n_{clad} ,但此时必然伴随着由辐射而引起的损耗。因此,约束模式的相速度必须处在这两个极限之间,即 $n_{clad}k < \beta \leq n_{core}k$,式中, $k=2\pi/\lambda$ 。从而可见,芯层、包层折射率差越大,可能存在的 β 就越多, β 对应的模式情况就会越多越复杂。一般情况下,当截止频率 $V_c < 2.405$ 时^[53],二层圆均匀光波导(阶跃光纤)只有基模出射,,其中 $V^2 = k^2 (n_1^2 - n_2^2) a^2$, a 为注入孔径, n_{core} 、 n_{clad} 为芯层、包层折射率差, k 为真空波矢,可见,芯、包层折射率差值对截止频率 V_c 产生很大影响,其折射率差值越大,截止频率越高,高阶模满足激射条件而激射出来,各阶横模间彼此交叠,最终导致模式间强烈的竞争。

根据表 3-1 截止频率 V_c 的具体参数,我们可以得到不同芯层、包层折射率

与截止频率的关系，以此来分析不同生长结构的器件模式方面的优劣。首先，截止频率的大小主要由器件的注入孔径、折射率两个因素决定，从表 3-1 中我们可以得到单基模工作的截止频率为 2.405，也就是说为了不使 V 值超过此限，在激光波长不变的情况下，注入孔径以及芯层、包层折射率必须取值适当且相互制约，而新型双有源区结构由于降低了 $n_{core}^2-n_{clad}^2$ 值，这样在满足单基模工作条件的前提下，注入孔径相比单有源区结构可以进一步加大，这对提高垂直腔面发射激光器的功率以及其应用价值有着相当重要的意义。其次，在注入孔径不变的情况下，新型双有源区结构依靠较小的 $n_{core}^2-n_{clad}^2$ 值，有效的降低了 V 值，这样激光器中可能存在的模式类型将被减少，由于不同模式的空间分布不同，彼此间存在交叠，从而导致模式间竞争激烈，对器件的模式噪声、开关特性等产生较大不利影响，而越少的模式类型越可以避免上述问题的产生。

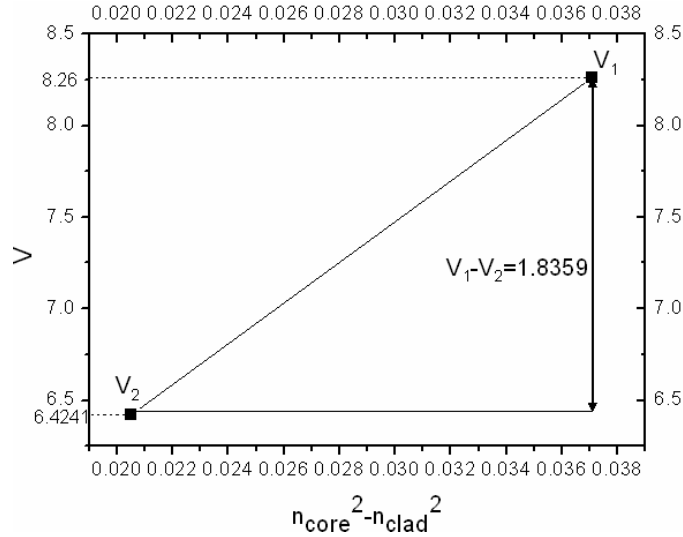


图 4-5：截止频率与芯层、包层折射率的对应关系

Fig4-5. The difference values of V-parameter about the single-active-region VCSELs and the double-active-region VCSELs. V_1 is V-parameter of the single-active-region VCSELs and V_2 is V-parameter of the double-active-region VCSELs, the characteristic of modes can be analysed by the values of the V-parameter

图 4-5 展示的是 $k=2\pi/\lambda=6.41\mu\text{m}^{-1}$ 、 $a=7\mu\text{m}$ 时不同芯层、包层折射率值和截止频率的对应关系以及不同折射率下可能存在的模式情况，从图中我们可以看出，随着 $n_{core}^2-n_{clad}^2$ 的增大，截止频率 V 单调递增，而 V 的增加必然导致高阶模式满足阈值条件而激射，模式分布将更加复杂。

对于上述模拟的两种结构，将其各自的有效折射率数值代入到 $V^2=k^2(n_1^2-n_2^2)$ ，其中注入孔径 $a=7\mu\text{m}$ ，波矢 $k=2\pi/\lambda=6.41\mu\text{m}^{-1}$ ，我们发现，对于单有源区 980nm VCSEL 来说，其 V 值为 8.26，从表 3-1 可以看出，截止频率 V 小于 8.26 的

各模式将满足激射条件而激射即 LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{21} 、 LP_{31} 、 LP_{12} 、 LP_{41} 、 LP_{03} 、 LP_{51} 。对于新型双有源区 980nm VCSELs 来说，代入相同的 a 和 k 值，我们得到其 $V=6.4241$ ，即 LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{21} 、 LP_{31} 、 LP_{12} 、 LP_{41} 满足激射条件而激射。可见，相对单有源区 980nm VCSELs 来说，由于新型双有源区 VCSELs 结构变化导致折射率差值的减小，从而导致截止频率的降低，限制了高阶模的出现，使得不同模式的传播常数差异减小，提高了垂直腔面发射激光器的模式特性。

4.2.4 实验测试

为了和模拟结果进行对比，我们通过实验分别测试了双有源区、单有源区垂直腔面发射激光器的横模光场分布图，此两组器件均为 980nm 氧化限制性垂直腔面发射激光器，且注入孔径均为 $16.8\mu\text{m}$ ，首先我们选取折射率 $n_{core}^2 - n_{clad}^2 = 0.0371$ 的单有源区 VCSEL 进行测试，其阈值电流 $I_{th}=5\text{mA}$ ，选取注入电流为 $0.5I_{th}$ 、 $2I_{th}$ 和 $3I_{th}$ 时的近场分布，如图 4-6 所示：

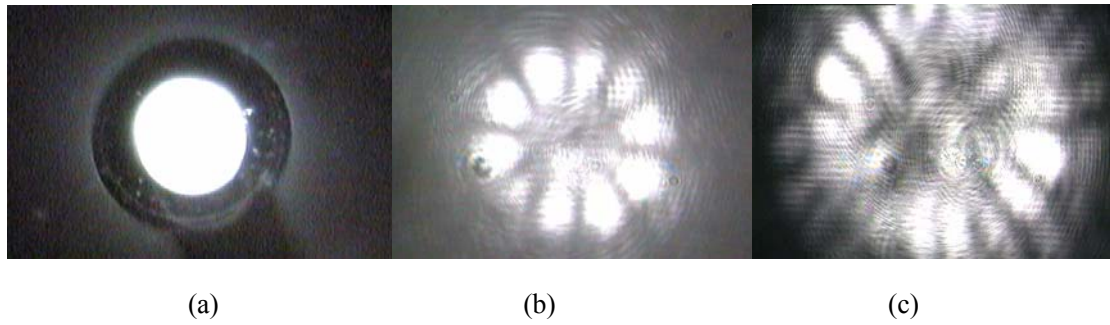


图 4-6 单有源区 980nm VCSEL 横模光场分布随注入电流变化的近场图

(a) $I=0.5I_{th}$ (b) $I=2I_{th}$ (c) $I=3I_{th}$

Fig 4-6 The different distributions of modes with the working current increased

(single-active-region VCSELs) (a) $I=0.5I_{th}$ (b) $I=2I_{th}$ (c) $I=3I_{th}$

同理，我们选取 $n_{core}^2 - n_{clad}^2 = 0.0205$ 的双有源区 VCSEL 进行测试，其阈值电流 $I_{th}=4\text{mA}$ ，选取相同的工作条件，其横模光场分布变化如图 4-7 所示：

从图 4-6 (a)、4-7 (a) 中我们可以很清楚得看出，在注入电流 $I_f=0.5I_{th}$ 时，单有源区、双有源区器件都没有达到阈值条件而荧光出射，出光强度很低。当注入电流 $I_f=2I_{th}$ 时，双有源区 VCSEL 光斑没有出现分瓣现象，其仍然工作在基模 LP_{01} 下单模出射，如图 4-7 (b) 所示，而此时单有源区器件已经出现明显的光斑分瓣，高阶模达到阈值条件激射出来，从图 4-6 (b) 中我们可以看出，由于注入孔径较大，模式竞争强烈， LP_{51} 模对应载流子分布位置而获得较高增益，从图中观察光斑圆周地分布在孔径边缘处。随着注入电流的进一步增大，当 $I_f=3I_{th}$ 时，

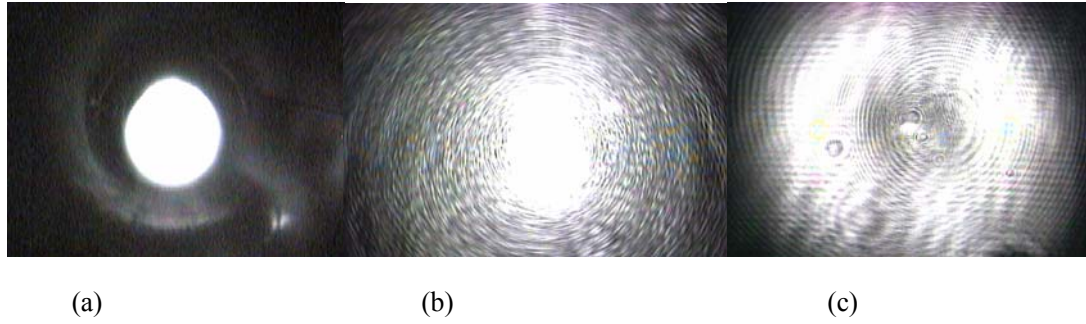


图 4-7 双有源区 980nm VCSEL 横模光场分布随注入电流变化的近场图

(a) $I=0.5I_{th}$ (b) $I=2I_{th}$ (c) $I=3I_{th}$

Fig 4-7. The different distributions of modes with the working current increased

(double-active-region VCSELs) (a) $I=0.5I_{th}$ (b) $I=2I_{th}$ (c) $I=3I_{th}$

由于空间烧孔现象^[54]，载流子分布的峰值会向边缘移动，如图 4-7（c）所示，双有源区器件的次高阶模 LP_{11} 满足阈值条件而激射，而单有源区器件的模式分瓣也更加明显，如图 4-6（c）所示。故整体来看，随着有源区数目的增加截止频率降低，从而限制了高阶模式的出现，这样对减少模间色散有贡献，也就是折射率差降低，使得不同模式的传播常数的差异减少，提高了 VCSEL 的模式特性。此论述观点在盖红星博士的论文中也有提及，当时通过商用软件模拟，盖博士得到双有源区 VCSEL 可能存在 7 组模式，比普通单有源区 VCSEL 的 11 组减少 4 组，在相同初始条件下，此结果与本实验结果基本一致。

4.3 本章小结

本章中建立纵模光场分布模型、利用传输矩阵法推导有效折射率模型，准确计算 VCSEL 的折射率值。对新型双有源区垂直腔面发射激光器利用有效折射率模型，准确地计算出其芯、包层折射率值。结合光波导理论，对比单有源区 VCSELs 模拟不同结构、不同材料器件的横模分布情况。实验结论表明随着芯、包层折射率差的增大，更高阶模式满足出射条件而激射，横模分布情况更加复杂，模式之间交叠情况更加严重，而新型双有源区结构有效地提高了垂直腔面发射激光器的模式特性。理论和实验、模拟结果得到统一。

第5章 影响模式特性的诸因素分析

我们研究模式，除了要建立模式模型，了解不同阶次模式的空间分布关系，更重要的是要学习控制模式，了解影响模式的诸多因素，使其得到合理、有效地利用。从前面的章节中我们看到，注入电流、注入孔径、折射率、激励波长等因素不仅影响器件中可能存在的模式种类，而且对器件载流子分布有着非常明显的作用。我们知道，载流子的分布对模式之间的竞争影响很大，只有了解它们彼此的关系，我们才能准确把握模式的分布规律。在下面的论述中，我们将通过速率方程建立载流子分布模型，并从各影响因素入手，分析 VCSEL 的模式特性。

5.1 注入电流对垂直腔面发射激光器模式特性的影响

5.1.1 速率方程的建立

我们知道，只有某一模式的增益大于损耗，该模式才能激励。而器件中载流子的分布对各阶模式的影响不尽相同。要研究注入电流对 VCSEL 模式的作用，首先要了解注入电流与载流子分布的关系。

一般采用圆柱形光波导模型来对 VCSEL 的横向光场进行分析。垂直腔面发射激光器的动态特性主要依赖于空间和时间有关的速率方程^[55]。这里假定载流子分布轴对称，为了简化问题，沿 Z 方向的不均匀性忽略不计，增益饱和效应也不计。

$$\frac{\partial N(r,t)}{\partial t} = \frac{\eta_i j(r,t)}{qd n_w} - \frac{N(r,t)}{\tau_n} - \sum_m \sum_n G_0 (N(r,t) - N_t) S_{mn}^{s,c}(r, \varphi, t) - D_n \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial N(r,t)}{\partial r} \right) \quad (5-1)$$

$$\frac{\partial S_{mn}^{s,c}(r, \varphi, t)}{\partial t} = \Gamma G_0 (N(r,t) - N_t) S_{mn}^{s,c}(r, \varphi, t) + \Gamma \beta \frac{N(r,t)}{\tau_n} - \frac{S_{mn}^{s,c}(r, \varphi, t)}{\tau_p} \quad (5-2)$$

其中 $N(r,t)$ 为载流子密度， $S_{m,n}^{s,c}(r, \varphi, t)$ 为光子密度， s, c 分别表示方向角的正弦和余弦， m, n 分别表示光横模沿角方向和半径方向的阶数， $m=0, 1, 2, \dots$ 对应余弦， $m=1, 2, \dots$ 对应正弦， $j(r,t)$ 是 t 沿半径方向注入电流密度， η_i 为注入效率， q 为电荷， d 和 n_w 量子阱有源区的阱宽和量子阱的个数， D_n 为有源区载流子扩散系数， τ_n 和 τ_p 为载流子和光子寿命， Γ 为光学限制因子， β 为自发发射因子， G_0 和 N_t 分别为增益系数和透明载流子浓度。

载流子浓度分布一般用贝塞尔函数的展开式：

$$N(r, t) = N_0(t) - \sum_{i=1}^{\infty} N_i(t) J_0\left(\frac{\sigma_i r}{r_{c1}}\right) \quad (5-3)$$

式中 $N_0(t)$ 、 $N_i(t)$ ——平均载流子浓度和 i 阶载流子浓度

r_{c1} ——包层半径,

σ_i ——一阶贝塞尔函数 i 阶根。

光子的密度可分为

$$S_{m,n}^{s,c}(r, \phi, t) = S_{0m,n}^{s,c}(t) \psi_{m,n}^{s,c}(r, \phi) \quad (5-4)$$

式中 $S_{0m,n}^{s,c}(t)$ (m, n)——阶模式的平均光子密度

$\psi_{m,n}^{s,c}(r, \phi)$ ——(m, n)阶模式光子密度的分布函数

$$\frac{1}{\pi r_{c1}^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_{c1}} \psi_{mn}^{s,c}(r, \phi) r dr d\phi = 1 \quad (5-5)$$

在氧化限制垂直腔面发射激光器, 除靠近氧化限制层的有源区附近形成的弱折射率波导外, 主要还是由于载流子注入分布不均匀形成的是增益波导, 通常用 $LP_{m,n}^{s,c}$ 表示 VCSEL 的横向模式。 $\Psi_{m,n}^{s,c}(r, \phi)$ 为强度分布, 由式 (5-6) 给出^{[56]-[61]}:

$$\psi_{m,n}^{s,c}(r, \phi) = \begin{cases} c_{mn} \cdot \begin{cases} \sin^2(m\phi) \\ \cos^2(m\phi) \end{cases} \cdot \frac{J_m^2(u_{mn} r / r_{co})}{J_m^2(u_{mn})} \\ c_{mn} \cdot \begin{cases} \sin^2(m\phi) \\ \cos^2(m\phi) \end{cases} \cdot \frac{K_m^2(u_{mn} r / r_{co})}{K_m^2(u_{mn})} \end{cases} \quad (5-6)$$

式中 c_{mn} ——归一化系数

$$c_{mn} = r_{c1}^2 / [1 + \delta_{m,0}] \left(\int_0^{r_{co}} J_m^2(u_{mn} r / r_{co}) / J_m^2(u_{mn}) r dr + \int_{r_{co}}^{r_{c1}} K_m^2(w_{mn} r / r_{co}) / K_m^2(w_{mn}) r dr \right) \quad (5-7)$$

式中 r_{co} ——VCSEL 器件半径

$\delta_{m,0}$ ——积分系数, $\delta_{0,0} = 1$, 其它 $\delta_{m,0} = 0$

J_m ——第一类贝塞尔函数

K_m ——修正的第二类贝塞尔函数

u_{mn} w_{mn} ——本征方程的本征值

一般地说, VCSEL 有源区内可能的模式, 取决于腔的结构和折射率分布。氧化孔径越大, 芯层和包层的折射率差越大, 有源区内存在的模式越多。究竟哪种

模式激励，最重要取决于与注入电流有关的参数，如电流大小，电流扩展，电流分布等。

为了简化问题，电流密度可表示为：

$$j(r, t) = j_0(t) \cdot j_r(r) \quad (5-8)$$

$$j_0(t) = I(t) / 2\pi \int_0^{r_{c1}} j_r(r) r dr \quad (5-9)$$

式中 $I(t)$ —— t 时刻注入电流的大小

$j_r(t)$ —— 注入电流密度沿半径方向分布

电流注入方式分两种，一种圆盘式，另一种是环形电极式。用高斯分布描述电流扩展。由于我们采用的是环形电极式，这里只介绍环形电极式电流分布情况。

$$j_r(r) = \begin{cases} \exp[-((r - r_{cr1})^2 / r_{03}^2)] & r \leq r_{cr1} \\ c_2 \exp[-((r - r_{cr})^2 / r_{04}^2)] & r_{cr1} \leq r \leq r_{cr2} \\ c_3 \exp[-((r - r_{cr2})^2 / r_{03}^2)] & r_{cr2} \leq r \leq r_{co} \\ c_4 \exp[-((r - r_{co})^2 / r_{05}^2)] & r \geq r_{co} \end{cases} \quad (5-10)$$

式中 r_{cr1} , r_{cr} , r_{cr2} —— 环形电极内环，中间和外环半径

r_{03}, r_{04}, r_{05} —— 相应区域的电流扩散系数

c_2, c_3, c_4 —— 常数

将 (5-3) - (5-7) 代入 (5-1) 和 (5-2) 中得到：

$$\frac{dN_0(t)}{dt} = \frac{\eta_i j_0(t)}{qdn_w} \cdot \varepsilon_0 - \frac{N_0(t)}{\tau_n} - \sum_m \sum_n G_0 \{N_0(t) - \sum_i \gamma_{jmmi}^{s,c} N_i(t) - N_t\} S_{mn}^{s,c}(t) \quad (5-11)$$

$$\begin{aligned} \frac{dN_j(t)}{dt} = & -\frac{\eta_i j_0(t)}{qdn_w} \cdot \varepsilon_j - N_j(t) \left(\frac{1}{\tau_n} + d_j \right) \sum_m \sum_n G_0 \{ \phi_{jmm0}^{s,c} N_0(t) \\ & - \sum_i \phi_{jmmi}^{s,c} N_i(t) - \phi_{jmm0}^{s,c} N_t \} S_{0mn}^{s,c}(t) \end{aligned} \quad (5-12)$$

$$\frac{dS_{0mm}^{s,c}(t)}{dt} = \Gamma G_0 (N_0(t) - \sum_i \gamma_{jmmi}^{s,c} N_i(t) - N_t) S_{0mm}^{s,c}(t) + \frac{\Gamma \beta}{\tau_n} \cdot N_0(t) - \frac{S_{0mm}^{s,c}(t)}{\tau_p} \quad (5-13)$$

以上方程中 $d_j, \varepsilon_0, \varepsilon_j, \gamma_{mni}^{s,c}, \phi_{jmm0}^{s,c}, \phi_{jmmi}^{s,c}$ 为积分系数，由 (5-14) - (5-17) 式给出。

$$d_j = D_n \left(\frac{\sigma_j}{r_{c1}} \right) \quad (5-14)$$

$$\varepsilon_j = \frac{2}{r_{c1}^2 J_0^2(\sigma_j)} \int_0^{r_{c1}} J_0 \left(\frac{\sigma_j r}{r_{c1}} \right) j_r(r) r dr \quad (5-15)$$

$$\gamma_{mni}^{s,c} = \frac{1}{\pi r_{c1}^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_{c1}} J_0\left(\frac{\sigma_i r}{r_{c1}}\right) \psi_{mn}^{s,c}(r, \varphi) r dr d\varphi \quad (5-16)$$

$$\gamma_{mni}^{s,c} = \frac{1}{\pi r_{c1}^2 J_0^2(\sigma_j)} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_{c1}} J_0\left(\frac{\sigma_i r}{r_{c1}}\right) \psi_{mn}^{s,c}(r, \varphi) \cdot J_0\left(\frac{\sigma_j r}{r_{c1}}\right) r dr d\varphi \quad (5-17)$$

通过这种方法，我们可以很容易地得到不同工作电流下载流子的分布情况以及 VCSEL 横截面上不同模式与载流子分布的对应关系，至此空间分布问题就简单的归结为上述参数的求解，而空间烧孔等现象便可通过上述积分传递到速率方程中并从实验结果中体现出来。

5.1.2 载流子分布对模式的影响

从速率方程（5-11）-（5-13）我们可以得到随注入电流变化载流子的分布变化情况，图 2 展示了有源区孔径为 $3\mu\text{m}$ 时，随着注入电流增大载流子分布的模拟计算结果：

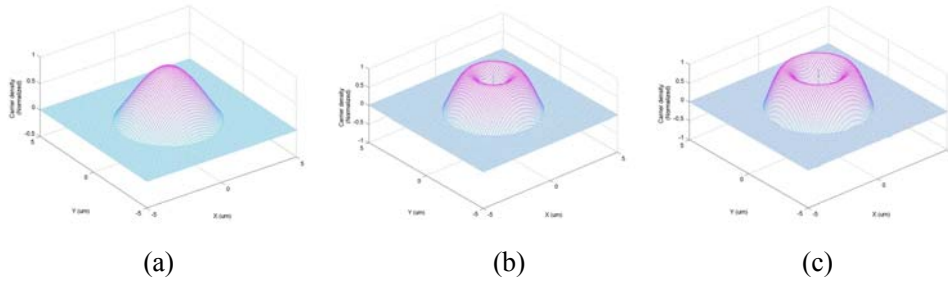


图 5-1：随注入电流增大载流子分布示意图(a)1mA(b)2 mA(c)15mA

Fig5-1 The distribution of carrier with the current increased (a)1mA(b)2 mA(c)15mA

当注入电流很小时，载流子变化幅度很小，其主要分布在有源区的中央^[62]，如图 5-1(a)所示，当满足激射条件时，对应该位置的基模 LP_{01} 最先激射，具体的模式位置图可以参照图 3-15。随着注入电流的不断增大，载流子随注入电流变化的幅度加强，中间位置的载流子由于 LP_{01} 模的激射而消耗较大，导致其分布峰值向有源区的边缘移动，中心出现低载流子密度的烧孔区域，如图 5-1(b)所示，同时使得基模 LP_{01} 增益降低，随电流增加，当满足高阶模式的出射条件，高阶模 LP_{11} 激射， LP_{01} 增益进一步降低，直至停止激射。随着注入电流的继续增大，中心位置的载流子消耗会越来越严重，低载流子烧孔区域会逐渐增大，如图 5-1(c)所示，分布在 LP_{11} 模边缘的 LP_{21} 模所在位置的载流子密度最高，使得 LP_{21} 模享有更高的增益而得到加强，此时 LP_{01} 、 LP_{11} 模则由于对应位置载流子密度较低，增益下降而被抑制。这里所谈到的模式间彼此竞争即空间烧孔现象。所谓空间烧孔现象^{[63][64]}，就是指有源区中心处载流子密度较低，也就是在截面中心部分由于载流子

的大量消耗出现了一个圆形低载流子密度烧孔区，从而导致主模增益下降，高阶模享有更高的增益而得到增加。

5.1.3 实验测量

对应上述论述，我们对 22 对顶DBR、26 对底DBR、GaAs欧姆接触层、 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 氧化限制层和1 λ 量子阱有源区的 980nm VCSEL器件进行测试，其具体参数及材料结构如表 5-1 所示：

22 对 DBR	GaAs	70nm
	$\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$	80nm
氧化限制层	$\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$	60nm
有源区×3	QW	8nm
		10nm
26 对 DBR	$\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$	70nm
	GaAs	80nm
n^+ Sub	GaAs (100) (2 degree off)	

表 5-1：980nm 氧化限制型 VCSEL 结构示意图

Table5-1 The structure of 980nm VCSEL

图 3-14 显示了 980nm氧化限制性VCSEL随注入电流增加其光场分布的显微照片，当注入电流为 1mA时，横模光场分布如图 3-14(a)所示，此时为 LP_{01} 基模出射，光斑没有分裂。随着注入电流增大到 2mA时，载流子的分布由于空间烧孔效应从有源区中心向边缘移动，横模光场分布如图 3-14(b)所示，光斑分裂成两个区域，即此时对应于载流子位置的 LP_{11} 模激射出来， LP_{11} 模会消耗掉中心区域的部分载流子，从而导致主模增益下降，高阶模享有更高的增益而得到加强，也就是说，此时我们从图 3-14(b)中看到是 LP_{11} 模的分布情况，主模 LP_{01} 几乎被掩盖。随着注入电流的继续增大，载流子更加向有源区的边缘移动，光斑的分裂情况会进一步加剧，如图 3-14(c)所示，光斑逐渐分裂成四个区域，即 LP_{21} 模显现出来，具体的误差分析在第三章中已经作了明确解释，这里不再重复。

从实验可见，模拟结果基本正确，注入电流对模式的影响可以从载流子分布的角度合理解释，这为我们今后优化模式特性、分析可能产生的模式现象提供了很好的理论依据。

5.2 注入孔径对垂直腔面发射激光器模式特性的影响

5.2.1 注入孔径对载流子分布以及模式的影响

与上面介绍注入电流不同，VCSEL器件的注入孔径、折射率等参数随着器件的制备而被限定下来，不再变化。对于VCSEL模式的截止频率来说， $\nu^2 = k^2(n_1^2 - n_2^2)a^2$ ，即不同的注入孔径造成不同结构VCSEL截止频率上的差异，截止频率越大，更多模式可能满足截止条件而激射，其对模式的稳定性不利，这在之前的章节中已经论述。除此之外，注入孔径对各模式之间的模式竞争是否存在影响呢？同注入电流一样，我们还是从速率方程推导其中的规律。

利用速率方程，我们得到了不同注入孔径下的载流子分布情况。图 5-2 为注入电流密度 ($j=0.013\text{mA}/\mu\text{m}^2$) 等因素相同的情况下，注入孔径分别为 $1.5\mu\text{m}$ 、 $3\mu\text{m}$ 、 $11\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ 的载流子分布示意：

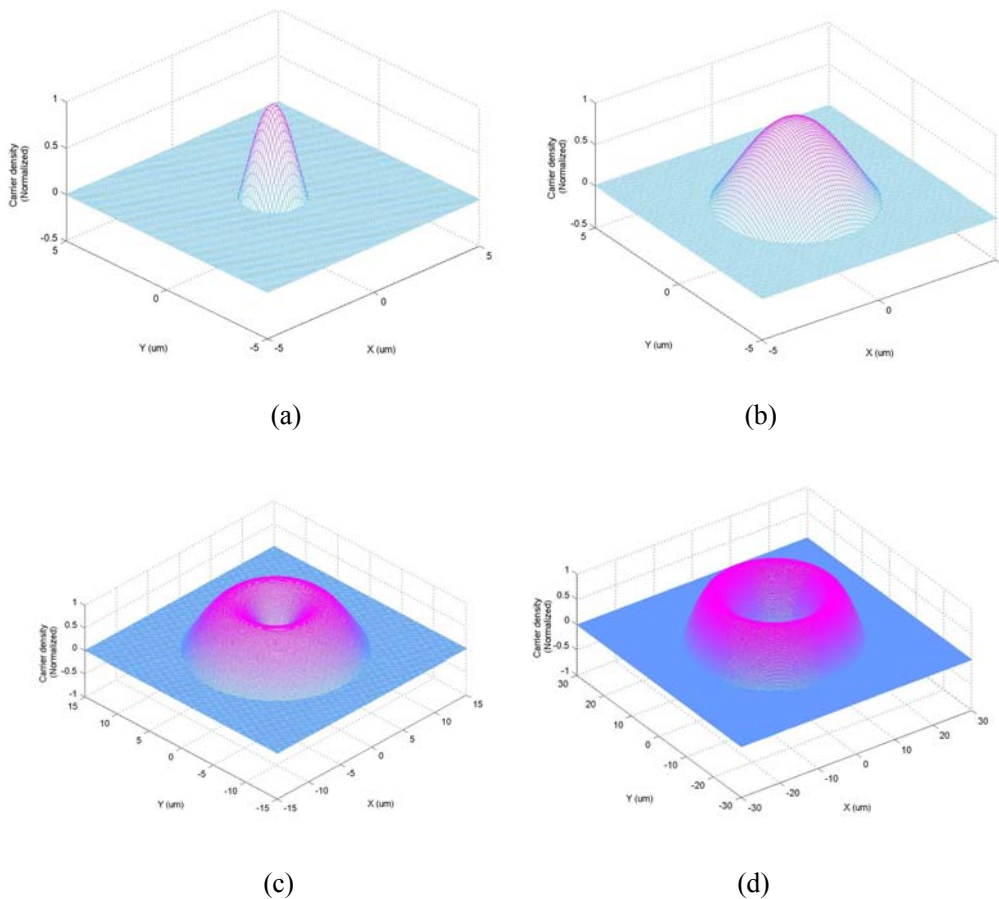


图 5-2：载流子随注入孔径变化的空间分布示意图(a)1.5 μm (b)3 μm (c)11 μm (d)20 μm

Fig5-2 the distribution of carrier with the aperture changed

(a)1.5 μm (b)3 μm (c)11 μm (d)20 μm

由于其它因素相同，所以我们可以把载流子分布上的区别归结为注入孔径对它的影响。从图中可以看出注入孔径的变化对载流子的空间分布有着十分明显的影响，当注入孔径 $r=1.5\mu\text{m}$ 时，载流子的分布如图 5-2(a) 所示，此时由于注入孔径较小，载流子主要集中在有源区的中心位置，孔径对载流子的限制能力较强。当注入孔径增大到 $r=3\mu\text{m}$ 时，如图 5-2(b)所示，载流子由于注入孔径的增大向外扩展，其空间分布范围相比图 5-2(a)情况要大。随着注入孔径的进一步增大，如图 5-2(c)所示，其对载流子的限制能力更低，由于各个孔径的器件在注入电流、温度等工作条件相同的情况下，载流子的总量不变，故随着其向外延伸的程度越来越大，整体分布的最大值将从中心处向边缘移动，即中心出现低载流子的烧孔区域，且该区域随着注入孔径的增大而增大，如图 5-2(d)所示。我们知道，载流子的分布对垂直腔面发射激光器的模式特性有着非常重大的影响，由于不同阶次模式在空间中的分布位置不同，因此他们与载流子的耦合程度也不尽相同，对应载流子分布位置的模式将获得增益较高而激励，以三个低阶模式 LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{21} 为例，他们的空间分布如图 3-16 所示，那么结合上面的载流子分布，我们可以分析出不同注入孔径下与载流子耦合程度最好的模式，从而得到孔径对模式分布的影响。对于 LP_{01} 来说，图 5-2(a)(b)载流子分布在有源区的中心位置，与之对应，即这两种情况 LP_{01} 模与载流子的耦合较强拥有更高的增益而优先激励，对于 LP_{11} 、 LP_{21} 模而言，其主要分布在有源区边缘附近，与载流子的耦合较弱，得到的增益较低，因而未能激励。随着注入孔径的增大，载流子的分布最大值向边缘移动，如图 5-2(c)(d)所示，此时分布在边缘的 LP_{11} 、 LP_{21} 模便有可能得到更高的增益而达到阈值，由于二者出射消耗了一部分有源区的载流子，故基模 LP_{01} 强度将下降，继续增加电流注入孔径， LP_{11} 阶横模越来越强，而主模 LP_{01} 强度则随之逐渐减小直到被掩盖。由此可见，VCSEL注入孔径越大越易激发高阶模式，要使VCSEL稳定的以单基模工作， R_d 必须控制在较小的范围内。

由此可见，注入孔径不仅仅影响着VCSEL中可能存在的模式种类，而且对模式间的竞争也起着至关重要的作用。那么，注入孔径对模式分布形状有没有影响呢？图 5-3 以 LP_{21} 为例，说明 $3\mu\text{m}$ 、 $7\mu\text{m}$ 注入孔径下其分布形状是否发生变化：

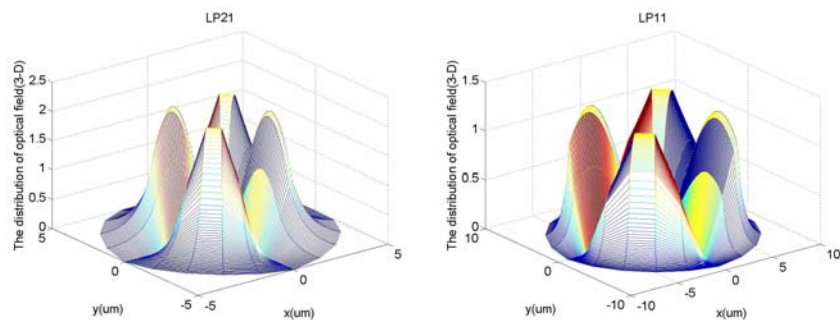


图 5-3 不同注入孔径对 LP_{21} 形状的影响 (a) $3\mu\text{m}$ (b) $7\mu\text{m}$

Fig5-3 The distribution of LP_{21} with the different apertures (a) $3\mu\text{m}$ (b) $7\mu\text{m}$

从图中我们可以看出,不同注入孔径下,模式 LP_{21} 的空间分布基本没有变化,孔径对模式的空间形状没有影响。

5.2.2 有源区尺寸很小的情况

目前在国内外的研究中曾经提到了纳米 VCSEL 的概念,为了能够同世界先进的工作水平同步,我们也在注入孔径上分析、计算了一下纳米 VCSEL 模式上存在的问题。

这种VCSEL有源区尺寸很小,我们分别模拟了注入孔径为 50nm、500nm、1 μ m 情况下 LP_{01} 模的二维光场分布,如图 5-4 所示:

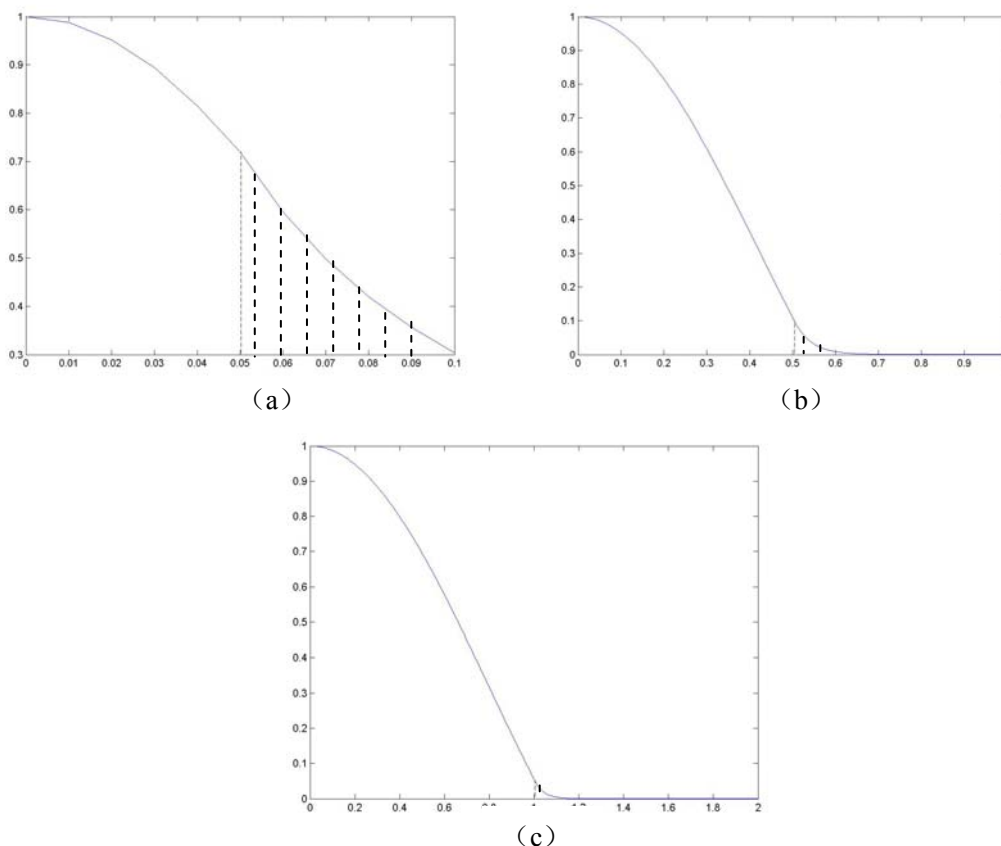


图 5-4 小注入孔径下 LP_{01} 的光场空间分布 (a) 50nm (b) 500nm (c) 1 μ m

Fig5-4 The distribution of optical field for LP_{01} with the small apertures (a)50nm(b)500nm(c) 1 μ m

从模拟的结果来看,有源区宽度越小,光场限制能力就越弱,也就是说,到达注入孔径边界时刻,光强仍然很大,以至于光场渗透到包层内,如图 5-4 中的虚线部分所示,这种渗透的程度随着有源区宽度的增大而减少。

为了更加准确地分析这种渗透的程度,我们从限制因子的角度出发,来计算一下以上各种情况的限制因子。

限制因子反映了被限制在中心层内的辐射能量与激光器产生的总辐射能量之比。图 5-5 是垂直腔面发射激光器的光腔示意图:

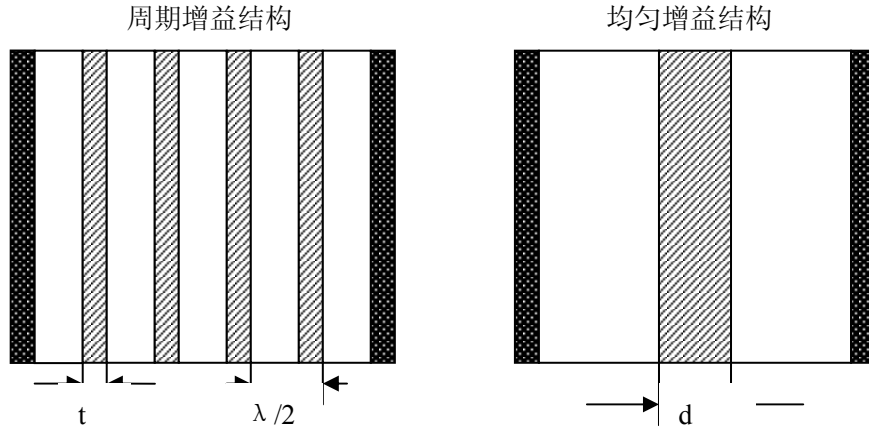


图 5-5 垂直腔面发射激光器的光腔示意图

Fig5-5 The sketch map of optical cavity for VCSEL

1. 纵向限制因子

阈值增益可表示为^{[65][66]}:

$$g_{th} = \frac{1}{\Gamma} \left(\alpha_i + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{R} \right) \right) \quad (5-18)$$

式中 R ——腔面几何平均反射率

Γ ——限制因子

α_i ——内部损耗

限制因子是增益区与激光模式之间的交叠程度，是决定有源区为激光模式提供增益有效性的重要因素。可表示为：

$$\Gamma = \Gamma_x \Gamma_y \Gamma_z \quad (5-19)$$

其中 $\Gamma_x \Gamma_y$ 代表横向限制因子， Γ_z 代表纵向限制因子。在垂直腔面发射激光器中， Γ_z 是影响阈值增益的一个重要因素。纵向因子定义为：

$$\Gamma = \frac{\int_{active} E^2(r) dr}{\int_L E^2(r) dr} \quad (5-20)$$

对于高反射率的谐振腔，电场为 $E(z) = E_0 \cos(kz)$ ，其中， $k = 2\pi n/\lambda$ ，可得到周期增益结构的限制因子为：

$$\Gamma_p = \frac{\frac{d}{t} \int \cos^2(kz) dz}{\frac{L}{\lambda/2} \int_{\lambda/2} \cos^2(kz) dz} \quad (5-21)$$

积分得：

$$\Gamma_p = \frac{d}{L} \left\{ 1 + \frac{\sin \left[\pi \left(\frac{t}{\lambda/2} \right) \right]}{\pi \left(\frac{t}{\lambda/2} \right)} \right\} = \frac{d}{L} \Gamma_r \quad (5-22)$$

这样一来纵向限制因子被表示为一个与有源区厚度 t 相关的表达式。如果有源区与一个标准的波峰相重叠，于是 $d=nt$ ， N 为腔中半波长的数目。则有：

$$\frac{d}{L} = \frac{t}{\lambda/2} \quad (5-23)$$

则 Γ_r 为：

$$\Gamma_r = 1 + \frac{\sin \left(\pi \frac{d}{L} \right)}{\pi \frac{d}{L}} \quad (5-24)$$

由此，可得在垂直腔面发射激光器的量子阱有源区相对于激射模式的位置决定纵模的光限制因子。对于均匀增益结构的限制因子可以在上式中将 $t=\lambda/2$ 代入后可获得： $\Gamma_u=d/L$ ，有 $\Gamma_r=1$ 。对于周期增益波导由式的 $\Gamma_r=2$ ，即相对于空间一致的增益分布，如果有源区位于激射模式的波峰处，则纵向限制因子是前者的两倍。在腔长为 $l\lambda$ 的光腔中，仅有一个波峰（波腹），因此，应将量子阱有源区置于波峰的中心来获得最大的纵向限制因子，以减低阈值增益。

2. 横向限制因子

我们查阅了一些相关资料发现，在注入孔径比较大的情况下，一般研究的都是纵向的限制因子，横向上由于尺寸较宽，没有考虑限制的问题，而如果把激光器的有源区宽度做到纳米级，那么横向上的限制必须要考虑，江剑平的半导体激光器中谈到了平面波导激光器中中心层很薄的情况下的限制因子。

仍然利用公式（5-20），将横向二维光场分布的表达式（3-13）代入其中，则我们可以计算得到小尺寸下横向限制因子的数值。

经过计算，我们取 $m=0$ ， $n_{core}=3.5$ ， $n_{clad}=1$ ， $V=2$ 的 850nm VCSEL 进行模拟，当 $a=1\mu m$ 时，计算得到限制因子 $\Gamma=0.3154$ ；当 $a=500nm$ 时，计算得到限制因子 $\Gamma=0.1857$ ；当 $a=50nm$ 时，计算得到限制因子 $\Gamma=0.0221$ 。可见，有源区尺寸越小，限制因子越小，，光限制能力越差，模式特性越不好。

5.3 折射率对垂直腔面发射激光器模式特性的影响

在有效折射率一章中，我们已经谈到了折射率对 VCSEL 截止频率以及模式特性的影响，根据式 $V^2=k^2 (n_1^2 - n_2^2) a^2$ ， $n_1^2 - n_2^2$ 值越大， V 值就越大，满足截止条件的模式阶次就越多，这对 VCSEL 的模式稳定性不利。另一方面考虑，折射率差值越大，对载流子的限制能力就越强，对模式的稳定性有利，二者互为矛盾，必

须针对工作需要选择合适的结构以满足要求。

与讨论注入孔径时相同，我们来看看折射率的变化对某一阶次的模式分布是否有影响呢？下面我们通过模拟作一下分析。图 5-6 为不同折射率差值情况下， LP_{21} 模式的空间分布情况：

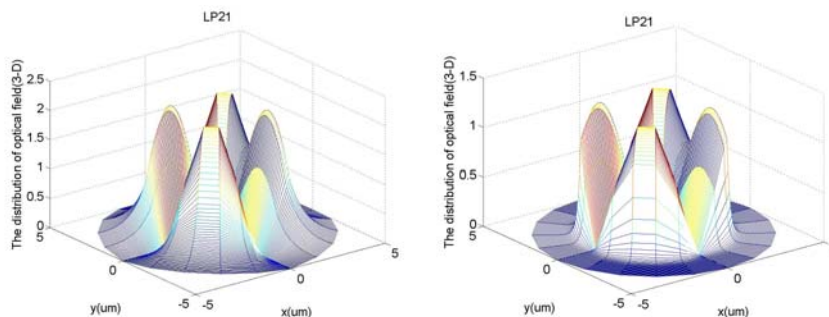


图 5-6 不同折射率差对 LP_{21} 形状的影响 (a) $n_{\text{core}}=3.3$ $n_{\text{clad}}=3.29$ (b) $n_{\text{core}}=3.3$ $n_{\text{clad}}=3.1$

Fig5-6 The distribution of LP_{21} with the different apertures

(a) $n_{\text{core}}=3.3$ $n_{\text{clad}}=3.29$ (b) $n_{\text{core}}=3.3$ $n_{\text{clad}}=3.1$

从图中我们可以看出，不同折射率差下，模式 LP_{21} 的空间分布基本没有变化，折射率差对模式的空间形状没有影响。

5.4 激光波长对垂直腔面发射激光器模式特性的影响

我们知道，波矢 k 也是影响截止频率的因素之一，而 k 又与垂直腔面发射激光器的激光波长有关，在其它因素相同的情况下，激光波长 λ 越长，波矢 k 越小，截止频率 ν 就越小，模式特性就越好。那么，如何用实验来验证不同波长 VCSEL 的模式稳定性呢？

我们可以通过分析 850nm、980nm VCSEL 来说明一下问题。一般情况下，垂直腔面发射激光器振动的腔长必须满足 $n\lambda/2$ [67]，首先考虑 850nm VCSEL，这里假设其单模临界孔径 $L=3\mu\text{m}$ ，那么通过计算，我们可以得到此时的 $n=7$ ，那么将 $n=7$ 代入到 980nm VCSEL 计算一下其单模临界条件 L' 的值，得到单基模临界孔径 $L'=3.43\mu\text{m}$ ，我们知道，注入孔径越大对模式特性越不利，这里 980nm 单模临界孔径达到 $3.43\mu\text{m}$ ，比 850nm 临界条件大，说明其可以在较大孔径下实现单模工作，激光波长越长的 VCSEL 结构模式特性越好。

5.5 本章小结

本章分析了影响模式的若干因素，如注入孔径、注入电流、折射率、输出波长等因素对 VCSEL 模式种类、模式形状、模式瞬态特性的影响，通过推导时空分离的速率方程，有效地描述出了器件动态的载流子、光子分布以及它们的相互作用，模拟不同工作条件下的载流子分布，并以此入手对注入电流、注入孔径等因素进行理论分析，得到模拟结果。总体来说，本章对空间烧孔现象、模式分布变化进行了有效的分析与证明，验证实验和模拟结果得到吻合。

第6章 模式测试遇到的问题及改善模式特性的方法

一般来说, 由于实际条件的不确定性, 实验测得的结果往往与模拟结果存在着一定的不一致性。对于垂直腔面发射激光器的模式特性而言, 由于不同阶次模式存在同时激励的可能性, 且实际器件的注入孔径较大, 高阶模式较多, 这都给实验测试带来了一定的难度。在本章中, 我们将针对测试时遇到的光场分辨不清楚等问题进行分析, 对比模式彼此空间分布的区别, 提出改善模式特性的方法, 为优化 VCSEL 的模式特性提供理论依据。

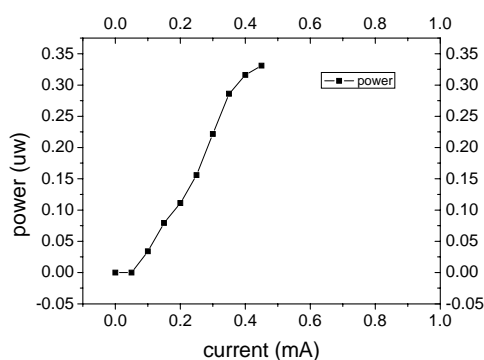
6.1 模式测试中遇到的问题及分析

目前本实验室制备完成的垂直腔面发射激光器器件注入孔径都比较大, 小的一般在 $11\mu\text{m}$, 大的可达 $20\mu\text{m}$ 以上。相对而言, 部分较小孔径的 VCSEL 器件可以得到比较理想的模式分布结果, 而大孔径的 VCSEL 测试出的光场空间分布则比较难以观测。

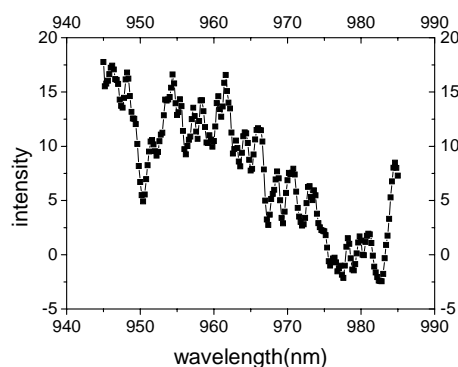
首先, 我们来看看模式特性比较理想的情况。所测试器件为 980nm VCSEL, 编号 1303017, 该器件注入孔径 $11\mu\text{m}$:

1. 工作电流 0.5mA , 工作电压 1.615V , 半高全宽 FWHM 38.8nm 时, 此器件的 I - V 特性曲线、纵模分布情况、远场、近场图如图 6-1 所示:

从图中可见, 此时激光器还没有达到阈值条件, FWHM 为 38.8nm , 显然不是激光出射, 从图 6-1 所示, 此时光发散角很大, 光场强度很低, 且不能测试激励波长。



(a)



(b)

从此刻的半宽FWHM 0.6nm以及图 6-2 (b) 纵模观测结果我们可以看出, 此时器件已经达到阈值条件发射出激光, 且激射波长接近 980nm, 从横模近场、远场图 6-2 (c) (d) 中我们发现测试过程中模式分布发生的变化, 相比图 6-1, 此时远场图发散角变小, 光场沿径向出现一个极大值, 沿角坐标方向没有出现最小值位置, 呈 LP_{01} 模式分布。而近场相比图 6-1 结果来看, 光场强度有所增大且主要分布在器件中央, 与图 6-2 (c) 测试结果相吻合。

3. 工作电流 2mA, 工作电压 2.016v, FWHM 1.2nm 时, 此器件的 I - V 特性曲线、纵模分布情况、远场、近场图如图 6-3 所示:

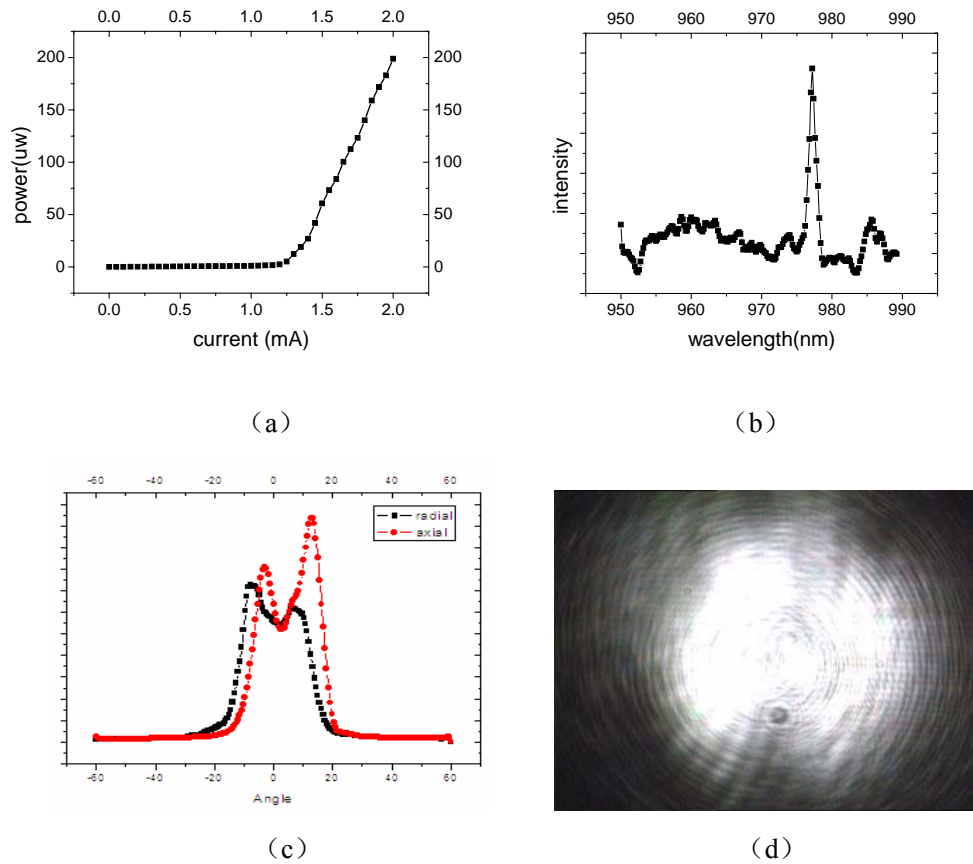


图 6-3 工作电流 2mA 时 980nm VCSEL 的工作状态(a) I - V 曲线(b)纵模(c)横模远场(d)横模近场

Fig6-3 The state of 980nm VCSEL when the current is 2 mA

(a) I - V (b) longitudinal mode(c) far-field (d)near-field

从此刻半宽FWHM 1.2nm, 从图 6-3 (b) 纵模观测结果看仍为单纵模激光出射。随着注入电流的增大, 器件的输出功率有所增加, 且模式分布出现比较明显的变化。相比图 6-2 (c) (d) 所示, 图 6-3 (c) (d) 出现了明显的光场分瓣情况, 沿径向方向出现了一个极大值位置, 沿角坐标方向出现两个最小值点, 即 LP_{11} 激射, 由于 LP_{11} 、 LP_{01} 二者存在模式竞争, 所以这里我们看到的最小值位置不是很明显, 具体的误差分析在 3.3 节中已经讨论, 这里不再重复。

4. 工作电流 3mA，工作电压 2.248v，FWHM 0.8nm 时，此器件的 I - V 特性曲线、纵模分布情况、远场、近场图如图 6-4 所示：

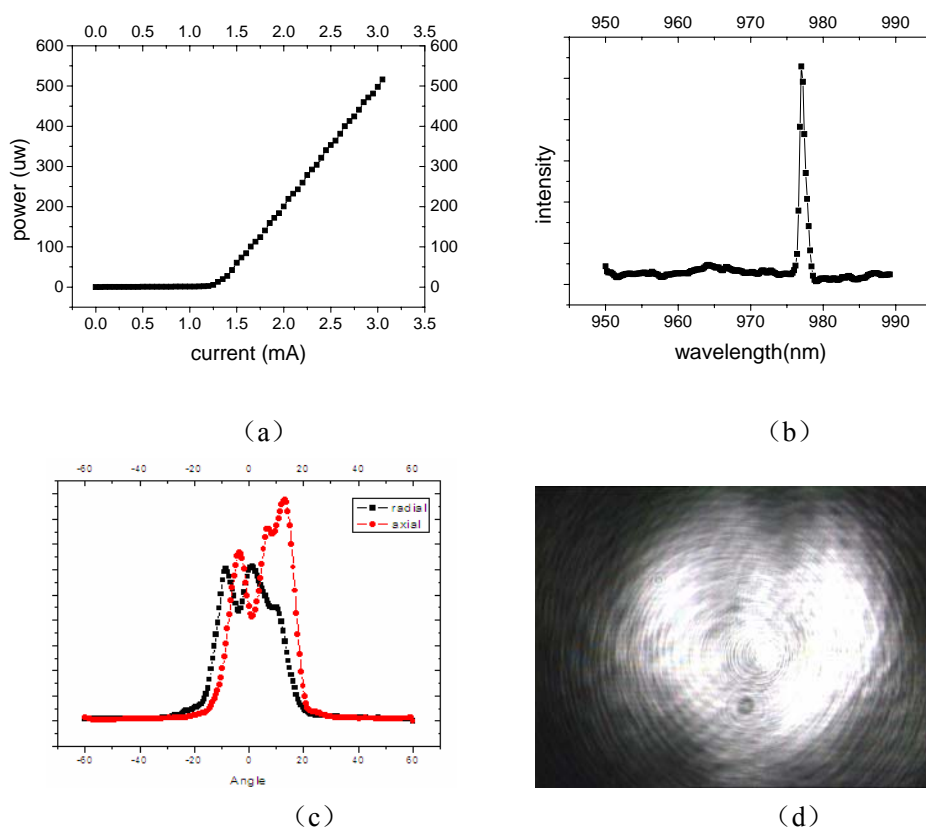


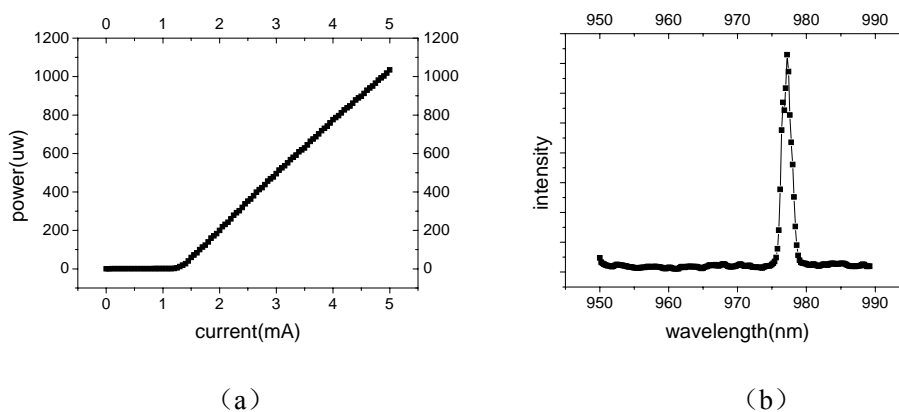
图 6-4 工作电流 3mA 时 980nm VCSEL 的工作状态(a) I - V 曲线(b)纵模(c)横模远场(d)横模近场

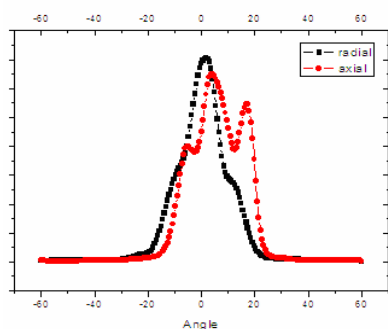
Fig6-4 The state of 980nm VCSEL when the current is 3 mA

(a) I - V (b) longitudinal mode(c) far-field (d)near-field

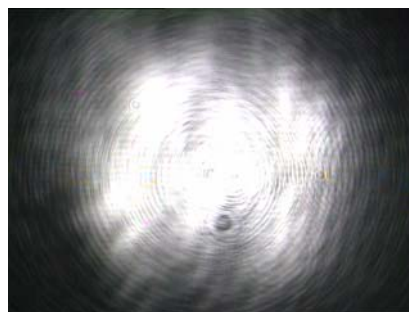
从图 6-4 中我们可以看出，光场分裂情况更加剧烈，但是整体看还是 LP_{01} 和 LP_{11} 的交叠分布， LP_{21} 还没有达到阈值条件激励。

5. 工作电流 5mA，工作电压 2.605v，FWHM 1nm 时，此器件的 I - V 特性曲线、纵模分布情况、远场、近场图如图 6-5 所示：





(c)



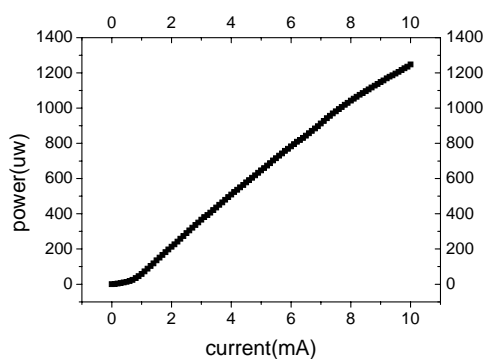
(d)

图 6-5 工作电流 5mA 时 980nmVCSEL 的工作状态(a)I-V 曲线(b)纵模(c)横模远场(d)横模近场

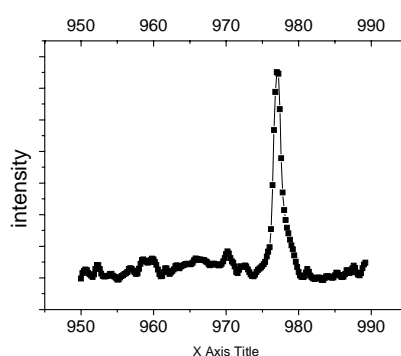
Fig6-5The state of 980nm VCSEL when the current is 5 mA

(a)I-V(b) lognitudinal mode(c) far-field (d)near-field

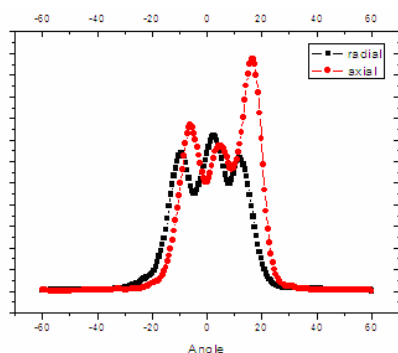
6. 工作电流 10mA，工作电压 3.455v，FWHM 1nm 时，此器件的 I - V 特性曲线、纵模分布情况、远场、近场图如图 6-6 所示：



(a)



(b)



(c)



(d)

图 6-6 工作电流 10mA 时 980nmVCSEL 的工作状态(a)I-V 曲线(b)纵模(c)横模远场(d)横模近场

Fig6-6 The state of 980nm VCSEL when the current is 10 mA

(a)I-V(b) lognitudinal mode(c) far-field (d)near-field

从图 6-6 (c) (d) 中我们可以看出，此刻沿径向出现一个极大值位置，沿角

坐标方向出现四个最小值位置，即 LP_{21} 模式激射，由于其与 LP_{01} 、 LP_{11} 存在模式竞争，所以各模式的交叠导致实际测试结果的不规则。

7. 工作电流 15mA，工作电压 4.212V，FWHM 1.2nm 时，此器件的 I - V 特性曲线、纵模分布情况、远场、近场图如图 6-7 所示：

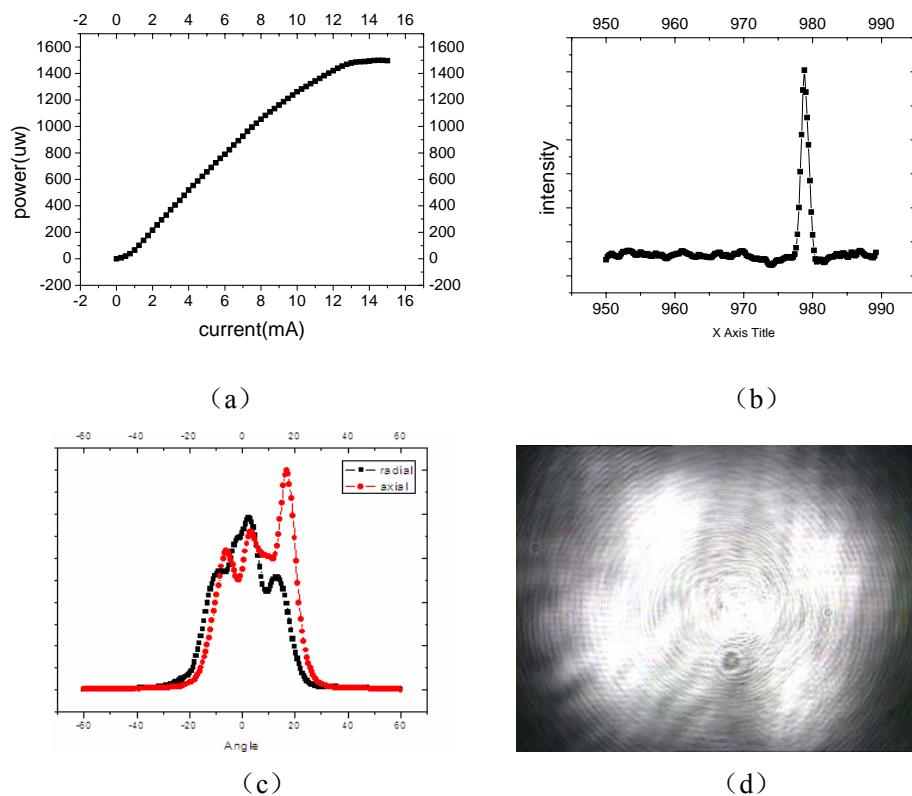


图 6-7 工作电流 15mA 时 980nm VCSEL 的工作状态

(a)I-V 曲线(b)纵模(c)横模远场(d)横模近场

Fig6-7 The state of 980nm VCSEL when the current is 15mA

(a)I-V(b) longitudinal mode(c) far-field (d)near-field

从图 6-1 至图 6-7 中我们可以看出，编号为 1303017 的器件随着注入电流的升高，我们可以通过实验测试得到比较明显的光场变化情况，模式特性的实验与理论结果得到很好的吻合。

而同样是 VCSEL 器件，在测试过程中，我们也遇到了一些问题。如编号为 3007065 的器件，其注入孔径为 $20.5\mu\text{m}$ ，我们分别测试其工作电流为 6mA, 10mA, 20mA 时刻的近场分布情况，如图 6-8 所示：

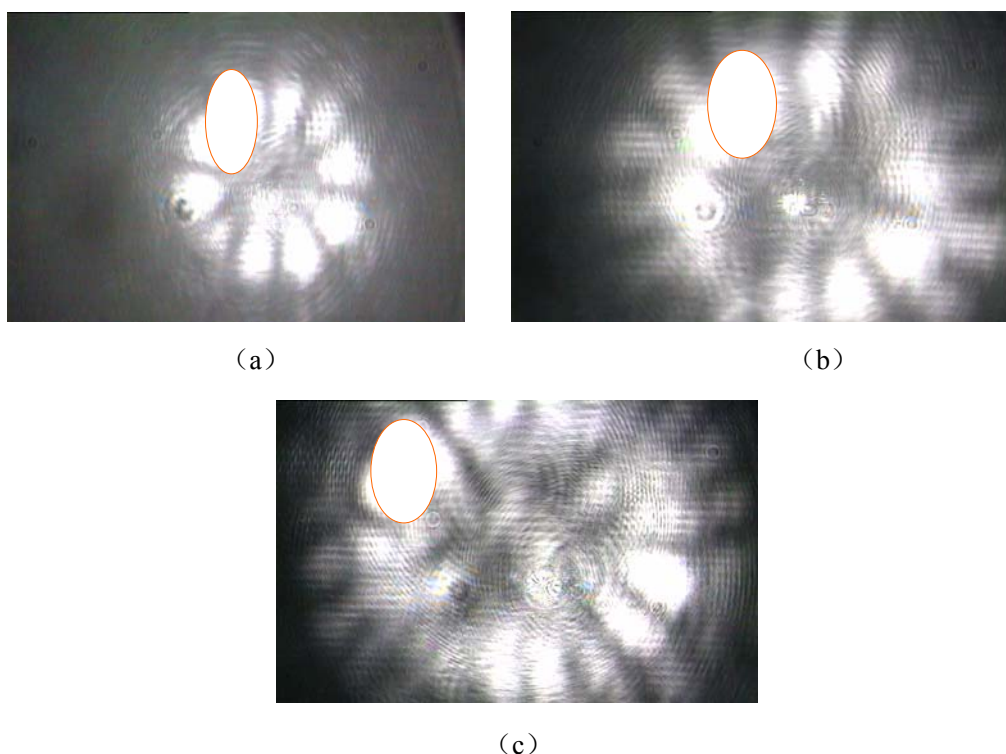


图 6-8 不同注入电流下 3007065 的近场分布示意图 (a) 6mA (b) 10mA (c) 20mA

Fig6-8 The distribution of near-field for 980nm VCSEL (a) 6mA (b) 10mA (c) 20mA

从图 6-8 中我们可以看出，由于注入孔径较大，注入电流的增大仅仅对光场的强度、发散程度有一定的影响，从图中圈中的位置我们可以发现，模式的分布并未发生改变。一般情况下，由于孔径尺寸过大造成对载流子限制能力的下降，许多高阶模式满足激射条件而出射，他们彼此竞争激烈且交叠严重，造成比较混乱的多瓣近场分布情况，遇到这种情况，即使我们如何改变电流，对载流子以及模式的改善都是微乎其微的，这给我们观测模式分布带来了一定的困难。

除上述问题以外，还有一种情况在测试过程中也经常发生。图 6-9 为工作电流为 15mA 时器件 1503014 与工作电流 10mA 时器件 1504103 的模式近场图对比：

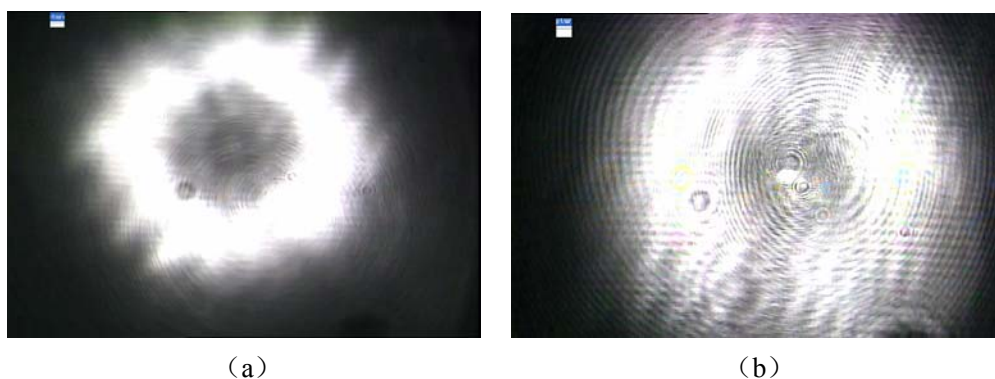


图 6-9 不同 VCSEL 的近场分布对比 (a) 1503014 15mA (b) 1504103 10mA

Fig6-9 The comparison of the different near-field for VCSELs

(a) 1503014 15mA (b) 1504103 10mA

从上图中我们可以看出, 1504103 器件在 10mA 时刻出现明显的双瓣分布, 即 LP_{11} 出射, 而 1503014 器件在 15mA 工作条件下分布近似 LP_{11} , 但是分裂却不是那么明显。为了更加明显地看出二者的区别, 我们分别测试了上图两种情况的远场图, 如图 6-10 所示:

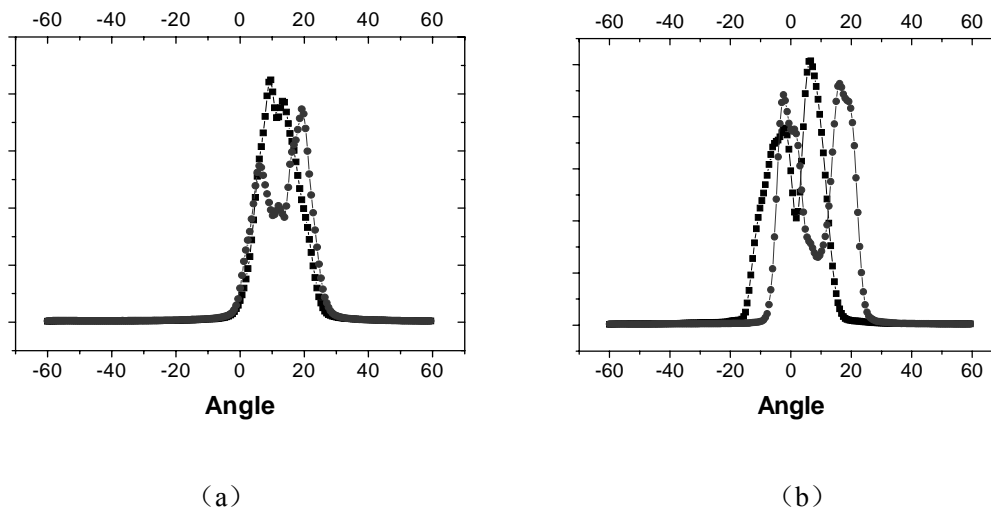


图 6-10 不同 VCSEL 的远场分布对比 (a) 1503014 15mA (b) 1504103 10mA

Fig6-10 The comparison of the different far-field for VCSELs

(a) 1503014 15mA (b) 1504103 10mA

从上图我们可以搞清楚为什么 1503014 的分布没有 1504103 清晰, 从 6-10(b) 中我们发现光场分布的强弱差异明显, 器件中央的光场分布极小值与边缘光场最大值的差距很大, 所以用显微镜可以观测到非常明显的双瓣分裂情况。而图 6-10 (a) 光场最小值与最大值相距很近, 这对临界处的观测不利, 我们无法得到明暗分明的图像。遇到这种情况, 我们通常可以考虑加滤光片, 整体降低器件的光场强度, 使最小值位置进一步下降, 直到我们无法观测到较暗区域为止。这时, 虽然亮区强度也有所下降, 但是由于较暗区域的光场已经被抹除, 这样便可以得到比较理想的分裂情况。通常我们可以在薄玻璃片上镀上一层膜来制作滤光片。

6.2 改善模式特性的方法

为了提高垂直腔面发射激光器的使用价值, 我们必须对 VCSEL 的模式特性进行改善。近些年来, 通过改变 VCSEL 的折射率分布、孔径结构来实现对模式优化的方法很多, 下面我们举例说明:

6.2.1 改变折射率分布法

1. 光子晶体结构PC-VCSEL^{[68]-[70]}

由于光子晶体结构对 VCSEL 的模式稳定性有利，因此我们对该结构进行了资料的搜集与总结。光子晶体的结构可以这样理解，正如半导体材料在晶格结点（各个原子所在位点）周期性的出现离子一样，光子晶体是在高折射率材料的某些位置周期性的出现低折射率（如人工造成的空气空穴）的材料。通常我们在 VCSEL 的顶部 DBR 上制作周期性的许多小孔以此来实现对 VCSEL 类光纤结构折射率的控制，影响模式分布。

A、PC-VCSEL 的波导机制

光子晶体垂直腔面发射激光器呈现出光子带隙结构，在带隙中光传播是禁止的。其波导机制分为两种：

a、折射率导模 PC-VCSEL：其导模机制是全反射（TIR）。这种结构由二维空气孔网格组成，该空气孔网格没有中心空气孔，芯层折射率大于包层折射率。

b、光子带隙导模 PC-VCSEL：其导模机制是光子带隙效应（PBG）。网络外的空气孔产生缺陷，这里被引导的模式落在蜂窝状光子晶体禁带上，因为包层平均折射率高于芯层，所以 TIR 理论不能用来解释这种机制，而内部带波导机制归结为由光子晶体包层禁带产生的横向辐射抑制。

B、目前 PC-VCSEL 的研究内容

a、PC-VCSEL 结构以及特点的研究：光子晶体垂直腔面发射激光器可以实现单模激射，光束为发散角小，像散可以忽略的圆形光束。大出光孔可以实现高功率，同时也提高其与单模光纤的耦合效率，降低热电阻，改善激光器的热特性和高速调谐特性。

b、PC-VCSEL 的结构、性能优化：PC-VCSEL 本身存在着一些问题。对于同一晶格常数，占空比大的输出功率低，在相同的刻蚀条件下，孔越大则刻蚀的深度越深，深度越深对激光器模式影响很大，使得出射模式越接近于单模。相应地，功率损耗越大，出射功率越低。其次，光子晶体孔增加了注入电流的散射损耗，所以单缺陷微腔的激光阈值较大。图 6-11 为光子晶体 VCSEL 的表面结构示意图：

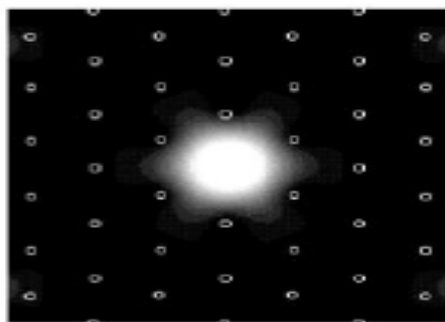


图 6-11 PC-VCSEL 的表面示意图

Fig6-11 The surface of PC-VCSEL

2、通过 DBR 掺杂改变折射率分布

图 6-12 为 DBR 掺杂情况的 VCSEL 结构示意图^[71]:

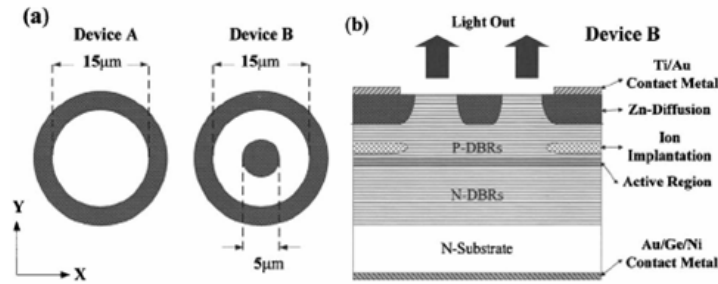


图 6-12 DBR 掺 Al 的 VCSEL 结构示意图

Fig6-12 The structure of VCSELs whose DBR was injected by Al

此种情况通过改变芯层、保层折射率，改变截止频率 $V^2=k^2(n_1^2-n_2^2)a^2$ ，从而改变器件对载流子的限制能力以及控制不同模式的截止条件，从而达到改善模式特性的效果。

3、通过表面光栅改善模式特性

这种方法与光子晶体结构比较类似，光栅是由大量等宽、等间隔的狭缝构成的光学元件。通过在 DBR 上制作光栅以改变 VCSEL 的折射率分布，实现对 VCSEL 模式的控制，图 6-13 为带有表面光栅结构的 VCSEL^[72]:

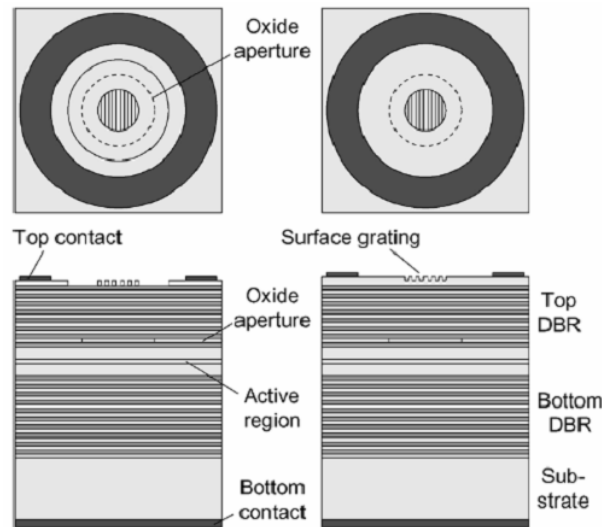


图 6-13 带有表面光栅结构的 VCSEL 示意图

Fig6-13 The structure of the grating VCSELs

4、多有源区结构 VCSEL 的模式特性

通过第四章的介绍，我们已经从数值上计算了多有源区模式特性上的优势，由于多有源区 VCSEL 层数较多，所以氧化层氧化后折射率对 VCSEL 整体包层折射率的影响相比单有源区要小，因此多有源区芯层、包层折射率值就更加接近，折射率差相比单有源区就小，对模式特性有益。

6.2.2 改变注入孔径法

注入孔径是影响模式分布的重要因素之一，根据公式 $V^2 = k^2 (n_1^2 - n_2^2) a^2$ ，我们知道注入孔径 a 越小，截止频率 V 值就越低，这样满足截止条件的模式就越少，模式特性越好。而由于注入孔径较小所带来的问题也相应而生，由于注入孔径较小导致增益区域过小，VCSELs 的输出功率等性能将被限制。在这种情况下，人们提出了双氧化孔径结构，如图 1-3 (b) 所示。这种结构具有两个氧化限制层，将电注入孔径与光孔径分开，既有效的限制了光场分布，又增大了 VCSEL 的增益区域，提高了其功率特性。

6.3 本章小结

本章分析了在实验测试 VCSEL 远场、近场分布时所遇到的问题。对照模式特性较好的 VCSEL 器件，分析注入孔径较大时测试模式出现的若干问题。由于之前制造的 VCSEL 器件主要改善、针对的是激光器阈值电流、输出功率等方面的性能，所以实验室目前存在的 VCSEL 氧化限制型注入孔径相对较大，这对研究 VCSEL 模式特性造成了一定的难度。之后，我们对近些年来人们提出的控制模式的方法进行了一定的说明，从理论上提出了例如多有源区、光子晶体、表面掺杂、双氧化孔径等改善 VCSEL 模式特性的方法。

结 论

本论文在国家“973”项目、“863”项目、国家自然科学基金和北京市自然科学基金资助下，围绕内腔接触式氧化物限制型垂直腔面发射激光器的模式特性，进行了深入的理论分析和实验研究。

总结起来，本论文共有两个创新点，并取得了三个成果。

创新点一：利用圆柱弱折射率导引结构建立垂直腔面发射激光器的模式分布模型，通过软件编写、模拟绘制不同模式的二维、三维分布情况，建立可视化操作界面，为我们直观、动态了解模式空间分布、交叠情况提供便利，申请获得软件著作权。（登记号 2008SRBJ0974）

创新点二：与国外的前沿垂直腔面发射激光器的研究领域结合，将计算有效折射率的方法与本实验的驻波模拟分布程序相结合，利用传输矩阵法推导有效折射率模型，实现在模拟输出激光器驻波场分布的同时准确的计算出芯层、包层折射率值。证明了多个有源区结构不仅仅有效地降低了阈值电流，提高了输出功率，而且改善了 VCSEL 的模式特性。

本论文取得的成果主要分为模式理论和模式特性、模式模拟与模式分析及模式测试与误差分析三个方面。

模式理论和模式特性：从模式的研究现状出发，提出 VCSEL 模式方面的优势以及利用价值，分析当今垂直腔面发射激光器模式方面的主要研究重点、研究难点，以及解决问题的主要方法。

对 VCSEL 模式的若干概念进行总结与归纳，如纵模、横模、偏振的定义，分析了纵模分裂、多横模情况、偏振对模式的影响等主要问题，随后我们针对 VCSEL 特有的 LP 模式定义进行总结，对 LP 的表达式进行了理论分析及数学推导，得出 LP 模式同普通边发射激光器 TE、TM 等模式表达的相互关系，用表格的形式说明线性偏振模的简并关系。最后，我们重点讨论了垂直腔面发射激光器同边发射激光器模式方面上特性、计算方法上的区别，为之后建立空间分布模型、有效折射率模型提供理论依据。

模式模拟与模式分析：从理论上推导垂直腔面发射激光器的模式分布表达式，分别利用三层波导结构、圆柱弱折射率导引结构建立垂直腔面发射激光器的模式分布模型，并使用 MATLAB 软件编写了圆柱弱折射率导引结构的可操作界面。对 LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{21} 、 LP_{12} 等模式进行模拟与分析，对模式模拟结果进行优化，并讨论模式之间的交叠程度对模式竞争的影响、奇模、偶模概念、以及模式连续性分布等相关问题。

建立纵模光场分布模型、得到不同结构 VCSEL 的驻波场分布。利用传输矩

阵法推导有效折射率模型，准确计算 VCSEL 的折射率值。对新型双有源区垂直腔面发射激光器利用有效折射率模型，准确地计算出其芯、包层折射率值。结合光波导理论，对比单有源区 VCSELs 模拟不同结构、不同材料器件的横模分布情况。实验结论表明随着芯、包层折射率差的增大，更高阶模式满足出射条件而激射，横模分布情况更加复杂，模式之间交叠情况更加严重，而新型双有源区结构有效地提高了垂直腔面发射激光器的模式特性。理论和实验、模拟结果得到统一。

通过建立时空分离的速率方程，分析影响模式的若干因素，如注入孔径、注入电流、折射率、输出波长等因素对 VCSEL 模式种类、模式形状、模式瞬态特性的影响，有效地描述出了器件动态的载流子、光子分布以及它们的相互作用，模拟不同工作条件下的载流子分布，并以此入手对注入电流、注入孔径等因素进行理论分析，得到模拟结果。

模式测试与误差分析：分析了在实验测试 VCSEL 远场、近场分布时所遇到的问题，讨论模拟结果与实验结果之间误差产生的原因。对照模式特性较好的 VCSEL 器件，分析注入孔径较大时测试模式出现的若干问题。对近些年来人们提出的控制模式的方法进行了一定的说明，从理论上提出了例如多有源区、光子晶体、表面掺杂、双氧化孔径等改善 VCSEL 模式特性的方法。

通过本论文的工作，全面完成了国家“973”、“863”、国家自然科学基金和北京市自然科学基金等科研任务中 VCSEL 模式方面的研制工作，通过模拟、实验相结合的手段，得到了模式的空间分布形式，讨论了影响、控制模式的主要因素，共发表论文 5 篇，以第一作者发表论文 2 篇，其中 SCI 收录 1 篇，另外有一篇 SCI 论文已接收，关于模式分布方面的可视化界面目前正在申请相关的软件著作权。

参考文献

- 1 K. Iga, F. Koyama, S. Kinoshita. Surface Emitting Semiconductor Lasers. IEEE J. Quantum Electron.. 1988, 24(9):1845~1855
- 2 H. Soda, K. Iga, C. Kitahara, and Y. Suematsu, GaInAs-P/InP Surface Emitting Injection Lasers. Japan. J. Appl. Phys.. 1979, 18(5):2329~2320
- 3 江剑平. 半导体激光器. 电子工业出版社, 2000, 2:170 173 175
- 4 伊贺健一, 小山二三夫. 面发射激光器基础与应用. 科学出版社, 2002: 5~7 128 38 52~53 30 26
- 5 R.S.Geels, S.W.Corzine, L.A.Coldren. InGaAs vertical-cavity surface-emitting lasers. IEEE J.Quantum Electron. 1991, 27(6): 1359~1367
- 6 T.Baba, Y.Yogo, K.Suzuki. Near room temperature continuous wave lasing characteristics of GaInAsP/InP surface emitting laser. Electron.Lett. 1993, 29(10): 913~914
- 7 K.Uomi. Low threshold room temperature pulsed operation of 1.5 μ m vertical-cavity surface-emitting lasers with an optimized multi-quantum well active layer. Photon.Technol.Lett. 1994, 6(3): 317
- 8 K.Iga. Possibility of Green/Blue/UV surface emitting lasers. In Int.Symp.Blue Laser Light Emitting Diodes, 1996, Th-11: 263~266
- 9 垂直腔面发射激光器: 进展和未来前景. 激光与光电子学进展. 1999, 5: 13~17
- 10 韩力英, 张存善. 垂直腔面发射激光器的结构和应用. 电子产品世界. 2003, 4:12~14
- 11 K.D.Choquette, J.F.Klem, A.J.Klem. Electron.Lett. 2000, 36(16): 1388
- 12 董立闽. AlGaAs 湿氮氧化技术和新型垂直腔面发射激光器的研制. 北京工业大学工学硕士学位论文. 2004, 5:1~3 18 34 16 47
- 13 刘立新. 垂直腔面发射激光器的热场及与电、光耦合的理论分析. 河北工业大学硕士论文. 2003, 3:1~2
- 14 Yue aiwen, Zhang wei, Zhan duning. High Slope efficiency and high power 850nm oxide confined vertical cavity surface emitting lasers Chinese Journal of Semiconductors. 2003, 24(7): 693~696
- 15 Zorn M , Knigge A , Zeimer U. MOVPE growth of visible vertical cavity surface emitting lasers . J .Crystal Growth . 2003, 248 :186~193.
- 16 H.E.Shin, Y.G.Ju, J.H.Shin.Electron. 780 nm oxidised vertical~cavity surface emitting lasers with Al_{0.11}Ga_{0.89}As quantum wellsLett..1996,32(14): 1287-1288
- 17 黄智伟. 竖直表面发光激光器—VCSEL. 世界电子元器件. 1999, 8:16
- 18 黄章勇. 光纤通信用光电子器件和组件. 北京邮电大学出版社, 2001:43
- 19 Johan S. Gustavsson, Jörgen Bengtsson, Piotr Jedrasik, Åsa Haglund, Design and Evaluation of Fundamental-Mode and Polarization-Stabilized VCSELs With a Subwavelength Surface Grating. Journal of quantum electronics. Vol.42. No.3, March 2006
- 20 Jordi Buesa, Hugo Thienpont, Krassimir Panajotov, Polarization switching and dynamics induced by optical injection in VCSELs. European Quantum Electronics Conference, 2005
- 21 Takashi Mori, Yasuhiro Yamayoshi, Experimental demonstration of all-optical regeneration

- using a polarization bistable VCSEL. Conference on Lasers & Electro-Optics (CLEO), 2005
- 22 杨宜, 阮玉, 宋镜明, 柳光全, VCSEL 偏振相关特性的实验研究. 光电子技术与信息, Optoelectronic Technology & Information 2003 Jun; 16(3)
 - 23 W. Nakwaski and R. P. Sarzała, Mode Selectivity in Oxide-Confined Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers. IEEE, 2005
 - 24 W. Nakwaski, M. Wasiak, P. Maćkowiak, W. Bedyk, M. Osiński et al., Oxidation kinetics of AlAs and (AlGa)As layers in arsenidebased diode lasers: Comparative analysis of available experimental data, Semicond. Science and Technol., vol. 19, pp. 333-341, 2004.
 - 25 郭长志. 半导体激光模式理论. 人民邮电出版社. 1989, 1: 13~19
 - 26 渠宏伟. 新型隧道再生和微机械可调谐垂直腔面发射激光器的研制. 北京工业大学工学博士学位论文. 2005, 5: 1~3 18 34 82
 - 27 李建军, 陈昌华, 廉鹏, 高国, 邹德恕, 沈光地, 多横模复折射率波导的数值求解. 光学学报, 第 21 卷, 第 7 期, 2001
 - 28 张季熊, 光电子学教程. 华南理工大学出版社. 2001, 1(3): 55~56
 - 29 韩力英, 垂直腔面发射激光器偏振特性的研究. 河北工业大学工学硕士学位论文. 2004, 2: 19 25
 - 30 张之翔, 光的偏振. 北京高等教育出版社. 1985(1): 50~65
 - 31 盖红星, 新型高效垂直腔面发射激光器的研制. 北京工业大学工学博士学位论文. 2005, 10: 89~91
 - 32 张伟贤, 光波导电子学. 电子工业出版社. 1990(1): 15~32
 - 33 韩力英, 张存善, 曹彬, 姚晓琼, 回文静, 朱奇伟, 贾春辉, 刘磊, VCSEL 的偏振特性随注入电流变化的实验研究. 光子技术, 2006, 1(11)
 - 34 K. Panajotov, B. Nagler, G. Verschaffelt, A. Georgievski, H. Thienpont, J. Danckaert, and I. Veretennicoff, Impact of in-plane anisotropic strain on the polarization behavior of vertical-cavity surface-emitting lasers. Applied physics Letters, 2000, 77(11)
 - 35 G. R. Hadley. Effective index model for vertical cavity surface emitting lasers. Opt. Lett. 1995(20): 1483~1485
 - 36 K. J. Ebeling. Analysis of vertical cavity surface emitting laser diodes (VCSEL). Semiconductor Quantum Opto-electronics[M]. Institute of Physics, London, 1999: 312~330
 - 37 国分泰雄. 光波工程. 科学出版社. 2002: 157~205
 - 38 吴重庆. 光波导理论. 清华大学出版社. 2000: 24~46
 - 39 李建军. 多有源区耦合大光腔高效大功率半导体激光器的研究. 北京工业大学博士学位论文. 2001, 5: 11~22
 - 40 姚晓琼, 张存善, 韩力英, 曹彬, 回文静, 用 MATLAB 模拟三层平板波导的模式特性. 光子技术. 2006, 1(11)
 - 41 刘式适, 特殊函数. 北京气象出版社. 2002
 - 42 斯奈德, 光波导理论. 北京人民邮电出版社. 1991
 - 43 李孝峰, 潘炜, 罗斌, 马冬, 理论研究电流注入对垂直腔面发射激光器多横模行为的影响. 光学技术. 2006. 32(1)
 - 44 A. Valle, J. Sarma, and K. A. Shore, Dynamics of transverse mode competition in vertical cavity surface emitting lasers, Opt. Commun. 1995, 115: 297~302
 - 45 Wei-Choon Ng, Yang Liu, and Karl Hess, Resonant-Wavelength Control and Optical Confinement Analysis for Graded SCH VCSELs Using a Self-Consistent Effective-Index

- 46 Method. Journal of lightwave technology, 2003.21(2)
- 47 黄永箴. 垂直腔面发射激光器中顶层相位对模式特性的影响. 光学学报. 2000, 20(2):181~185
- 48 Yong-Zhen Huang. Influence of Lateral Propagating Modes on Laser Output Characteristics in Selectively Oxidized Vertical Cavity Surface-Emitting Lasers with Double Oxide Layers. J. Appl. Phys.. 1999, 86(7):3519~3524
- 49 李建军,沈光地,垂直腔面发射激光器光场数值解的打靶法.光电子激光 2006.12(17)
- 50 Wei-Choon Ng, Yang Liu, Ben Klein, and Karl Hess. Improved Effective Index Method for Oxide-Confined VCSEL Mode Analysis. Physics and Simulation of Optoelectronic Devices. 2002. 4646 (2002)
- 51 朱文军. 新型高效大功率垂直腔面发射激光器研究. 北京工业大学博士学位论文. 2003, 34 64~65 75~78
- 52 刘恩科, 朱秉升等. 半导体物理学. 上海科学技术出版社. 1984:278~283 74~78 162~166 172~173 174~176 157 156
- 53 朱文军, 郭霞, 沈光地, 新型垂直腔面发射激光器的最优化设计模式. 量子电子学报. 2003. 2 (20)
- 54 Nam-Heon Kim, Tae-Woo Lee, Ling Bao, Susan C. Hagness, and Luke J. Mawst, Modal characteristics of large aperture ARROW VCSELs, Proceedings of SPIE Vol. 5364
- 55 李孝峰, 潘炜, 罗斌, 马冬, 理论研究电流注入对垂直腔面发射激光器躲横模行为的影响. 光学技术. 2006. 32(1)
- 56 Hongbin Zhang, Gerd Mroczynski, Analysis of Transverse Mode Competition of VCSELs Based on a Spatially Independent Model IEEE Journal of quantum electronics .2004, 40(1):18~24
- 57 A. Valle, J. Sarma, and K. A. Shore. Spatial hole burning effects on the dynamics of vertical cavity surface-emitting laser diodes. IEEE J. Quantum Electron, 1995 ,31: 1423~1431
- 58 J. Y. Law and G. P. Agrawal, Effects of spatial hole burning on gain switching in vertical-cavity surface-emitting lasers, IEEE J. Quantum Electron. 1997, 33.:462~468
- 59 A. Valle, J. Sarma, and K. A. Shore, Dynamics of transverse mode competition in vertical cavity surface emitting lasers, Opt. Commun. 1995, 115: 297~302
- 60 J. Dellunde, M. C. Torrent, J. M. Sancho, and K. A. Shore, Statistics of transverse mode turn-on dynamics in VCSEL's. IEEE J. Quantum Electron. 1997, 33:1197~1204
- 61 A. Valle, Selection and modulation of high-order transverse modes in vertical-cavity surface-emitting lasers. IEEE J. Quantum Electron, 1998, 34: 1924~1932.
- 62 A. Valle, L. Pesquera, S. I. Turovets, and J. M. López, Nonlinear dynamics of current-modulated vertical-cavity surface-emitting lasers. Opt. Commun. 2002, 208: 173~182
- 63 Shiqi Zheng, Zhongyuan Yu, Yan Ren, Junqiang Cheng^a, Yan Ren, Junqiang Cheng. The Multi-mode Behaviour of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers under a Spatially Periodical Current Injection. Optoelectronic Materials and Devices for Optical Communications, 2005. 6020(602010)
- 64 A. Valle, J. Sarma, and K. A. Shore. Spatial hole burning effects on the dynamics of vertical cavity surface-emitting laser diodes. IEEE J. Quantum Electron, 1995 ,31: 1423~1431
- 65 J. Y. Law and G. P. Agrawal, Effects of spatial hole burning on gain switching in vertical-cavity surface-emitting lasers, IEEE J. Quantum Electron. 1997, 33.:462~468
- 66 黄静. 内腔接触氧化物限制垂直腔面发射激光器的研制. 北京工业大学硕士学位论文. 2003: 23~25

- 67 Scott W. Corine. Design of Fabry-Perot Surface-Emitting Lasers With a Periodic Gain Structure. IEEE Journal of quantum electronics. 1989, 25(6): 1513~1523
- 68 俞宽新, 江铁良, 赵启大, 激光原理与激光技术, 北京工业大学出版社. 2003(3).
- 69 张瑞君, 光子晶体垂直腔面发射激光器及最佳化设计, 纳米器件与技术. 2006: 1671~4776
- 70 许兴胜, 王春霞, 杜伟, 赵致民, 胡海洋, 宋倩, 鲁琳, 陈弘达, 光子晶体垂直腔面发射 850nm 波长激光器研究. 研究快讯. 2007: 36(1)
- 71 Noriyuki Yokouchi, Aaron J. Danner, Student and Kent D. Choquette, Two-Dimensional Photonic Crystal Confined Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers. Journal of selected topics in quantum electronics. 2003.9(5): 1439
- 72 Jin-Wei Shi and C.H. Jiang, Single-mode vertical-cavity surface-emitting laser with ring-shaped light-emitting aperture. Applied physics letters. 2005. 87. 031109
- 73 Åsa Haglund, Johan S. Gustavsson, Jörgen Bengtsson, Piotr Jedrasik, and Anders Larsson, Design and Evaluation of Fundamental-Mode and Polarization-Stabilized VCSELs With a Subwavelength Surface Grating. Journal of quantum electronics. 2006. 42(3)

攻读硕士学位期间发表的学术论文

(2005 年 9 月-2008 年 6 月)

- 1 杨浩, 郭霞, 关宝璐, 王同喜, 沈光地, 注入电流对垂直腔面发射激光器横模特性的影响, 物理学报. 2008, 57(5),SCI 检索.
- 2 **Hao Yang**, Xia Guo, Baolu Guan, Tongxi Wang, Guangdi Shen, Research on Influence of Oxidized Aperture on Transverse Mode Characteristics of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, Chin. Phys. Lett (SCI Received)
- 3 Baolu Guan, Xia Guo, Ting Liang, Xiaoling Gu, Jun Deng, Jing Guo, **Hao Yang**, Qiaoming Lin, Guangdi Shen. Sacrificial Al_{0.8}Ga_{0.2}As Etching for Microstructures in Integrated Optoelectronic Devices. Journal of Applied Physics. 2006 100:113508
- 4 关宝璐, 郭霞, 杨浩, 梁庭, 顾晓玲, 郭晶, 邓军, 高国, 沈光地. 宽调谐范围垂直腔面发射激光器特性分析及设. 物理学报 2007 56(8):4585~4589 SCI检索.
- 5 关宝璐, 郭霞, 杨浩, 顾晓玲, 邓军, 高国, 沈光地. 可调谐光子器件和微悬臂梁特性研究. 中国激光. 2008 8
- 6 以第一作者编写了“垂直腔面发射激光器光场分布模拟软件V1.0”, 获得软件著作权(登记号2008SRBJ0974)

致 谢

本论文是在导师沈光地教授和郭霞副教授的悉心指导下完成的，在此表示衷心的感谢。沈老师渊博的知识、扎实的理论功底、敏锐的科学洞察力、严谨的治学态度使我终生受益，并且永远激励我在今后的工作中勤奋进取。在建立模式空间分布模型时，沈老师仔细听取并分析了 my 报告，及时纠正了我用三层波导结构建立 VCSEL 模式模型的错误观点，为我将来能够正确建立柱坐标系下的 VCSEL 模型提供了有力的保证，在此向沈光地教授致以最崇高的敬意和最衷心的感谢。

特别感谢郭霞副教授给予的热情帮助和指导，其一丝不苟、精益求精的工作态度和对问题的透彻分析能力使我受益无穷。郭霞老师仔细听取我的每一次汇报并提出多个宝贵意见，包括模型的建立、多有源区 VCSEL 模式分析等等，为我的工作指明方向，在这里衷心感谢郭老师的关怀与教导。

特别感谢高国教授、陈建新教授、邹德恕教授、徐晨教授和郭伟玲副教授在我完成论文期间给予的指导和帮助。他们在专业上对我谆谆教导，使我少走了许多弯路，并且在生活上对我亲切关怀，这些都将深深地留在我的美好回忆当中。

特别感谢实验室的韩金茹老师、高新焕老师、董欣老师、李建军老师、崔毕峰老师、刘莹老师和刘宝玲、吴文荣等在工作中给予的支持和帮助，使我的工作得以顺利进行。

特别感谢韩军老师和邢艳辉老师在生长和测试等方面的支持和帮助。

特别感谢关宝璐博士在我学业方面对我的热心帮助和指导，我们在工作中的默契协作使研究工作得到了很大进展。

特别感谢家人对我无微不至的关心和照顾，是他们的支持和鼓励，使我能够心无旁骛地在求学路上一直奋进。

感谢国家自然科学基金委员会、国家 863 计划、国家 973 计划、北京市科委和北京市自然科学基金委员会，本论文工作得到了它们的经费支持。

最后向在我三年的学习和生活中所有支持和帮助过我的老师和同学致以最最衷心的感谢。

杨 浩

二零零八年四月