

分类号_____

密级_____

UDC _____

编号_____

中国科学院研究生院 博士学位论文

电泵浦垂直外腔面发射激光技术研究

张 星

指导教师_____ 宁永强 研究员

_____ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

申请学位级别_____ 博士 _____ 学科专业名称_____ 凝聚态物理

论文提交日期_____ 2011 年 4 月 _____ 论文答辩日期_____ 2011 年 5 月

培养单位_____ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

学位授予单位_____ 中国科学院研究生院

答辩委员会主席_____ 刘式墉 教授

Classified Index_____

Confidential Grade_____

UDC_____

Number_____

**Dissertation Applying for a Doctor Degree to
the Changchun Institute of Optics, Fine
Mechanics and Physics**

Chinese Academy of Sciences

**Research on Electrically-pumped Vertical External Cavity
Surface Emitting Laser Technology**

Zhang Xing

Directed by Prof. Ning Yongqiang

**Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and
Physics, Chinese Academy of Sciences, China**

2011

独 创 性 声 明

本人郑重声明：所提交的学位论文是本人在导师指导下独立进行研究工作所取得的成果。据我所知，除了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。对本人的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明。本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：_____日期：_____

学位论文使用授权书

本学位论文作者完全了解中国科学院研究生院及中国科学院长春光学精密机械与物理研究所有关保留、使用学位论文的规定，即：中国科学院研究生院及中国科学院长春光学精密机械与物理研究所有权保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权中国科学院研究生院及中国科学院长春光学精密机械与物理研究所可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其它复制手段保存、汇编本学位论文。

（保密的学位论文在解密后适用本授权书）

学位论文作者签名：_____指导教师签名：_____
日 期：_____日 期：_____

学位论文作者毕业后去向：

工作单位：_____

电话：_____

通讯地址：_____

邮编：_____

电泵浦垂直外腔面发射激光技术研究

张 星（凝聚态物理）

导师：宁永强 研究员

摘 要

垂直腔面发射激光器(VCSEL)由于具有独特的谐振腔结构,使其与半导体边发射激光器(EEL)相比有很多优点,例如圆形对称光斑、单纵模工作及便于二维集成。电泵浦垂直外腔面发射激光器(EP-VECSEL)在保留 VCSEL 优点的基础上,通过引入外腔结构对光束质量进行控制,使其能够输出近衍射极限光束。因此 EP-VECSEL 很好的解决了 VCSEL 光束质量差的问题,能够同时实现高功率及高光束质量输出。输出波长为 980nm 的 EP-VECSEL 在泵浦掺 Yb 固体激光器及光纤激光器方面有很好的应用前景。同时,还能够通过 980nm EP-VECSEL 的外腔结构进行腔内倍频,使输出波长扩展到可见光波段,使其能够应用于生物医学研究及激光显示方面。本文主要对输出波长为 980nm 的 EP-VECSEL 进行了器件结构设计及制备工艺方面的研究。

首先对 980nm EP-VECSEL 的谐振腔结构进行了优化设计。介绍了模式选择 FP 谐振腔与普通 FP 谐振腔的区别,对 EP-VECSEL 的三镜面谐振腔中光场的变化过程进行了分析。找出了与器件输出特性最为相关的谐振腔参数:DBR 反射率、外腔镜反射率、外腔腔长及外腔镜参数。通过理论计算分析了 980nm EP-VECSEL 的 N-DBR 反射率及外腔镜反射率对阈值电流及输出功率的影响,得出如下结论:器件的有源区直径为 300 μ m 同时 N-DBR 反射率为 87%时,能够在保持较低阈值电流的前提下确保芯片本身谐振腔与外腔之间的充分耦合。研究了外部光反馈对 980nm VCSEL 振荡特性的影响,在实验上证实了 EP-VECSEL 谐振腔结构设计中采用复合腔理论的准确性。

在谐振腔结构设计的基础上,对 980nm EP-VECSEL 半导体器件部分进行了优化。设计了低阻 DBR 反射镜结构,得出需要 12 对 N-DBR 以达到需要的反射

率；采用三维有限元方法建模分析了 EP-VECSEL 有源区电流分布与电流注入结构的关系，分析得出合理调节 P 面电极直径能够使有源区电流分布均匀。将建模分析的结论应用于 980nm VCSEL 的设计及研制中，实验结果表明：调节 P 面电极尺寸之后，器件远场分布中的环形光斑被抑制，发散角明显降低。采用热—电耦合方法分析了陶瓷热沉及金刚石热沉对 EP-VECSEL 芯片温度分布的影响，结果表明采用陶瓷热沉的芯片最高温升达到 264.14℃，而换为金刚石热沉后，芯片的最高温升下降至 226.27℃；同时，初步模拟了 EP-VECSEL 列阵的温度分布。

对 EP-VECSEL 制备工艺中的湿法刻蚀及选择性氧化工艺条件进行了改进，研制出具有单片集成结构的 980nm EP-VECSEL 器件。器件在注入电流为 5A 时连续输出功率为 280mW，输出波长在 980nm~990nm 范围内，在注入电流从 0A 增加至 5A 时呈现单纵模及多纵模两种交替出现的工作状态。同时，利用与 EP-VECSEL 结构设计类似的方法，对 980nm VCSEL 列阵的单元结构进行了优化。在单元结构优化后，研制出 8×8 及 10×30 VCSEL 列阵，测试结果表明 8×8 VCSEL 列阵的连续输出功率达到 2.73W，脉冲输出功率达到 115W；10×30 VCSEL 列阵的连续输出功率达到 5.26W。

关键词：垂直外腔面发射激光器；电泵浦；结构设计；谐振腔；单片集成

Research on Electrically-pumped Vertical External Cavity Surface Emitting Laser Technology

Zhang Xing (condensed matter physics)

Directed by Prof. Ning Yongqiang

Abstract

Vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) have a unique cavity geometry that offers numerous advantages over edge-emitting semiconductor lasers (EELs) such as circular output beam, single longitudinal mode and easy formation of two-dimensional (2-D) array. Electrically-pumped vertical external cavity surface emitting laser (EP-VECSEL) is able to output near diffraction-limit beam, which makes both high power and good beam quality possible. 980nm EP-VECSEL has good application potential in pumping Yb-doped solid state lasers and fiber lasers. By using intra-cavity frequency doubling technology the output wavelength of EP-VECSEL can be converted into visible regime, making it suitable for biomedical research and laser display application. In this thesis, the EP-VECSEL's device structure and optical cavity were optimized and the device fabrication process was investigated.

The optical cavity of 980nm EP-VECSEL was optimized. The differences between FP cavity and mode-controlled FP cavity were illustrated, as well as the variation of three-mirror optical cavity field. The relationship between the reflectivity of N-DBR, threshold current and output power was analyzed theoretically. Based on the results of theoretical analysis, we draw a conclusion that to strengthen the coupling between the chip-cavity and the external cavity on condition that the

threshold current is relatively low, the diameter of active region should be $300\mu\text{m}$ and the reflectivity of N-DBR should be 87%. To validate the accuracy of compound cavity theory which we used to design the structure of EP-VECSEL's optical cavity, the influence of external optical feedback on the oscillate characteristics of 980nm VCSEL was investigated, both theoretically and experimentally.

The semiconductor device structure of 980nm EP-VECSEL was optimized. We have designed the low-resistance DBR structure and confirmed that to achieve the reflectivity 12 pairs of N-DBR is needed. By using 3-D finite-element method, the relationship between the current distribution inside the active region of EP-VECSEL and the current-injected structure was analyzed. It could be seen from the results of simulation that appropriate adjustment of p-contact diameter could help to achieve uniform current distribution in the active region. The results of experimental measurement show that the far-field angle of VCSEL with adjusted p-contact diameter is smaller and the ring-shaped beam is suppressed. The temperature distribution of EP-VECSEL chips bonded to ceramic and diamond heat sink was simulated using thermal-electrical coupled method. It could be seen from the results of analysis that the maximum temperature-rise of the chip bonded to ceramic heat sink was 264.14°C and as to the chip bonded to diamond it was 226.27°C .

Device fabrication process, such as wet-etching and selectively oxidation technology were improved. A 980nm EP-VECSEL with monolithic structure was fabricated and its CW output power is 280mW under injected current of 5A. The device's wavelength of output light is within 980nm~990nm and the longitudinal mode characteristics during the operation show single-mode and multi-mode regime. Based on the method we utilized to design the structure of EP-VECSEL, the element structure of 980nm VCSEL array was optimized. After the structural optimization, 8×8 and 10×30 VCSEL array were fabricated. The CW output power of the 8×8 VCSEL array is 2.73W and its peak power is 115W under pulse regime. The CW output power of the 10×30 VCSEL array is 5.26W.

Key words: vertical external cavity surface emitting laser; electrically-pumped; structural design; optical cavity; monolithic

目 录	
摘 要.....	I
Abstract.....	V
目 录.....	IX
第 1 章 绪论.....	1
1.1 VCSEL 及高功率 VCSEL.....	1
1.1.1 VCSEL 简介.....	1
1.1.2 高功率 VCSEL.....	3
1.1.3 高功率 VCSEL 面临的瓶颈.....	6
1.2 VECSEL:光泵浦及电泵浦.....	6
1.2.1 OPS-VECSEL.....	7
1.2.2 EP-VECSEL.....	10
1.2.3 OPS-VECSEL 与 EP-VECSEL 的对比.....	15
1.3 本论文的研究工作.....	16
第 2 章 980nm EP-VECSEL 谐振腔理论分析及优化设计.....	19
2.1 普通 FP 谐振腔与模式选择 FP 谐振腔.....	19
2.1.1 特征模式, 特征值及模式识别能力.....	19
2.1.2 普通 FP 谐振腔.....	21
2.1.3 具有模式选择功能的 FP 谐振腔.....	23
2.2 EP-VECSEL 的三镜面谐振腔.....	25
2.2.1 三镜面谐振腔.....	25
2.2.2 三镜面谐振腔原理分析.....	26
2.2.3 EP-VECSEL 谐振腔设计中的关键参数.....	29
2.3 980nm EP-VECSEL 谐振腔结构设计.....	30
2.3.1 等效谐振腔.....	30
2.3.2 980nm EP-VECSEL 振荡特性分析.....	32

2.3.2.1 理论模型	33
2.3.2.2 计算结果	37
2.3.3 980nm EP-VECSEL 谐振腔参数的确定	44
2.4 外部光反馈对 980nm VCSEL 振荡特性影响	46
2.4.1 外部光反馈对 VCSEL 的影响	46
2.3.2 光反馈率与 980nm VCSEL 输出特性关系: 理论计算	47
2.3.2 光反馈率与 980nm VCSEL 输出特性的关系: 实验研究	51
2.5 本章小结	52
第 3 章 980nm EP-VECSEL 器件结构设计研究	55
3.1 980nm EP-VECSEL 器件基本结构	55
3.2 DBR 反射镜结构设计	58
3.2.1 低阻 DBR 结构的实现	59
3.2.2 DBR 反射率计算理论模型	62
3.2.3 980nm EP-VECSEL N-DBR 结构设计	67
3.3 EP-VECSEL 电流扩散模拟	69
3.3.1 EP-VECSEL 的稳态电流扩散模型	70
3.3.2 EP-VECSEL 有源区稳态电流分布模拟	70
3.3.3 电流扩散模拟的实验验证: VCSEL 发散角的压缩	76
3.4 EP-VECSEL 热特性分析	78
3.4.1 EP-VECSEL 中的热扩散理论模型	79
3.4.2 EP-VECSEL 热特性模拟	81
3.5 本章小结	83
第 4 章 980nm EP-VECSEL 器件制备及输出特性研究	85
4.1 980nm EP-VECSEL 器件制备工艺	85
4.1.1 外延结构	85
4.1.2 器件制备工艺流程	86
4.1.3 湿法刻蚀工艺	87
4.1.4 选择性氧化工艺	89
4.1.5 增透膜及高反膜	90

4.2 980nm EP-VECSEL 输出特性分析	91
4.3 980nm 高功率 VCSEL 列阵器件的单元结构优化	93
4.3.1 理论模型.....	94
4.3.2 980nm 高功率 VCSEL 列阵的单元结构优化.....	95
4.3.3 980nm 高功率 VCSEL 列阵的研制.....	98
4.4 本章小结	101
第 5 章 总 结	103
参考文献	105
在学期间学术成果情况	115
指导教师及作者简介	119
致 谢	123

第1章 绪论

自从日本东京工业大学的伊贺健一(Kenichi Iga)于1977年提出垂直腔面发射激光器(Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL)这一新型半导体激光器设计方案以来^[1], 经过三十余年的发展, VCSEL 成为了独立于半导体边发射激光器(Edge Emitting Lasers, EEL)的一种实用化的半导体激光器件。目前, VCSEL 已经广泛应用于光互连^[2]、光通信^[3, 4]、激光显示^[5]、激光引信^[6]、芯片级原子钟^[7]以及光信号处理^[8]等许多领域。

垂直外腔面发射激光器(Vertical-External-Cavity Surface-Emitting Laser, VECSEL)作为 VCSEL 家族中的一个历史较短的成员, 由于其兼具 VCSEL 及固体激光器的优点, 在激光显示、生物医学研究、固体激光泵浦源方面有广泛的应用前景, 近年来受到了研究者的广泛关注^[9]。本章对全文工作的研究背景进行了介绍, 综述了 VCSEL 及 VECSEL 的研究进展和发展现状, 最后对本文工作进行了简介。

1. VCSEL 及高功率 VCSEL

1.1.1 VCSEL 简介

VCSEL 是面发射激光器(Surface Emitting Laser, SEL)的一种, 1977 年, 日本东京工业大学的伊贺建一首次提出 VCSEL 这一概念^[10]。这种激光器得名的原因在于其光学谐振腔与半导体芯片的衬底垂直, 因此能够通过芯片表面输出激光即“表面发射”。VCSEL 的反射镜由半导体材料多层外延结构组成, 而不像 EEL 那样采用解理面作为反射镜。图 1-1 所示为典型的 VCSEL 结构, 器件的谐振腔由两个分布布拉格反射镜(Distributed Bragg Reflector, DBR)构成并通过其中一个 DBR 输出激光。

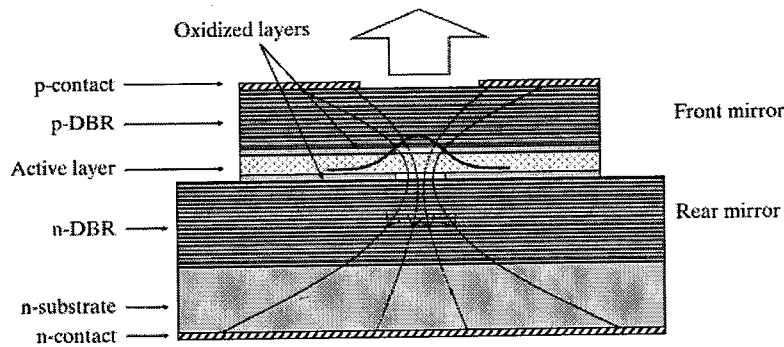


图 1-1 典型 VCSEL 器件结构示意图。

VCSEL 这种新型半导体激光器自诞生之日起，就引起了各研究机构的极大关注。世界各国的研究者在结构优化、材料生长以及器件制备等多个方面进行了大量的工作，在降低 VCSEL 阈值电流及实现室温工作等方面取得了一系列进展：1979 年，Iga 等人研制出有源区采用 $GaInAsP-InP$ 材料体系，激射波长为 1300nm 的电泵浦 VCSEL 器件^[10]；1986 年，Iga 等人又实现了阈值电流仅为 6mA 的 $GaAs$ 基 VCSEL 激射^[11]，并于 1988 年实现了室温连续激射^[12]；1989 年，Jewell 等人研制的 $GaInAs$ 基 VCSEL 阈值电流仅为 1-2mA^[13]，随后，VCSEL 的阈值电流又进一步被降低至亚毫安量级。

在经历了最初的基础研究阶段之后，VCSEL 的研究工作开始以应用为导向。从 1992 年起， $GaAs$ 基 VCSEL 开始成为主要开发对象，激射波长为 780nm、850nm 及 980nm 的 $GaAs$ 基 VCSEL 器件被陆续被开发出来并应用到了光通信系统；1993 年，能够在室温下工作的红光 $AlGaInAs$ VCSEL 器件被研制出来^[14]；从 1996 年开始，对输出蓝绿光及紫外光 VCSEL 的研究工作也开始了。目前，VCSEL 的输出波长已经基本覆盖紫外到红外，实用化的 VCSEL 产品已经广泛应用于光通信、光互连及光信号处理等领域。

VCSEL 最大的特点是谐振腔是由外延生长形成，与器件的有源区自成一體。综上所述，VCSEL 具备许多独特优点：

- (1) 由于有源区体积非常小，VCSEL 的阈值电流极低，目前已经能够达到微安量级；
- (2) 相对而言，VCSEL 的波长及阈值电流对温度不敏感；
- (3) 能够实现动态单模工作；

- (4)能够进行高速调制工作;
- (5)VCSEL 具有一体化的谐振腔和有源区, 因此具有更高的可靠性;
- (6)具有高转换效率(>50%);
- (7)易于进行光纤耦合并具有较高耦合效率;
- (8)VCSEL 制备工艺与硅基集成电路工艺兼容, 能够进行大批量生产, 成本较低;
- (9)可进行在片测试;
- (10)易于焊接及封装, 模块化成本较低;
- (11)易于进行高密度二维集成;
- (12)能够与大规模集成电路进行集成。

1.1.2 高功率 VCSEL

高功率 VCSEL 在保留前述 VCSEL 固有优点的基础上, 能够达到更高的输出功率水平(>1W), 使其有希望在多个领域取代传统的高功率 EEL。目前, 高功率 VCSEL 主要应用在如下几方面:

(1)激光显示方面: 激光显示技术具有色域广, 寿命长, 环保, 节能等优点, 已经成为显示领域的一个重要分支。使用高功率 VCSEL 进行腔内或腔外倍频后产生三基色激光可以做为激光显示的光源, 便携式投影设备、高清晰影院系统需要激光器的输出功率从几十毫瓦至几十瓦不等, 市场前景十分广阔。目前, 美国的 Coherent 公司、Arasor 公司, 德国的 OSRAM 公司以及韩国的 Samsung 公司等正在着力推进该项研究。

(2)光纤激光器及固体激光器方面: VCSEL 能够输出圆形对称光斑的特点使其成为光纤放大器和光纤激光器的理想泵源, 由于无需复杂的光束整形装置就能方便的与光纤进行耦合, 与传统的 EEL 相比具有更高的耦合效率^[15]。在泵浦固体激光器方面, 输出波长为 808nm 的高功率 VCSEL 也有很好的应用前景^[16]。

(3)激光检测、探测: 发展高功率脉冲 VCSEL, 能够利用其高峰值光功率、高光束质量、高耦合效率、小体积等优势, 在激光测距、激光引信、激光雷达及测量控制等军民品方面具有广泛的应用前景, 如激光测距雷达用于汽车、飞行器的防撞, 精密机械零件检测, 机器人距离感应控制, 大型设备对准等。

(4)信息技术方面:以激光测距为基础,加上二维 VCSEL 列阵及二维光学扫描机构后,可以实现对大视场范围内目标的三维测量。随着相关应用技术的不断发展,VCSEL 将在以自由空间光通讯为代表的各通讯领域中发挥重要的不可替代的作用。

虽然高功率 VCSEL 具有上述的广泛应用前景,但早期的研究者认为与 EEL 长度达到 mm 量级的谐振腔相比,VCSEL 的谐振腔长度太短,腔内光场传输的单程增益无法满足高功率输出的要求。因此,在 VCSEL 的发展初期进行的研究主要集中在降低阈值、拓展输出波长范围及对其进行高速调制等方面,直到 1996 年才有第一篇关于提高 VCSEL 输出功率方面的研究报道^[17]。自此,研究者才开始将注意力转移到开发具有高输出功率的 VCSEL 器件方面。

德国的 Ulm 大学最早开展了高功率 VCSEL 的研制^[17],通过在器件结构优化、外延生长及散热技术等几个方面进行攻关,Ulm 在高功率 VCSEL 研究方面取得了一系列重要进展:他们分别研制出波长为 980nm 的顶发射(图 1-2a)及底发射(图 1-2b)VCSEL 单管及列阵器件(图 1-3),并在高功率 VCSEL 研制中引入了选择性氧化工艺,将底发射及顶发射 VCSEL 单管的连续输出功率分别提高至 180mW 及 350mW^[18];列阵器件的连续输出功率达到 1.4W,脉冲峰值输出功率密度超过 $1\text{kW}/\text{cm}^2$ 。在提高 VCSEL 的转换效率方面,他们于 1997 年报道了转换效率达到 57% 的 850nm VCSEL 结果^[19]。

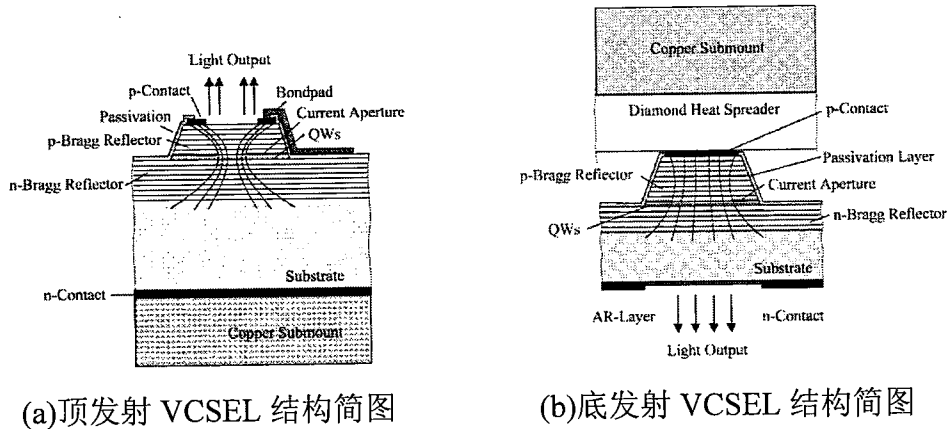


图 1-2: Ulm 研制的两种不同结构高功率 VCSEL 结构简图^[18]。

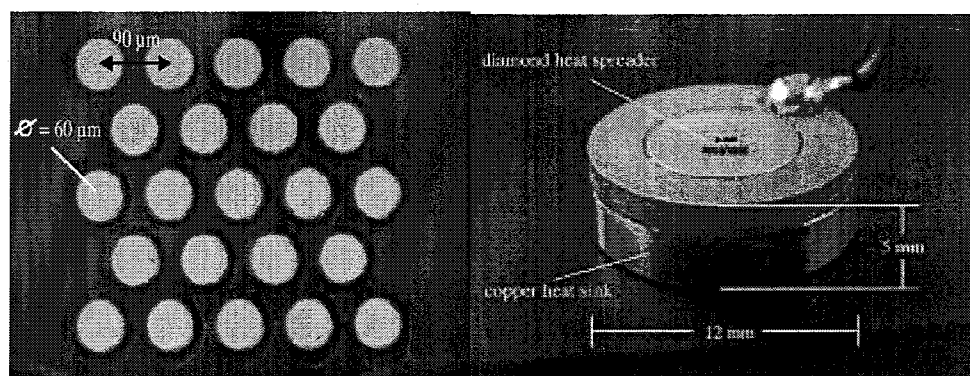


图 1-3: Ulm 研制的高功率 VCSEL 列阵(左)及封装之后的器件(右)^[20]。

在 Ulm 大学之后, UC Berkeley 的 Francis 等人于 1998 年报道了波长 940nm, 连续输出功率达到 2W, 脉冲输出功率达到 5W 的 VCSEL 列阵结果^[21], 这进一步提高了 VCSEL 列阵的输出功率纪录。随后, 在“DAPRA”项目的资助下, 美国多个科研机构陆续开展了高功率、高效率 VCSEL 的研究工作。美国 Princeton Optronics 公司代表着目前高功率 VCSEL 研究的最高水平: 他们分别研制出 980nm VCSEL 单管及列阵器件, 其中单管器件的连续输出功率达到 3W^[22], 列阵的连续输出功率达到 230W^[23], 最高转换效率达到 51%。Princeton Optronics 还研制出波长为 808nm 的 VCSEL 列阵^[16], 连续输出功率可达 120W, 最高转换效率为 42%。最近^[24], 该公司报道了集成了多个 VCSEL 列阵的激光照明模块(图 1-4), 连续输出功率超过 650W。

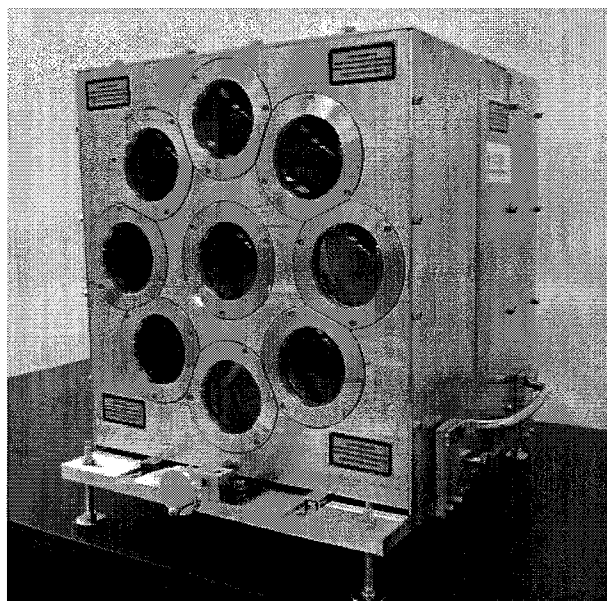


图 1-4: Princeton Optronics 研制的基于高功率 VCSEL 列阵的激光照明模块^[25]。

1.1.3 高功率 VCSEL 面临的瓶颈

VCSEL 由外延生长形成的 DBR 反射镜构成谐振腔, 为了有效降低阈值电流, 其谐振腔的光学长度一般为光波长的整数倍^[26], 因此 VCSEL 属于低增益的半导体激光器。为了提高 VCSEL 的输出功率, 必须增加其横向尺寸以提高增益介质的体积^[18], 这就导致了高功率 VCSEL 谐振腔的横向尺寸远大于其纵向尺寸。由于横向尺寸很大, VCSEL 的谐振腔的菲涅尔数亦随之增大, 因此谐振腔中振荡的各阶横模增益基本上没有任何差异^[27]。目前报道的高光束质量 VCSEL 多为小口径、低功率器件^[28, 29], 而高功率 VCSEL 器件均为高度多横模工作, 具有很大的发散角, 光束质量较差^[20, 30-32]。

随着工业、军事、医疗和空间通信等领域对高功率 VCSEL 的需求越来越广, 除了要求 VCSEL 具有高功率输出外, 对其光束质量的要求也变得更加苛刻: 要求 VCSEL 光束具有近衍射极限的单模高斯远场分布, 因为这样的光束既能提高激光功率密度, 也满足与光纤的高效耦合和高效固体激光泵浦的要求。如果仅满足高功率而无法保证光束质量, 就会在应用时遇到很大问题。综上所述, 如何在维持高输出功率的同时保持高光束质量就成为了高功率 VCSEL 面临的瓶颈。

1.2 VECSEL: 光泵浦及电泵浦

为解决高功率 VCSEL 光束质量差的问题, 研究者提出了垂直外腔面发射激光器概念^[33](图 1-5): VECSEL 的有源区与普通 VCSEL 类似, 均采用多量子阱结构, 区别在于其中一个反射镜采用 DBR, 而另一个反射镜由外腔镜代替。这种垂直外腔结构的引入, 在保留量子阱有源区组分可控性好、发射光波长范围宽以及 VCSEL 能够二维集成优点的基础上, 通过引入外腔结构改变了谐振腔内各阶特征横模的增益, 因此能够有效提高器件的单模功率, 实现高功率高光束质量输出。按照泵浦方式不同, VECSEL 可分为光泵浦垂直外腔面发射激光器 (Optically-pumped Semiconductor Vertical-External-Cavity Surface-Emitting Laser, OPS-VECSEL) 及电泵浦垂直外腔面发射激光器 (Electrically-pumped Vertical-External-Cavity Surface-Emitting Laser, EP-VECSEL) 两种结构, 下面将分

别介绍这两种器件。

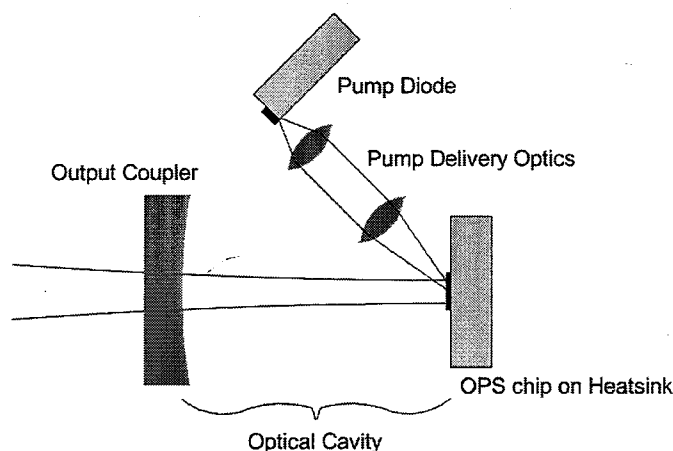


图 1-5: OPS-VECSEL 结构示意图。

1.2.1 OPS-VECSEL

OPS-VECSEL 是目前为止最为成熟的一种 VECSEL，其基本结构与固体激光器中的微片激光器非常相似，因此有时也将 OPS-VECSEL 称为半导体微片激光器。OPS-VECSEL 最初的设计思路就是将固体激光器中的晶体材料替换为半导体芯片，由于半导体材料的增益谱范围远比固体激光晶体材料宽，因此 OPS-VECSEL 拓展了固体激光器的输出波长范围。

1997 年，Kuznetsov 等人首次研制出了同时具有高功率及高光束质量的 OPS-VECSEL^[34] (图 1-6)，该器件由半导体芯片部分及垂直外腔两部分组成，半导体芯片的结构包括：最顶端使用 30 对 $Al_{0.8}Ga_{0.2}As/GaAs$ 多层镜面作为 DBR 反射镜；增益区由 $Al_{0.08}Ga_{0.92}As$ 抽运吸收层，及位于光驻波波腹位置的 8 nm 厚压应变 $In_{0.16}Ga_{0.84}As$ 量子阱组成(14 个周期)。Kuznetsov 等人通过调节多量子阱有源区的组分以调节发射波长，并引入合理的散热结构，针对单横模工作条件对外腔结构进行了优化设计^[35]，最终研制出的 OPS-VECSEL 输出波长为 1004nm，在 TEM_{11} 模式下的最高输出功率为 0.69 W；在 TEM_{00} 与模式下最高输出功率约为 0.5W，通过单模光纤耦合的输出功率为 0.37 W(图 1-7)。

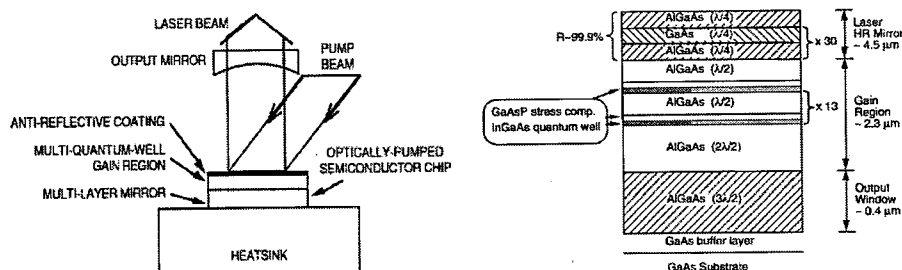


图 1-6: Kuznetsov 等人研制的 OPS-VECSEL 结构简图(左)及半导体芯片结构(右)^[35]。

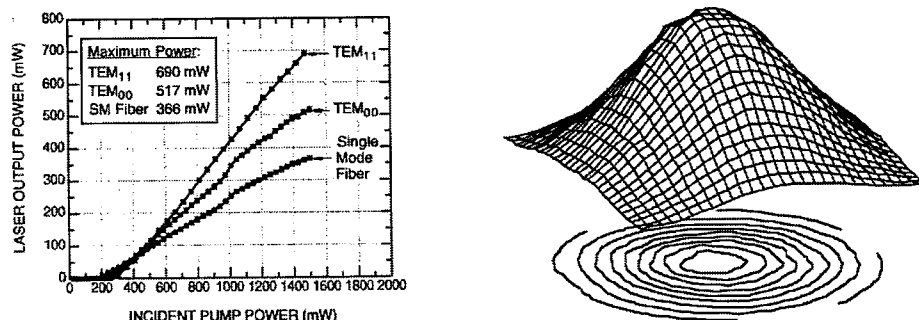


图 1-7: Kuznetsov 等人研制 OPS-VECSEL 的输出特性(左)及光束特性(右)^[35]。

2004 年, Hopkins 等人^[36]报道了采用 $GaInNAs/GaAs$ 量子阱有源区, 输出波长为 1300nm 的 OPS-VECSEL, 输出功率达到 0.6W, 远场发散角仅为 0.12°(图 1-8), 光束质量因子 $M^2 < 1.2$ 。同年, Lindberg 等人^[37]通过键合 Si 散热层的方法成功研制出了输出波长为 1550nm 的 OPS-VECSEL, 输出功率为 0.25W, M^2 为 1.2(图 1-9)。这样, 在输出波长方面 OPS-VECSEL 已覆盖了光通信 1.3μm 及 1.55μm 波段。

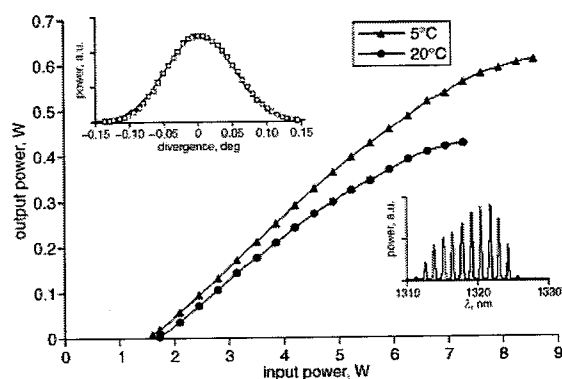


图 1-8: Hopkins 等人研制的 1.3μm OPS-VECSEL 输出特性^[36]。

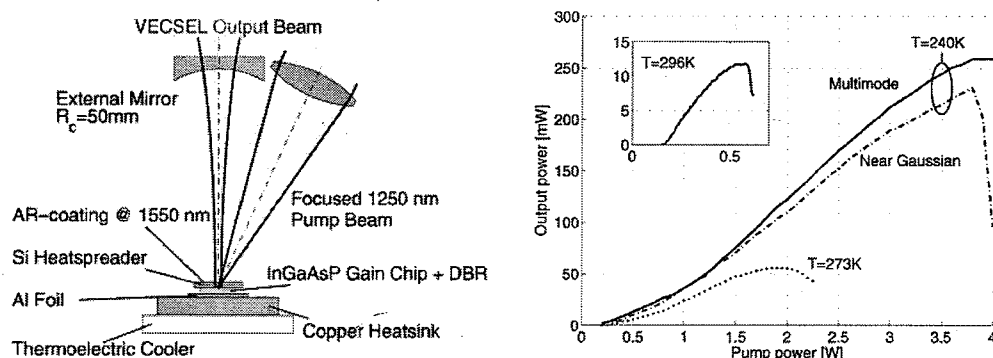


图 1-9: Lindberg 等人研制的 $1.55\mu\text{m}$ OPS-VECSEL 结构示意图及输出特性^[37]。

由于近红外波段OP-VECSEL的应用领域主要是作为固体激光器及光纤激光器的泵浦源，因此针对这一波段器件的研究工作主要以提高输出功率作为目标。研究者提出了更为高效的散热结构，并对泵浦方式进行了改进，有效提高了OP-VECSEL的泵浦光功率以及热饱和水平，使近红外波段OP-VECSEL的输出功率纪录不断被刷新：2006年，Harkonen等人^[38]将激光器芯片与金刚石热沉键合，大大改善了器件的热特性，研制出波长为1050nm，输出功率达到4W的OP-VECSEL， M^2 仅为1.15；同年，Lee等人^[33]通过引入末端泵浦方式(图1-5)，使OP-VECSEL的输出功率达到9.1W；美国的Coherent公司^[39]报道了使用InGaAs/GaAs作为有源区的980nm OP-VECSEL，采用3台光纤耦合二极管激光器列阵作为泵浦源，在泵浦光功率为70W时得到输出功率为30W(图1-10)，又通过腔内倍频，得到488nm倍频光输出功率为15W；2007年，该公司又报道了输出功率高达60W的532nm OP-VECSEL^[40]，这也是迄今为止已报道的OP-VECSEL最高输出功率水平。

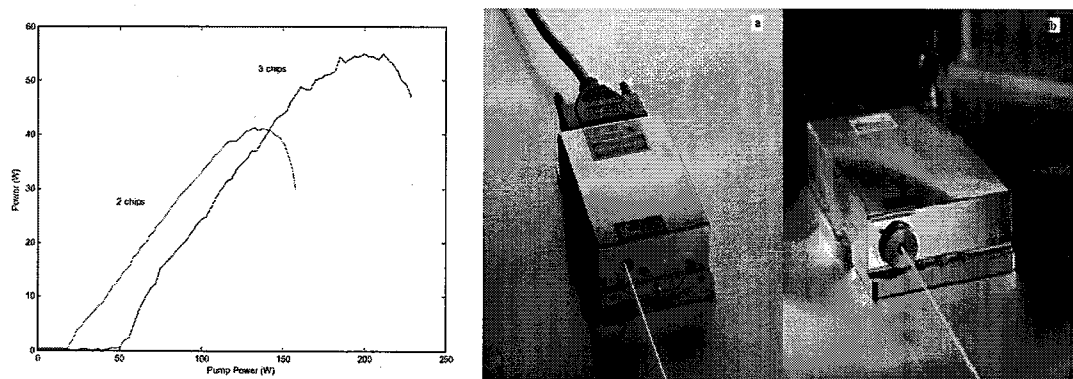


图 1-10: Coherent 公司的 532nm OP-VECSEL 的输出特性(左)及实物照片(右)^[40]。

随着半导体外延生长技术, 高效散热技术及泵浦技术的持续进步, 更多种类的 OPS-VECSEL 不断被开发出来, 器件的基模输出功率不断提高, 输出波长范围不断扩大。在输出功率提高的基础上, 与 OPS-VECSEL 有关的应用研究也取得了一系列进展: 腔内倍频技术^[41]使 OPS-VECSEL 的输出波长拓展至可见光波段, 使其应用于激光显示领域成为可能^[42], 锁模技术^[43]的引入使研制出具有超短脉冲的 OPS-VECSEL 成为可能。

1.2.2 EP-VECSEL

EP-VECSEL 的基本结构与普通 VCSEL 非常接近, 区别仅在于外部光学元件的引入。研究者提出这一设计方案的最初目的就是为了提高 VCSEL 的单模功率, 改善大口径 VCSEL 的光束质量。

EP-VECSEL 的研究工作始于 1993 年, Hadley 等人^[44]使用了一种具有 33 对 P-DBR 及 7 对 N-DBR 的 VCSEL 结构(图 1-11), 对应反射率分别为 99.7% 及 86%。在低反射率 DBR 的一侧加上反射镜提供额外的反馈使器件激励, 并通过控制反射镜的反射率、镜形及腔长来控制腔内模式的增益, 最终研制出的 EP-VECSEL 口径为 $100\mu\text{m}$, 输出波长为 980nm , 在 TEM_{00} 模式下连续及脉冲输出功率分别达到 2.4mW 及 100mW (图 1-12)。同年他们又研制出外腔结构与器件自成一體(或者也可以称为“单片集成”)的 980nm EP-VECSEL^[45](图 1-13), 基模连续及脉冲输出功率分别为 2mW 及 36.7mW 。

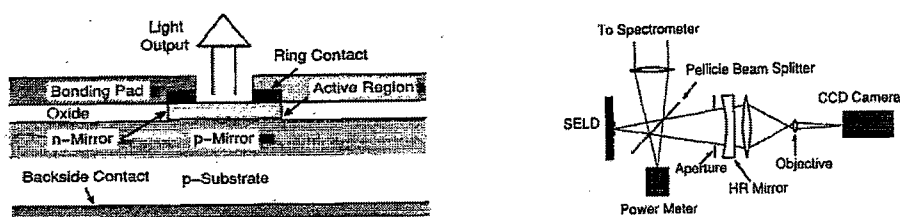
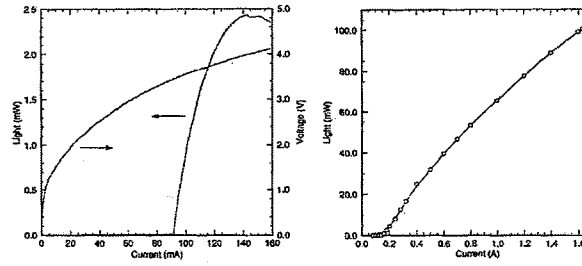
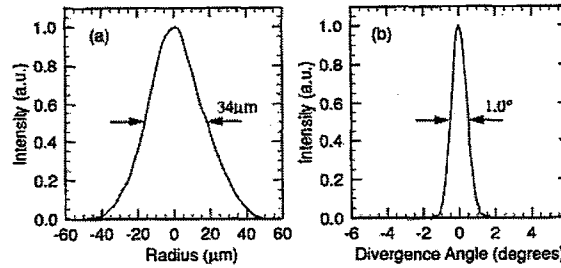


图 1-11: Hadley 等人研制的 EP-VECSEL 芯片结构(左)及实验装置(右)^[44]。



(a)连续及脉冲输出特性



(b)1.3 倍阈值时的近场及远场分布

图 1-12: Hadley 等人研制 EP-VECSEL 的输出特性^[44]。

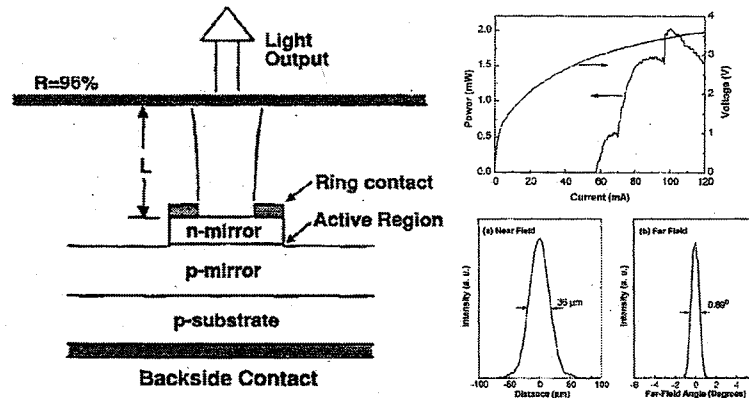


图 1-13: Hadley 等人研制的具有一体化扩展腔结构的 EP-VECSEL(左)及其输出特性(右)^[45]。

虽然输出功率较低并且器件的重复性较差,但 Hadley 等人在实验上验证了外腔结构对 VCSEL 光束质量的改善,他们的研究成果引起了其他研究者的关注,并引发了对 EP-VECSEL 的后续研究。Koch 等人^[46]将类似思路应用到了 850nm VCSEL 结构中,并将外腔反射镜替换为梯度折射率(GRIN)透镜,得到的器件基

横模输出功率为 4.5mW(图 1-14), 亮度达到 $5.1 \times 10^5 \text{ W/cm}^2 \text{ str}$, 这将 VCSEL 的亮度指标提高了一个数量级; Nikolajeff 等人^[47]采用了 *GaP* 半导体材料制成的微透镜来形成外腔结构(图 1-15); 同时, 也出现了对 EP-VECSEL 进行腔内倍频方面的初步研究^[48]。

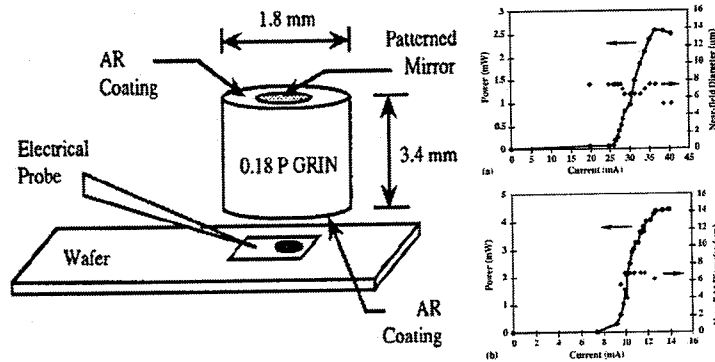


图 1-14: 采用 GRIN 透镜构成外腔结构的 EP-VECSEL(左)及其输出特性(右)^[46]。

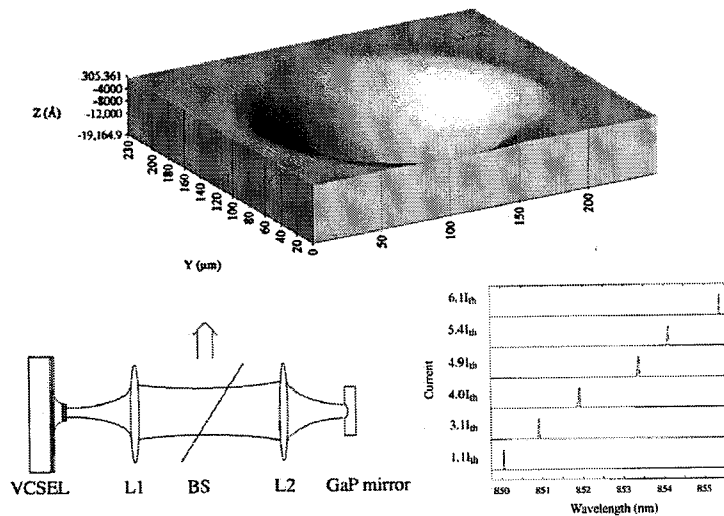


图 1-15: 采用 *GaP* 微透镜构成外腔结构的 EP-VECSEL 及其输出特性^[47]。

目前已经报道的 EP-VECSEL 主要分为两类: 一种是采用与器件集成为一体的外腔结构, 这种器件的口径一般较小, 外腔腔长也较短($<1\text{mm}$), 能够满足对输出功率要求较低的应用领域; 另一种则是采用所谓的“空气腔”, 即器件口径较大, 外腔的腔长也较长($1\text{mm} \sim 5\text{cm}$), 这种器件由于模式体积更大, 因此能够达到更高的基模输出功率。

在研制具有集成化外腔的小口径 EP-VECSEL 方面,美国的 Sandia 实验室取得了一系列进展。Sandia 实验室的 Keeler 等人在玻璃衬底上制成微透镜^[49],并将其与特殊设计的 VCSEL 结构胶合在一起(图 1-16),研制出了输出波长分别为 850nm 及 970nm 的 EP-VECSEL 器件^[50, 51]。其中 850nm EP-VECSEL 的脉冲输出功率超过 90mW(图 1-17a), $M^2 \sim 1.2$; 970nm EP-VECSEL 的脉冲输出功率为 40mW(图 1-17b), $M^2 \sim 1.22$ 。在达到较高输出功率及高光束质量的同时,这些器件还具有很高的调制带宽,其中 850nm EP-VECSEL 的 3dB 带宽为 1.9GHz(图 1-17a)。目前 Sandia 实验室已经成功将研制的 EP-VECSEL 应用于激光引信模块^[52]。

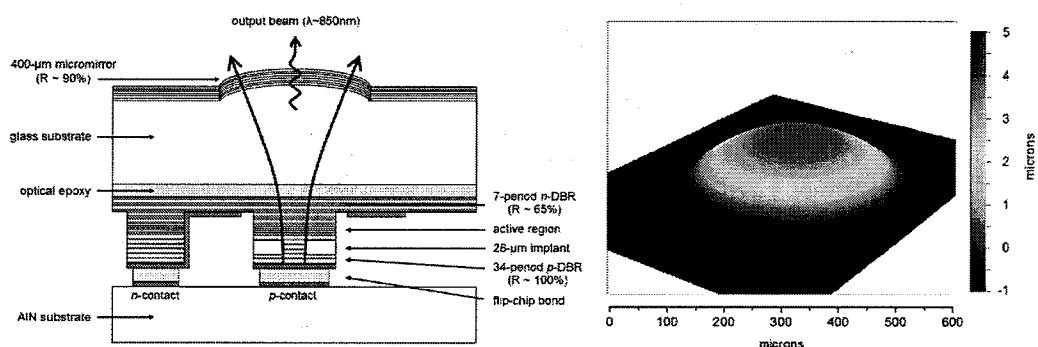
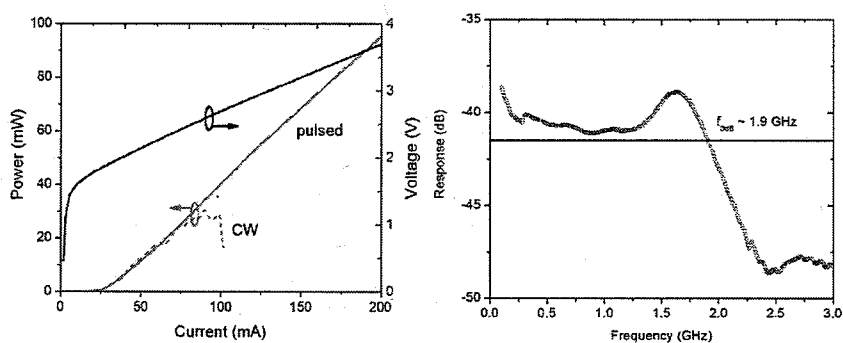
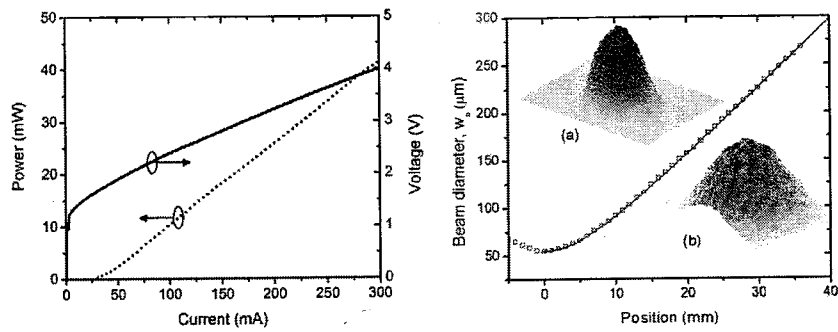


图 1-16: Sandia 实验室研制的微透镜集成 EP-VECSEL^[51]。



(a) Sandia 850nm EP-VECSEL 输出特性及调制特性^[50]



(b) Sandia 970nm EP-VECSEL 输出特性^[51]

图 1-17: Sandia EP-VECSEL 的输出特性(a)850nm EP-VECSEL (b)970nm EP-VECSEL

在空气腔 EP-VECSEL 研制方面,美国的 Novalux 公司于 2003 年报道了输出波长为 980nm 的单管 EP-VECSEL 器件,基横模连续输出功率达到 0.5W^[53],并通过腔内倍频实现了红、绿、蓝三基色基横模式输出^[54, 55]。在此基础上,他们开发出具有不同集成度及不同输出功率水平的二维集成三基色 EP-VECSEL 面阵,以满足激光显示、生物医学研究等领域的应用需求^[56]。至此,EP-VECSEL 已经从实验室走向实用化。

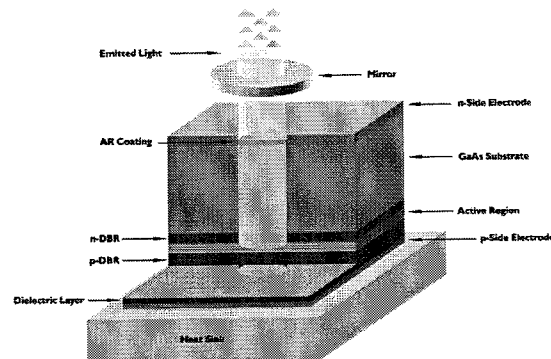


图 1-18: Novalux 公司研制的 980nm EP-VECSEL 结构简图。

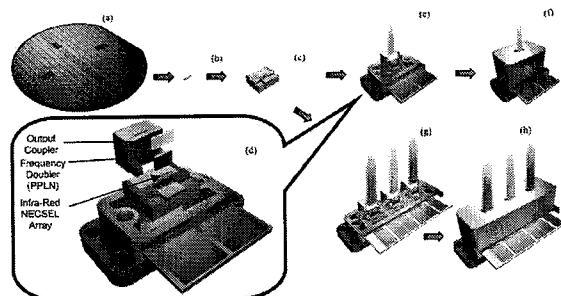


图 1-19: Novalux 公司开发的激光显示用三基色 EP-VECSEL 面阵光源。

2009 年, 美国 Princeton Optonics 公司报道了其 980nm EP-VECSEL 产品系列^[57](图 1-20), 通过引入双凸透镜与平面镜构成扩展腔结构, 得到的口径为 160 μm 的单管器件多模及基模连续输出功率分别为 1W 及 365mW, 基模工作时 $M^2 < 1.2$ 。通过 PPLN 晶体进行腔内倍频, 得到了 36mW 的倍频蓝光输出。在 15ns, 1kHz 的脉冲电源驱动下, 得到基频光、倍频光的基横模峰值输出功率分别为 4W 及 250mW。Princeton Optonics 还研制出包含 475 个发光单元的 980nm EP-VECSEL 列阵, 基模连续及脉冲输出功率分别达到 42W 及 155W, 这也是目前 EP-VECSEL 所达到的最高基横模输出功率水平。

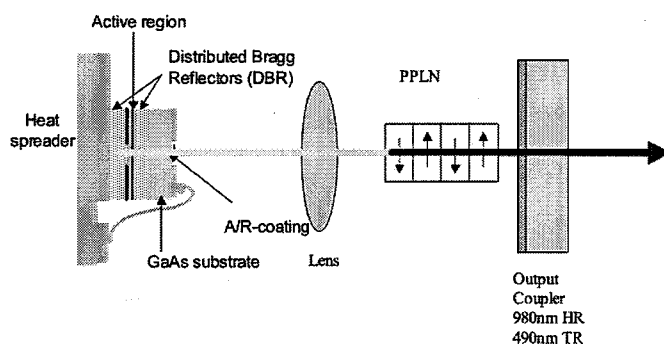


图 1-20: Princeton Optonics 980nm EP-VECSEL 结构示意图

1.2.3 OPS-VECSEL 与 EP-VECSEL 的对比

大多数 OPS-VECSEL 采用由三腔镜构成的双谐振腔, 一个腔是由芯片表面与外腔反射镜形成的, 另一个腔则是由 DBR 和芯片表面形成。OPS-VECSEL 激光波长由内谐振腔决定, 当内谐振腔的温度上升时, 半导体材料折射率会发生变化, 内谐振腔的光学厚度随之变化, 这就导致了激光波长的变化。目前报道的多数 OPS-VECSEL 结果中, 器件的激光波长从激光到发生热饱和均会变化 10 nm 以上, 这是由于泵浦光一般直接作用于芯片表面, 加速了内谐振腔的温度上升, 导致了非常大的波长漂移。

OPS-VECSEL 一般是通过增加有源区中量子阱的数量 (>10) 来获得高增益。当生长数量较多的量子阱结构时, 由于外延生长的不均匀性, 会使量子阱宽度、组分变化的不均匀性加剧, 导致光谱纯度不高, 光谱宽度可能会达到几 nm。由

于 VECSEL 的大多数应用对波长的稳定性和线宽有严格的要求, 上述过大的波长漂移以及过宽的光谱无疑会限制 OPS-VECSEL 的应用。

与其他半导体激光器相比, OPS-VECSEL 最为明显的缺点是需要外加泵浦光源, 这增大了器件封装和调节的难度, 导致 OPS-VECSEL 的制造成本较高, 同时降低了长期工作的可靠性。由于 OPS-VECSEL 的泵浦光源主要是 EEL, 而 EEL 的发射波长大多集中在 700-1000 nm 的范围之内, 如果在 EEL 的有源区材料设计方面没有进展, 那么设计高功率可见光 OPS-VECSEL 时, 就会缺少与之匹配的结构紧凑、高效的短波长泵浦光源。

与 OPS-VECSEL 相比, EP-VECSEL 具有下列优点:

(1) 由于采用电泵浦方式, EP-VECSEL 能够达到更高的电-光转换效率, 这也是电泵浦器件所共有的优点;

(2) EP-VECSEL 无需单独对泵浦光源进行调节, 结构更为紧凑, 并且能够与其他光学元件进行集成;

(3) EP-VECSEL 的制备工艺与普通 VCSEL 兼容, 能够大规模生产并能进行在片测试, 成本更低;

(4) EP-VECSEL 能像 VCSEL 一样方便的进行二维集成, 能够达到更高的输出功率。

综上所述, 虽然目前 EP-VECSEL 技术还不像 OPS-VECSEL 一样成熟, 但由于具有上述优点, 尤其是在转换效率及结构方面的优势, EP-VECSEL 无疑会是 VECSEL 技术未来的主要发展趋势。本文的主要研究工作也将围绕 EP-VECSEL 而展开。

1.3 本论文的研究工作

980nm EP-VECSEL 在泵浦固体激光器, 光纤激光器方面有着非常大的应用潜力, 同时通过调节量子阱有源区材料组分以及腔内倍频, 能够获得 488nm 激光及红、绿、蓝三基色激光, 在生物医学研究、激光投影及激光显示应用中有着非常重要的应用。从前文中的叙述可以看出, 近年来国外的研究机构已经在 980nm EP-VECSEL 器件研制及应用等方面取得了较大进展, 而国内在该方面仍

然处于空白状态。因此, 本文将主要围绕 980nm EP-VECSEL 器件, 开展半导体芯片结构优化设计及器件制备等方面的研究。

本文的工作主要包括以下几部分:

(1)对 980nm EP-VECSEL 的谐振腔结构进行了理论分析及优化设计。首先对 EP-VECSEL 谐振腔的模式控制过程进行了理论分析, 找出与输出特性最为相关的谐振腔结构参数; 然后从决定 EP-VECSEL 器件输出特性的两个关键谐振腔参数即 DBR 反射率与外腔反射率入手, 基于复合腔理论分析了这些参数与器件的连续输出特性之间的关系; 最后通过合理调节 DBR 反射率、外腔镜反射率及其他谐振腔参数, 对器件输出特性进行了优化。同时, 研究了外部光反馈对 980nm VCSEL 振荡特性的影响, 验证了谐振腔结构优化所采用复合腔理论的正确性。

(2)对 980nm EP-VECSEL 结构中的半导体器件部分进行了优化设计。以改进 EP-VECSEL 有源区电流分布, 消除环形光斑及局部过热效应为目的, 采用三维有限元方法建模分析了器件的电流注入结构及散热结构对 EP-VECSEL 有源区的电流分布及温度分布的影响。对 EP-VECSEL 的电流注入结构及散热结构进行了优化设计, 实现了有源区电流均匀分布并有效消除了局部过热。同时, 将 EP-VECSEL 的电流注入结构设计思路应用于 980nm VCSEL 研制中, 有效压缩了器件的发散角。

(3)对器件制备工艺中的关键技术进行了改进后, 研制出单片集成结构的 980nm EP-VECSEL 器件并研究了其输出特性。

(4)在 EP-VECSEL 结构设计的理论基础上, 对 980nm VCSEL 列阵的单元结构进行了优化设计, 有效提高了器件的输出功率。

第2章 980nm EP-VECSEL 谐振腔理论分析及优化设计

2.1 普通 FP 谐振腔与模式选择 FP 谐振腔

自从 1960 年 Fabry-Perot 谐振腔(FP 谐振腔)出现以来,已经成为了最为重要的一种谐振腔。目前,包括 VCSEL 在内的大多数激光器均采用了 FP 谐振腔。最简单的 FP 谐振腔激光器由夹在一对具有一定反射率镀膜镜片中的增益介质组成,能同时提供对光能量的限制及放大。通过在两镜片间反复进行反射及聚焦,具有特定波长、特定相位及振幅分布的光束就能够被该谐振腔捕获。当光束通过增益介质获得的放大足以补偿其在谐振腔中的损耗时,激光器就发生了激射。本节对两种不同的 FP 谐振腔:普通 FP 谐振腔及模式选择 FP 谐振腔中光场的模式特性进行了对比。

2.1.1 特征模式,特征值及模式识别能力

在详细讨论两种 FP 谐振腔的模式分布特性之前,首先有必要简介以下几个重要的概念及定义。

FP 谐振腔内部光场的变化过程可以表述如下:光场在谐振腔内经过一次完整的循环之后重新返回其最初的参考平面,此时的光场分布形式已经与最初有所不同。如果某一时刻光场在谐振腔内部完成一次完整循环之后其分布形式没有发生变化,也就是前面所说的通过增益介质获得的放大能够完全补偿损耗时,此时激光器就发生了激射。这些在激光谐振腔内经过一次完整循环之后分布形式未发生变化的模式,就称为该谐振腔的特征模式。

对于由一对无限大平行平面镜组成的 FP 谐振腔而言,其特征模式就是平面波,这也是形式最为简单的一种特征模式,另一种最简单的特征模式是后面要提

到的厄米—高斯模式。

在一个 FP 谐振腔内，一次完整的光场循环过程可以用下面的数学表达式来加以描述：

$$U^{(n+1)}(x, y) = e^{-2jkd} \iint_{\text{reference plane}} K(x, y; x_0, y_0) U^{(n)}(x_0, y_0) dx_0 dy_0 \quad 2-1$$

式 2-1 中 U 代表参考平面处的光场分布； k 代表传播方向上的波矢量； $2d$ 代表一次循环传输的距离； K 是一个描述谐振腔特性的量。 U 的上标代表谐振腔内某一特定光场循环传输的次数。

式 2-1 是一个线性算子方程，每当 K 作用于该表达式中的光场 $U^{(n)}$ 一次以后，就会产生一个新的光场 $U^{(n+1)}$ 。这里最为重要的问题就是找到式 2-1 的特征解，也就是对于某个具有给定 K 参量的谐振腔，我们需要找出一组特征模式 $E_i(x, y)$ 及对应的特征值 γ_i 来使得这些特征模式在经过一次循环之后能够满足循环传输的表达式。

$$E_i^{(n+1)}(x, y) = e^{-2jkd} \iint_{\text{reference plane}} K(x, y; x_0, y_0) E_i^{(n)}(x_0, y_0) dx_0 dy_0 = \gamma_i e^{-2jkd} E_i^{(n)}(x, y) \quad 2-2$$

满足式 2-2 的特征解就代表了该谐振腔中能够自再现的特征横模，也就是经过一次完整的谐振腔内循环传输之后，光场的空间分布 $E_i^{(n)}(x, y)$ 除变化一个恒定的增益或损耗量 γ_i 以及一个恒定的位相变化量 e^{-2jkd} 以外，分布形式未发生任何变化，此时我们可以认定 E_i 为 K 谐振腔的特征模式。

由于谐振腔中存在由于衍射等因素而导致的损耗，所以未包含增益介质的谐振腔的特征值振幅总是逐渐趋于减小的，也就是 $|\gamma_i| < 1$ 。此时特定的横模振幅将随着光场的循环以 2-3 式中的指数形式衰减。

$$\frac{E_i^{(n+k)}}{E_i^{(n)}} = \gamma_i^k \quad 2-3$$

也就是说，为了使激光器达到阈值或达到稳态激光振荡，激光器工作物质的单次循环增益需要达到 $1/\gamma_i$ ，以补偿对应的损耗项。

在一个谐振腔所有的特征模式中，损耗最低的模式一般被称为基模。基模具

有最大的 $|\gamma_i|$ 值，同时具有最低的阈值增益，此时在谐振腔中基模最容易激射，而具有较小 $|\gamma_i|$ 值的高阶模式则不容易发生激射。为了衡量谐振腔抑制高阶模式及进行基模工作的能力，我们定义表征模式识别能力的参量 D ：

$$D = \frac{G_1}{G_0} = \frac{|\gamma_0|^2}{|\gamma_1|^2} \quad 2-4$$

式 2-4 中 G_i 代表第 i 阶模式的阈值增益， γ_i 则是对应的特征值。下标 0 及 1 分别代表基模及下一阶模式。

2.1.2 普通 FP 谐振腔

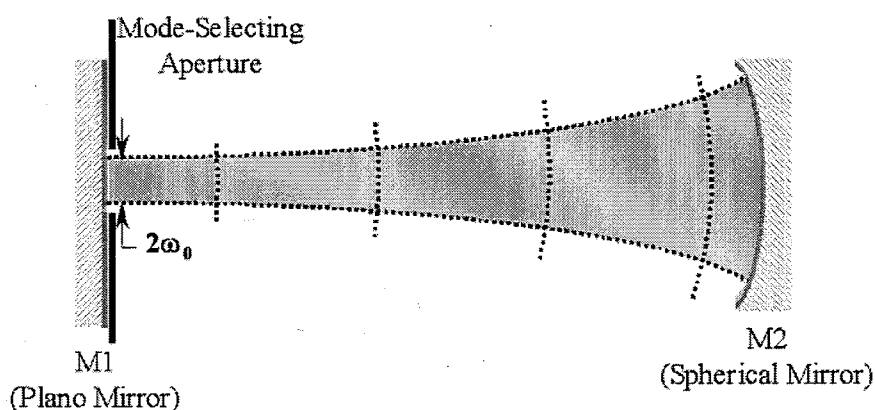


图 2-1：普通稳定 FP 谐振腔示意图

普通的 FP 谐振腔包括一对分开特定距离的反射镜，如图 2-1 所示。对于特定的 FP 谐振腔而言，存在一组对应的空间光场分布(或其线性组合)在谐振腔内传播一个来回之后不会改变其分布形式，这样一组空间光场分布就是该激光谐振腔的特征模式。稳定激光谐振腔的特征模式是厄米—高斯模式，其数学表达式如下^[58]：

$$E_{l,m}(x,y,z) = E_0 \frac{\omega_0}{\omega(z)} H_l \left(\sqrt{2} \frac{x}{\omega(z)} \right) \times \exp \left[-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2(z)} - \frac{ik(x^2 + y^2)}{2R(z)} - ikz + i(l+m+1)\eta \right] \quad 2-5$$

其中 H_l 是 l 阶厄米多项式； $\omega(z)$ 是光斑半径； $R(z)$ 是光波前的曲率半径； η

是相邻模式间的相移。 $\omega(z)$ ， $R(z)$ 及 η 由式 2-6 至式 2-9 定义。在下面这组表达式中， ω_0 是光束腰半径， z_0 是瑞利距离，这两个量共同决定了厄米-高斯模式的波前形状。

$$\omega^2(z) = \omega_0^2 \left(1 + \frac{z^2}{z_0^2} \right) \quad 2-6$$

$$R = z \left(1 + \frac{z_0^2}{z^2} \right) \quad 2-7$$

$$\eta(z) = \tan^{-1} \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad 2-8$$

$$z_0 \equiv \frac{\pi \omega_0^2 n}{\lambda} \quad 2-9$$

图 2-2 所示是一组特定厄米—高斯模式的强度分布。图中给出了 3 阶不同的模式，位于孔径中心的 0 阶厄米—高斯模式强度最高，1 阶及 2 阶模式沿横轴均有 m 个强度为 0 的点，其中 m 是该模式的阶数。

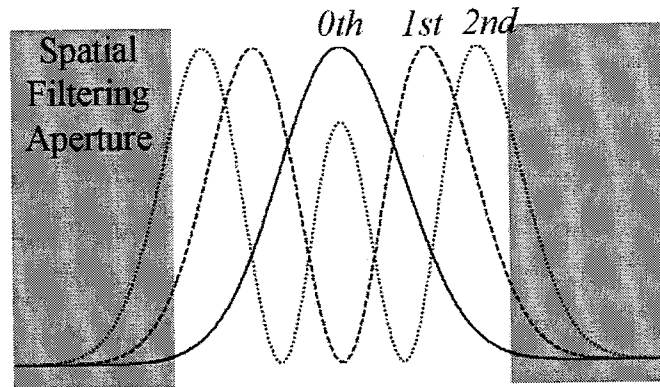


图 2-2: 0 阶(实线), 1 阶(短划线)及 2 阶(点虚线)厄米—高斯模式的强度分布示意图

在激光谐振腔的镜面处，各阶厄米—高斯模式均具有与镜面完全相同的球面波前曲率，而与模式的阶数无关。此时这些模式具有低衍射损耗，称为该谐振腔

的稳定模式。在普通 FP 谐振腔中，各阶模式的损耗均相同，谐振腔无法对某个特殊的模式进行选择，因此其模式识别能力很差，通过这种谐振腔发出的激光一般为多横模。在许多的应用领域中，均需要光源为单横模工作，此时为了抑制所有的高阶横模来达到单横模激射，一般需要在谐振腔中使用一个小孔径的空间滤波器，如图 2-1 及 2-2 所示。当厄米—高斯模式的阶数增加时，更多的能量会从中心处离散并被空间滤波器阻挡，当该滤波器的孔径进一步减小时，对于高阶模式的抑制能力就会进一步增强。但采用这种方法同样会使基横模的能量有所损失，也会在一定程度上造成模式扭曲。在一些高增益、高输出功率的激光系统中，这种用于模式控制的滤波器会使 0 阶模式有明显的能量损失，此时激射的模式与实际的 0 阶厄米—高斯模式会有很大不同。

2.1.3 具有模式选择功能的 FP 谐振腔

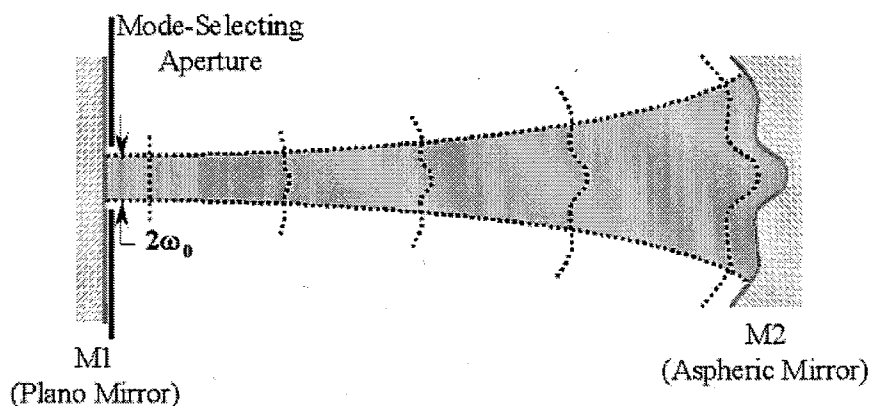


图 2-3：具有模式选择功能的 FP 谐振腔示意图

当 FP 谐振腔中的镜面经过特殊设计成为非球面反射镜时，谐振腔中振荡的模式强度分布形式会随之被“剪裁”成为一种特殊的形式^[59]。这样就可以针对不同谐振腔模式的波前形状，设计不同的镜面与之匹配。图 2-3 所示的两镜面谐振腔中，其中一个反射镜就被设计为非球面镜，以实现光束的平顶模式整形。由于要得到的平顶模式的束腰位于图 2-3 中左侧的镜面，而束腰处的波前形状为平面，因此左侧的镜面设计为平面镜。在普通 FP 谐振腔中，一个特征模式的所有光束都被限制在了谐振腔内，并具有低衍射损耗。与该情况类似，如果在一个非球面 FP 谐振腔中，某一特征模式的所有光束都被限制其中，那么该特征模式

也是这个非球面 FP 谐振腔的稳定模式。为了达到该目的，入射到反射镜上的光线必须与其垂直以使得反射光与入射光的路径相同，这样才能使所有光束都被限制在两反射镜之间。在波动光学理论看来，以上情况也就是谐振腔镜面的位相分布要与需要得到的谐振腔特征模式的波前相匹配。基于以上分析，为了达到图 2-3 所示的平顶模式整形，反射镜 M2 的位相分布必须是非球面形式。

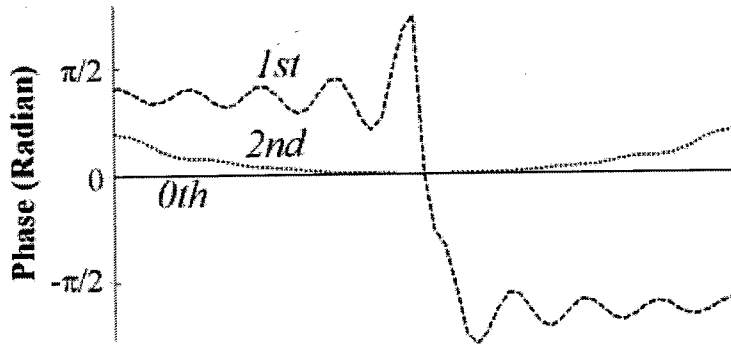


图 2-4：在平顶模式整形谐振腔中，M1 反射镜处各阶模式的位相分布。

与普通稳定球面 FP 谐振腔中的情况不同，在非球面 FP 谐振腔中，高阶模式的波前并不与反射镜表面相同。只有需要的谐振腔特征模式能够在两个谐振腔镜面之间正常循环传输并具有低衍射损耗，而高阶模式在这种谐振腔中是非稳定的模式，具有很高的衍射损耗。图 2-3 中各阶模式在平面镜处的相位分布示于图 2-4，可见 0 阶模式的相位分布与平面镜符合得很好，而 1 阶及 2 阶模式明显与平面镜表面不同。这说明非球面反射镜的引入很大程度上改善了谐振腔的模式识别能力。

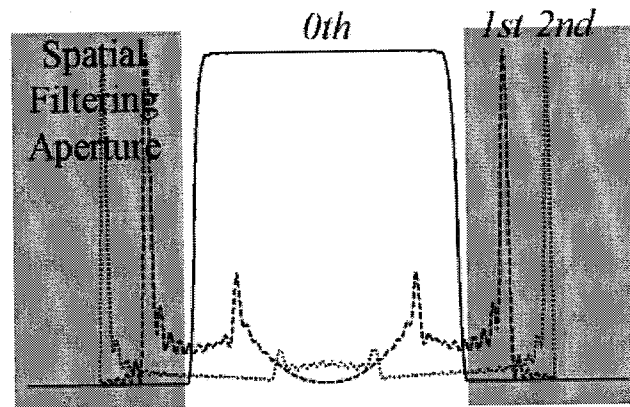


图 2-5：平顶模式整形谐振腔中的空间模式强度分布

图 2-5 所示为用于平顶模式整形的非球面 FP 谐振腔中的不同阶特征模式的强度分布。从图中可见,基模,也就是平顶模式的能量沿着空间滤波器孔径呈均匀分布。谐振腔中的高阶模式基本没有被限制在孔径之中,其大部分能量均被空间滤波器阻挡,因此高阶模式具有较高的损耗。

2.2 EP-VECSEL 的三镜面谐振腔

2.2.1 三镜面谐振腔

通过前面的论述可以得出如下结论:只有采用非球面反射镜,才能在不损失基模能量的前提下抑制高阶模式,使谐振腔具有较高的模式识别能力。在固体激光器及气体激光器中,采用双镜面的非球面 FP 谐振腔就能实现对高阶模式的抑制。对于半导体激光器而言,由于器件本身的谐振腔只包含了两个由解理面形成的平面反射镜^[60],因此如果要使用非球面 FP 谐振腔,只能通过外加特定的光学元件来加以实现。引入外部光学元件之后,半导体激光器的谐振腔中实际已经包含三个反射镜面,这种谐振腔称为三镜面谐振腔。对于多数的 EEL 而言,引入外部光学元件的主要作用是纵模控制。在 EEL 外部引入光学元件最为典型的例子就是 C³ 激光器^[61],这种激光器的谐振腔分为两段,激光器本身的解理谐振腔可以等效为一个复合反射镜。在大多数情况下,模式控制元件都放置于半导体芯片外部,并与芯片直接或通过某种成像系统进行耦合^[62-65]。

对于 VCSEL 而言,由于其具有非常短的腔长(波长量级)^[66],因此纵模间距很大,这种谐振腔一般只有一个稳定的纵向模式,具有很好的单纵模特性。另一方面,VCSEL 谐振腔的横向尺寸一般远大于其纵向尺寸,导致谐振腔的菲涅尔数很大,因此 VCSEL 在工作时一般都是多横模振荡。在具有更高输出功率的大口径 VCSEL 中多横模工作的问题更为严重,这在第一章中也有所表述。因此,有必要通过引入外加光学元件的方法对 VCSEL 的横模特性加以控制,这样带有外部光学元件的 VCSEL—EP-VECSEL 就应运而生了。

EP-VECSEL 谐振腔的主要设计思路就是将非球面反射镜引入 VCSEL 结构中,与 VCSEL 本身的 DBR 反射镜构成三镜面谐振腔。一方面对 VCSEL 结构进行修改,保留多量子阱有源区及部分 DBR 结构以实现纵模的控制;另一方面

通过外加非球面反射镜与经过特殊设计的 VCSEL 芯片构成外腔结构以实现横模的控制。EP-VECSEL 的三镜面谐振腔结构示于图 2-6。

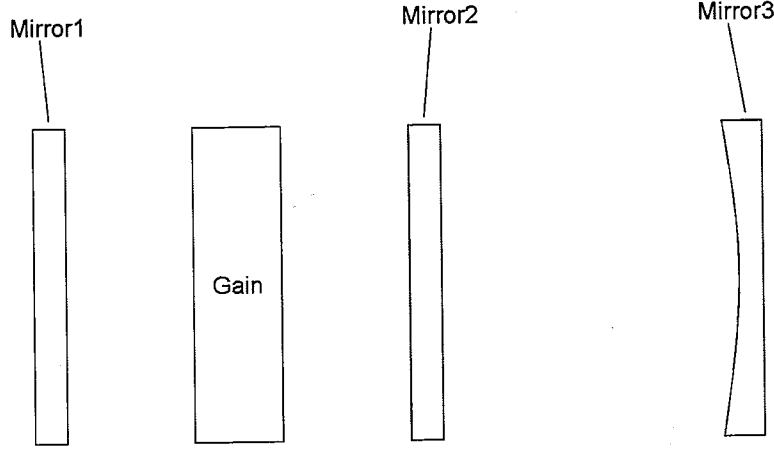


图 2-6: EP-VECSEL 三镜面谐振腔示意图

图 2-6 中的反射镜 M1 及 M2 代表 VECSEL 半导体芯片部分的 P-DBR 及 N-DBR，这部分谐振腔相当于普通 FP 谐振腔，其中放置了增益介质即半导体多量子阱有源区。反射镜 M3 是外加的非球面反射镜，与 M2 构成了外腔结构，这部分谐振腔中未包含增益介质，属于“冷腔”。M1、M2 及 M3 构成了一个三镜面谐振腔，M1 及 M2 构成谐振腔 1 用于提供激励所需的增益，M2 及 M3 构成谐振腔 2 用于对横模的控制。

在三镜面谐振腔的基本结构确定之后，需要找出对 EP-VECSEL 工作最为重要的谐振腔参数，在这之前对光场在该谐振腔中的变化过程进行详细分析是很有必要的。

2.2.2 三镜面谐振腔原理分析

通过预先对图 2-6 中反射镜 M3 的参数进行调节，能够使被其反射的光场波前发生变化。这一过程在数学上可以用下述表达式描述：

$$A_r e^{i\varphi_r(x,y)} = A_i e^{i\varphi_i(x,y)} \times |r| e^{2i\varphi_m(x,y)} = |r| A_i \times e^{i[\varphi_i(x,y) + 2\varphi_m(x,y)]} \quad 2-10$$

其中 A_i 与 A_r 分别代表空间相关的入射及反射光场振幅； φ_i 及 φ_r 分别代表空间相关的入射及反射光场相位分布； φ_m 代表镜面的相位分布； $|r|$ 代表镜面的振

幅反射系数。当镜面与光场的波前相匹配时(即 φ_i 与 φ_m 相反的情况), 式 2-10 变为:

$$A_r e^{i\varphi_r(x,y)} = |r| A_i e^{i[\varphi_i(x,y) - 2\varphi_i(x,y)]} = |r| A_i e^{-i\varphi_i(x,y)} \quad 2-11$$

从式 2-11 中可以看出除了增加一个系数 $|r|$ 以外, 反射光场与入射光场的振幅分布相同, 相位相反。由于反射光场与入射光场的传播路径恰好相反, 此时可认为在谐振腔空间内入射及反射光场处处一致。

当非球面反射镜 M3 具有上述特性时, M2 及 M3 组成的谐振腔 2 就成为了一个具有模式选择功能的标准具^[67]。如果谐振腔 2 设计为只对某特定模式提供反馈, 那么谐振腔 1 中的模式就能够被“剪裁”为需要的模式, 此时三镜面谐振腔起到的作用就相当于一个具有模式选择功能的两镜面谐振腔。下面将详细分析谐振腔 1 及谐振腔 2 中光场变化之间的关系。

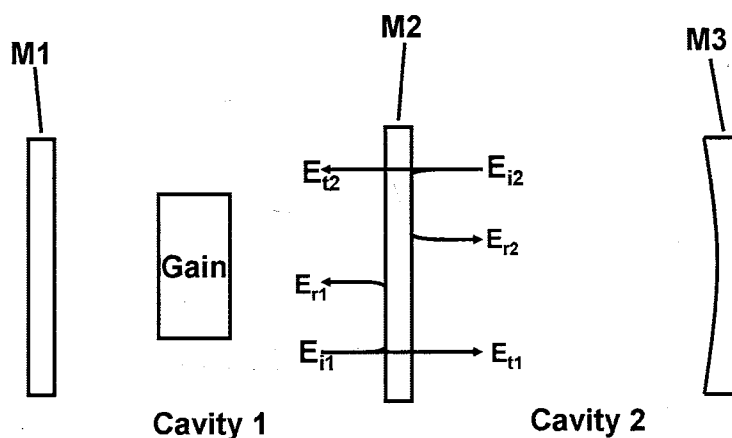


图 2-7: 三镜面谐振腔中的光场传输过程示意图

图 2-7 所示是三镜面谐振腔中的光场传输过程, 从图中可见该谐振腔由谐振腔 1 及谐振腔 2 组成, 反射镜 M2 为谐振腔 1 及谐振腔 2 所共有。谐振腔 1 及谐振腔 2 中的光场通过 M2 反射及透射, 因此两个谐振腔互相耦合, 它们的特征值及特征模式都是互相影响的^[68]。

由图 2-7 可见, 从谐振腔 1 入射到 M2 的光场 $E_{i1}(x,y)$ 一部分被反射, 反射

光场 $E_{r1}(x, y)$ 可以表示为:

$$E_{r1}(x, y) = E_{i1}(x, y) \times r_{21}(x, y) \quad 2-12$$

其中 t_2 代表 M2 的复振幅透射比。此时从 M2 反射回谐振腔 1 的总光场 E_{2R1} 可表示为:

$$E_{2R1}(x, y) = E_{r1}(x, y) + E_{i2}(x, y) \quad 2-13$$

当反射光场在谐振腔 1 中完成一次循环又回到 M2 之后, 由于衍射及增益介质的作用, 表达形式会有所变化:

$$E'_{i1}(x, y) = O_1(E_{2R1}(x, y)) \times g_1^2 = O_1(E_{i1}(x, y) \times r_{21}(x, y) + E_{i2}(x, y) \times t_c(x, y)) \times g_1^2 \quad 2-14$$

E'_{i1} 表示经过传输之后产生的新的光场, O_1 是谐振腔 1 的循环传输算子, g_1 是谐振腔 1 的单程增益。

为了达到稳态, 光场在谐振腔内经过一次循环之后必须能够自再现, 因此有:

$$E'_{i1}(x, y) = E_{i1}(x, y) \quad 2-15$$

或者也可以写成:

$$O_1(E_{i1}(x, y) \times r_{21}(x, y) + E_{i2}(x, y) \times t_c(x, y)) \times g_1^2 = E_{i1}(x, y) \quad 2-16$$

与谐振腔 1 类似, 对于谐振腔 2 有:

$$E'_{i2}(x, y) = E_{i2}(x, y) \quad 2-17$$

或

$$O_2(E_{i2}(x, y) \times r_{22}(x, y) + E_{i1}(x, y) \times t_2(x, y)) \times g_2^2 = E_{i2}(x, y) \quad 2-18$$

其中 O_2 是谐振腔 2 的循环传输算子, g_2 是谐振腔 2 的单程增益。

式 2-16 及 2-18 构成了一对互相耦合的方程, 可用于求解三镜面谐振腔中的特征模式。有一点需要注意的是, 该方程组仅适用于谐振腔内增益均匀分布的情况。

如果将式 2-16 及 2-18 表示为矩阵形式, 有:

$$\begin{bmatrix} E_{i1} \\ E_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} O_{11} & O_{12} \\ O_{21} & O_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{r1} \\ E_{r2} \end{bmatrix} \quad 2-19$$

$$O_{11}(E_{i1}(x, y)) = O_1(E_{i1}(x, y) \times r_{21}(x, y)) \times g_1^2 \quad 2-20$$

$$O_{12}(E_{i2}(x, y)) = O_1(E_{i2}(x, y) \times t_2(x, y)) \times g_1^2 \quad 2-21$$

其中 O_{11} 代表未与其他谐振腔耦合的情况下谐振腔 1 中光场的循环; O_{12} 代表由谐振腔互相耦合引入的光场循环。式 2-19 可以推广到 “n+1” 镜面谐振腔:

$$\begin{bmatrix} E_{i1} \\ E_{i2} \\ M \\ M \\ M \\ E_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} O_{11} & O_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ O_{21} & O_{22} & O_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & O_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & O_{(n-2)(n-1)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & O_{(n-1)(n-2)} & O_{(n-1)(n-1)} & O_{(n-1)n} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & O_{n(n-1)} & O_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{r1} \\ E_{r2} \\ M \\ M \\ M \\ E_m \end{bmatrix} \quad 2-22$$

由于只有相邻的谐振腔是相互耦合的, 因此矩阵中除了对角线上单元以及相邻单元以外, 其他都为 0。通过方程 2-22 就能求解 n+1 镜面的特征值问题。

2.2.3 EP-VECSEL 谐振腔设计中的关键参数

前文分析了三镜面谐振腔中的光场相互耦合的过程, 下面结合 EP-VECSEL 谐振腔的实际情况, 找出谐振腔设计中需要确定的关键参数。

通过前面的分析可以看出, 在三镜面谐振腔的两个副腔即谐振腔 1、2 的光场表达式中, 分别包含单独循环的光场项及相互耦合的光场项。对于 EP-VECSEL 而言, 谐振腔 1 就是半导体芯片本身的谐振腔, 该谐振腔的单程增益 g_1 , 腔长及反射镜 M1 的反射率均为常量, 在这种情况下 O_{11} 就被固定, 此时在设计中能加以调节的参数主要就是与 O_{12} 及 O_{22} 有关的量即反射镜 M2 的反射率, 谐振腔 2 的腔长, 反射镜 M3 的曲率半径及反射率。通过合理调节 O_{22} 的有关参数使谐振腔 2 支持基模振荡并抑制高阶模式, 同时调节 O_{12} 的有关参数以加强两个副腔之间的耦合, 就能够实现对谐振腔 1 中特征模式的“剪裁”, 实现对特定模式的选择。

在下一节中,将结合实际 EP-VECSEL 器件结构对这些谐振腔关键参数进行确定。

2.3 980nm EP-VECSEL 谐振腔结构设计

2.3.1 等效谐振腔

在 EP-VECSEL 的三镜面谐振腔结构中,外腔反射镜对于半导体芯片本身构成的谐振腔而言,可以看成一种外部的光反馈^[69]。这里有必要介绍一下半导体激光器中的外部光反馈效应。

半导体激光器中的外部光反馈效应是一部分激光器发出的光经过外部光学元件的反射,重新注入谐振腔所产生的多种效应。最早从理论上对 EEL 中的外部光反馈效应加以解释的是 Lang 等人^[70],他们提出了一种“复合腔”理论。在 Lang 等人的理论中,EEL 的外部光学元件被等效为一个具有一定振幅反射系数的反射镜,该反射镜及与之相邻的 EEL 本身的解理反射镜面可以等效为同一个反射镜,而该反射镜的反射率是在 EEL 解理镜面反射率基础上加上一个等效反射率,该等效反射率的值与外部反射镜的反射率及反射位相均有关。

此后,外部光反馈对 EEL 的影响被广泛研究。Tkach 等人^[71]对这些研究进行归纳以后,按照反馈强度的不同,总结出了五种外部光反馈模式(图 2-8):

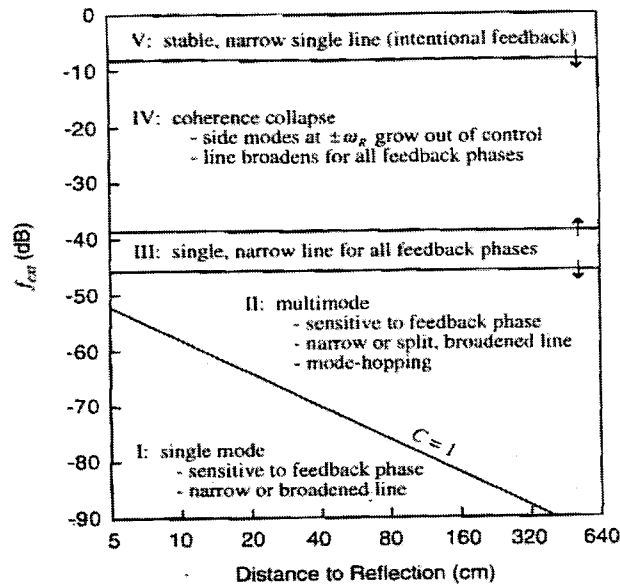


图 2-8: Tkach 等人总结的随强度不同而互相转换的五种外部光反馈模式^[71]

(1)模式 1: 反馈强度最低的情况, 此时激光器的线宽会随外部光反馈相位而发生窄化或展宽^[72]。当外部光学元件与 EEL 反射镜面距离 40cm 并且反馈强度为 -80dB 时(如果输出功率为 1mW, 相当于反馈功率 10pW), 线宽会变窄 30%。

(2)模式 2: 在该模式下, 反馈效应同样对反馈相位很敏感, 激光器会随着反馈相位的不同发生由于模式跳跃而导致的多模工作, 其程度与反馈强度及相位均密切相关^[73]。

(3)模式 3: 当反馈进一步加强至 -45dB 左右时, 此时反馈效应变得与相位无关。在该范围下模式跳跃消失了, 激光器为窄线宽单模工作。但这一模式仅存在于反馈强度 -45dB~-39dB 的范围内, 并且此时激光对反馈强度的变化十分敏感。

(4)模式 4: 该范围内反馈效应同样与相位无关, 激光器的主要振荡模式两侧开始出现卫星模式, 随着反馈强度的增加这种现象会变得更加明显, 激光器的线宽会展宽至 50GHz 左右。这种效应被称为“相干塌缩”^[74], 因为此时激光器的相干长度已经大幅度减少。

(5)模式 5: 当反馈强度大于 -10dB 时, 此时实际上已经处于主动反馈状态, 这也是大多数外腔激光器的工作模式。为了达到这一反馈强度, 一般需要在 EEL 的解理腔面镀增透膜^[62, 63, 75]。在该模式下外部光学元件实际上已经相当于激光器谐振腔的一部分, 如果该谐振腔的模式选择性能足够好的话, 激光器将始终保持窄线宽单模工作, 并对其他的光反馈不敏感。

从上面的讨论中可以看出, 只有当外部光反馈的强度达到模式 5 的范围内, 才能构成外腔激光器, 对于 EP-VECSEL 也是如此。为了在 EP-VECSEL 结构中形成外腔结构, 一方面需要在半导体芯片表面镀增透膜以消除表面反射率, 另一方面需要适当增加外腔镜的反射率。

根据 Lang 等人提出的复合腔理论, 对于 EP-VECSEL 而言同样可以把三镜面谐振腔等效为两镜面谐振腔, 如图 2-9 所示:

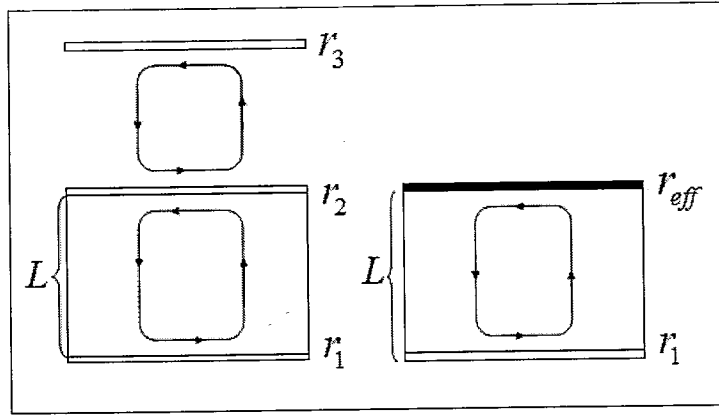


图 2-9: EP-VECSEL 三镜面谐振腔简化为两镜面谐振腔。

图 2-9 中的三个振幅反射系数为 r_1 、 r_2 及 r_3 的反射镜分别对应图 2-7 中 M1、M2 及 M3，其中 r_3 中已经包含了外腔结构中所有的衍射及吸收损耗。将三镜面谐振腔简化为两镜面谐振腔后，两个镜面的振幅反射系数分别为 r_1 及 r_{eff} 。其中 r_{eff} 为等效反射系数，与 M2 及 M3 的振幅反射系数均有关，其表达式为^[76]：

$$r_{eff} = r_2 + \frac{T_2 r_3 \exp(i\phi_l)}{1 + r_2 r_3 \exp(i\phi_l)} \quad 2-23$$

其中 T_2 代表 M2 的透过率，在 EP-VECSEL 中主要是由 DBR 的吸收而引入的； ϕ_l 代表光束在外腔中循环一次的相位改变，主要与外部反射镜 M3 与激光器输出镜面 M2 的距离有关。EP-VECSEL 是工作在外部光反馈效应的模式 5 范围内，因此相位对光反馈的影响可以忽略。如果设 M1、M2 及 M3 的反射率分别为 R_1 、 R_2 及 R_3 ，则有 $R_1 = r_1^2$ 、 $R_2 = r_2^2$ 及 $R_3 = r_3^2$ ，由 2-23 式可以得到等效反射率 R_{eff} 的表达式为：

$$R_{eff} = \left(\frac{\sqrt{R_2} + \sqrt{R_3}}{1 + \sqrt{R_2 R_3}} \right)^2 \quad 2-24$$

2.3.2 980nm EP-VECSEL 振荡特性分析

从前面的讨论中，可以看出与 O_{12} 关系最为密切的参数是 EP-VECSEL 的谐振腔的镜面反射率。确定合适的镜面反射率，既能加强谐振腔间的耦合，同时也

能决定器件的振荡特性。下面就结合相关的理论模型，给出镜面反射率与 EP-VECSEL 的阈值电流、斜率效率及输出功率等振荡特性参数之间的关系。

2.3.2.1 理论模型

EP-VECSEL 的有源区采用厚度为 $\lambda/2n$ 整数倍的周期增益结构^[77] (Periodic Gain Structure, PGS), λ 是激光波长, n 是有源区在该波长处的有效折射率。采用 PGS 的好处在于其能够有效消除纵向空间烧孔效应, 使谐振腔光场驻波的波腹与增益介质更好的重叠, 有效提高激光器的纵模限制因子 Γ_z ^[78]。EP-VECSEL 的有源区由三个 $Ga_{0.8}In_{0.2}As/GaAs_{0.92}P_{0.08}$ 量子阱组成, 在有源区两侧还引入了 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 间隔层来使激光器腔长的光学长度保持为 $\lambda/2$ 的整数倍。EP-VECSEL 的有源区如图 2-10 所示:

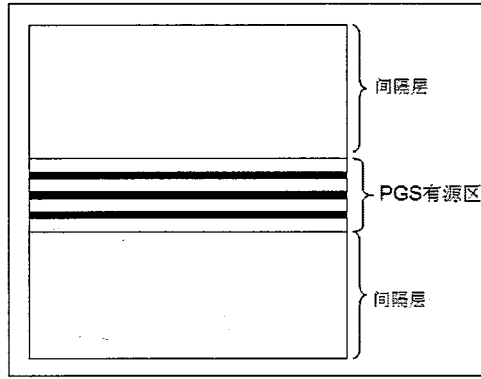


图 2-10: EP-VECSEL 有源区示意图

EP-VECSEL 的有源区与普通 VCSEL 相同, 因此可采用类似的模型进行分析, 下面先得出普通 VCSEL 的阈值增益及阈值电流的表达式, 然后再推出 EP-VECSEL 对应的表达式。

忽略有源层与间隔层交界面处的折射率突变, 普通 VCSEL 阈值增益的表达式为^[78]:

$$\Gamma_z g_{th} = \alpha_{in} + \Gamma_z \alpha_{diff} + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}} \right) \quad 2-25$$

$\Gamma_z g_{th}$ 代表阈值模式增益; α_{in} 为腔内吸收系数; α_{diff} 为衍射损耗系数, 当有源区体积较大时可忽略不计^[78]; L 为有效腔长; R_1 、 R_2 分别代表两个镜面的反

射率, $\frac{1}{L} \ln(1/\sqrt{R_1 R_2})$ 代表镜面损耗。由于有源区的其他参数相对固定, 因此在器件设计中首先需要优化的参数就是纵模限制因子 Γ_z 。在 PGS 有源区中, 设量子阱的阱层厚度之和为 d , Γ_z 可以表示为^[77]:

$$\Gamma_z = \frac{\int_d E^2(z) dz}{\int_L E^2(z) dz} \quad 2-26$$

其中: $E(z) = E_0 \cos(k_{eff} z)$ 是镜面反射率较高时驻波光场的近似值, k_{eff} 为有效传播常数。2-26 式的分子部分可以看成对每个量子阱分别进行积分后求和, 分母部分也可以看成对每个间隔层分别积分后求和。代入 $E(z)$ 的表达式后可以得到:

$$\Gamma_z = \frac{\frac{d}{d_w} \int_{d_w} \cos^2(k_{eff} z) dz}{\frac{L}{\lambda/2n} \int_{\lambda/2n} \cos^2(k_{eff} z) dz} \quad 2-27$$

d_w 代表单个量子阱的阱宽, 经推导可由上式得到:

$$\Gamma_z = \frac{d}{L} \left\{ 1 + \frac{\sin\left(\pi \left(\frac{d_w}{\lambda/2n}\right)\right)}{\pi \left(\frac{d_w}{\lambda/2n}\right)} \right\} \equiv \frac{d}{L} \Gamma_r \quad 2-28$$

Γ_r 定义为相对限制因子, 可见 Γ_z 受到量子阱阱宽 d_w , 谐振腔腔长 L 以及相对限制因子 Γ_r 的影响。

在普通 VCSEL 中, 量子阱有源区内以及间隔层内的载流子密度随时间变化的关系为^[79]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} &= \frac{J}{qn_w d_w} - \frac{M}{\tau_s} + \frac{d_w}{d_s} \frac{N}{\tau_{le}} \\ \frac{\partial N}{\partial t} &= \frac{d_s}{d_w} \frac{M}{\tau_s} - \frac{\tau_n + \tau_{le}}{\tau_n \tau_{le}} N - v_g g(N) S \end{aligned} \quad 2-29$$

其中 J 为电流密度； q 为电子电荷； n_w 为量子阱数； d_s 为间隔层厚度； τ_s 是双极载流子通过间隔层的渡越时间； τ_n 是量子阱中的载流子寿命； τ_{te} 是量子阱的热电子激发寿命； g 是光增益，与量子阱有源区内载流子密度 N 有关； v_g 是群速度。 M 和 S 分别代表间隔层内的载流子密度和谐振腔内的光子密度。忽略阈值处自发发射对 S 的贡献，并考虑到阈值处 $J = J_{th}$ ， $N = N_{th}$ ，可以得到：

$$\frac{J_{th}}{qn_w d_w} = \frac{1}{\tau_n} \frac{d_w}{d_s} N_{th} \quad 2-30$$

根据量子阱激光器的增益与载流子密度之间的关系^[76]，由 2-30 式可以得到阈值电流密度 J_{th} 的表达式为：

$$J_{th} = qn_w d_w B N_{tr}^2 \exp \left(\frac{2}{g_N \Gamma_z} \left[\alpha_m + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}} \right) \right] \right) \quad 2-31$$

B 为双分子复合系数。将 2-31 式乘以有源区的面积 A_s ，同时考虑内量子效率 η_i 的影响，可以得到阈值电流 I_{th} 的表达式为：

$$I_{th} = \frac{q V B N_{tr}^2}{\eta_i} \exp \left(\frac{2}{g_N \Gamma_z} \left[\alpha_m + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}} \right) \right] \right) \quad 2-32$$

V 代表有源区的体积。

根据 2.3.1 节中的讨论，EP-VECSEL 的三镜面谐振腔能够等效为一个两镜面谐振腔，镜面反射率分别为 R_l 及 R_{eff} 。因此，只要在普通 VCSEL 输出特性的计算公式中，将其中一个镜面反射率更换为 R_{eff} ，就能对 EP-VECSEL 的输出特性进行分析。

引入等效反射率 R_{eff} 并忽略衍射损耗，2-25 式可改写为：

$$\Gamma_z g_{th} = \alpha_m + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{\sqrt{R_l R_{eff}}} \right) \quad 2-33$$

2-32 式变为:

$$I_{th} = \frac{qVBN_r^2}{\eta_i} \exp \left(\frac{2}{g_N \Gamma_z} \left(\alpha_{in} + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_{eff}}} \right) \right) \right) \quad 2-34$$

得出阈值电流的表达式后, 接下来给出 EP-VECSEL 输出功率的表达式, 同时考虑了热效应的影响。

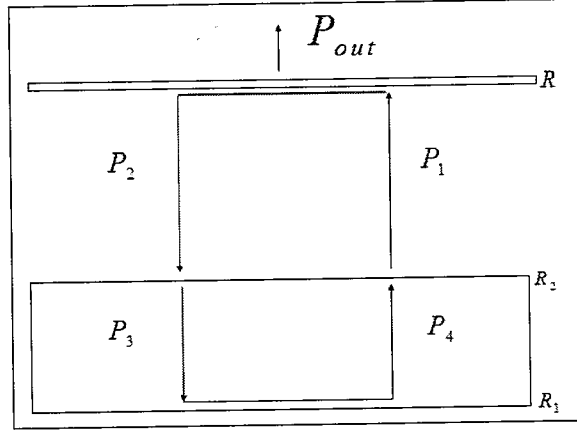


图 2-11: EP-VECSEL 内部光功率传输示意图, P_1 及 P_2 为谐振腔 2 中的环流功率, P_3 及 P_4 为谐振腔 1 中的环流功率, P_{out} 为通过外腔反射镜耦合输出的功率。

EP-VECSEL 的内部光功率传输如图 2-11 所示, 其中 P_1 代表通过 M2 输出的光功率; P_2 代表返回谐振腔 1 的光功率; P_{out} 代表通过外腔反射镜 M3 耦合输出的光功率。

由前面的分析中可以看出, EP-VECSEL 的阈值电流除了与 R_2 有关之外, 还会受到外腔反射镜 M3 反射率 R 的影响, R 还会影响到激光器的微分量子效率 η_d 以及输出功率。 η_d 及 P_2 的表达式分别为^[11]:

$$\eta_d = \frac{\frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}} \right)}{\alpha_{in} + \frac{1}{L} \left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}} \right)} \quad 2-35$$

$$P_1 = \frac{\eta_i \eta_d h \nu}{q} (I - I_{th}) \quad 2-36$$

其中 $h\nu$ 代表光子能量; I 为注入电流; I_{th} 由 2-34 式决定。假设此时器件中

有均匀的热生成, 同时将热流看成是一维传输, P_1 可改写为:

$$P_1 = \frac{\eta_i \eta_d h\nu}{q} (I - I_{th}) \left(1 - \frac{\Delta T}{T_{off}} \right) \quad 2-37$$

其中 T_{off} 为器件截止温度; ΔT 为器件温升, 表示为:

$$\Delta T = R_t [(V_k + IR_d)I - P_1] \quad 2-38$$

V_k 代表开启电压; R_d 代表微分电阻; $R_t = (2\sigma D)^{-1}$ 为热阻(当有源区直径较小时近似成立); σ 为热沉材料的热导率, D 为有源区直径。

把 2-38 式代入 2-37, 并且代入 R_{eff} , 可以得到存在外腔反馈情况下, P_1 表达式变为:

$$P_1 = \frac{\eta_i h\nu (I - I_{th}) \left(1 - \frac{\Delta T}{T_{off}} \right) \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_{eff}}} \right)}{q \left(\alpha_m + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_{eff}}} \right) \right)} \quad 2-39$$

由图 2-11 可知 P_{out} 与 P_1 、 P_2 与 P_1 有如下关系:

$$P_{out} = (1 - R) P_1 \quad 2-40$$

$$P_2 = R P_1 \quad 2-41$$

2.3.2.2 计算结果

根据上述理论模型, 可以通过理论计算得出各关键参数之间的关系, 对 EP-VECSEL 结构进行优化设计。计算中所使用的激光器及材料特性参数列于表 2-1。得到的关系曲线图分别为图 2-12, 图 2-13, 图 2-14, 图 2-15, 图 2-16 和图 2-17。图 2-12 是相对限制因子 Γ_r 与量子阱数 N 的关系曲线, 可见当量子阱数为 3 时, 相对限制因子的值为 1.9936, 得到相应的纵模限制因子 Γ_z 为 0.1245, 该值远高于不使用 PGS 有源区的激光器; 图 2-13 是无外腔反射镜 M3, 并且未

考虑热效应影响时,不同有源区直径器件阈值电流 I_{th} 与 M2 反射率 R_2 的变化关系,可见稍稍降低 R_2 (2%) 就会导致 I_{th} 的大幅提高,这是由 EP-VECSEL 增益谐振腔的短腔长决定的;图 2-14 是等效反射率 R_{eff} 与 M2 反射率 R_2 及外腔反射镜 M3 反射率 R 的变化关系;图 2-15 是加上外腔反射镜 M3 并且其反射率 R 为 99% 时,不同有源区直径器件阈值电流 I_{th} 与 M2 反射率 R_2 的变化关系,可见当其他参数相对固定时, R_2 的合理取值可以使 I_{th} 存在于合理的范围之内;图 2-16 是加上外腔反射镜 M3 并且其反射率 R 分别为不同值时,有源区直径为 $300\mu\text{m}$ 的器件通过外腔反射镜耦合输出功率 P_{out} 与 M2 反射率 R_2 以及注入电流 I 的变化关系,可见如果不考虑热效应的影响,当 $R=90\%$ 时,有源区直径为 $300\mu\text{m}$ 的器件最高输出功率可达 1W 以上;图 2-17 是加上外腔反射镜 M3 并且其反射率 R 分别取不同值且 M2 反射率为 87% 时,在考虑热效应影响的情况下,有源区直径 D 为不同值时得到器件的 $P_{out}-I$ 曲线,可见考虑热效应影响之后,当 $R=90\%$, $R_2=88\%$ 时,有源区直径为 $300\mu\text{m}$ 的器件通过 M3 反射镜耦合输出功率可达 0.5W 以上。

表 2-1: 激光器和材料特性参数

参量	名称	数值	单位
n	有源区有效折射率	3.4	—
λ	激射波长	980	nm
D	有源区直径	100~500	μm
α_{in}	腔内吸收系数	10	cm^{-1}
R_1	P-DBR 反射率	99.9%	—
d_w	量子阱阱宽	0.006	μm
n_w	阱数	3	—
g_N	材料增益系数	2100	cm^{-1}
η_i	内量子效率	1	—
N_{tr}	透明载流子密度	1.7×10^{18}	cm^{-3}
ρ	外腔耦合效率	0.85	—
B	双分子复合系数	1.0×10^{-10}	cm^3/sec

T_{off}	器件截止温度	170	K
V_k	结电压	1.68	V
R_d	串联电阻	0.06	Ω
σ	热沉材料热导率	400	$W \cdot m^{-1} K^{-1}$

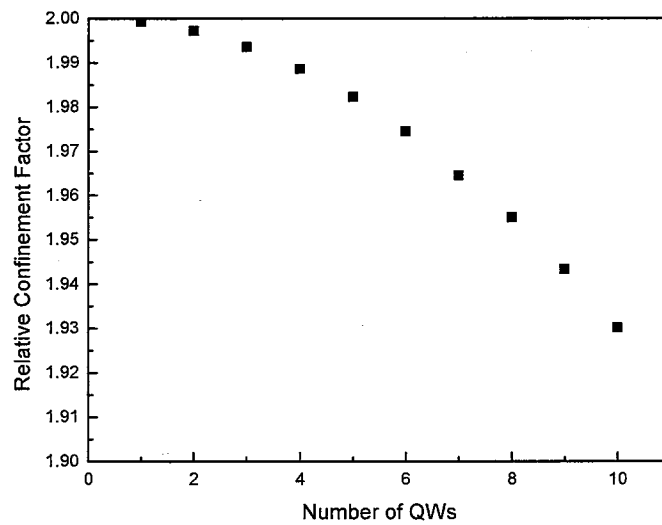


图 2-12: 相对限制因子 Γ_r 与量子阱数 n_w 的关系。从图中可见, 随着 n_w 的增加, Γ_r 呈逐渐下降的趋势

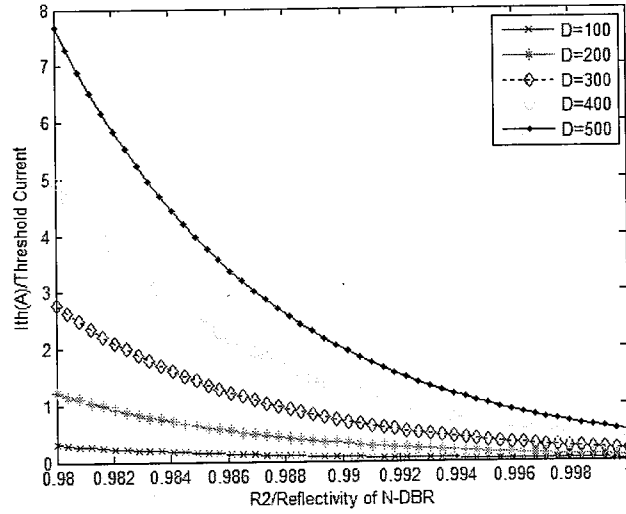


图 2-13: 无外腔反射镜 M3 情况下, 有源区直径 D 分别为 $100\mu\text{m}$ 、 $200\mu\text{m}$ 、 $300\mu\text{m}$ 、 $400\mu\text{m}$ 、 $500\mu\text{m}$ 时, 阈值电流 I_{th} (A) 与 M2 反射率 R_2 的关系, 可见稍稍降低 R_2 (2%)就会导致阈值电流迅速升高 (最高达 8A), 这主要是由 EP-VECSEL 有源谐振腔的短腔长决定的。

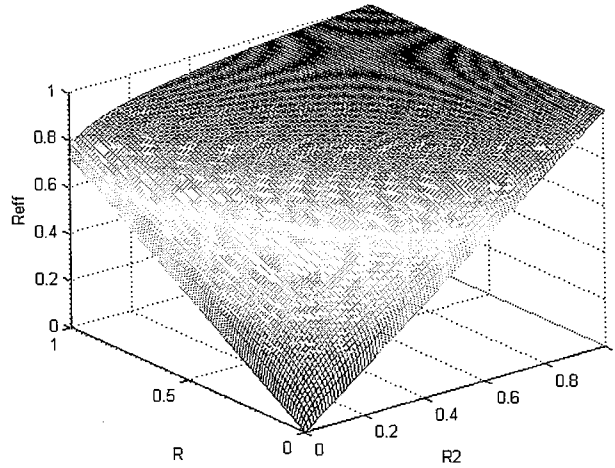


图 2-14: 等效反射率 R_{eff} 、M2 反射率 R_2 及外腔反射镜反射率 R 的关系, 其中考虑了外腔耦合效率对 R 的影响, 可见 R 及 R_2 的降低都将导致 R_{eff} 迅速减小, 这将会导致 EP-VECSEL 阈值电流的升高。

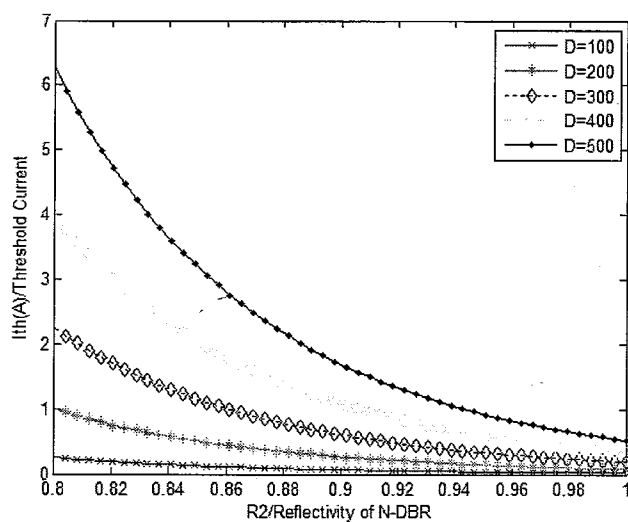
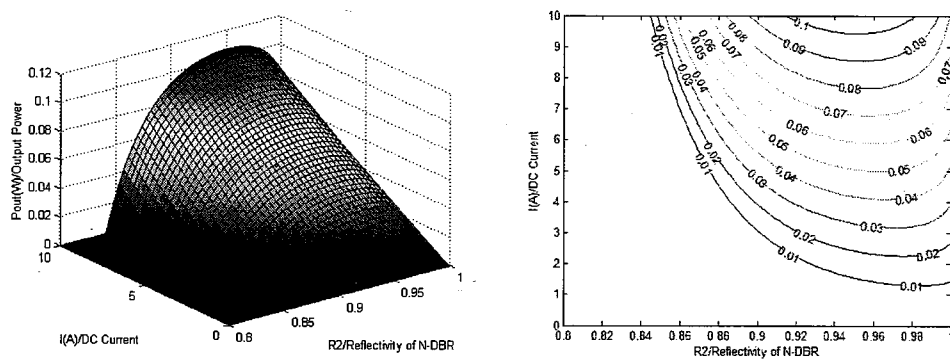
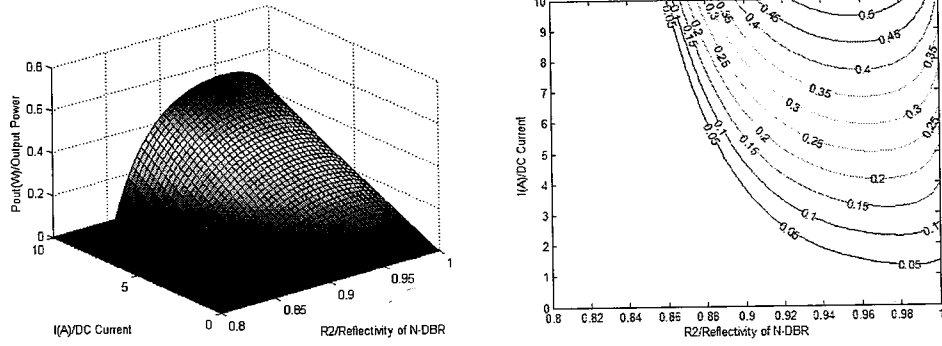


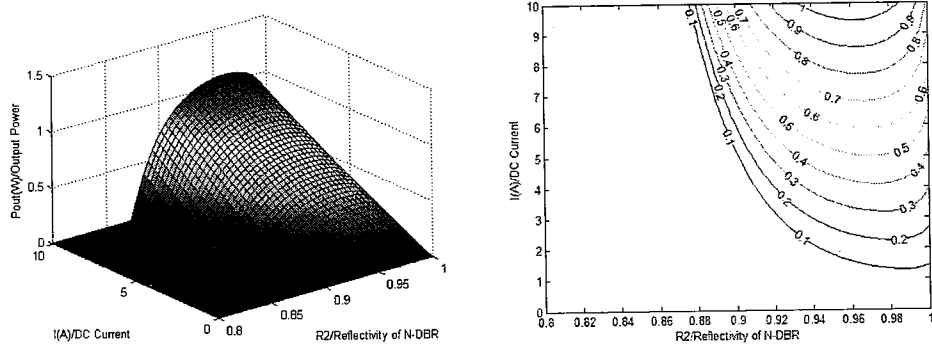
图 2-15: 加上外腔反射镜 M3 并且其反射率 $R=99\%$ 时, 有源区直径 D 分别为 $100\mu\text{m}$ 、 $200\mu\text{m}$ 、 $300\mu\text{m}$ 、 $400\mu\text{m}$ 及 $500\mu\text{m}$ 时, 阈值电流 $I_{th}(\text{A})$ 与 M2 反射率 R_2 的关系。与图 2-13 对比可以看出, 随着反射镜 M3 的引入, 即使 R_2 降低至 90% 以下, EP-VECSEL 的阈值电流仍然维持在合理范围之内。



(1) $R=99\%$

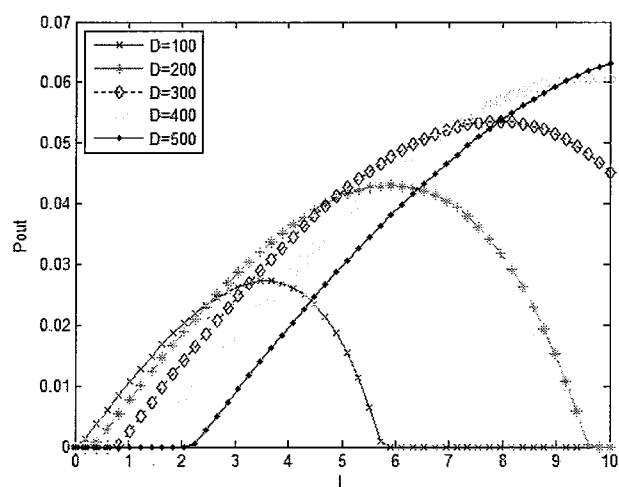


(2) $R=95\%$

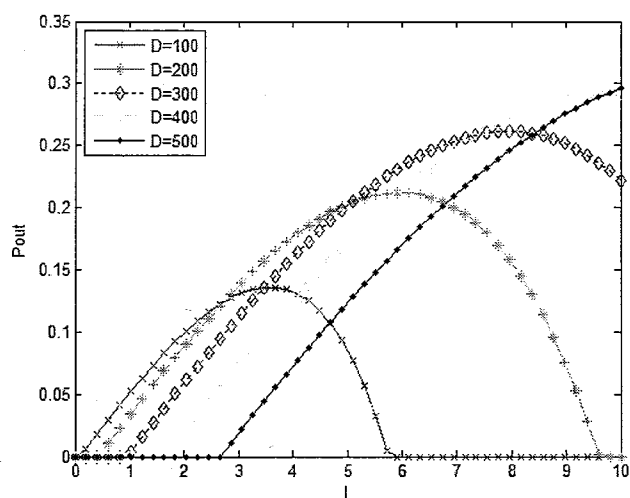


(3) $R=90\%$

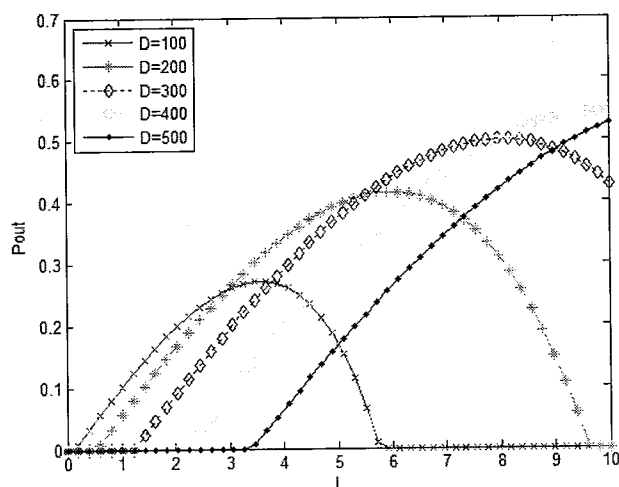
图 2-16: 加上外腔反射镜 M3 并且其反射率 R 分别为 99%、95%、90%，有源区直径 $D=300\mu\text{m}$ ，未考虑热效应影响时，通过 M3 耦合输出功率 P_{out} (W) 与 M2 反射率 R_2 及注入电流 I (A) 的变化关系。从图中可见 R 的降低提高了通过 M3 反射镜耦合输出的功率，但同时也提高了器件的阈值电流。



(1) $R=99\%$



(2) $R=95\%$



(3) $R=90\%$

图 2-17: 加上外腔反射镜 M3 并且其反射率 R 分别为 99%、95%、90%，M2 反射率为 87%，有源区直径 D 分别为 100 μm 、200 μm 、300 μm 、400 μm 及 500 μm 时，通过 M3 耦合输出功率 P_{out} (W)与注入电流 I (A)的关系，可见 $D=300\mu\text{m}$ 且 $R=90\%$ ， $I=6\text{A}$ 时 $P_{out}>0.4\text{W}$ 。

2.3.3 980nm EP-VECSEL 谐振腔参数的确定

图 2-18 是 980nm EP-VECSEL 的结构示意图，其具体谐振腔结构参数的选择是基于上述理论计算得到的结果。

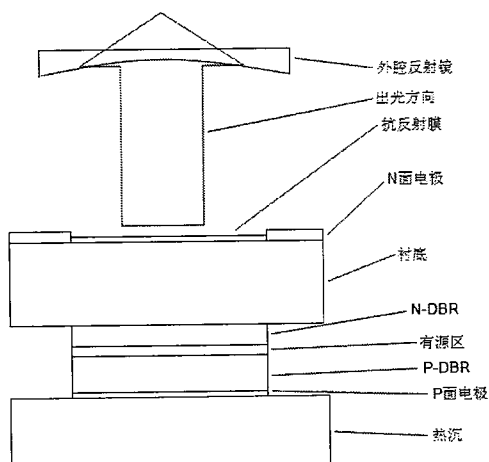


图 2-18: 980nm EP-VECSEL 结构简图

为了电流扩散的均匀性, 980nm EP-VECSEL 采用底发射结构, 出光窗口制作在衬底面上, 其上镀有 980nm 抗反射膜, 使其可与外腔反射镜构成外腔结构。激光器芯片通过 In 焊料焊接在微通道水冷热沉上以提高其散热性能, N 面电极及 P 面电极分别使用 Au/Ge/Ni 及 Ti/Pt/Au。

由于器件为底发射结构, 因此衬底厚度的选择会对器件性能产生影响, 从改善电流注入均匀性及消除热透镜效应的角度考虑, 衬底厚度一般为 150~200 μm , 具体参数选择将在下一章中讨论。生长在芯片上的 DBR 选用光学厚度为 $\lambda/4$ 的多层 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{AlAs}$ 结构, 其中 P-DBR 为高反镜, 反射率超过 99.9%; N-DBR 为部分反射镜, 引入 N-DBR 主要是为了减少带间吸收引起的损耗, 并且能够加强纵模选择性; 激光器发生激射所需的反馈, 由 P-DBR, N-DBR 及外腔反射镜共同提供。其中 N-DBR 与外腔反射镜的反射率根据具体应用将有不同取值, 如果希望通过外腔镜耦合输出较高功率, 其反射率应为 90%~95%, N-DBR 反射率取值为 88%~93%; 如果希望得到较高腔内环流功率来用于腔内倍频, 外腔镜反射率应达到 99%以上, 相应的 N-DBR 反射率取值为 80%~88%。

根据 2.3.2 中的计算结果, 当外腔镜反射率为 90%, N-DBR 反射率为 87%时, 有源区直径 300 μm 的器件具有最佳 P-I 特性, 其外腔耦合连续输出功率可达 0.5W 以上, 且此时器件的阈值电流维持在较为合理的水平。这说明通过适当调节 EP-VECSEL 谐振腔各镜面反射率, 加强了两个副腔之间的耦合, 使前文提到的 O_{12} 得到优化, 进而使器件的振荡特性得到了最优化。

在确定镜面反射率, 对 O_{12} 完成优化之后, 还需要确定与 O_{22} 有关的外腔参数。外腔参数主要包括腔长以及外腔镜的镜面参数。由于希望 O_{22} 支持基横模工作, 因此只需根据基横模工作的条件对腔长及镜面的曲率半径进行调节即可。根据前面的讨论, 外腔反射镜应该为非球面反射镜, 因此这里选用非球面平凹透镜。设外腔镜与激光器芯片出光表面的距离为 L_c , 曲率半径为 R_c , 芯片出光孔径处的模斑直径为 ω , 对于基横模工作情况, 有如下关系成立^[35]:

$$\omega^2 = \frac{4\lambda L_c}{\pi} \sqrt{\frac{R_c - L_c}{L_c}} \quad 2-42$$

利用该式可以确定 L_c 及 R_c , 当 ω 为 100 μm 时, L_c 与 R_c 的取值分别为 20mm 及

25mm。这样,根据不同的有源区直径选择外腔参数,就能使 O_{22} 也得到优化。至此,我们得到了具有模式选择功能同时能够进行高功率工作的 EP-VECSEL 非球面三镜面谐振腔结构。

2.4 外部光反馈对 980nm VCSEL 振荡特性影响

2.3 节中使用的复合腔理论,最初是在对 EEL 光反馈的研究中得到验证的,那么该理论是否同样适用于 VCSEL? 本节将对该问题进行探讨。通过理论及实验研究,我们将证实外部光反馈对 VCSEL 振荡特性的影响与 EEL 相同,进而说明了将复合腔理论应用于 EP-VECSEL 结构设计的合理性。

2.4.1 外部光反馈对 VCSEL 的影响

外部光反馈对 EEL 会产生各种影响,这在前文中已经提及,研究者早期的研究重点也主要是 EEL 在外部光反馈下的各种效应。由于 VCSEL 的镜面反射率较高,在很长一段时间内,人们认为 VCSEL 对外部光反馈是不敏感的^[80]。但随后的研究表明,VCSEL 同样会受到外部光反馈的影响^[81-87],主要是由于 VCSEL 的高镜面反射率与短谐振腔互相补偿,使其谐振腔内光子寿命与 EEL 具有相同的量级。

在研究外部光反馈对激光器输出特性的影响时,一般是在描述激光器电场的 Van der Pol 方程中引入由光反馈所导致的时间延迟项。忽略有关的噪声项后,该方程可写为^[71]:

$$\frac{dE}{dt} = \left(-i\omega_0 + \frac{VG}{2}(1-i\alpha) \right) E(t) + \kappa E(t-\tau_e) \quad 2-43$$

其中 ω_0 代表没有外部光反馈情况下的激光频率; VG 代表有外部光反馈时激光器增益条件的改变; α 代表线宽展宽因子^[88-90]; τ_e 代表由外部光反馈带来的时间延迟; $\kappa = \frac{1}{\tau_s} \frac{1-R_2}{\sqrt{R_2}} \sqrt{R_1} \sqrt{1+\alpha^2}$, 称为光反馈灵敏因子^[81], τ_s 代表激光器本身

谐振腔循环时间； R_2 代表激光器输出镜面反射率； R 代表外部光反馈的反馈率，其定义为：

$$R = \frac{\text{反射能量}}{\text{出射能量}} = \rho^2 R_{ext} \quad 2-44$$

R_{ext} 代表外部光学元件的反射率； ρ 代表耦合效率，包括各种衍射及吸收损

耗。当 $\kappa > \frac{1}{\tau_e \sqrt{1+\alpha^2}}$ 且外部光反馈强度达到一定程度时，Van der Pol 方程有多个

解，此时会出现由外部光反馈引起的各种效应^[71]。如果设 VCSEL 及 EEL 的光反馈灵敏因子分别为 κ_1 及 κ_2 ，出射镜面的镜面反射率分别为 99.7% 及 30%，腔长 L 分别为 $1\mu\text{m}$ 及 $300\mu\text{m}$ ，可得到 $\kappa_1/\kappa_2 \approx 0.6$ 。由此可见 VCSEL 的光反馈灵敏因子与 EEL 处于同一量级，即 VCSEL 对外部光反馈的敏感性与 EEL 类似。其原因主要是，虽然 VCSEL 谐振腔的腔长很短，但其高镜面反射率补偿了短谐振腔长对腔内光子寿命的影响，使 VCSEL 的腔内光子寿命与 EEL 处于同一量级^[83]。

2.3.2 光反馈率与 980nm VCSEL 输出特性关系：理论计算

VCSEL 的阈值电流密度 J_{th} 可表示为^[76]：

$$J_{th} = J_s \exp \left\{ \frac{2}{g_N \Gamma_z} \left\{ \alpha_m + \frac{1}{L} \left(\alpha_{diff} d + \ln \left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}} \right) \right) \right\} \right\} \quad 2-45$$

其中 J_s 为名义电流密度，是一个常数； g_N 为材料增益系数； Γ_z 为限制因子； α_m

为腔内吸收系数； α_{diff} 为衍射损耗系数； L 为谐振腔有效腔长； d 为有源区厚度；

R_1 、 R_2 代表 VCSEL 的镜面反射率。

如图 2-19 所示，根据复合腔理论^[91]，外部光反馈的影响可通过引入等效复合谐振腔加以考虑。

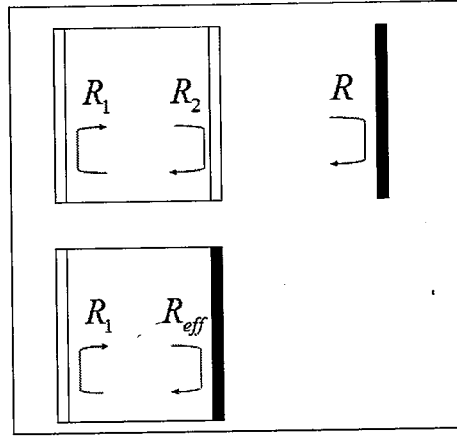


图 2-19: 通过引入等效反射率 R_{eff} 将光反馈等效到谐振腔镜面, 构成复合谐振腔来研究外部光反馈对 VCSEL 的影响

当反馈率较强(1%以上)时, 相位改变对等效反射率的影响可以忽略^[6], 此时外部光反馈对激光器性能的影响与反馈元件到出光表面的距离无关。如图 2-19 所示, 等效复合谐振腔两个镜面的反射率分别为 R_1 及 R_{eff} , 其中 R_{eff} 为等效反射率, 其表达式为^[91]:

$$R_{eff} = \left(\frac{\sqrt{R_2} + \sqrt{R}}{1 + \sqrt{R_2 R}} \right)^2 \quad 2-46$$

引入 R_{eff} 之后, 2-46 式可改写为:

$$J_{th} = J_s \exp \left\{ \frac{2}{g_N \Gamma_z} \left\{ \alpha_{in} + \frac{1}{L} \left(\alpha_{diff} d + \ln \left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_{eff}}} \right) \right) \right\} \right\} \quad 2-47$$

由 2-46 式和 2-47 式可以得到存在外部光反馈时 VCSEL 的阈值电流密度 J_{th} 与不存在外部光反馈时 VCSEL 的阈值电流密度 J_{th0} 之比为:

$$\frac{J_{th}}{J_{th0}} = \exp \left(\frac{\ln \frac{1}{R_1 R_{eff}} - \ln \frac{1}{R_1 R_2}}{L \Gamma_z g_N} \right) \quad 2-48$$

可以得出 J_{th}/J_{th0} 与外部光反馈率 R 的关系如图 2-20 所示, 计算所用数据取自表

2-2。

表 2-2：计算选取参数列表

参数	名称	值	单位
R_1	P-DBR 反射率	99.9%	—
R_2	N-DBR 反射率	99.7%	—
L	腔长	1	μm
η_i	内量子效率	1	—
Γ_z	限制因子	0.12	—
g_N	材料增益常数	2100	cm^{-1}
α_{in}	腔内吸收系数	10	cm^{-1}
λ	波长	980	nm

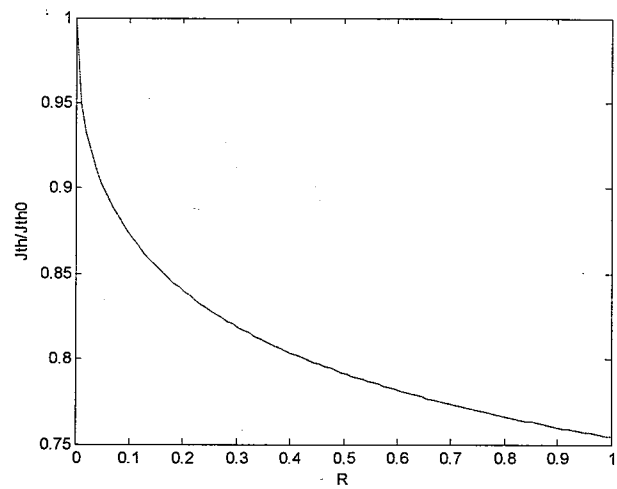


图 2-20： J_{th}/J_{th0} 与反馈率 R 的关系

当注入电流强度较低时，可忽略热效应的影响。此时 VCSEL 的输出功率 P_{out}

随注入电流 I 的变化关系为：

$$P_{out} = \frac{h\nu}{q} \eta_i \eta_d (I - I_{th})$$

2-49

其中 $h\nu$ 为光子能量； η_i 为内量子效率； η_d 为微分量子效率，当存在外部光反馈时其表达式为：

$$\eta_d = \frac{\ln\left(\frac{1}{R_1 R_{eff}}\right)}{2\alpha_{in} L + \ln\left(\frac{1}{R_1 R_{eff}}\right)} \quad 2-50$$

因此存在外部光反馈时 P_{out} 的表达式变为：

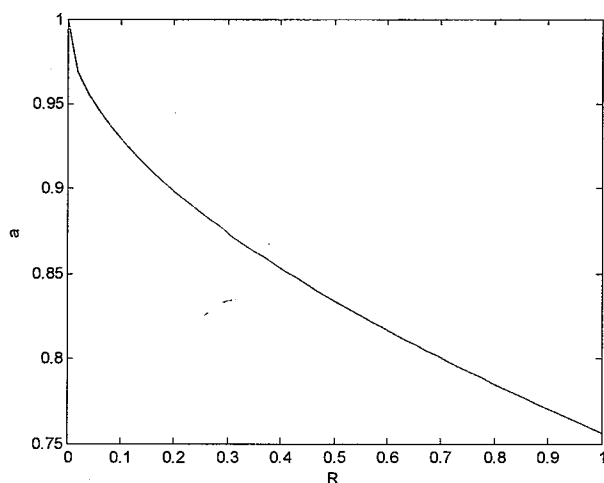
$$P_{out} = \frac{h\nu}{q} \eta_i \frac{\ln\left(\frac{1}{R_1 R_{eff}}\right)}{2\alpha L + \ln\left(\frac{1}{R_1 R_{eff}}\right)} (I - I_{th}) \quad 2-51$$

其中 $I_{th} = A_s J_{th}$ ， A_s 为有源区的面积。

VCSEL 的斜率效率定义为： $\frac{dP_{out}}{dI}$ ，由 2-51 式可知，存在外部光反馈时，VCSEL 的斜率效率为：

$$\frac{dP_{out}}{dI} = \frac{h\nu}{q} \eta_i \frac{\ln\left(\frac{1}{R_1 R_{eff}}\right)}{2\alpha L + \ln\left(\frac{1}{R_1 R_{eff}}\right)} \quad 2-52$$

由 2-52 式可知，外部光反馈对斜率效率的影响与对微分量子效率 η_d 的影响相同。设存在外部光反馈 VCSEL 的微分量子效率 η_d 与不存在外部光反馈时的微分量子效率 η_{d0} 之比 $\eta_d/\eta_{d0}=a$ ，计算得到 a 与反馈率 R 的关系示于图 2-21，所用数据取自表 2-2。

图 2-21: a 与反馈率 R 的关系

2.3.2 光反馈率与 980nm VCSEL 输出特性的关系: 实验研究

实验研究外部光反馈对 980nm VCSEL 振荡特性影响的装置如图 2-22 所示:

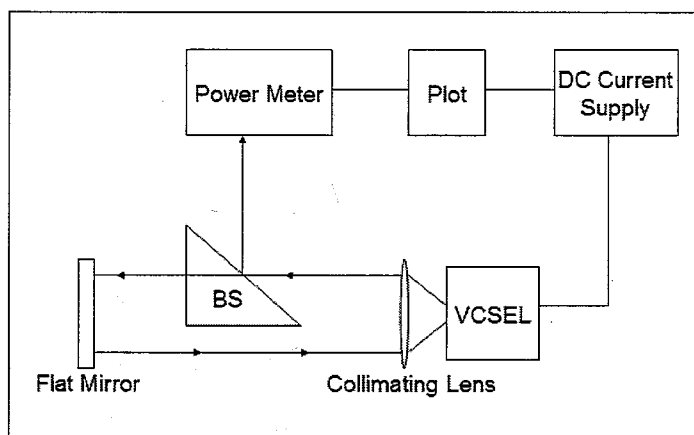


图 2-22: 研究反馈率与 980nm VCSEL 输出特性关系的实验装置示意图

VCSEL 发出的光束经双凸透镜准直后, 其中一部分被平面镜反射回谐振腔。通过放置在光路中的分束器将一部分光耦合输出至功率计, 用来测量 VCSEL 输出功率的变化, 分束器的透反比为 1: 1。实验中使用的 980nm VCSEL 直径为 300 μm , P-DBR 及 N-DBR 反射率分别为 99.9% 及 99.7%。平面镜到 VCSEL 的距离为 60mm, 对 980nm 波段的反射率为 70%。

VCSEL 输出的激光分为两部分, 一部分通过分束器耦合输出至功率计, 另一部分被反射镜反射回谐振腔形成外部光反馈。需要注意的一点是反射光有一部

分还会被分束器再次反射,无法回到 VCSEL 的谐振腔,因此虽然平面反射镜的反射率达到 70%,但计入各种光学原件的损耗得出实际反馈率仅为 10%左右。

图 2-23 所示为引入外部光反馈之前与之后 VCSEL 的 P-I 曲线。从图中可见引入外部光反馈之后,VCSEL 的阈值电流及斜率效率有所下降。当反馈率为 10%时,VCSEL 的阈值电流从 0.63A 下降至 0.59A,当注入电流为 0.8A 时,其输出功率较之无外部光反馈时下降了 8%,说明器件的斜率效率也发生了下降。实验结果有效验证了理论计算的结论。

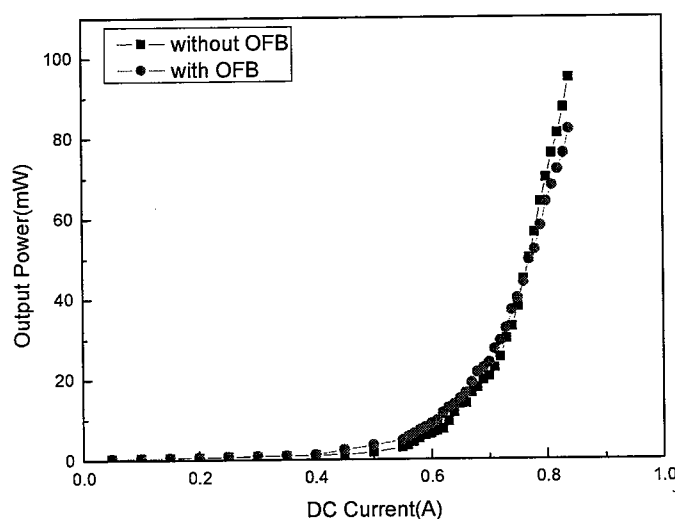


图 2-23 引入外部光反馈之前 VCSEL 的 P-I 曲线与反馈率为 10%时 VCSEL 的 P-I 曲线。

2.5 本章小结

本章主要对 980nm EP-VECSEL 谐振腔的相关理论进行了介绍,并对谐振腔结构进行了优化设计。首先对 EP-VECSEL 谐振腔改善光束质量的基础—模式选择 FP 谐振腔进行了介绍,通过与普通 FP 谐振腔的对比说明其如何实现谐振腔内的模式选择;分析了 EP-VECSEL 三镜面谐振腔中光场的变化过程,找出了对模式控制最为重要的谐振腔参数;基于复合腔理论,将三镜面谐振腔简化为两镜

腔, 分析了外腔反射镜反射率与 N-DBR 反射率对 980nm EP-VECSEL 的阈值电流、斜率效率及转换效率等关键特性参数的影响, 并以此为根据对 EP-VECSEL 谐振腔的关键参数进行了确定; 为了验证结构设计中复合腔理论的准确性, 在理论及实验两方面研究了一定反馈率水平下, 外部光反馈对 980nm VCSEL 阈值电流及斜率效率等振荡特性参数的影响。

第3章 980nm EP-VECSEL 器件结构设计研究

在前一章里，我们对 EP-VECSEL 进行模式控制的基础——三镜面谐振腔结构进行了理论分析和优化设计，在保证较低阈值电流的基础上适当调节了 EP-VECSEL 的 N-DBR 反射率；同时为了实现基模工作，对外腔结构参数进行了调节。但是，仅设计出外腔结构并不能完全保证 EP-VECSEL 同时实现高功率高光束质量输出，因为除了外腔结构，EP-VECSEL 的半导体器件部分结构设计也会对器件输出特性产生极大的影响。

EP-VECSEL 的半导体器件部分主要包括由外延生长形成的多量子阱有源区、DBR 反射镜、在器件制备中形成的用于实现电流注入的电极结构以及对电子和光子实现限制作用的氧化限制结构以及帮助散热的热沉结构。它们都会对 EP-VECSEL 的性能产生决定性影响：如果电极结构及氧化限制结构没有得到优化，就不能保证电流在有源区的均匀分布，而电流的不均匀分布会直接影响光场分布，使所谓的模式控制无从谈起；如果器件不具备高效的散热结构，那么高功率工作带来的大量废热就会使器件迅速升温，导致阈值电流升高、输出功率过快热饱和以及过多的波长漂移，这将极大降低器件的可靠性。本章的主要内容就是以改善器件输出特性为目标，对 980nm EP-VECSEL 的 DBR 反射镜，电极结构及散热结构进行优化设计。

3.1 980nm EP-VECSEL 器件基本结构

980nm EP-VECSEL 的整体结构及半导体器件部分示于图 3-1、3-2：

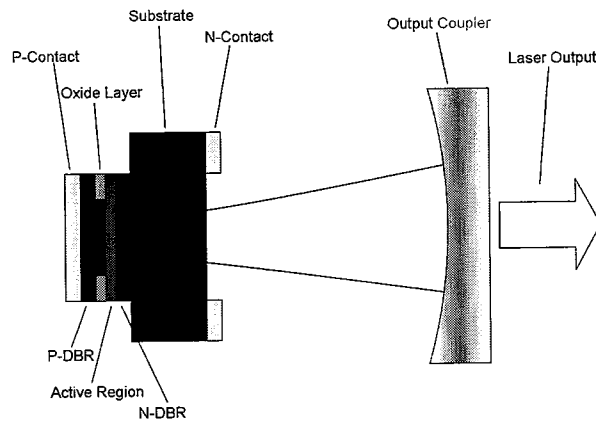


图 3-1: 980nm EP-VECSEL 整体结构示意图

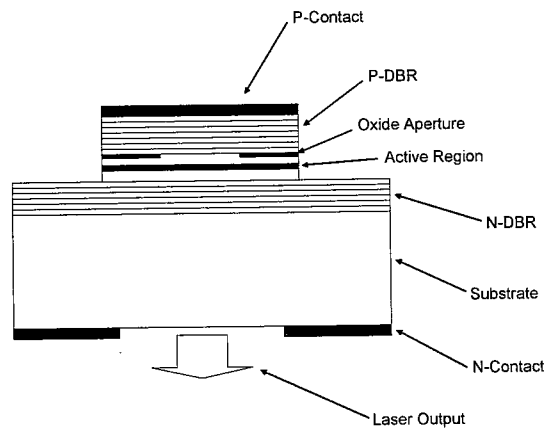


图 3-2: 980nm EP-VECSEL 半导体器件部分结构示意图

980nm EP-VECSEL 的半导体器件部分与 980nm 底发射 VCSEL 结构类似，其中多量子阱有源区的结构在第 2 章中已经介绍，在有源区的上下两侧是 P-DBR 及 N-DBR，有源区与 DBR 反射镜共同构成了光学长度为 $\lambda/2$ 整数倍的 PGS 谐振腔。采用 PGS 结构的谐振腔能够保证腔内光场驻波的波腹正好位于量子阱有源区处^[92]，如图 3-3 所示。DBR 反射镜是由数对光学厚度为 $\lambda/4$ 的高/低折射率薄膜构成，起到纵向光限制作用。通过增加高低折射率薄膜的对数，DBR 反射镜的中心反射率能够达到 99% 以上，如图 3-4 所示。

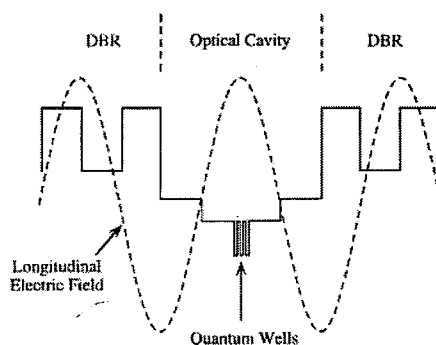


图 3-3: 采用 PGS 结构谐振腔后, VCSEL 腔内光场的纵向分布示意图^[93]。

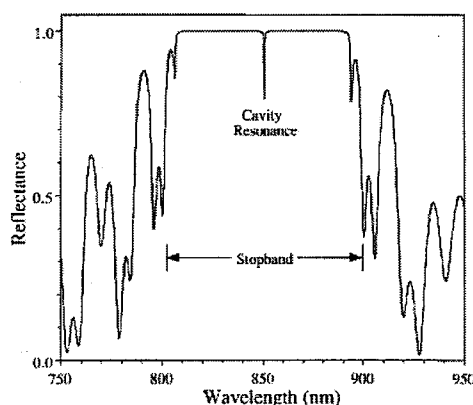


图 3-4: 典型的 DBR 反射镜反射谱, 中心的凹陷代表谐振腔的振荡模式^[93]。

除了采用 DBR 反射镜提供纵向光限制外, 还需要在谐振腔中引入横向的电、光限制结构。最为直接的手段是通过刻蚀柱状或者台面结构来对谐振腔进行横向限制^[94], 如图 3-2 中所示就是通过台面结构来限定谐振腔横向尺寸的。加强侧向限制的手段还包括在有源区与 P-DBR 之间引入一层高 Al 组分 (98%), 并通过选择性氧化技术形成由 Al_xO_y 组成的氧化限制层, 该层具有低折射率、低电导率, 能够进一步加强对电子及光子的横向限制。氧化限制层的引入在 VCSEL 的发展中曾经起到里程碑式的作用^[95]: 该结构在 VCSEL 中引入折射率导引, 提供了比空气台面及质子注入结构更好的电、光限制, 大大降低了器件的电流, 并缩小了谐振腔的尺寸。在器件的 N 面和 P 面, 分别有电极结构来实现电流的注入。出光窗口位于衬底表面, 并镀有增透膜以消除表面额外的光反射。

980nm EP-VECSEL 的半导体器件部分与 VCSEL 在结构上的主要区别在于其 N-DBR 具有更低的反射率, 这是为了加强三镜面谐振腔中两个副腔之间的耦

合,在上一章中对该问题已进行了详细阐述。在这一点上,EP-VECSEL 与 OPS-VECSEL 也有所不同:OPS-VECSEL 结构中一般只保留一个 DBR 反射镜,这是由于 OPS-VECSEL 采用光泵浦,必须去除其中一个 DBR 反射镜并在芯片表面引入泵浦光吸收窗口^[96]。由于采用电泵浦,EP-VECSEL 就不会受到泵浦光吸收问题的影响。保留部分 N-DBR 还能带来一系列好处:通过保留部分 N-DBR,EP-VECSEL 能够像 VCSEL 那样具有很大的纵模间隔,保持良好的单纵模特性;部分 N-DBR 的保留还能有效提高谐振腔镜面的等效反射率,进而有效降低阈值电流,这在上一章的计算结果中也有所体现;在底发射结构中,保留部分 N-DBR 能有效减少进入衬底的光能量,这对于 EP-VECSEL 的意义在于大大降低了由吸收而导致的腔内损耗。

综上所述,保留部分 N-DBR 是非常有必要的,并且我们也已经在第 2 章中通过计算确定了 N-DBR 应具有的最佳反射率。那么,如何使 N-DBR 在 980nm 波段具备需要的反射率?在下一节中我们将详细讨论 DBR 反射镜结构设计的问题。

3.2 DBR 反射镜结构设计

DBR 反射镜的设计是 EP-VCSEL 能否实现激射的关键,其反射率还直接影响着器件的阈值电流、微分量子效率及输出功率。性能良好的 DBR 反射镜应具有尽可能高的反射率、较小的光吸收及良好的导电、导热性。表 3-1 是几种常见 DBR 反射镜的特性比较。在 VCSEL 研制早期使用的金属膜反射镜^[10],由于其较大的吸收及相对较低的反射率现已很少使用。半导体 DBR 反射镜凭借其高反射率、低光吸收率以及低制作成本等优越性能在 VCSEL 器件中得到广泛应用,现在商用化的 VCSEL 绝大多数都采用了半导体 DBR 反射镜。介质膜 DBR 反射镜由于制作技术成熟,几乎不存在光吸收,在一些难以外延生长制作半导体 DBR 反射镜或者外延制作困难的器件中经常使用,但其需要特殊的电极制作方法。此外在一些特殊要求下,也可以把不同类型的 DBR 反射镜结合起来作为复合反射镜来使用。

表 3-1 几种常见的 VCSEL 用 DBR 反射镜

特性 种类	光吸收系数	反射率	导电性、 导热性	备注
金属膜	大	最高 98%	良好的导电性 及导热性	制作方便，反 射率在退火后 降低
介质膜 DBR 反射镜	无	数对即可达到 99%以上	不导电、散热 性差	制作工艺成熟
半导体 DBR 反射镜	小	数十对达到 99%以上	导电性比金属 膜差，散热性 能一般	可以通过外延 生长形成

3.2.1 低阻 DBR 结构的实现

980nm 波段 VCSEL 及 EP-VECSEL 一般采用 *GaAs* 基材料生长其外延结构。由于此波段的有源区材料晶格常数与 *GaAs* 非常接近，因此可采用外延生长技术十分成熟的 *AlGaAs/GaAs* 半导体 DBR 作为反射镜，并且仅需一次外延生长就可制作出一体化的谐振腔。*AlGaAs/GaAs* DBR 反射镜不仅可以提供高反射率，而且经掺杂后还可直接作为电流通路，进一步降低了器件结构的复杂性。

一般而言，在设计 DBR 反射镜时希望构成 DBR 的两种材料有尽可能大的折射率差，以提高反射率，这一点将在后面详细讨论。但是由于半导体材料的禁带宽度与折射率有近似线性的关系，折射率差越大的两种材料其带隙差也越大，因而两种半导体材料构成的同型异质结界面处能带不连续性也越大，在异质结界面处的势垒也就越高。这些能带结构中的势垒会阻碍电流在 DBR 中的流动，进而形成较大的串联电阻，特别是由于空穴具有更大的有效质量，在 P-DBR 中这种情况更为严重^[97]。较大的串联电阻使电流流过 DBR 时会生成更多的焦耳热，这会大大提高器件的内部温升，影响高功率工作的可靠性。为了降低串联电阻，就需要消除异质结界面处的势垒，改善能带的不连续性，实现导带或价带的连续。由半导体物理可知采用调制掺杂和组分渐变结构可以改变异质结间的能带结构，下面我们将分别说明利用调制掺杂和组分渐变结构来改善价带的不连续性，降低

半导体 DBR 电阻的方法。

虽然在理论上对任何一种渐变异质结都可以找到一种掺杂方式来实现价带的连续,但我们必须结合对实际器件性能的影响来考虑该问题。首先为了降低吸收损耗,掺杂浓度必须保持在较低水平;在保持较高反射率的同时尽量选择折射率差较小的两种材料制作 DBR,以此降低固有的能带不连续性;最后还要考虑外延生长的可操作性和可重复性。

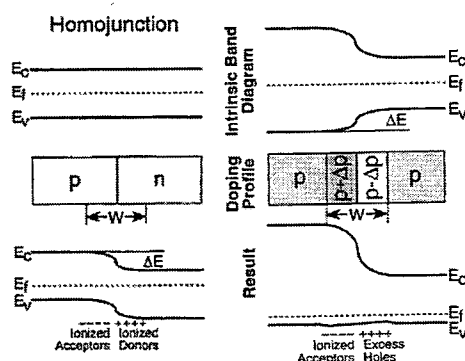


图 3-5: 掺杂的同质结能带示意图及阶梯型掺杂抛物线型渐变异质结能带示意图。

从泊松方程可知空间电荷会使半导体材料的能带发生抛物线型弯曲,因此一个简单的方法是使用空间电荷来补偿由抛物线型渐变形成的能带不连续。图 3-5 是掺杂的同质结能带示意图及阶梯型掺杂抛物型渐变异质结能带的示意图。图中左侧为突变型同质结,在界面处,空间电荷使能带发生抛物线型弯曲,由泊松方程可以求出耗尽层的宽度 \$W\$ 的表达式为:

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \Delta E}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right)} \quad 3-1$$

式中 \$q\$ 为电子电量, \$\epsilon_s\$ 为材料介电常数, \$N_A\$ 和 \$N_D\$ 分别为 P 型和 N 型的掺杂浓度, \$\Delta E\$ 为能带的不连续差值。从这个公式出发,我们可以通过选择合适的阶梯型掺杂浓度和抛物线型渐变宽度在同型异质结中实现价带的连续。如图 3-5 中右侧所示,如果我们可以同型异质结中引入一个 p-n 结型的区域,就可以用它对能带产生的弯曲来补偿由抛物线型渐变带来的能带弯曲,从而实现价带的连续。这里需要注意以下几个原则:首先,使用阶梯型掺杂后平均掺杂应为 P 型以

利于空穴的传输；其次，为了减少对光的吸收使用阶梯型掺杂后平均掺杂浓度应保持在较低水平；第三，为了补偿抛物线型渐变造成的能带不连续，需要在界面 $AlGaAs$ 层处引入有带负电的空间电荷(高 P 型掺杂)，在 $GaAs$ 层处引入有带正电的空间电荷(减少 P 型掺杂浓度)。例如在掺杂浓度为 $N_A=1\times 10^{18}cm^{-3}$ 的 P-DBR 中，要改善价带的不连续性，可以在界面处 $AlGaAs$ 层掺杂 $N_A+\Delta p$ ，在 $GaAs$ 层掺杂 $N_A-\Delta p$ ，然后由公式 3-1 计算出异质结中抛物线型渐变层宽度 W 。渐变层宽度 W 和掺杂量 Δp 的关系可以近似表示为：

$$\Delta p \approx \frac{4\varepsilon_s \Delta E_v}{qW^2} \quad 3-2$$

由上式可以看出 Δp 越大，渐变层宽度 W 越小。如对 $Al_{0.67}Ga_{0.33}As/GaAs$ DBR 来说， $\Delta E_v \approx 320meV$ ，当选择 $\Delta p=N_A$ 即在 $GaAs$ 层不主动掺杂时，计算得到的渐变层宽度 $W \approx 27nm$ 。

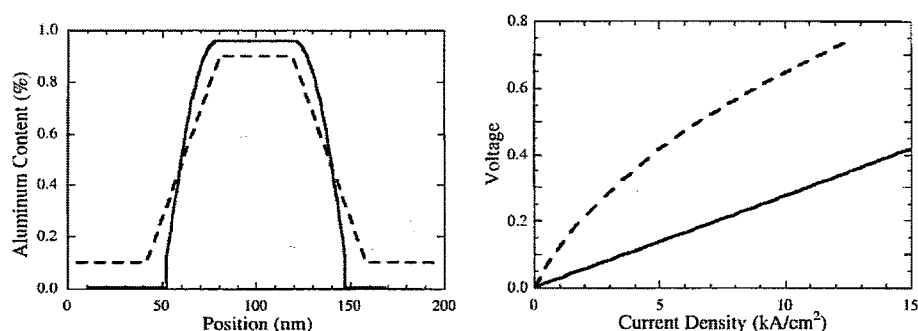


图 3-6：不同形式的组分渐变异质结构及对应的 I-V 曲线。

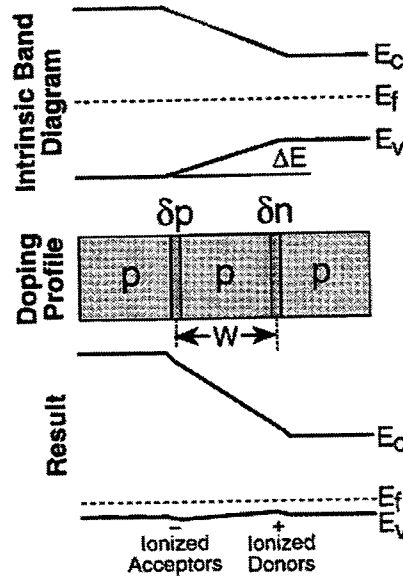


图 3-7: δ 型掺杂示意图。

另一种改善价带不连续的方法是采用组分渐变异质结构^[98]并引入 δ 型掺杂。图 3-6 所示是不同形式的组分渐变异质结构及对应的 I-V 曲线，图 3-7 是 δ 型掺杂示意图。这种方法的主要思路是在 DBR 反射镜高低折射率材料的界面处采用渐变的 Al 组分，并通过 δ 型掺杂在该渐变区两侧引入两个空间电荷层，由这两个空间电荷层组成类似平板电容的结构形成稳恒电场来补偿由线性渐变异质结构而产生的能带弯曲。使用简单电容模型中的 $Q \propto \Delta E_v / W$ 关系，可以得到渐变层两端的掺杂和渐变层宽度 W 的关系为：

$$\delta n = \delta p \approx \frac{\epsilon_s \Delta E_v}{qW} \quad 3-3$$

由 3-3 式确定了渐变层的厚度 W 之后，就可以据此确定掺杂浓度了。

3.2.2 DBR 反射率计算理论模型

DBR 反射镜是由两种折射率不同材料的薄膜交替构成的列阵结构，两种薄膜的光学厚度各为四分之一波长。实际上这种列阵相当于一个光栅，其主要原理就是由许多微小的反射叠加成为一个较大的净反射。在布拉格频率处，每个不同折射率材料间界面的反射会发生同相叠加。对于图 3-8 中的 DBR 反射镜，每个

周期有两个界面，每个界面的反射率为 r 。当净反射很弱时，每个界面“看”到的入射光场几乎相同，因此由 m 个光栅周期产生的净反射约为 $r_g \approx 2mr$ 。当反射较强时，入射光场在光栅周期内衰落，此时为较复杂的情况。当频率偏离布拉格条件时，从界面返回至光栅的反射逐步累积，相位失配逐渐变大，此时净反射将迅速减小。

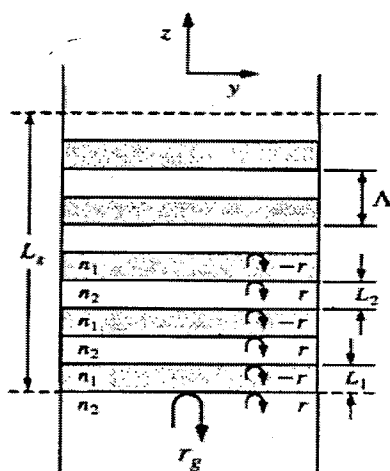


图 3-8: DBR 反射镜示意图。

计算图 3-8 所示 DBR 反射镜净反射率的方法主要采用传输矩阵法：如果已知各输出场，只要将表征每个 DBR 周期(实际上就是光栅的周期)的矩阵依次相乘，从输出端进行至输入端，就可以确定各输入场，从而确定反射率。在图 3-9 中，DBR 反射镜的各层及各层之间的界面分别用一个 T 矩阵来表征，DBR 反射镜的整体可用一个净传输矩阵 T_g 表征。

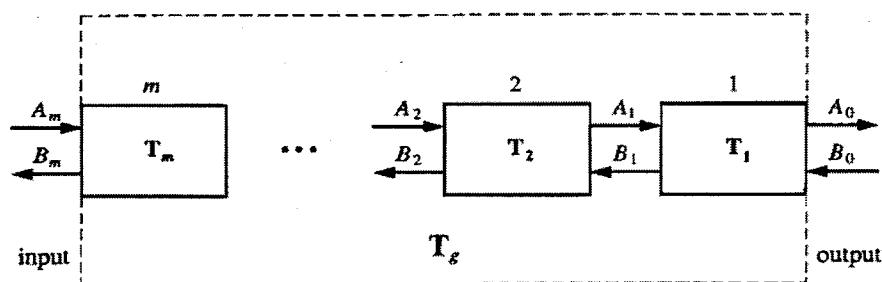


图 3-9: 用传输矩阵表征 DBR 各层及各层之间的界面。

由于 DBR 是周期性结构，因此只要确定一个周期内的 T 矩阵就能确定 T_g 矩阵。设从 DBR 反射镜第一层开始的材料分别是 2,1,2,1..., 则一个周期内将分

别包括: (1)2-1 界面; (2)长度为 L_1 的传输时延; (3)1-2 界面; (4)长度为 L_2 的传输时延。随后将遇到另一个 2-1 界面, 此时代表下一个周期的开始。可以得出每个周期内四个结点元素表达式如下^[76]:

$$T_{11} = \frac{1}{t^2} [e^{i\phi_+} - r^2 e^{-i\phi_-}] \rightarrow -\frac{1+r^2}{t^2} \quad 3-4$$

$$T_{21} = \frac{r}{t^2} [e^{i\phi_+} - e^{-i\phi_-}] \rightarrow -\frac{2r}{t^2} \quad 3-5$$

$$T_{12} = \frac{r}{t^2} [e^{-i\phi_+} - e^{i\phi_-}] \rightarrow -\frac{2r}{t^2} \quad 3-6$$

$$T_{22} = \frac{1}{t^2} [e^{-i\phi_+} - r^2 e^{i\phi_-}] \rightarrow -\frac{1+r^2}{t^2} \quad 3-7$$

其中 $\phi_{\pm} \equiv \beta_1^0 L_1 \pm \beta_2^0 L_2$, 在布拉格条件下的值为 π 或 0 。为了方便表达, 定义一个光栅周期的平均传输常数为:

$$\beta_{\pm}^0 = \frac{\beta_1 / n_1 \pm \beta_2 / n_2}{1/n_1 + 1/n_2} \rightarrow \frac{1}{\beta_+} \equiv \frac{1}{\beta} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2} \right], \quad \beta_- = 0 \quad 3-8$$

$$\alpha_{\pm} = \frac{\alpha_1 / n_1 \pm \alpha_2 / n_2}{1/n_1 + 1/n_2} \rightarrow \alpha_+ = \alpha, \quad \alpha_- = 0 \quad 3-9$$

在 3-8 式中, 定义 β_+ 是光栅的平均传输常数 β , 并且无论频率如何, β_- 总为 0 。当折射率差值较小时, $\beta \approx \beta_1 \approx \beta_2$ 。在 3-9 式中, 只有当每一层的损耗相同时, 才能应用该简化。

利用上面定义的传输常数, 可将 3-4~3-7 中的相位改写为 $i\phi_+ = i\beta\Lambda + \alpha_+\Lambda/2$ 及 $i\phi_- = \alpha_-\Lambda/2$, 其中 Λ 代表光栅周期的长度。在布拉格频率处, 每层的位相延迟为 $\beta_1 L_1 = \beta_2 L_2 = \pi/2$ 且 $\beta_0 \Lambda = \beta_1 L_1 + \beta_2 L_2 = \pi$ 。定义失谐参数为:

$$\delta \equiv \beta - \beta_0 \quad 3-10$$

无损耗时的相位项简化为：

$$\phi_+ = \pi + \delta\Lambda \quad \phi_- = 0 \quad 3-11$$

将 m 个长度为 Λ 的光栅单元相级联可得：

$$T_g = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix}^m \quad 3-12$$

对整个光栅的各个 T 参数采用附加的下角标 g ，并假定互换性成立即

$T_{11}T_{22} - T_{12}T_{21} = 1$ ，可以得到：

$$T_{g11} = (1 + im_{eff}\Delta) \cosh m\xi \quad 3-13$$

$$T_{g2} = \frac{T_{21}}{T_{11}} m_{eff} (1 + i\Delta) \cosh m\xi \quad 3-14$$

$$T_{g12} = \frac{T_{12}}{T_{22}} m_{eff} (1 - i\Delta) \cosh m\xi \quad 3-15$$

$$T_{g22} = (1 - im_{eff}\Delta) \cosh m\xi \quad 3-16$$

其中：

$$\pm\xi = \ln \left[\frac{1}{2}(T_{11} + T_{22}) \pm \sqrt{\frac{1}{4}(T_{11} + T_{22})^2 - 1} \right] \quad 3-17$$

$$\Delta = i \frac{T_{22} - T_{11}}{T_{22} + T_{11}} \quad 3-18$$

$$m_{eff} = \frac{\tanh m\xi}{\tanh \xi} \quad 3-19$$

下面将分析 ξ 、 Δ 及 m_{eff} 的物理意义：

第一个参数是分立的传输常数 ξ ，其取值与入射光的波长相关，并且通常为

复数。将其称为分立的传输常数的原因在于，图 3-9 中的光场在穿过下一个周期时要乘以 $e^{\pm\xi}$ 。例如，如果 ξ 在某些波长处是纯虚数，入射光场在穿过 m 个周期后仅获得相位变化 $m\xi$ ，没有经历衰减，从而实现了理想传输。产生这一现象的波长范围被称为电介质列阵的通带。如果 ξ 在某些波长处为实数，则光场在传输通过 m 个周期后将被衰减 $e^{\pm m\xi}$ 倍，从而导致高反射的发生，这些波长区域就被称作电介质列阵的阻带。在布拉格频率下有 $\xi \approx i\pi + 2r$ ，这表明经过每个周期后，场的相移为 π ，衰减为 e^{-2r} ，如果 r 足够大，并且周期足够多，则衰减将非常高，从而导致非常低的场传输及非常高的反射。

第二个参数定义为归一化的失谐参数 Δ ，用来测量相对于布拉格条件的偏离程度。当反射较小时，将 3-4 式~3-7 式与 3-10 式相结合，可得 $\Delta \approx \tan \delta\Lambda \approx \delta\Lambda$ 。在布拉格条件下，无损耗电介质列阵满足 $T_{11} = T_{22}$ ，则由 3-18 式有 $\Delta = 0$ 。

第三个参数定义了入射光场通过的有效周期 m_{eff} 。当衰减比较弱 ($\text{Re}\{\xi\} = 1$) 且周期数较小时， $\tanh$ 函数化简为其自变量，且 $m_{\text{eff}} = m$ 。当衰减较大时， m_{eff} 作为 m 的函数在 $m_{\text{eff}} = 1/\tanh \xi$ 处饱和，将该值乘以 Λ 就能得到场对电介质列阵的透入深度。

此时，净反射的计算就归结于对上述三个参数的计算，下面分析一种波长满足布拉格条件，没有损耗及增益的情况。在布拉格频率处有 $T_{11} = T_{22}$ ， $T_{21} = T_{12}$ 。

此时的互换条件简化为 $T_{11}^2 - T_{21}^2 = 1$ 。将该关系代入 3-17 式，可以得到 $e^{\pm\xi} = T_{11} \pm T_{21}$ ，由此可得 $\tanh \xi = T_{21}/T_{11}$ 。此时以上三个参数就可以简化为：

$$\xi = i\pi + \ln(-T_{11} - T_{21}) \quad 3-20$$

$$\Delta = 0 \quad 3-21$$

$$m_{eff} = \frac{T_{11}}{T_{21}} \tanh[m \ln(-T_{11} - T_{21})] \quad 3-22$$

代入 T_{11} 及 T_{21} 的表达式, 有:

$$\operatorname{Re}\{\xi\} = \ln\left(\frac{1+r}{1-r}\right) \approx 2r \quad 3-23$$

$$m_{eff} = \frac{1+r^2}{2r} \tanh\left[m \ln\left(\frac{1+r}{1-r}\right)\right] \approx \frac{1}{2r} \tanh(2mr) \quad 3-24$$

其中通过忽略 r 中的二阶和高阶项可获得 3-24 式。因此在布拉格波长处, ξ 的衰减部分大致等于一个周期内经历的反射率的总和。其有效周期数也与 $2r$ 成反比。也就是说, 当 r 增加时, 光场能够通过的周期数越来越少。当 m 增加至无穷大时, m_{eff} 在 $1/2r$ 值达到饱和。通常情况下整个列阵所需要的反射率为 $r_g = T_{g21} / T_{g11}$, 此时根据 3-13 式至 3-16 式, 可求得该反射率为:

$$r_g = \frac{T_{21}}{T_{11}} m_{eff} \frac{1+i\Delta}{1+im_{eff}\Delta} \quad 3-25$$

如果没有增益或损耗, 在布拉格频率处, 可以将该式简化为:

$$r_g = \tanh\left[m \ln\left(\frac{1+r}{1-r}\right)\right] \approx \tanh(2mr) \quad (\Delta = 0) \quad 3-26$$

如果用折射率来表示 r , 还可以将布拉格频率处的反射率写为:

$$r_g = \frac{1-(n_1/n_2)^{2m}}{1+(n_1/n_2)^{2m}} \quad (\Delta = 0) \quad 3-27$$

3.2.3 980nm EP-VECSEL N-DBR 结构设计

根据 3.2.2 中的理论模型, 就能够计算一定对数 DBR 反射镜对某一波长的净反射率。与一般的光学薄膜不同, 对于 980nm EP-VECSEL 结构中的 DBR 反射镜而言, 入射介质和出射介质均是半导体材料, 如下图所示:

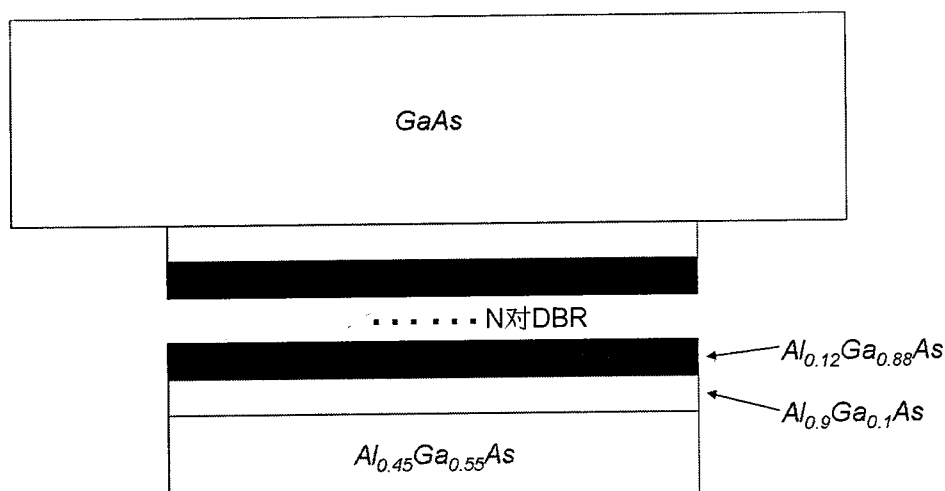


图 3-8: EP-VECSEL 结构中 $AlGaAs/GaAs$ DBR 示意图。

这样, 只要各层的折射率已知, 根据上一节中得出的 3-27 式, 就能通过控制层数和各层的厚度来使 DBR 反射镜在 980nm 波段具有一定的反射率。图 3-8 中各层材料的折射率示于表 3-1:

表 3-1: 材料折射率

材料	折射率
$GaAs$	3.523
$Al_{0.45}Ga_{0.55}As$	3.265
$Al_{0.12}Ga_{0.88}As$	3.454
$Al_{0.9}Ga_{0.1}As$	3.007

图 3-9 是计算得到的 20 对 N-DBR 在波长范围为 850nm-1100nm 的反射谱, 可见其反射谱中心波长为 980nm, 对应的中心反射率>98%。

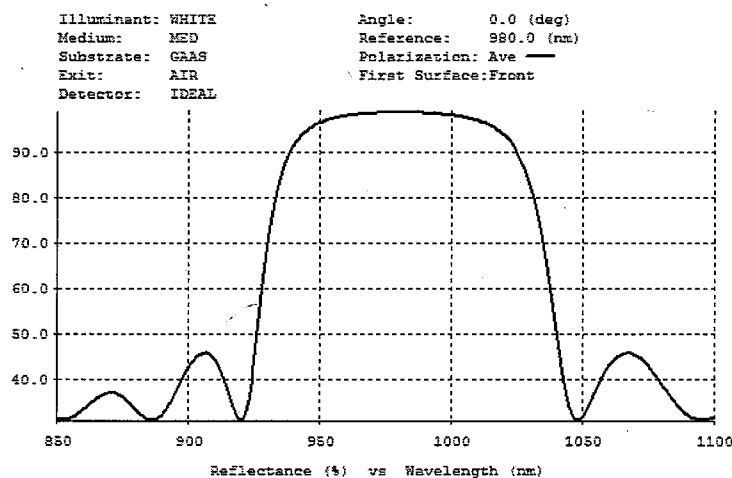


图 3-9: 计算得到的 20 对 N-DBR 反射谱。

图 3-10 是计算得到的 12 对 DBR 的反射谱, 可见此时反射谱的中心反射率约为 87%, 根据第 2 章中对最佳反射率的计算, 已经达到目标反射率。

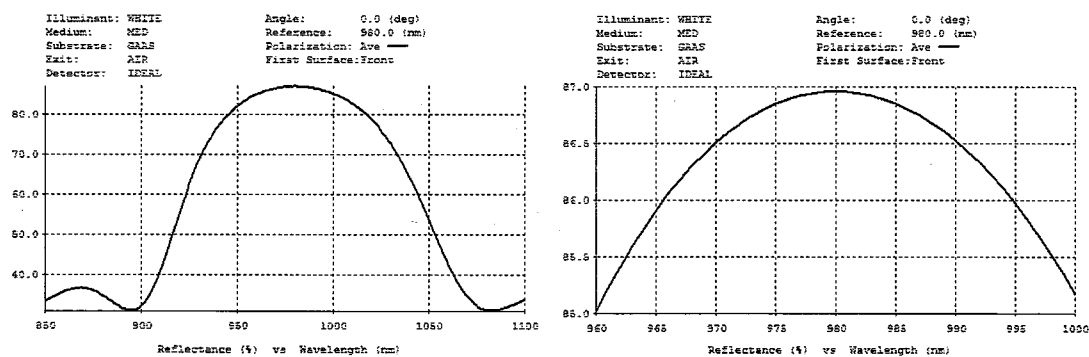


图 3-10: 计算得到的 12 对 N-DBR 反射谱。

通过上面的理论分析及对一定对数 DBR 反射镜反射率的计算, 就可以确定达到第 2 章中计算得到反射率所需的 N-DBR 对数为 12 对。

3.3 EP-VECSEL 电流扩散模拟

除了获得具有特定反射率的低电阻 DBR 反射镜之外, 电流注入及限制结构也是 980nm EP-VECSEL 器件设计中需要考虑的一个重要因素。EP-VECSEL 中的电流注入及限制结构与 VCSEL 相同, 主要包括电极结构及氧化限制结构。为了避免电流拥挤^[99]等影响器件输出特性的效应, 必须对这些与电流注入及限制有

关的结构进行合理设计。在本节中,通过对 EP-VECSEL 结构中的稳态电流扩散过程进行分析,并对器件有源区中的电流分布进行模拟,我们将找出与 EP-VECSEL 有源区中电流分布关系最为紧密的结构参数,并据此对器件结构进行优化。

3.3.1 EP-VECSEL 的稳态电流扩散模型

与 EEL 中的一维电流扩散^[100]不同,在图 3-2 所示的 EP-VECSEL 结构中,电流扩散为二维^[101]。因此在研究 EP-VECSEL 电流扩散时,必须同时考虑纵向及横向的扩散。

在稳态条件下,EP-VECSEL 结构中的电势分布由拉普拉斯方程决定:

$$\nabla \cdot (\sigma \cdot \nabla \cdot U) = 0 \quad 3-28$$

3-28 式中的 σ 是电导率,由以下矩阵决定:

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{pmatrix} \quad 3-29$$

对于 σ_x, σ_y 及 σ_z , 有:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\sum \sigma_i d_i}{\sum d_i} \quad 3-30$$

$$\sigma_z = \frac{J_c d_r}{V} \quad 3-31$$

σ_x, σ_y 及 σ_z 分别代表导电介质中 x, y 及 z 方向上的电导率; σ_i 代表多层结构中第 i 层的电导率; J_c 代表特定层中的一维电流密度; V 代表特定层两端的电压; d_r 和 d_i 分别代表某一层和第 i 层的厚度。当多层结构中的某一层两端加上了电压 V 之后,对应的 J_c 可以通过 SimWindows 软件来加以计算^[102]。

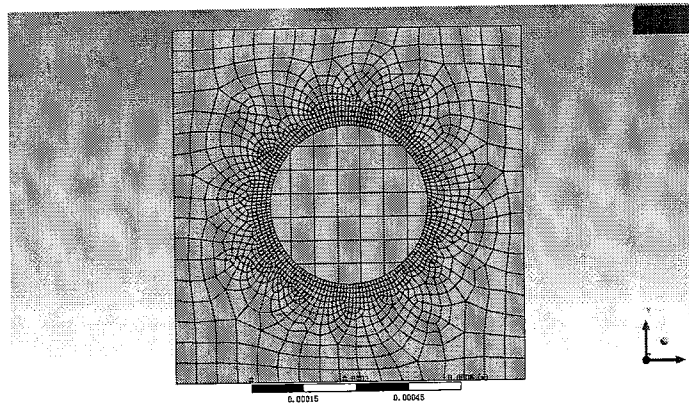
3.3.2 EP-VECSEL 有源区稳态电流分布模拟

基于三维有限元方法,我们建立了 EP-VECSEL 的电流扩散模型来分析器件有源区稳态电流分布与电流注入结构参数之间的关系。为了保证计算结果的精确度,该模型充分考虑了多层外延结构中边界及界面之间的电子散射效应,将 DBR、有源区及间隔层的材料参数均设置为各向异性。表 3-2 为模型中采用的材

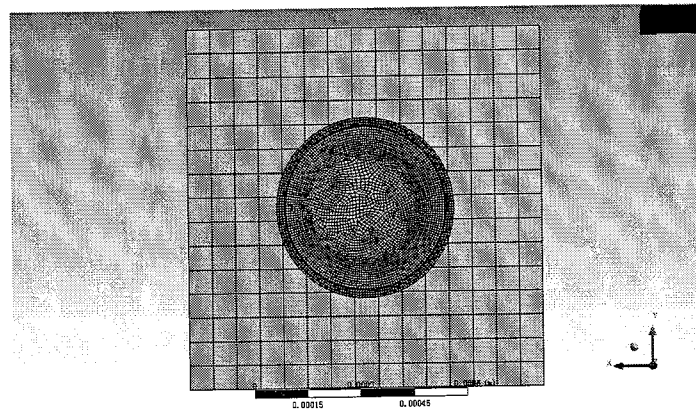
料参数。图 3-11 是已经生成网格结构的模型不同角度的示意图。根据计算重点的不同, 网格的疏密程度也有所不同, 在有源区及 DBR 区域的网格较密集, 而在衬底处则较为稀疏。

表 3-2: 各层厚度及电导率

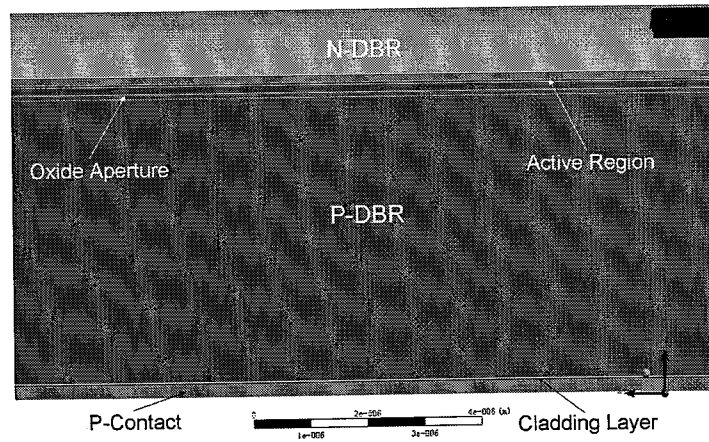
名称	电导率($\Omega \cdot \text{m}$) ⁻¹	厚度(μm)
P 面电极	$\sigma_x=\sigma_y=\sigma_z=1 \times 10^7$	0.2
盖层	$\sigma_x=\sigma_y=\sigma_z=4.23 \times 10^4$	0.04
P-DBR	$\sigma_x=\sigma_y=5.86 \times 10^3$ $\sigma_z=2.33 \times 10^2$	4.641
氧化孔径	$\sigma_x=\sigma_y=\sigma_z=3.66 \times 10^3$	0.07
Al_xO_y	$\sigma_x=\sigma_y=\sigma_z=1 \times 10^{-5}$	0.07
P 型间隔层	$\sigma_x=\sigma_y=2.14 \times 10^3$ $\sigma_z=1.17 \times 10^2$	0.127
有源区	$\sigma_x=\sigma_y=5.9 \times 10^2$ $\sigma_z=1.2 \times 10^2$	0.042
N 型间隔层	$\sigma_x=\sigma_y=3.19 \times 10^3$ $\sigma_z=2.14 \times 10^2$	0.127
N-DBR	$\sigma_x=\sigma_y=5.93 \times 10^4$ $\sigma_z=7.39 \times 10^3$	1.856
衬底	$\sigma_x=\sigma_y=\sigma_z=4.5 \times 10^4$	200
N 面电极	$\sigma_x=\sigma_y=\sigma_z=1 \times 10^7$	1



(a)N 面电极示意图



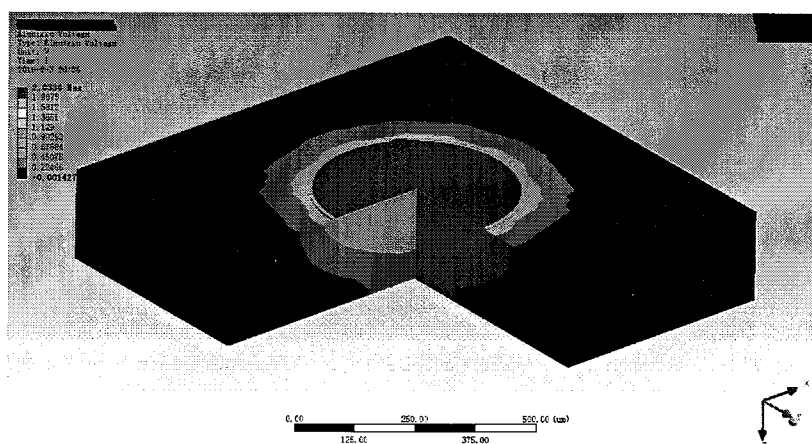
(b)P 面电极示意图



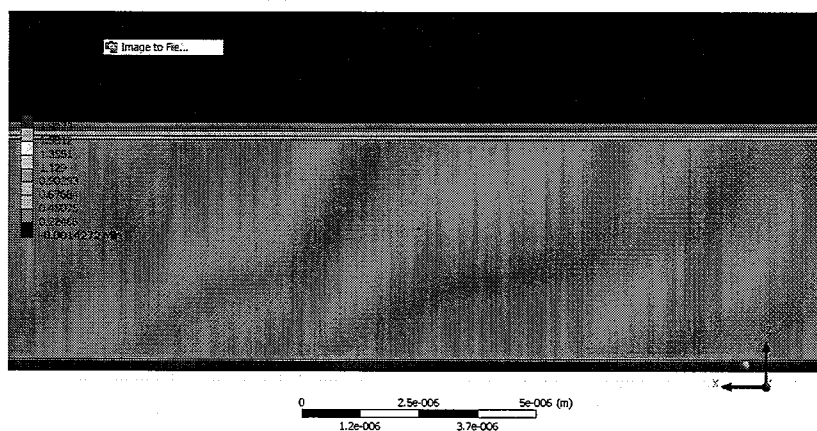
(c)剖面图

图 3-11: (a)(b) 生成网格的模型 (c) 模型剖面图。

为了确保在模拟中使用的材料 z 方向电导率参数是准确的, 首先有必要对模型的 I-V 特性进行初步的模拟。初步模拟的工况如下: 器件的台面直径设为 $450\mu\text{m}$, P 面电极的直径设为 $400\mu\text{m}$, 在有源区施加 1.265V 的平带电压并对该模型施加 5A 的电流边界条件, 得到的电压分布结果示于图 3-12(a)(b)。从图中可见此时器件两端的最高电压约为 2.03V 。同时我们对一个具有相同结构参数的 EP-VECSEL 半导体器件部分进行了 V-I 特性测试, 结果示于图 3-13。V-I 特性测试的结果显示当注入电流为 5A 时测到器件两端的电压为 2.03V , 与模拟结果相符, 说明了模拟中使用的材料电导率值是准确的。



(a)模拟得到的电压分布



(b)模拟得到的有源区附近的电压分布

图 3-13: 模拟得到的 EP-VECSEL 器件电压分布。

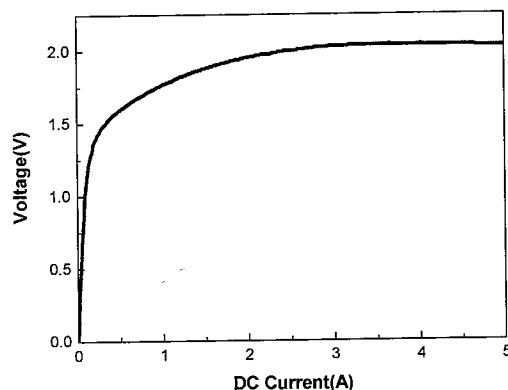


图 3-14: 实验测试得到的 EP-VECSEL 器件 I-V 特性。

为了研究氧化限制结构存在与否会对有源区电流分布产生怎样的影响, 我们模拟了存在氧化限制层及去除氧化限制层后 EP-VECSEL 有源区的电流分布, 图 3-15 是模拟结果。EP-VECSEL 的台面直径设为 $450\mu\text{m}$, 电压边界条件设定为 0.7V (去除平带电压后实际加在器件两端的电压), 氧化孔径分别设为 $450\mu\text{m}$ 及 $400\mu\text{m}$, 也就是分别对应不存在氧化限制层及存在氧化限制层的情况, P 面电极的直径设为 $400\mu\text{m}$ 。由图 3-15 可见有源区的电流扩散区域是由氧化孔径来决定的, 因此有源区的直径实际上就是氧化孔径的直径。在引入氧化限制层后有源区中心的电流密度有所增加, 但此时在有源区的边缘处出现了电流密度尖峰。这说明在器件工作中该位置会首先达到阈值, 这会导致环形光斑的出现, 不利于提高器件的光束质量。

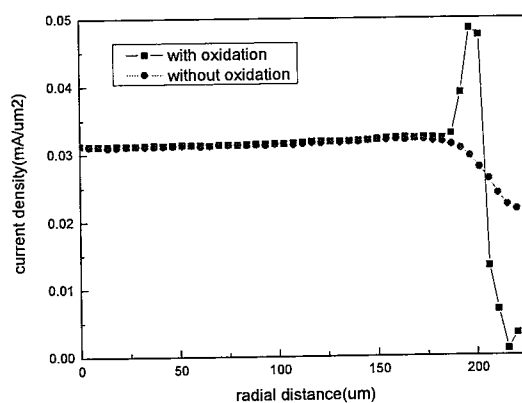


图 3-15: 模拟得到的存在及不存在氧化限制层时, EP-VECSEL 有源区的电流分布。

接下来将研究 P 面电极尺寸与电流分布的关系, 图 3-16 是具有不同 P 面电极的 EP-VECSEL 有源区电流分布模拟结果。氧化孔径的直径设为 $400\mu\text{m}$, P 面电极的直径分别设为 $300\mu\text{m}$, $350\mu\text{m}$ 及 $400\mu\text{m}$ 。从图 3-16 可见当 P 面电极直径变化时, 有源区的电流分布发生了程度较大的变化。P 面电极直径变得比氧化孔径小时, 3-15 中的电流密度尖峰就被抑制了, 而当 P 面电极变得更小时, 整个有源区的电流密度都呈现减小的趋势。因此根据模拟结果可以预期: 采用比氧化孔径直径稍小的 P 面电极, 能在不过分减小有源区电流密度的前提下, 有效抑制电流密度的不均匀分布, 进而改善器件的光束质量。

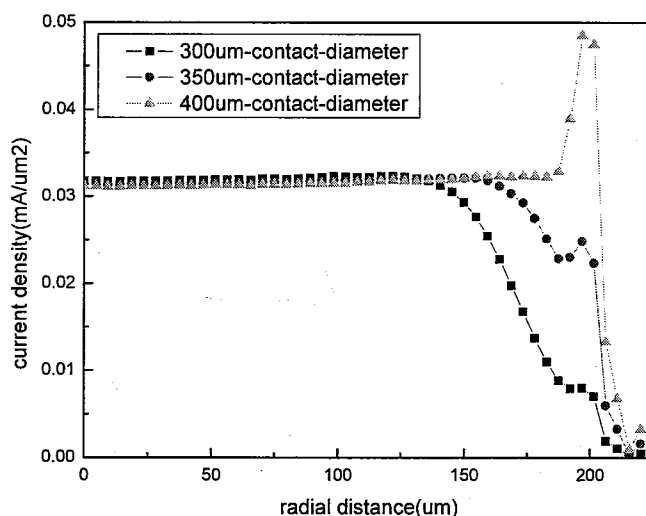


图 3-16: 具有不同 P 面电极直径的 EP-VECSEL 有源区电流分布模拟结果。

图 3-17 是具有不同衬底厚度的 EP-VECSEL 有源区电流分布模拟结果。模拟中采用的工况为: 衬底的厚度分别设为 $100\mu\text{m}$, $150\mu\text{m}$ 及 $200\mu\text{m}$, P 面电极和氧化孔径的直径分别为 $350\mu\text{m}$ 及 $400\mu\text{m}$ 。从图中可见当衬底厚度减小至 $100\mu\text{m}$ 时, 有源区的电流密度稍有降低, 而当衬底厚度为 $150\mu\text{m}$ 及 $200\mu\text{m}$ 时, 有源区的电流密度及分布形式基本相同。模拟结果说明, 与 P 面电极及氧化限制结构相比, 衬底厚度的改变对有源区的电流分布影响并不明显。

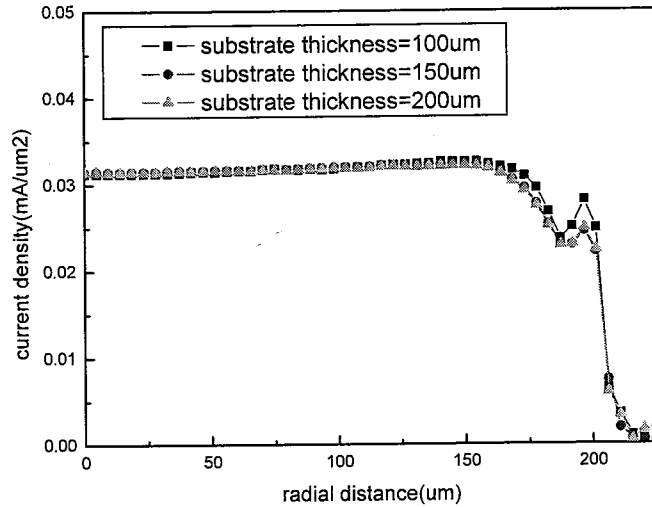


图 3-17: 具有不同衬底厚度的 EP-VECSEL 有源区电流分布模拟结果。

3.3.3 电流扩散模拟的实验验证: VCSEL 发散角的压缩

从上述电流扩散模拟结果来看, 对 EP-VECSEL 有源区稳态电流分布影响最大的电流注入结构参数是 P 面电极的直径, 对 P 面电极的适当调节能使有源区的电流分布更均匀。为了对这一结论进行实验验证, 我们分别制备了两种具有不同 P 面电极尺寸的 980nm 底发射 VCSEL, 具体的器件结构及制备过程见参考文献 [103]。之所以选择用 VCSEL 进行验证是因为在没有外腔镜的情况下, 对 VCSEL 远场分布的测试能够直接反映出有源区的电流分布情况。

这两种 VCSEL 的台面直径为 450 μm , 氧化孔径直径为 400 μm , P 面电极的直径分别为 400 μm 及 350 μm 。由于两种 VCSEL 的氧化孔径及衬底厚度均相同, 因此其远场分布如果有所区别, 主要原因就是由于具有不同的 P 面电极直径。

我们分别测试了注入电流为 1000mA、1500mA 及 2000mA 时两种 VCSEL 的远场分布, 其中 P 面电极 400 μm VCSEL 的结果示于图 3-18。从图中可见在三种注入电流水平下, 器件的远场均呈现环形分布, 这导致远场发散角很大, 光束质量很差。结合电流分布模拟的结果, 可以看出此时有源区边缘的电流尖峰分布的确会导致边缘处先达到阈值, 导致环形光斑的出现, 只有当注入电流逐渐加大

之后这种情况才有所改善。

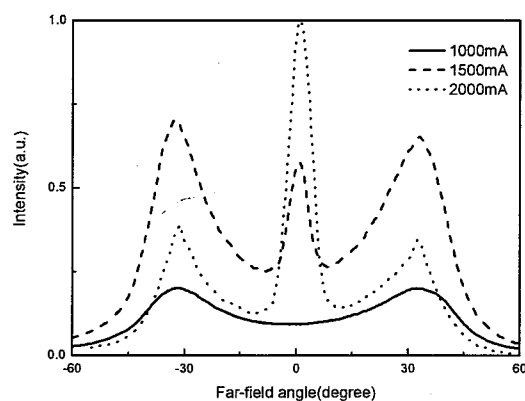


图 3-18: 实验测得三种不同注入电流水平下, P 面电极直径与氧化孔径直径均为 $400\mu\text{m}$ 的 VCSEL 远场分布。

P 面电极直径为 $350\mu\text{m}$ VCSEL 的远场分布测试结果示于图 3-19。可见此时器件始终呈现较小的发散角, 图 3-18 中的环形光斑得到了有效抑制。这主要是由于 P 面电极经调整后直径略小于氧化孔径, VCSEL 有源区边缘的电流密度尖峰被有效抑制, 因此环形光斑也随之消失, 器件的光束质量得到了有效的改善。从图中可见在三种注入电流水平下, 器件的远场发散角分别为 4.2° 、 6.9° 及 9° , 与图 3-18 相比有了明显改善。对 980nm 底发射 VCSEL 的 P 面电极直径与远场发散角关系的详细讨论见参考文献[104]。

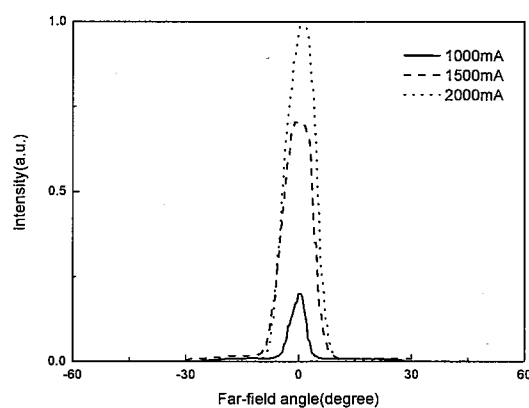


图 3-19: 实验测得三种注入电流水平下, P 面电极直径略小于氧化孔径 VCSEL 的远场分布。

由理论模拟及实验研究的结果可得出如下结论: 当氧化孔径的直径相对固定时, 能够影响到 EP-VECSEL 有源区电流分布的主要电流注入结构参数是 P 面电极的直径, 采用比氧化孔径略小的 P 面电极直径, 能在不过分降低有源区电流密度的前提下使其分布更为均匀, 进而有效改善光束质量。通过对具有不同 P 面电极直径的 VCSEL 的远场分布进行对比, 发现在氧化孔径直径相同时, 具有更小 P 面电极的 VCSEL 远场发散角更小。由于在第 2 章中我们将 EP-VECSEL 有源区的直径确定为 $300\mu\text{m}$, 那么根据本节的结论, P 面电极直径应在 $250\mu\text{m}\sim 300\mu\text{m}$ 之间, 以保证有源区电流的均匀分布。

3.4 EP-VECSEL 热特性分析

由于 980nm EP-VECSEL 需要达到较高的输出功率以满足作为泵浦源的应用需求, 因此除了优化电流注入结构之外, 还必须考虑其散热特性。因为对于高功率器件而言, 高注入电流意味着有源区及 DBR 会产生很多废热, 如果这些废热不能有效的导出, 有源区温度将会随注入电流增加迅速升高, 导致器件过早热饱和。而且对于半导体激光器而言, 器件的寿命随温度的升高会呈指数关系递减^[105], 因此有源区温度过高还会影响器件的可靠性。

为了对 EP-VECSEL 及 VCSEL 内部的电流及热流进行分析, 研究者提出过许多模型。早期的研究工作假设 VCSEL 有源区的电流分布和温度分布是均匀的, 这种方法会导致很大的误差; Nakwaski^[106]等人用电学分析的方法分析了 VCSEL 的电热特性; Chen^[107]等人采用控制体积法分析了 EP-VECSEL 的电-热特性, 这也是对 EP-VECSEL 进行该方面研究的首次报道; Choi^[108]等人采用有限元方法分析了 850nm VCSEL 的热特性。这些工作都取得了一些理论及实验上的结果, 但以上工作采用的均为二维模型, 和实际器件的三维结构仍有较大差异。尤其是在高输出功率的器件中, 由于注入电流较高, 因此废热生成量很大, 此时十分需要采用三维模型来进行分析。

3.4.1 EP-VECSEL 中的热扩散理论模型

在底发射 EP-VECSEL 结构中，主要的热源有两部分：一是有源区的非辐射复合所产生的热量；二是电流流过器件各部分，包括有源区、DBR 反射镜及衬底所产生的焦耳热。由于热流要流过由多层薄膜材料构成的 DBR 反射镜，因此在 EP-VECSEL 中的热流扩散机制比 EEL 更为复杂。

电流流过 EP-VECSEL 各层所产生焦耳热 Q_j 的表达式为：

$$Q_j = \sigma_x \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \sigma_y \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 + \sigma_z \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 \quad 3-32$$

由于器件一般工作在阈值电流以上，此时由于有源区非辐射复合及自发发射吸收所产生热量的表达式如下^[109]：

$$Q_a = \frac{V_b(1-\eta_{sp}f)}{d} [J_{th} + (J - J_{th})(1-\eta_i)] \quad 3-33$$

在上式中 d 代表有源区的厚度； V_b 代表有源区两端的电压降； J 代表注入电流密度； J_{th} 代表阈值电流密度； η_{sp} 及 η_i 分别代表自发发射及受激发射的内量子效率； f 代表自发发射逃逸因子^[107]。 J_{th} 与温度之间服从 Arrhenius 关系：

$$J_{th} = J_{th}(300K) \exp((T - 300K)/T_0) \quad 3-34$$

其中 $J_{th}(300K)$ 代表有源区温度为 300K 时的阈值电流密度； T_0 是特征温度。 η_{sp} 及 η_i 与温度的关系与微分量子效率随温度变化的关系类似^[110]：

$$\eta_{sp(i)}(T) = \eta_{sp(i)}(300K) \exp[-(T - 300K)/2T_0] \quad 3-35$$

下面将会导出有源区自发发射逃逸因子 f 的表达式：

EEL 的自发发射逃逸因子表达式在文献[109]已经有所表述，与 EEL 结构不同，在 EP-VECSEL 或 VCSEL 结构中，自发发射的传输是由多层电介质结构，也就是 DBR 结构决定的。图 3-20 是为了分析自发发射逃逸因子而建立的一个简化模型，该模型假设谐振腔上下两个反射镜都由无限多对数的电介质构成，并进一步假设自发发射是各向同性的。虽然在微腔中自发发射并不是各向同性的，但如果自发发射的位相方程已知的话，那么这一假设对该模型而言是合理的。

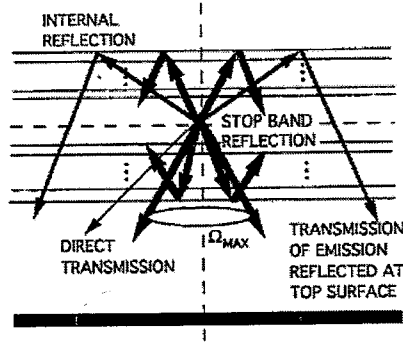


图 3-20: 分析自发发射逃逸因子的简化模型^[107]。

在 $\lambda/4$ 多层薄膜结构具有最强的反射时, 各层的位相差 $2\pi nh\cos\theta/\lambda$ 变为 $\pi/2 \pm \Delta$, 其中 Δ 代表高反带的半宽, n 代表折射率, h 是 $\lambda/4$ 层的实际厚度。当光线垂直入射时有^[111]:

$$\Delta = \sin^{-1}(\mathfrak{R}^{1/2}) \quad 3-36$$

这里 $\mathfrak{R}$ 代表 $AlGaAs/GaAs$ 界面的反射率, 对于该多层结构, 能够被反射光线的最大入射角可由下式得出:

$$2\pi nh / \lambda = \pi / 2 \quad 3-37$$

$$\cos\theta_m = (\pi / 2 - \Delta) / (2\pi nh / \lambda) = 1 - 2\Delta / \pi \quad 3-38$$

大部分逃逸的自发发射都被衬底或电极结构吸收了, 这部分由吸收而产生的热量由于距离有源区较远, 并没有计入总热源中。

最终得到的自发发射逃逸因子的表达式为:

$$f = 1 - 2 \sin^{-1}(\mathfrak{R}) / \pi \quad 3-39$$

对于 $AlGaAs/GaAs$ 构成的 DBR 反射镜而言, $\Delta = 0.08$, $f = 0.95$ 。

在 EP-VECSEL 结构中的稳态热传输方程是泊松方程:

$$k\nabla^2 T + q = 0 \quad 3-40$$

上式中的 k 是热导率, 由下面的矩阵决定:

$$k = \begin{pmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{pmatrix} \quad 3-41$$

$$k_x = k_y = \frac{\sum k_i d_i}{\sum d_i} \quad 3-42$$

其中 k_x , k_y 及 k_z 分别代表 x , y 及 z 方向的热导率。 k_i 代表多层薄膜结构中第 i 层的热导率, k_z 是一个测量值, 远低于 k_x 及 k_y ^[112]。最终得到 EP-VECSEL 内部的热产生率 q 为:

$$q = Q_j + Q_a \quad 3-43$$

3.4.2 EP-VECSEL 热特性模拟

这里我们使用了与 3.3 节相同的三维有限元方法来模拟 EP-VECSEL 的热特性。通过在模型中同时导入电导率及热导率参数, 并设置合理的边界条件, 就能够通过热—电耦合分析方法来得得到器件有源区的温度分布。模拟中使用的材料参数及器件特性参数分别列于表 3-3 及 3-4。

表 3-3: 热特性模拟中使用的材料参数

名称	热导率(Wm ⁻¹ K ⁻¹)
P 面电极	$k_x=k_y=k_z=315^a$
盖层	$k_x=k_y=k_z=44^b$
P-DBR	$k_x=k_y=19.39^b$ $k_z=10^c$
氧化孔径	$k_x=k_y=k_z=39.6^b$
Al _x O _y	$k_x=k_y=k_z=20^a$
P 型间隔层	$k_x=k_y=k_z=11.3^b$
有源区	$k_x=k_y=k_z=18.64^b$
N 型间隔层	$k_x=k_y=k_z=11.3^b$
N-DBR	$k_x=k_y=19.45^b$ $k_z=11^c$

衬底	$k_x=k_y=k_z=44^b$
N 面电极	$k_x=k_y=k_z=315^a$

^a参考文献[113]

^b参考文献[114]

^c参考文献[112]

表 3-4: 热特性模拟中使用的结构参数及物理量

参数名称	值
氧化孔径直径	300 μm
中心波长	980nm
有源区电压降 V_b (V)	1.265
室温自发发射内量子效率 $\eta_{sp}(300\text{K})$	0.9 ^a
受激发射内量子效率 η_i	1 ^b
自发发射逃逸因子 f	0.95 ^c

^a参考文献[115]

^b参考文献[78]

^c参考文献[107]

图 3-20 是模拟得到的焊接在陶瓷热沉上的芯片稳态温度分布，陶瓷热沉的温度边界条件设定为 15℃。图中的两种情况分别代表电流边界条件设为 6A 及 15A 的情况。随着注入电流由 6A 增加至 15A，模拟得到的最高温升由 114.66℃ 上升至 264.14℃，可见陶瓷热沉由于热导率较低(270Wm⁻¹K⁻¹)，无法提供较好的散热效果。

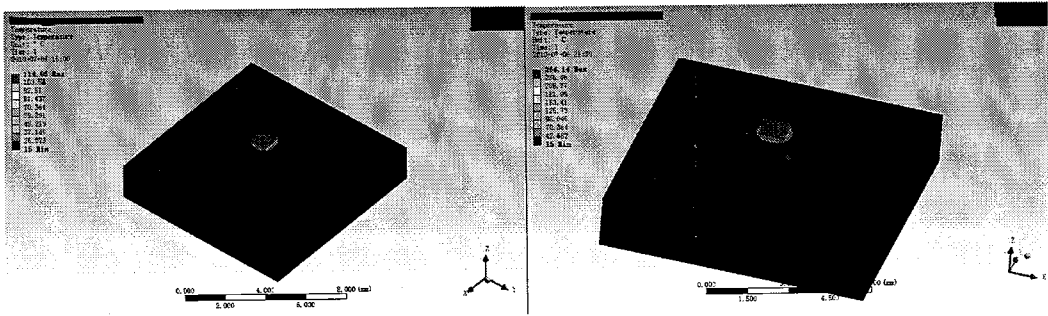


图 3-20: 模拟得到的陶瓷热沉条件下的芯片温度分布(左)6A(右)15A。

图 3-21 是将热沉材料换为表面镀金的金刚石热沉之后，模拟得到的芯片稳态温度分布。这里的电流边界条件为 15A，可见与图 3-20 相比最高温升下降至

226.27℃，金刚石热沉的引入有效降低了芯片的温升。

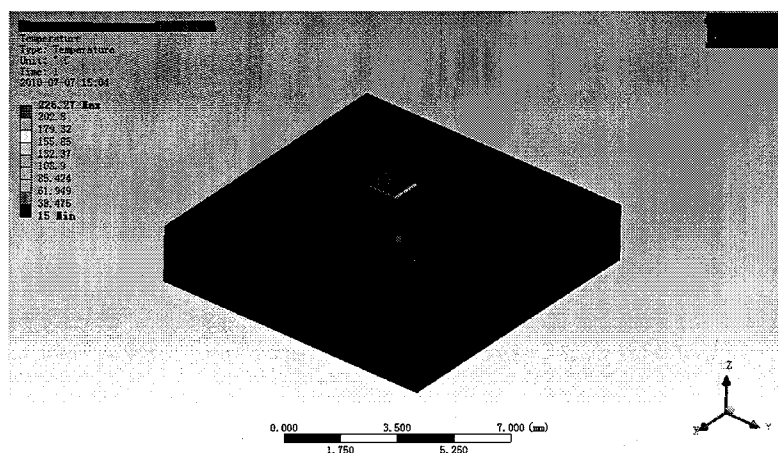


图 3-21: 模拟得到的金刚石热沉条件下芯片温度分布。

基于上述模型，我们还初步模拟了 EP-VECSEL 10×10 列阵的温度分布，得到的结果示于图 3-22，图中每个单元器件的有源区直径设为 $100\mu\text{m}$ 。从图中可见由于存在热串扰，每个单元的温度分布都不是独立的，而是互相影响的。由于将电流边界条件限制在阈值附近(1A)并且热沉材料选为金刚石，得到的最高温升为 22°C 。对于列阵器件而言，如何改进散热结构是更为重要的问题。

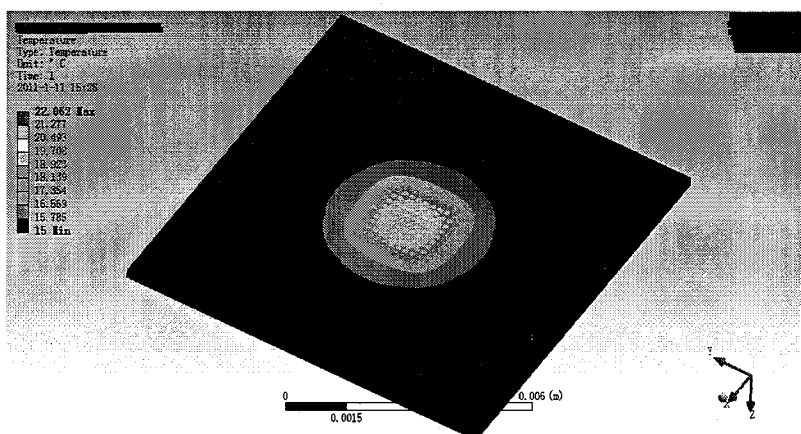


图 3-22: 模拟得到的 EP-VECSEL 10×10 列阵温度分布。

3.5 本章小结

本章主要对 980nm EP-VECSEL 的半导体器件部分进行了结构设计。对 DBR 反射镜结构进行了优化：介绍了如何通过掺杂及组分渐变技术降低 DBR 反射镜

的电阻；基于传输矩阵理论分析了 DBR 反射镜对某一波段反射率的计算方法，并调整了 EP-VECSEL 的 N-DBR 对数使其在 980nm 波段具有指定的反射率。对 EP-VECSEL 电流注入结构及散热结构进行了优化：采用三维有限元方法分析了器件的电流注入结构及电流限制结构与有源区电流分布的关系；通过调节 P 面电极尺寸使有源区电流分布更为均匀，并通过测试具有不同 P 面电极直径 VCSEL 的远场分布验证了理论模拟的结果；最后采用热—电耦合的方法分析了 EP-VECSEL 在一定边界条件下的芯片温度分布，并初步模拟了 EP-VECSEL 阵列的温度分布。

第4章 980nm EP-VECSEL 器件制备及输出特性研究

在前面两章的工作中,围绕 980nm EP-VECSEL 的研制,以实现高功率高光束质量输出为目标,对器件的谐振腔结构及半导体器件部分进行了优化设计。在理论分析及结构优化完成之后,所有与 980nm EP-VECSEL 器件结构有关的参数已经齐备,接下来的工作重点主要就是解决器件制备工艺中的关键技术问题,完成器件的研制。

本章将对 980nm EP-VECSEL 的器件制备工艺及输出特性进行研究。通过对器件制备工艺中的湿法刻蚀、选择性氧化等关键技术进行一系列改进,研制出一种具有单片集成结构的 980nm EP-VECSEL,并对研制出的器件输出特性进行了初步测试及分析。同时,根据第2章中给出的与 EP-VECSEL 振荡特性参数有关的理论模型,对 980nm 底发射 VCSEL 列阵的单元结构进行了优化,并对结构优化之后器件的输出特性进行了测试。

4.1 980nm EP-VECSEL 器件制备工艺

4.1.1 外延结构

980nm EP-VECSEL 的器件结构在第3章中的图 3-1 及图 3-2 中已经给出。器件的外延结构采用金属有机化合物化学气相淀积(Metal-organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)方法生长而成。图 3-1 中红色部分代表器件的有源区,具体结构已经在第2章中给出,是由 3 个 $In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs_{0.92}P_{0.08}$ 量子阱构成,其中 $In_{0.2}Ga_{0.8}As$ 为阱层, $GaAs_{0.92}P_{0.08}$ 为垒层。采用 $GaAs_{0.92}P_{0.08}$ 作为垒层,能有效的提高势垒高度,形成对载流子较好的限制,改善器件的温度特性^[116]。P-DBR 作为高反射率镜面,由 30 对 $Al_{0.9}Ga_{0.1}As/Al_{0.1}Ga_{0.9}As$ 构成,反射谱中心波

长为 980nm, 反射率为 99.9%, 高低折射率材料界面引入了组分渐变层以降低串联电阻^[117]; 根据第 3 章中的计算, N-DBR 作为中间镜面, 反射率与普通 VCSEL 相比有所降低, 由 12 对 $Al_{0.9}Ga_{0.1}As/Al_{0.1}Ga_{0.9}As$ 构成, 反射率约为 87%。在 P-DBR 与间隔层之间有一层厚度为 30nm 的 $Al_{0.98}Ga_{0.02}As$ 层, 该层主要用于制备氧化限制层。

4.1.2 器件制备工艺流程

980nm EP-VECSEL 的优点之一在于其半导体器件部分的制备工艺与普通 VCSEL 完全兼容:

1. 减薄: 采用机械或化学减薄的方法把外延片减薄到 400 μ m 左右以利于加工。
2. 光刻: 采用紫外接触式曝光机及正性光刻胶进行光刻, 将光刻板上预先设计好的图形转移印到芯片表面并进行加热固化。
3. 湿法刻蚀: 在光刻胶的保护下, 使用无晶向选择性的腐蚀液对芯片进行湿法刻蚀, 刻蚀到正好超过高 Al 组分层即可。
4. 选择性氧化: 使用精密温度控制装置来控制氧化炉的温度, 使用一定流量的 N_2 气体携带水蒸气进入氧化炉工作区对高 Al 组分层进行氧化, 氧化深度由氧化时间来控制。
5. 制备 SiO_2 绝缘膜: 采用磁控溅射的方法制备 SiO_2 绝缘膜, 防止器件在焊接时短路。 SiO_2 绝缘膜的厚度由膜厚监控仪进行实时监测, SiO_2 绝缘膜的厚度应适当, 较薄时易存在针孔产生漏电流, 较厚则应力较大影响器件性能。
6. P 面电极制作: P 面电极即在芯片的 P 面形成的欧姆接触。可以用做 P 面电极的金属材料种类较多, 常见的有: $Zn-Au$, $In-Au$, $Cr-Au$, $Ti-Pt-Au$, $In-Ag-Au$, $Ti-Ag-Au$, $Ti-Au$ 等, 性能各有优劣。我们选择的是 $Ti-Pt-Au$, 各层分别起到互相加强附着力的作用。P 面电极采用 ZZSX-500 型电子束设备进行制备。
7. 衬底减薄、抛光: 为了减少衬底表面的吸收和散射损耗, 同时也是为了便于在衬底表面镀制光学膜, 使用 UNIPOL-802 型精密研磨抛光机采用机械减薄的方法将外延片减薄到 150 μ m, 然后使用抛光液对衬底表面进行抛光。
8. 双面对准光刻及制备增透膜或高反膜: 使用双面对准光刻机在衬底表面制

作出与 P 面图形对准的出光窗口, 并使用 lift-off 工艺在出光窗口上镀制增透膜或高反膜。

9.N 面电极制作: 采用 DM-450A 型真空镀膜机设备在芯片的 N 面热蒸发 $Au-Ge-Ni$ 合金, 并在 RTP-500 快速热处理装置在 400°C 合金 60 秒, 这样就能够 N 面获得欧姆接触。

10.器件封装: 将制作完成的芯片用解理划片机解理, 解理之后的管芯首先需要经过测试系统进行筛选, 之后采用热压焊的方式焊接到镀 In 或 Au-Sn 的铜热沉上, 完成引线之后采用 TO-3 或 TO-56 管壳封装。

在 980nm EP-VECSEL 的整个工艺流程中, 对最终的器件输出特性影响较大步骤主要有湿法刻蚀、选择性氧化及表面镀制光学膜工艺, 我们对这些工艺步骤进行了深入研究, 并对工艺流程进行了适当调整以获得更为理想的实验结果。

4.1.3 湿法刻蚀工艺

在外延片上制作激光器结构时, 必须借助于刻蚀技术在芯片表面制成各种形状的结构。刻蚀就是采用光刻工艺形成的抗蚀剂(光刻胶)图形作为掩膜, 在芯片上进行细微加工的技术。刻蚀可以分为干法刻蚀和湿法刻蚀两种: 干法刻蚀由于可以精确控制刻蚀深度, 并且在刻蚀过程中基本不会发生侧蚀现象, 因此广泛应用于制作小口径($<100\mu\text{m}$)VCSEL 器件^[93]。但是干法刻蚀设备十分昂贵, 使用维护费用很高, 并且在干法刻蚀过程中会对芯片表面及刻蚀出的侧面造成损伤。湿法刻蚀本质上是化学反应, 虽然会出现侧蚀现象, 但是对芯片表面的损伤较小, 而且制作大尺寸结构时侧蚀影响也较小, 因而适合用于制作大口径、高功率 VCSEL 器件^[118, 119]。由于这里我们要制备的 EP-VECSEL 的台面直径较大($350\mu\text{m}$), 因此我们选择湿法刻蚀来制成最初的圆形台面结构。

目前, 湿法刻蚀工艺中常用的是由 $K_2Cr_2O_7:HBr:CH_3COOH=1:1:1$ 配比而成的腐蚀液, 这种溶液的特点是: 它与光刻胶完全没有作用; 可通过温度来控制反应速度, 且重复性好; 生成的反应物可溶于腐蚀液, 避免不溶性生成物对芯片表面的沾污。但是该溶液用于腐蚀多层结构, 例如 VCSEL 中的多层 DBR 结构时, 会出现在圆形台面的两侧腐蚀速率不同的现象。腐蚀速率不同导致的直接后果就是圆形台面两侧的腐蚀深度不同, 其中一侧的 $Al_{0.98}Ga_{0.02}As$ 层就有可能没有露

出,这就导致选择性氧化工艺中台面的一侧经常无法形成氧化限制层。图 4-1 所示就是圆形台面一侧(左侧)没有形成氧化限制层的情况。

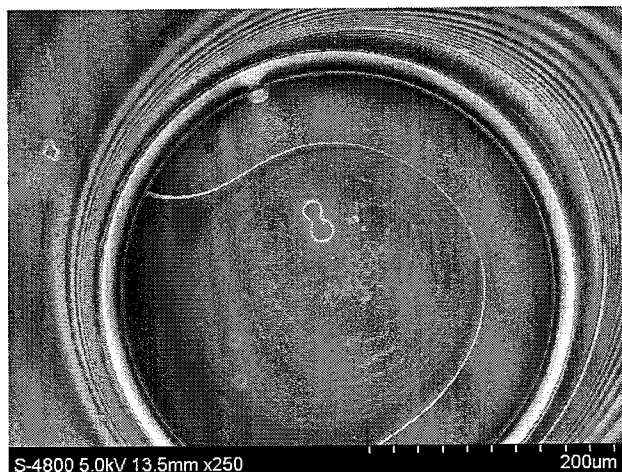


图 4-1: $K_2Cr_2O_7:HBr:CH_3COOH=1:1:1$ 腐蚀液腐蚀圆形台面两侧深度不同,导致腐蚀较浅的一侧(左侧)未能形成氧化限制层。

为了解决上述问题,我们将腐蚀液替换为 $H_3PO_4:H_2O_2:H_2O=1:1:3$ 配比,取得了较好的效果。改进湿法刻蚀工艺后,得到的圆形台面两侧腐蚀深度基本相同,在选择性氧化工艺后形成了完整的氧化限制层(图 4-2)。经多次试验,该腐蚀液在 $22^{\circ}C$ 条件下的腐蚀速率约为 $1.5-1.8\mu m/min$ 。

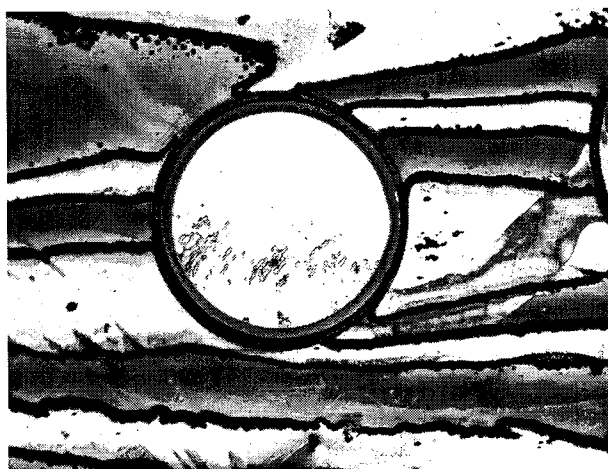


图 4-2: 改进湿法刻蚀工艺后,选择性氧化形成能够形成完整的氧化限制层(蓝色圆环部分)。

4.1.4 选择性氧化工艺

980nm EP-VECSEL 器件制备工艺中的另一个重要步骤就是选择性氧化工艺。选择性氧化工艺在 VCSEL 发展历史中曾经起到过里程碑式的作用^[94]：由于该工艺对高 Al 组分层具有很高的选择性，并能生成致密、绝缘的低折射率氧化物，这种物质能最大限度的限制载流子的侧向扩散，使制作极小尺寸、极低功耗的 VCSEL 成为可能^[28]。同时，低折射率的氧化物能提供光场的侧向限制，减少光的衍射损耗和散射损耗。选择氧化技术的引进，极大的改善 VCSEL 中对电流和光场的限制作用，使得 VCSEL 的整体性能有了突飞猛进的提高，高转换效率^[19]及高输出功率^[120]的器件在选择性氧化技术出现后陆续被研制出来。虽然后来出现了一些采用外延生长实现电光限制的新技术^[121]，但成本相对较高。这里我们仍然采用选择性氧化技术来形成对 980nm EP-VECSEL 有源区的电、光限制。

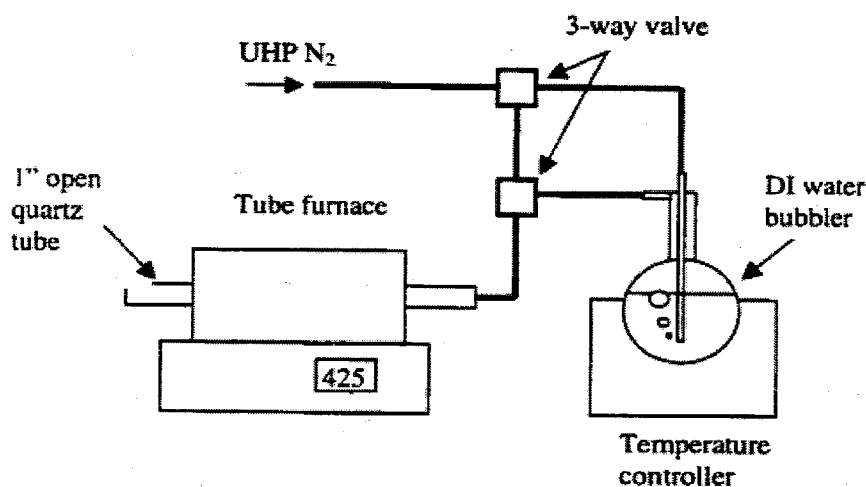


图 4-3：选择性氧化工艺实验设备示意图。

图 4-3 是选择性氧化工艺中使用的实验设备示意图。主要是使一定流量的高纯 N_2 气体通过接近沸腾的去离子水，携带一定量水蒸气进入氧化炉的恒温加热区进行反应。加热区内放有待氧化的芯片样品，芯片样品已经通过光刻、湿法刻蚀后形成圆形台面，露出待氧化的高 Al 组分层。水蒸汽在气压作用下侧向扩散进入高 Al 组分层，发生化学反应形成由 Al_xO_y 构成的氧化限制层。高纯 N_2 气体起到水蒸气载体的作用，这种载体也可以是高纯 Ar 气体或一定比例的 H_2/N_2 。为

了保证氧化的均匀性和重复性,必须保证氧化系统的稳定性,这包括水温、氧化炉加热区温度的稳定以及气流的稳定。

为了确定氧化速率与加热区温度、水温及 N_2 气体流量的关系,我们进行了反复的试验:首先制成一系列表面带有圆形台面结构的样品,然后分别对不同的样品在各种工艺条件下进行选择氧化,最后使用湿法刻蚀将覆盖在选择性氧化层上面的材料腐蚀掉,观察氧化深度(图 4-4)。



图 4-4: 氧化深度的确定,其中圆形台面直径已知,与台面尺寸进行对比就能获知氧化深度。

按照以上方法就能够得到氧化深度与各项工艺条件的关系。最终确定的选择性氧化工艺条件为:炉温 425°C 、水温 95°C 、氮气流量为 1.5L/min ,对应的氧化速率约为 $0.5\mu\text{m/min}$ 。在该条件下能够获得较高的氧化速率,且氧化速率在较长时间内保持不变,可以精确控制氧化深度。

4.1.5 增透膜及高反膜

对于空气腔 980nm EP-VCSEL 而言,除了半导体器件部分,还需要引入外部光学元件来构成外腔结构。但是,在制作器件时衬底表面通常会有 32% 的反射率,这会阻碍外腔结构的形成。这就需要在衬底表面镀增透膜来消除该剩余反射率,使半导体器件部分与外腔部分结合得更好。形成增透膜最简单的途径是在衬

底表面上镀制一层低折射率材料的薄膜。在近红外波段 $GaAs$ 材料的折射率约为 3.5, 而由薄膜光学知识我们知道理想单层增透膜的膜层光学厚度应为 $\lambda/4$, 折射率应为入射介质($GaAs$)和基片(空气)折射率的平方根, 这样可以得出理想的增透膜材料的折射率应在 1.9 左右。 HfO_2 (氧化铪)材料在一定的蒸发条件下其折射率正好位于这个范围, 因此我们选择单层 HfO_2 材料来制作增透膜。

另一种形成外腔的途径就是在 EP-VECSEL 半导体器件部分的衬底表面直接镀高反膜, 这样在 N-DBR 与衬底之间就形成了另一个谐振腔, 该方法同样能够有效的改善器件的光束质量。这种与器件集成在一起的外腔结构有时也被称为扩展腔(Extended-Cavity), 采用扩展腔结构的 VECSEL 也可以称为扩展垂直腔面发射激光器(Vertical-Extended-Cavity Surface-Emitting Laser)。同时, 也可以在衬底表面集成表面镀制高反膜的微透镜^[49]或光栅^[122]等结构。高反光学膜的原理与 DBR 相同, 都是由一定对数的高/低折射率材料构成的, 这里我们选择 SiO_2/TiO_2 作为高反膜的两种组成材料。

4.2 980nm EP-VECSEL 输出特性分析

通过上述一系列工艺流程, 我们研制出了具有单片集成结构的 980nm EP-VECSEL。单片集成 EP-VECSEL 的器件结构与图 3-2 基本相同, 区别在于器件的外腔结构是通过在衬底表面直接镀制高反膜形成的。器件的有源区直径为 $300\mu m$, 衬底表面的高反膜在 980nm 波段中心反射率约为 95%, 根据第 2 章中的计算, 这足以使器件发生激射。我们分别测试了表面镀增透膜及高反膜时器件的连续输出特性: 从图 4-5 中可以看出镀增透膜器件的阈值电流很大, 说明芯片本身的 DBR 反射镜不能提供足够的反馈, 因此器件没有发生激射; 在衬底表面镀高反膜后, 由于构成了扩展腔结构, 谐振腔的反馈明显增加, 因此从图 4-6 中可以看出阈值电流明显降低, 器件的斜率效率在阈值电流以上有明显升高, 注入电流为 5A 时输出功率为 280mW。参照第 2 章中对有源区直径 $300\mu m$, 外腔镜反射率 95%条件下输出特性的计算, 可见器件的阈值电流及输出功率与计算结果符合的很好。

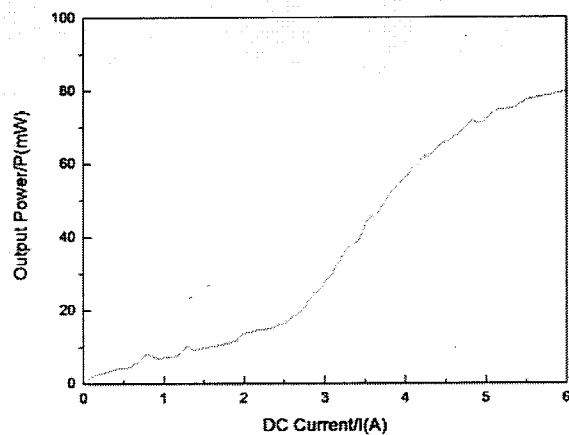


图 4-5: 未镀高反膜时器件的输出特性, 此时由于阈值电流很大, 器件没有发生激射。

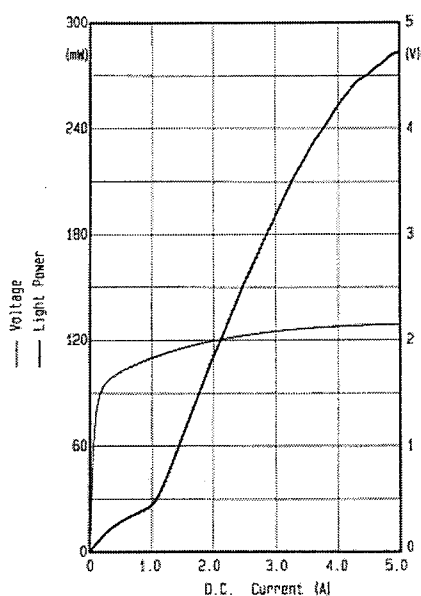


图 4-6: 镀高反膜之后, 器件斜率效率在注入电流超过 1A 后有明显提高, 说明发生了激射。

图 4-7 是测试得到的单片集成 EP-VECSEL 器件的光谱特性, 可见输出波长在 980nm~990nm 之间, 最窄光谱宽度<1nm。在注入电流从 0A 增加至 5A 的过程中, 器件分别呈现单纵模及多纵模两种工作状态, 并且在整个过程中这两种状

态交替出现。这可能是基于以下原因：量子阱有源区的增益谱峰值对应的波长随着注入电流增加而不断红移，当量子阱的增益与扩展腔支持的纵模对准时，器件就呈现单纵模工作，否则就会呈现多纵模工作。当器件单纵模工作时，输出光场的所有能量均在该模式中，而多纵模工作时由于光谱变宽，最高强度就会减弱。出现这两种工作状态说明此时扩展腔的选模作用仍需进一步加强，需要根据实验结果的反馈进一步进行器件结构的优化。

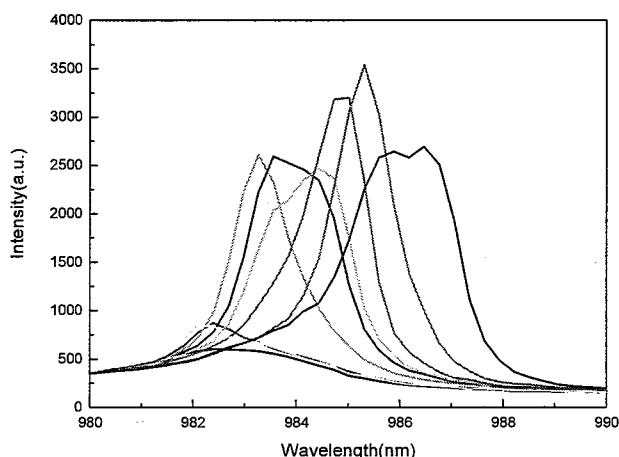


图 4-7：单片集成 EP-VECSEL 在不同注入电流水平下的输出光谱，从左至右依次代表注入电流从 0A 增加至 5A 时的光谱。

研制出这种单片集成的 EP-VECSEL 主要意义在于：实现了通过扩展腔反馈使器件激射，为进一步研究 EP-VECSEL 谐振腔的振荡特性提供了实验数据。以此为基础，能够进一步研制出具有空气腔结构的 EP-VECSEL，实现更高的输出功率，同时也可以在此器件窗口表面集成其他的微光学元件，如微透镜或者二阶光栅等结构，实现更好的光束质量控制及偏振控制。

4.3 980nm 高功率 VCSEL 列阵器件的单元结构优化

在第 2 章中，对 EP-VECSEL 的谐振腔镜面反射率与器件的斜率效率、阈值电流等振荡特性参数之间的关系进行了分析。只要对分析 EP-VECSEL 的方法稍作调整，就能够对 VCSEL 的镜面反射率与其输出特性的关系进行分析。在本节

中,将采用第2章中的理论模型,分析980nm底发射VCSEL列阵单元器件DBR反射率与输出特性的关系,并对单元结构进行优化设计。

4.3.1 理论模型

为了分析VCSEL输出特性与DBR反射率的关系,首先需要给出其阈值电流、输出功率及转换效率等与DBR反射率之间关系的表达式。VCSEL的阈值电流表达式为:

$$I_{th} = \frac{qN_w V_1 B N_{tr}^2}{\eta_i} \exp\left(\frac{2(\alpha_i + \alpha_m)}{N_w \Gamma_1 g_0}\right) \quad 4-1$$

式4-1中各项的意义在第2章中EP-VECSEL阈值电流表达式中已经给出,在这里与第2章中不同的主要是镜面损耗项 $\alpha_m = \frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}}\right)$ 中的 R_1 及 R_2 此时分别代表N-DBR及P-DBR的反射率,而不包括外腔镜的反射率。

VCSEL连续工作状态下的输出功率表达式为:

$$P_{out} = \eta_i \frac{\alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m} \frac{h\nu}{q} \frac{T_1}{(1-R_1) + \sqrt{\frac{R_1}{R_2}}(1-R_2)} (I - I_{th}) \left(1 - \frac{\Delta T}{T_{off}}\right) \quad 4-2$$

其中 T_1 代表N-DBR的透射率,如果N-DBR本身的吸收为 L_{DBR} (百分比),则 $T_1 = 1 - R_1 - L_{DBR}$ 。设 P_m 为总输入电功率,则 $P_m = I^2 R_s + IV_f$,其中 R_s 为串联电阻, V_f 为开启电压。废功率: $P_D = P_m - P$,其中:

$$P = \eta_i \frac{\alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m} \frac{h\nu}{q} (I - I_{th}) \left(1 - \frac{\Delta T}{T_{off}}\right) \quad 4-3$$

4-3式代表VCSEL通过两个DBR反射镜的总输出功率; $\Delta T = P_D R_T$ 代表VCSEL的内部温升,其中 R_T 为热阻。当热沉平面非常接近于产生热量的区域的侧向维度时,可以假定热流为一维(当然,这是一个较为粗略的近似,计算得出

的热阻值是一个近似值), 此时有 $R_T = \frac{h}{\xi A}$, 其中 h 代表热源到热沉的距离, ξ 代

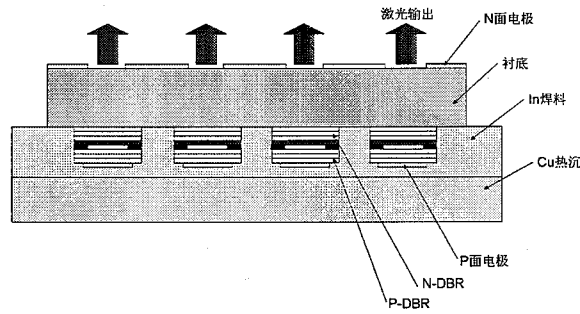
表材料的热导率, A 为热源的面积。

转换效率 η 定义为输出光功率与总输入电功率的比值, 表达式为:

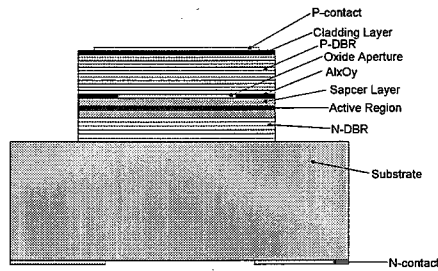
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{\eta_i \frac{\alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m} \frac{hv}{q} \frac{T_1}{(1-R_1) + \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} (1-R_2)} (I - I_{th}) (1 - \frac{\Delta T}{T_{off}})}{I^2 R_s + IV_f} \quad 4-4$$

4.3.2 980nm 高功率 VCSEL 列阵的单元结构优化

图 4-8 是 980nm 高功率 VCSEL 列阵及其单元器件的结构示意图。从图 4-8 中可见, VCSEL 列阵实际上是由许多单元器件组成的。因此, 如果列阵中的单元 VCSEL 器件输出特性能够得到优化, 那么 VCSEL 列阵器件的整体性能就能随之得到优化。



(a) VCSEL 列阵



(b) 单元器件

图 4-8: (a) 980nm 高功率 VCSEL 列阵及 (b) 单元器件。

根据 4.3.1 中给出的表达式, 结合第 2 章中表 2-1 给出的材料及结构参数, 就能够得出 VCSEL 列阵单元器件的阈值电流、输出功率及转换效率与 N-DBR 反射率的关系。

图 4-9 是计算得到的有源区直径不同的 VCSEL 列阵单元器件阈值电流与 N-DBR 反射率的关系。

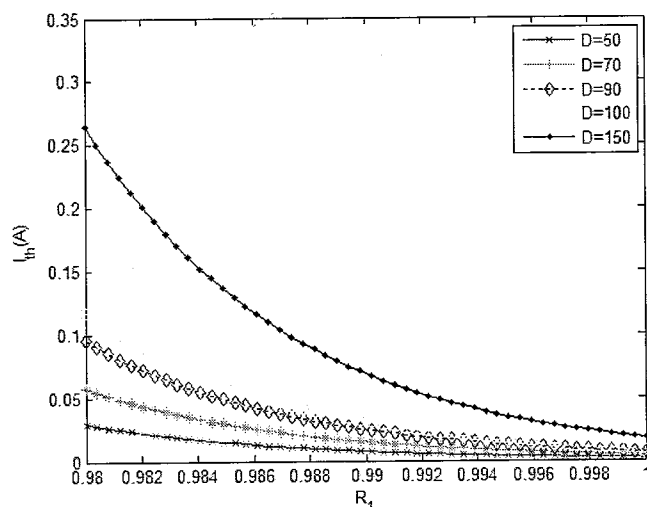
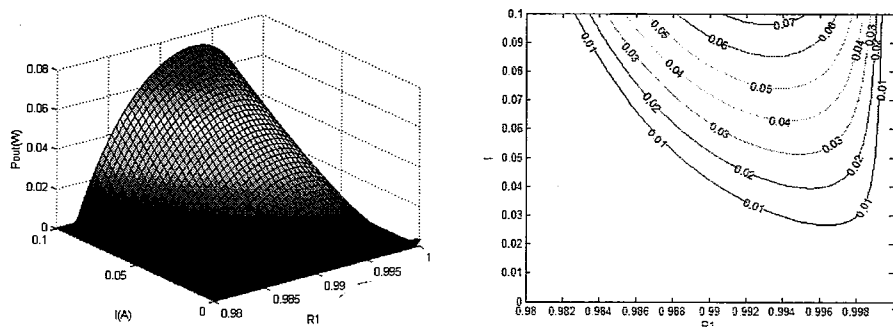


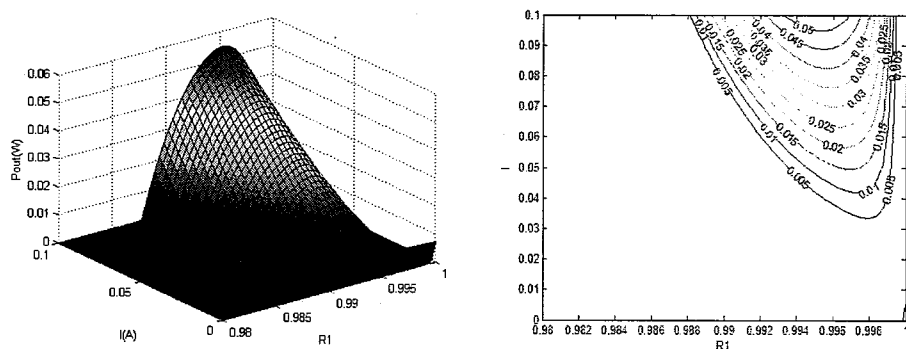
图 4-9: 有源区直径不同的 VCSEL 列阵单元器件阈值电流与 N-DBR 反射率的关系。

由图 4-9 可见, 有源区直径不同的单元器件, 阈值电流随 N-DBR 反射率的降低而升高的程度是不同的。当 N-DBR 反射率为 99%左右时, 有源区直径为 100 μm 以下的单元器件阈值电流仍然在 0.03A 以下, 这样即使集成较多的单元器件组成 VCSEL 列阵, 阈值电流仍然会维持在较合理水平。因此, VCSEL 列阵器件的发光单元有源区直径最好在 100 μm 以下, 这样能够使连续工作时列阵器件整体阈值电流维持在较低水平。

图 4-10(a)(b)是计算得到的, 考虑热效应影响时, 有源区直径为 100 μm 及 150 μm 的 VCSEL 列阵单元器件输出功率与 N-DBR 反射率及注入电流的关系。



(a)有源区直径为 $100\mu\text{m}$ 单元器件连续输出特性与 N-DBR 反射率关系及对应平面等势图



(b)有源区直径为 $150\mu\text{m}$ 单元器件连续输出特性与 N-DBR 反射率关系及对应平面等势图。

图 4-10: 计算得到的有源区直径为(a) $100\mu\text{m}$ 及(b) $150\mu\text{m}$ 的 VCSEL 列阵单元器件输出特性与 N-DBR 反射率的关系

由图 4-10 可见, 当考虑热效应影响时, 有源区直径不同的 VCSEL 列阵单元器件的输出特性与 N-DBR 反射率有不同的依赖关系。虽然 VCSEL 列阵的整体注入电流较高, 但每个单元器件的注入电流是有限的, 因此应该使单元器件能够在较低的注入电流水平下就能达到较高输出功率。因此, 根据上述计算结果, 为了达到较低阈值电流及较高输出功率, 我们将 VCSEL 列阵的单元器件的 N-DBR 反射率选为 99.2%。

图 4-11 是计算得到的 VCSEL 列阵单元器件转换效率与 N-DBR 反射率及注入电流之间的关系。

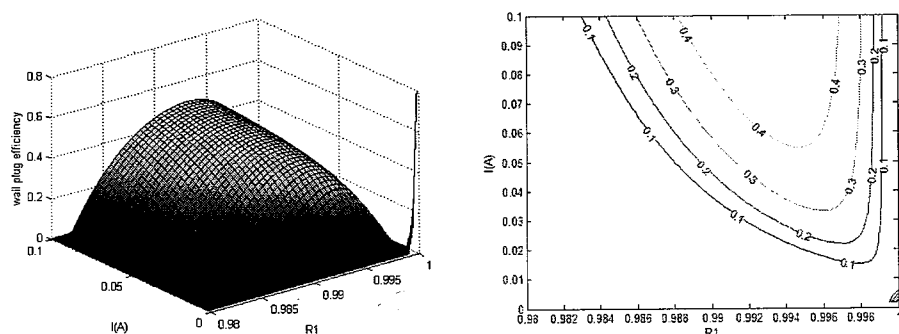


图 4-11: 计算得到的有源区直径为 $100\mu\text{m}$ 的 VCSEL 列阵单元器件转换效率与注入电流及 N-DBR 反射率的关系。

由图 4-11 可见, 注入电流和 N-DBR 反射率都会对单元器件的转换效率产生影响。与图 4-10 对比可以看出, 在相同注入电流水平下, N-DBR 反射率对转换效率的影响与对输出功率的影响类似。

根据上述计算, 我们可以得出如下结论: 同时考虑较高的转换效率, 较高输出功率及较低阈值电流三个因素, 我们将 VCSEL 列阵单元器件的 N-DBR 反射率确定为 99.2%, 同时单元器件的有源区直径确定为 $100\mu\text{m}$ 。

4.3.3 980nm 高功率 VCSEL 列阵的研制

基于上述结构优化的结果, 我们分别研制出具有 64 个发光单元的 8×8 VCSEL 列阵及具有 300 个发光单元的 10×30 VCSEL 列阵。列阵器件的发光单元直径均为 $100\mu\text{m}$, N-DBR 反射率为 99.2%。器件的实物照片见图 4-12。

VCSEL 列阵的制备工艺与 4.1.2 基本相同, 区别在于器件衬底表面只能镀制增透膜以进一步提高输出功率。



图 4-12: (左) 8×8 VCSEL 列阵和(右) 10×30 VCSEL 列阵。

我们测试了具有 64 个发光单元的 8×8 VCSEL 列阵, 测试结果分别示于图 4-13 及图 4-14。从图 4-13 中可见在器件在连续注入电流为 6A 时输出功率达到 2.73W, 阈值电流为 0.8A, 光谱半宽 0.7nm, 波长为 984nm; 图 4-14 显示器件的远场发散角为 13.2° 。与未经单元结构优化的器件相比^[123], 阈值电流并未有明显增加, 但最高斜率效率提高至 0.6W/A。同时可以看出, 在连续工作时, 采用被动制冷模式会使器件很大程度上受到热效应的影响, 在注入电流较高时会出现热饱和现象, 输出波长也发生了漂移。

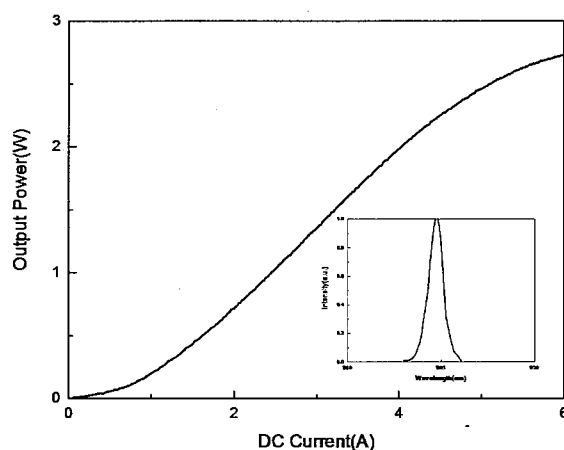


图 4-13: VCSEL 8×8 列阵的连续输出特性。

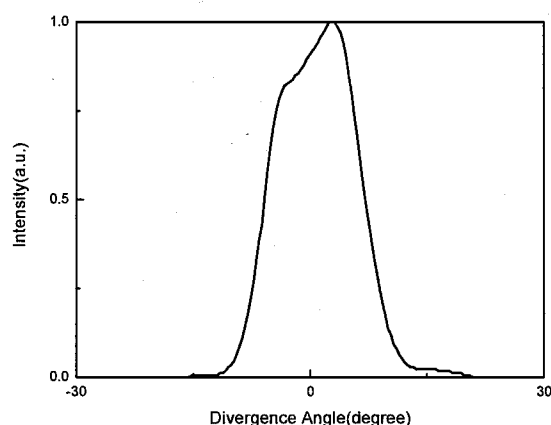


图 4-14: VCSEL 8×8 列阵的远场分布。

同时我们测试了窄脉冲电源驱动条件下的 8×8 VCSEL 列阵的输出特性, 测试结果分别示于图 4-15 及 4-16。驱动电源参数为: 重复频率 100Hz, 脉宽 100ns。从图 4-15 中可见峰值驱动电流为 130A 时器件的峰值输出功率达到 115W, 光谱宽度为 2nm, 波长为 975nm。同时可从光脉冲波形测试结果看出, 光脉冲的脉宽相对于电脉冲有所展宽, 为 120ns。在窄脉冲驱动条件下, VCSEL 列阵受热效应影响较小, 因此能够工作在较大驱动电流下, 并且具有更高的斜率效率。从光谱测试结果可以看出, VCSEL 列阵的波长基本未发生漂移, 为 975nm。

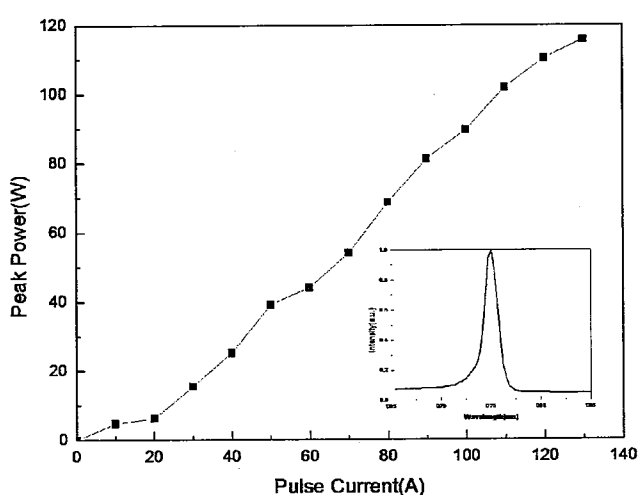


图 4-15: VCSEL 8×8 列阵的脉冲输出特性。

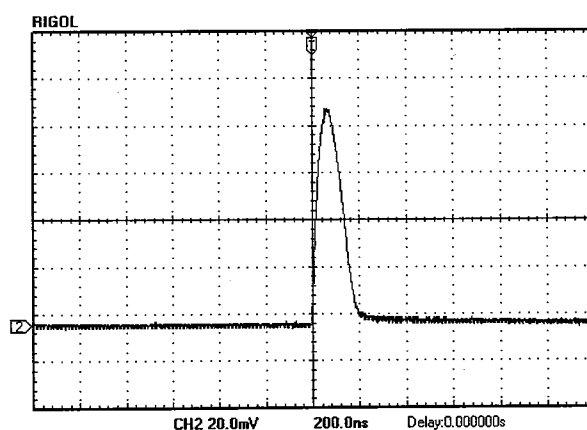


图 4-16: 光脉冲波形。

我们还研制出包含 300 个发光单元的 10×30 VCSEL 列阵。测试得到的曲线及光谱见图 4-17，在注入电流为 18A 时器件的连续输出功率达到 5.26W，光谱半宽为 1.7nm，输出波长为 983.5nm。由于采用了主动制冷方式，有效降低了热效应的影响，使器件能够工作在更高的电流下，进而提高了连续输出功率。

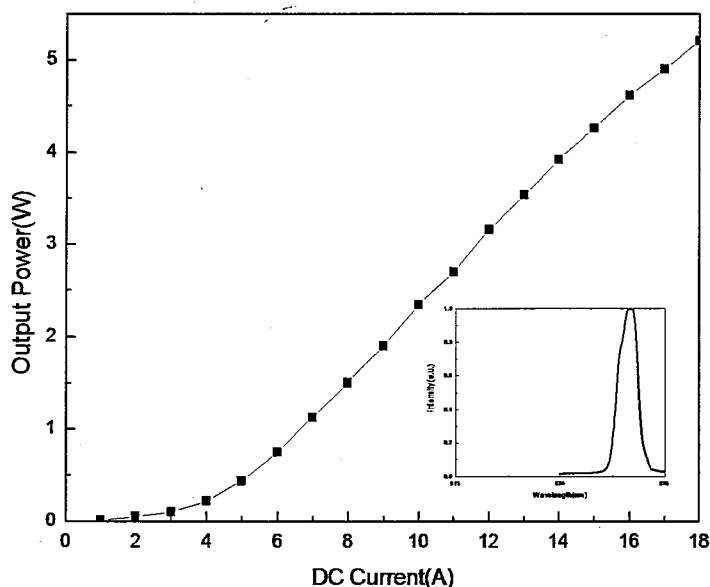


图 4-17: 10×30 VCSEL 列阵连续输出特性及光谱。

4.4 本章小结

本章主要对 980nm EP-VECSEL 器件制备工艺及器件输出特性进行了研究。对湿法刻蚀、选择性氧化等工艺流程中的关键步骤进行了改进之后，研制出了单片集成结构的 980nm EP-VECSEL 器件并进行了初步测试。测试结果显示当注入电流为 5A 时器件的连续输出功率为 280mW，在注入电流从 0A 增加至 5A 的过程中输出光谱呈现单纵模及多纵模两种状态，输出波长 980nm~990nm。同时，基于第 2 章中的理论模型，对 980nm VCSEL 列阵的单元器件结构进行了优化。进行结构优化之后分别研制出 8×8 及 10×30 VCSEL 列阵器件，其中 8×8 列阵连续输出功率达到 2.73W，脉冲输出功率达到 115W， 10×30 列阵连续输出功率达

到 5.26W。

第5章 总 结

980nm EP-VECSEL 能够同时实现高功率及高光束质量输出, 非常适合于作为掺 Yb 固体激光器及光纤激光器的泵浦源, 同时通过腔内倍频还能应用于生物医学研究及激光显示等领域。本文主要围绕 980nm EP-VECSEL 器件, 开展了器件结构设计及制备方面的研究, 主要包括以下几方面:

(1)为了实现高光束质量输出, 对 980nm EP-VECSEL 的谐振腔结构进行了理论分析及优化设计。通过对比普通 FP 谐振腔与模式选择 FP 谐振腔, 介绍了具有模式选择功能谐振腔的特点; 分析了 EP-VECSEL 的三镜面谐振腔实现模式控制的过程, 找出了与输出特性最为相关的谐振腔结构参数; 从决定器件输出特性的两个关键参数即 N-DBR 反射率及外腔镜反射率入手, 基于复合腔理论分析了这些参数与器件振荡特性参数的关系。根据理论计算的结果将 980nm EP-VECSEL 的有源区直径确定为 $300\mu\text{m}$, N-DBR 反射率确定为 87%, 并调节了外腔结构使其支持基横模工作。

(2)为了验证 EP-VECSEL 谐振腔结构设计中所用复合腔理论的合理性, 分析了外部光反馈对 980nm VCSEL 振荡特性的影响。分别计算了 VCSEL 及 EEL 的光反馈灵敏因子, 结果表明 VCSEL 具有和 EEL 一样的光反馈敏感性。基于复合腔理论, 计算了在一定强度的外部光反馈作用下 VCSEL 阈值电流及斜率效率的变化。在实验上测试了反馈率为 10% 时 980nm VCSEL 连续输出特性的变化, 结果表明器件的阈值电流有所下降, 同时输出功率下降了 8%。实验结果有效验证了复合腔理论的准确性。

(3)对 980nm EP-VECSEL 的半导体器件部分进行了结构优化。采用三维有限元方法建模分析了 EP-VECSEL 的电流注入结构对有源区电流分布的影响, 通过调节 P 面电极的直径实现了有源区电流的均匀分布。为了验证电流分布的模拟结果, 研制了两种具有不同 P 面电极直径的 VCSEL 器件。实验结果表明: P 面电极直径略小于氧化孔径的 VCSEL 器件在三种注入电流水平下的远场发散角分别

为 4.2° 、 6.9° 及 9° 。同时,基于上述三维有限元模型,分析了采用陶瓷热沉及金刚石热沉的 EP-VECSEL 芯片温度分布,并初步模拟了 EP-VECSEL 列阵的温度分布。

(4)对器件制备工艺中的关键技术进行了改进,调整了湿法刻蚀及选择性氧化的工艺条件,以实现更好的电、光限制。

(5)通过在衬底表面直接镀制高反膜,构成了扩展腔结构,研制出具有单片集成结构的 980nm EP-VECSEL,在注入电流为 5A 时连续输出功率达到 280mW。器件在 0~5A 范围内的波长均在 980nm~990nm 范围内,最窄光谱宽度为 1nm。器件在工作过程中呈现单纵模及多纵模两种状态,并且这两种状态互相交替出现。

(6)在 EP-VECSEL 结构设计的理论基础上,对 980nm VCSEL 列阵的单元结构进行了优化设计。根据理论计算的结果,将 VCSEL 列阵的单元器件直径确定为 $100\mu\text{m}$ 并将 N-DBR 反射率确定为 99.2%,预期能够在维持较低阈值电流的前提下实现较高的输出功率。在单元结构优化的基础上,研制出具有 64 个发光单元的 VCSEL 8×8 列阵,连续输出功率达到 2.73W,脉冲输出功率达到 115W;研制出具有 300 个发光单元的 VCSEL 10×30 列阵,连续输出功率达到 5.26W。