

分类号_____

密级_____

UDC _____

编号_____

中国科学院研究生院 硕士学位论文

光泵浦垂直外腔面发射激光器和 VCSEL 的热管理与实验研究

宁 宇

指导教师王立军 研究员

长春光学精密机械与物理研究所

申请学位级别理学硕士 学科专业名称凝聚态物理

论文提交日期2008.4 论文答辩日期2008.5.22

培养单位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

答辩委员会主席宁永强 研究员

A dissertation submitted to Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Academia Sinica for the degree of master of Philosophy

Thermal management and experimental study of optically
pumped semiconductor vertical external cavity surface emitting
laser and VCSEL

By Yuning

Directed by

Prof. Lijun wang

Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics,
Academia Sinica, P.R.C.

April 2008

光泵浦垂直外腔面发射激光器和 VCSEL 的热管理与实验研究

宁宇

导师: 王立军

摘要

垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 是一种在光通讯系统、光互连等多方面具有广泛应用前景的半导体激光器。具有低阈值电流、低工作电流、单纵模工作、低成本、高光纤耦合效率、易于实现二维列阵等诸多优点。同时作为一种新型半导体激光技术, 光泵浦垂直外腔面发射激光器将光泵浦固体激光器的一些优点与半导体激光器的特性结合在一起, 既能获得高功率输出, 也能获得接近衍射极限的圆形输出光斑。这使其在通讯和显示以及泵浦光纤激光器等很多领域有广阔的应用前景。本论文围绕 980nm 波段 GaAs 基 InGaAs 量子阱材料和 980nm 垂直外腔面发射激光器的理论, 对 VCSEL 设计、制备工艺、以及光泵浦垂直外腔面发射激光器进行结构设计和实验研究等进行了多方面深入系统的研究工作, 取得的主要创新性成果如下:

- 1、制作出衬底出光 VCSEL 单管和列阵器件。其中室温连续激射条件下单管器件最高功率达到 1.95W, 列阵器件达到 1.35W, 均达到国内领先水平。纳秒脉冲条件下单管器件最高输出功率达到 10.5W, 达到国际领先水平。
- 2、对 VCSEL 器件的随温度的变化进行实验分析研究。
- 3、在实验基础上分析了 OPS-VECSEL 的热管理, 建立了一维静态热传导方程, 并结合数学工具 matlab 解热传导方程, 得出热沉的热导率及 DBR 热导率变化对器件温度的影响。
- 4、进行泵浦试验, 得到了初步的测试结果, 并对所得结果进行分析和优化。

关键词：VCSEL，光泵浦垂直外腔面发射激光器，量子阱，热管理

**Thermal management and experimental study of optically
pumped semiconductor vertical external cavity surface
emitting laser and VCSEL**

Yuning (Semiconductor Photoelectronics)

Directed by: Lijun Wang

Abstact

Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL) is a promising semiconductor laser with many unique advantages including very low threshold and operating current, single longitudinal mode operation, easier coupling into single mode optical fibers, compatibility with other optical elements for simpler packaging and 2D arrays fabrication, and lower manufacturing costs thanks to the possibility of on-wafer testing. A new tpe semiconductor laser technology, optically pumped semiconductor (OPS) vertical-external-cavity surface- emitting lasers (VECSEL), OPS-VECSEL combines many of the virtues of the diode-pumped solid state laser and the semiconductor quantum-well gian medium. OPS-VECSEL lasers generate for the first time both high power and a circular near-diffraction-limited output beam directly from a semiconductor laser, which makes OPS-VECSEL a useful tool for telecommunication, display application and pumping fiber lasers. The work focuses on design and fabrication of the InGaAs quantum well (QW) VCSEL, and processing techniques for the device fabrication have also been investigated. this dissertation also describes the structure design and experimental study of 980nm vertical external

cavity surface emitting laser, at the same time we have tested the devices, especially analysed thermal management . The main achievements are as follows:

1、 High power VCSEL single device and 2D arrays are fabricated. On the CW condition, the output power of single device and 2D arrays are as high as 1.95 W and 1.35 W at the room temperature, respectively. On the pulse condition, the output power of single device is as high as 10.5 W.

2、 The dependence of lasing spectrum, output power and threshold current on the temperature are analysed through the control temperature experiment.

3、 The thermal management of OPS-VECSEL was analysed on the experimental results. The one-dimensional, stationary solution of heat conduction equation was established and it was deduced by the Matlab software. The temperature rising is relative to the thermal conductivity change of DBR and heat sink.

4、 We have done the pumping experiments, according to the above results, we further optimize the structure and the experimental technology.

Keyword: VCSEL, OPS-VECSEL, well, Thermal management;

目录

Abstract.....	- 2 -
1 绪论.....	- 6 -
1.1 面发射激光器的基本概念.....	- 6 -
1.2 VCSEL 的结构和特点.....	- 7 -
1.2.1 VCSEL 的结构.....	- 7 -
1.2.2 VCSEL 的特点.....	- 8 -
1.3 光泵浦半导体垂直外腔面发射激光器.....	- 9 -
1.3.1 OPS-VECSEL 的基本结构.....	- 10 -
1.3.2 OPS-VECSEL 的优点.....	- 10 -
1.4 垂直腔面发射激光器的进展.....	- 11 -
1.4.1 VCSEL 的研究历史.....	- 11 -
1.4.2 ops-VECSEL 的研究历史.....	- 12 -
1.5 面发射激光器的应用.....	- 14 -
1.5.1 VCSEL 的应用.....	- 14 -
1.5.2 ops-VECSEL 的应用.....	- 15 -
1.6 本论文的研究工作.....	- 15 -
2 理论研究.....	- 17 -
2.1 VCSEL 热特性分析及设计.....	- 17 -
2.1.1 电流传播模型.....	- 17 -
2.1.2 热分布.....	- 19 -
2.2 ops-VECSEL 理论分析及设计.....	- 20 -
2.2.1 光腔内的发光点.....	- 21 -
2.2.2 泵浦设计.....	- 22 -
2.2.3 温度分析模型 ^[7,8]	- 23 -
2.2.4 散热方式的选择.....	- 25 -
3 工艺研究.....	- 26 -
3.1 面发射激光器的工艺.....	- 26 -
3.1.1 光刻技术.....	- 26 -
3.1.2 湿法腐蚀工艺研究.....	- 26 -
3.1.3 AlAs 氧化技术研究.....	- 28 -
3.2 光泵浦垂直外腔面发射激光器的工艺.....	- 29 -
3.2.1 热沉制作与抛光.....	- 29 -
3.2.2 芯片金属化.....	- 31 -

3.2.3	芯片焊接.....	- 31 -
3.2.4	封边和腐蚀.....	- 32 -
3.2.5	芯片表面镀增透膜.....	- 34 -
4	测试和热管理分析.....	- 35 -
4.1	室温连续波条件下单管 VCSEL 器件光功率输出特性.....	- 35 -
4.2	器件温度特性的研究.....	- 37 -
4.2.1	器件激射波长随温度的变化关系.....	- 38 -
4.2.2	器件输出光功率随温度的变化关系.....	- 39 -
4.2.3	器件的阈值电流随温度的变化关系.....	- 39 -
4.3	ops-VECSEL 泵浦实验及结果.....	- 40 -
4.4	芯片的吸收谱和反射谱.....	- 42 -
4.5	芯片 PL 谱的测量.....	- 43 -
4.5.1	连续泵浦测试:	- 43 -
4.5.2	脉冲泵浦测试:	- 43 -
4.6	原因分析及解决方案.....	- 44 -
4.6.1	原因分析.....	- 45 -
4.6.2	解决方案.....	- 48 -
5	总结.....	- 50 -
6	参考文献.....	- 51 -
7	硕士期间参加的课题.....	- 55 -
8	宁宇在攻读硕士期间发表论文目录.....	- 56 -
9	宁宇个人简历.....	- 57 -
10	致谢.....	- 58 -

1 绪论

光纤通信是当前信息光子学取得的最重大的成就，它将继续朝向密集波分复用（WDM）发展，以提高单纤传输容量。而高密集的双向互联网和分道交换的发展则是信息化社会的迫切需求，电子计算机芯片光互联是突破瓶颈阻塞效应的重要途径，而高级的神经网络体系则寄希望于三维光互联技术的采用。光盘存储技术的进一步发展已由弥散和扩散效应而受到写入光斑尺寸和存储单元尺寸的限制，人们正在探索以全息存储为代表的三维立体存储技术。对于一个实用化的信息光子系统，无论从速率的提高、功能的扩展、系统的可靠性、稳定性以及微电子系统的兼容性等诸多方面考虑，光子回路集成化的发展将是必由之路。人们认为，一旦光子回路与微电子系统集成得以实现，它将继续微电子的成就之后，导致信息高技术的第二次革命性飞跃。目前，半导体光子集成的研究与应用已成为国际发展的热点。但是由于传统的边发射激光器属于水平腔结构，光束的发射沿芯片的同一水平方向，这种激光器的光束互连就要借助光纤来实现，无法实现面对面自由空间光互连、光子交换及各种高并行处理网络，更无法实现激光器的密集二维面阵列。同时较大的光束发散角与不对称的光束远场分布使得激光器与光纤耦合的效率非常低，对于二维化的光电子集成回路 OEIC 与光子集成回路 PIC 极为困难。因此，针对功能集成方面的应用，人们在 70 年代就开始探索一种新型结构的半导体激光器—面发射激光器（Surface Emitting Laser Diode，简称为 SELD）。

1.1 面发射激光器的基本概念

所谓面发射激光器是指从垂直于衬底表面的方向射出激光的半导体激光器，其一大特征是在同一衬底上可二维集成许多这样的激光器件。因为在衬底面上并列排列多个激光器，所以在并行光信息处理及光互连等新的光电子领域中得以应用。

到现在为止，人们提出来的面发射激光器的构造从谐振腔的角度来分类有三种^[1]。第一种是水平谐振腔型结构，利用现有的边发射半导体激光器的工艺结构，采用 45°倾斜的反射镜，以改变光的出射方向或用高阶光栅将光耦合到垂直输出；第二种是弯曲谐振腔结构；第三种是用高反射率的镜面作为有源区两侧的包层形成垂直谐振腔结构，使得形成的光束垂直于衬底发射的垂直腔面发射激光器（Vertical Cavity Surface Emitting Lasers，简称为 VCSEL）。图 1.1 给出这三种面发射激光器的构形。图 1.1(a)所示的采用 45°倾斜反射镜结构的面发射激光二极管，其特性完全依赖于内部反射镜的倾角和平整度，工艺制作困难，并有光束畸变等问题；采用高阶耦合光栅的 SLED，尽管可以获得发散角小的窄细光束，但



图 1.1 面发射激光器的三种结构

光束截面呈条状结构。由于布拉格反射作用，其纵模选择性很好，可实现动态单纵模工作，但其发射光大部分进入了衬底，使效率大大降低，而且激光束的发射角度随波长而变化。图 1.1(b)所示的内反射斜腔结构，由于附加的腔损耗使阈值电流大大增加；而弯曲腔型结构制作工艺困难，很难获得垂直输出光。图 1.1(c)所示的结构是有源区直径及腔长只有微米量级的微腔结构，容易实现低阈值，具有高的微分量子效率。该器件具有独特的空间层结构和微小尺寸，形成发散角很小、像散可以忽略的圆形光束，而且它与光纤或其它光学器件容易实现高效率耦合。同时，它具有良好的动态单模特性和空间发射模特性。它的发射波长取决于外延生长，而不是完全由材料和光刻工艺决定，所以比较容易实现发射波长的准确控制。容易制造面积较大、具有准确的单一波长或相等波长间隔的单片 VCSEL 阵列。

VCSEL 具有其它两种面发射激光器无法比拟的优点。从激光特性考虑，VCSEL 可以通过短腔实现类似于常规短腔条型激光器具有的高微分量子效率 (η_d) 和单纵模工作。尽管水平腔面发射激光器可以获得窄的光束发散，但效率差。45°角偏转反射镜结构的光学性能强烈取决于安装质量（如反射镜安装平整度和角度），同时可能有光束的畸变问题。在向上弯腔结构的激光器中，由于外加的腔损耗使阈值电流偏高。从二维应用考虑，由于 VCSEL 的侧向尺寸也很小，能制造尺寸较大的高密度单片集成二维阵列，而其它两种结构都受到腔长（约 200 μm -300 μm ）的限制。此外，由于 VCSEL 比较容易与其它电子学和光学器件集成以实现薄膜功能光学器件的单片集成，开辟新的三维光学领域。综上所述，VCSEL 是最有发展前途和实用价值的器件。

1.2 VCSEL 的结构和特点

1.2.1 VCSEL 的结构

垂直腔面发射激光器与传统的侧向出光的边发射激光器的结构有根本的不同，是半导体激光器发展历程中的一个历史性的重大进程。垂直腔面发射激光器

有多种结构，其主要结构分为两部分：中心是有源区，它有体异质结和量子阱两种结构；其侧向结构有增益导引和环形掩埋异质结之分。有源区上下是反射器：一种是介质膜反射器，一般上层是 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 多层结构，下层是 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Au}$ 结构；另一种是半导体多量子阱的分布布拉格反射器（DBR）。构成的谐振腔垂直于外延层表面，腔长约几微米至十几微米，腔截面积由十几平方微米到几十平方微米，比经典半导体激光器的谐振腔小许多，属于微谐振腔范围。

现在研究最多的是如图 1.2 所示的结构：它由镜面、有源层和金属接触层组成，两个反射镜分别是 N 型和 P 型 DBR 堆的布拉格反射镜；有源区由 1-3 个量子阱组成，有源区的两侧是限制层，它一方面起限制载流子的作用，另一方面调节谐振腔的长度，使其谐振波长正好是所需要的激光波长；在衬底和 P 型 DBR 的外表面制作金属接触层，形成欧姆接触，并在 P 型 DBR 上制成一个圆形出光窗口，输出圆形的激光束。对于这种结构的激光器，由于在腔内往返的增益长度非常短，简单而言，仅是有源区厚度的两倍。因此，DBR 反射器的反射率必须非常高。

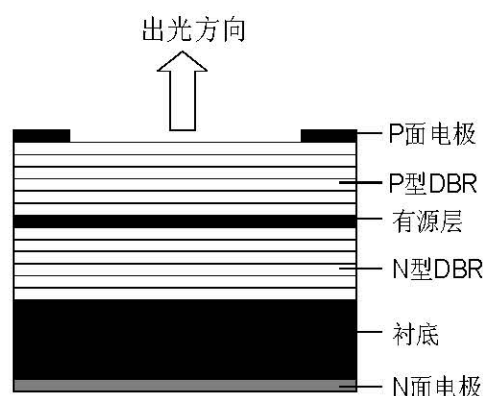


图 1.2 典型的 VCSEL 结构

1.2.2 VCSEL 的特点

如图 1.3 所示，VCSEL 与传统的侧向出光的边发射激光器（EEL）的根本区别在于出光方向的不同，VCSEL 的输出光垂直于衬底方向，而 EEL 输出光平行于衬底方向。EEL 的有源区长度为 $300\mu\text{m}$ - $1000\mu\text{m}$ ，而 VCSEL 的有源区长度大约为 $10\text{-}30\mu\text{m}$ ，光波要在如此短的区间获得足够的增益就需要反射镜的反射率足够大（ $>99\%$ ）才能达到激射条件；而 EEL 的解理面的反射率仅需 30% 就足够。

正是 VCSEL 与传统 EEL 结构的不同，使得 VCSEL 具有如下优点：

（1）低阈值电流：通过氧化技术可以实现很好的光限制和电限制，可以使有源区的体积很小，阈值电流可以达到 μA 量级[1]，比市售的 EEL（几十 mA ）低三个数量级，因此 VCSEL 在低功耗应用上很有优势。

（2）动态单模工作：传统 EEL 的谐振腔较长（ 100λ — 1000λ ），多以多纵模方式工作，易产生模式跳跃，而 VCSEL 谐振腔很短（一般 1λ ），纵模间距大，可以在较宽温度范围内得到单纵模输出。

（3）动态调制频率高：VCSEL 谐振腔很短，可以得到较大的弛豫振荡频率，因此调制带宽较宽。

（4）光纤耦合效率高：EEL 从外延片侧面出光，输出光的横模由横向的异

质结构和侧向的光限制结构决定。由于横向载流子结构较短，而侧向光限制结构较宽，导致输出光束不对称，横向光束发散角很大，与光纤的圆形截面不匹配，耦合效率不高。而 VCSEL 输出的是对称的圆形光束，发散角小，容易与光纤耦合，从单模光纤到 1mm 左右的塑料光纤都可以使用，耦合效率已证实高达 90% 以上。

(5) 制备成本低：EEL 的谐振腔反射镜由解理和刻蚀制成，需在电极制备完并解理后才能测试是否激射，而 VCSEL 的反射镜为一次外延生长，工艺完成后就可以在片上测试，这可以大大降低批量生产成本。

(6) 易制成一维和二维阵列：传统 EEL 侧面出光，难以制备成二维列阵，而 VCSEL 垂直于外延片表面出光，制备成一、二维列阵要容易得多。

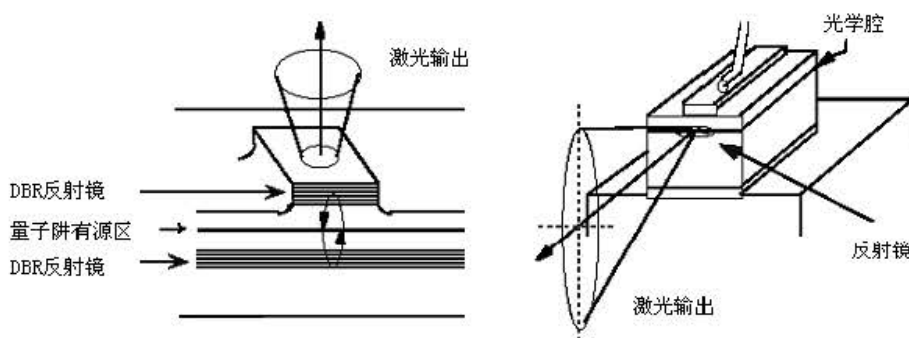


图 1.3 垂直腔面发射激光器与边发射激光器的出光方向

(7) 易集成：VCSEL 的制备工艺与标准集成电路平面工艺兼容，较易实现光电集成。此外，VCSEL 在降低上 DBR 反射率的情况下可以制成谐振腔增强型探测器（Resonant Cavity Enhanced Photodetector, RCE-PD），可以实现收发集成模块。VCSEL 还有很多独特之处，比如谐振腔很小，可以产生一定的微腔效应，自发辐射因子大大增加（ $\sim 10^{-2}$ ），可以用于微腔效应的研究。

1.3 光泵浦半导体垂直外腔面发射激光器

光泵浦半导体垂直外腔面发射激光器（OPS-VECSEL）出现于 1997 年[2]，它结合了半导体激光器泵浦固体激光器和量子阱垂直腔面激光器（VCSEL）的优点，它具有单模工作，输出圆对称的基模光束，可腔内倍频[3]，可以实现高功率输出等优点，在民用和军事领域的应用非常广泛，尤其近红外 OPS-VECSEL 有非常好的应用前景。此波段 OPS-VECSEL 倍频后输出 415-440nm 的蓝光，蓝色激光器在显示器件、探测器、高密度光存储、激光阅读、印刷工业中有着广泛的应用前景。

1.3.1 OPS-VECSEL 的基本结构

针对面发射激光器（VCSEL）的一些优势和其缺陷，我们设计了一种光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器（OPS-VECSEL）[2]的结构，VECSEL 在结构上类似于一个二极管泵浦固态圆盘激光器（如图 1.4），唯一不同的是采用一个光泵浦或电泵浦的面发射半导体有源镜的结构来代替了绝缘的激光器圆盘。镜子的结构包括分布式布拉格反射镜（DBR），及其上面生长的带有量子阱的有源区。用 808 nm 二极管激光耦合模块做泵浦源，激光谐振腔由外腔镜与芯片上的多层高反射镜和多量子阱增益区组成。多量子阱增益区提供光增益，激光波长为 980 nm，外腔镜通过控制传输模式对输出光束起整形作用。增益区由 $\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}$ 泵浦吸收层,和压应变 $\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}$ 量子阱组成，重复 14 个周期。以 $\text{AlGaAs}/\text{AlAs}$ 为 DBR 反射层，27-30 个周期； AlGaAs 为窗口层， GaAs 为盖层，以免 AlGaAs 氧化。量子阱厚度为 10nm 左右，其中每一个量子阱都位于光驻波的波腹位置以形成周期增益结构（RPG）[4]，[5]。为了有效的去除余热，布拉格反射镜（DBR）一侧焊接到金刚石热沉上。由激光器的外腔控制横向输出模式，通过控制泵浦光斑尺寸、腔长和输出耦合镜的曲率半径使 VECSEL 在 TEM00 模式下运转。

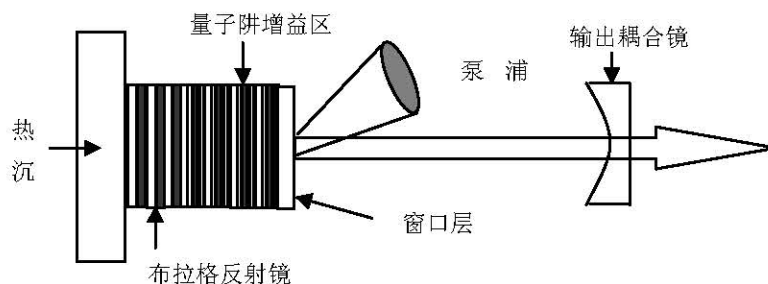


图 1.4 光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器结构示意图

1.3.2 OPS-VECSEL 的优点

OPS-VECSEL 结合了光泵浦固体激光器和半导体量子阱垂直腔面发射激光器的方法，吸取了二者的优点，与二极管泵浦固体激光器和电泵浦垂直外腔面发射激光器相比，具有以下优点：

1、OPS-VECSEL 的圆形高斯输出模[2]，[6]使其具有许多 VCSEL 激光器的优点，同时其输出功率也和边发射二极管激光器相当，能实现瓦级，以及更大功率输出。

2、OPS-VECSEL 发光光斑直径大（100 μm -2mm），使得它们工作在低的面光密度下，减小了在高功率下工作的光学面损伤阈值。

3、OPS-VECSEL 晶片是用不掺杂的半导体材料生长，减小了自由载流子吸

收引起的光损耗。在边发射和电泵浦面发射半导体激光器中，掺杂的盖层中自由载流子吸收是主要的功率限制。

4、OPS-VECSEL 芯片结构中没有 p-n 结或电接触，这明显简化了激光器外延片的生长和加工，而且增加了器件的可靠性。

5、OPS-VECSEL 没有电流注入，减少了随之带来的器件发热。

6、OPS-VECSEL 芯片的能带工程使我们能够调整吸收泵浦能量的分布，因而减少了多量子阱二极管激光器中载流子输运限制。

基于这些优点，OPS-VECSEL 在民用和军事领域的应用非常广泛，主要有激光显示、光纤通信、激光打印、高密度光存储、泵浦固体激光和光纤激光器以及军事等。

1.3.3 垂直腔面发射激光器的进展

1.3.4 VCSEL 的研究历史

20 世纪 70 年代东京工业大学的 K. Iga 等人首次提出 VCSEL 的概念[7]，在接下来的 20 多年里，VCSEL 一直都是研究的焦点，接下来简单的回顾一下 VCSEL 的研究历史。

1977 年，东京工业大学的 K. Iga 等人首次提出 VCSEL 的概念。

1979 年，K. Iga 等采用液相外延生长方法制备出 $1.2\mu\text{m}$ InGaAsP/InP VCSEL，77K 下脉冲激射，阈值电流 $I_{th} \sim 900\text{mA}$ [7]。

1983 年，K. Iga 等实现 860nm AlGaAs/GaAs VCSEL 77K 下脉冲激射，阈值电流 $I_{th} \sim 350\text{mA}$ ，同年室温脉冲激射， $I_{th} \sim 1.2\text{A}$ ，次年降到 310mA [8]。

1985 年，K. Iga 等制备出 860nm AlGaAs/GaAs VCSEL 列阵。

1988 年，K. Iga 等实现 860nm AlGaAs/GaAs VCSEL 室温连续激射[9]，AT&T 贝尔实验室 J.L. Jewell 实现光泵浦 InGaAs/GaAs VCSEL 室温连续激射。

1991 年，California 大学 R.S. Geel 等实现 980nm InGaAs/GaAs VCSEL 室温连续激射[10]。

1993 年，东京工业大学 T. BaBa 等实现 1310nm InGaAsP/InP VCSEL 室温连续激射[11]，美国 Sandia 实验室实现 GaInP/GaAs 红光 VCSEL 室温连续激射。

1994 年， 1550nm InGaAsP/InP 实现室温连续激射[12]。

1996 年，第一个 960nm InAs/GaAs 量子点 (Quantum Dots, QDs) VCSEL 实现室温连续激射[13]， $3.06\mu\text{m}$ CdHgTe 光泵浦 VCSEL 实现低温工作[14]。

1998 年，第一个蓝光 GaAlN/GaN VCSEL 在 77K 温度下实现脉冲激射[15]， $2.9\mu\text{m}$ InAs-GaSb-InAs-AlSb 量子级联 VCSEL 77K 温度下实现连续激射[16]。

2000 年， 1300nm GaInNAs/GaAs 量子阱 (Quantum Wells, QWs) VCSEL 实现室温连续激射[17]，PbTe VCSEL (波长 $4\text{--}6\mu\text{m}$) 85K 温度下实现脉冲激射， 1300nm InAs QDs VCSEL 实现室温脉冲激射[18]。

2001 年，第一个 GaSb 基 VCSEL (波长 $2\text{--}2.5\mu\text{m}$) 在 100K 准连续激射[19]。

2003 年, $3.8\mu\text{m}$ PbSe/PbSrSe VCSEL 实现室温高功率激射[20], $1.46\mu\text{m}$ GaInNAsSb/GaAs VCSEL 实现室温连续激射[21]。

2004 年, $2.36\mu\text{m}$ 光泵浦 GaInAsSb/AlGaAsSb VCSEL 实现室温连续激射[22]。

2005 年, $1.55\mu\text{m}$ VCSEL 阵列输出功率超出 30mW。

2006 年, 超高速 25Gbps 的 $1.1\mu\text{m}$ InGaAs VCSEL 研制成功[23]。

可以看到, 在过去的 20 多年里, VCSEL 的研究不断取得突破。很多大学、研究所和公司曾经或正在从事 VCSEL 的研究工作, 这包括日本的东京工业大学、三洋电气、NEC、Seiko Epson、NTT 光电实验室、Ricoh、Sony & 横滨国立大学; 美国的有 Lucent 技术研究所、California 大学、Texas 大学、Stanford 大学、亚利桑那州立大学、Sandia 国家实验室、加州理工大学、俄克拉荷马州大学、海军研究实验室; 亚洲的除日本外还有韩国的三星、Vichel 公司等。我国进行 VCSEL 器件研究的主要有中国科学院长春光机所、中国科学院半导体研究所、吉林大学、台湾工业技术研究所等。

1.3.5 ops-VECSEL 的研究历史

VECSEL 概念是由半导体盘形激光器发展[24]而来, 1997 年 Kuznetsov 用 3W 的 808nm 边发射半导体激光器做泵浦源, 第一次实现了高功率和高光束质量的 980nm OPS-VECSEL, 最大输出功率 0.69W。器件采用基于 GaAs 的增益层, 有源区包括 13 个 $\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱, 激射波长为 980nm。一个 3W 的 808nm 宽条二极管来泵浦, 输出耦合效率为 4%, 主要为 TEM_{11} 输出光。他们也报道了 TEM_{00} 输出, 耦合进单模光纤以后功率为 0.37W。

Hlom 等人制造了一种相似结构的器件[25], [26], 使用晶格匹配的 AlGaAs/GaAs 材料, 激射波长是 870nm。这个量子阱系统与压应变的 InGaAs/GaAs 系统比起来, 微分增益和特征温度都低, 而且当用一对偏振耦合 670nm 二极管的泵浦功率为 850mW, 并用热沉冷却到约 0°C 时, 他们的输出功率也仅为 0.15W。

这些早期的器件的有源区都形成一个共振亚腔, 在以相对窄的滤波机制的代价下, 增强了有效增益, 好的有源区可以在获得较宽的光谱滤波特性的同时, 也使热特性不随温度发生漂移。Garnache 等人分析了几种 VECSEL 增益结构的滤波特性[27], [28], 发现如果短亚腔与工作波长反共振, 并在空气界面形成窄带反射结构, 则不仅光谱滤波的带宽在 10nm 数量级, 而且量子阱的有效增益带宽也比本征带宽大。尽管这种结构设计没有共振增强有效增益, 但是它的阈值却很低。Holm 等人早时候也报道了这种反共振设计的结构, 用于对 VECSEL 实现单频二次谐波的产生。

VECSEL 用功率高达 1.5W 的 830nm 光纤耦合二极管泵浦, 在增益结构的表面形成 90 μm 的光斑。把热直接从有源区移走的有效方法不是通过 DBR, Alford 提出了这种方法[29], 他用未镀膜的蓝宝石窗口作为热沉, 与 VECSEL 增益元件

的前表面相接。这些人在没移除任何衬底的情况下得到的最大连续输出功率为 1.6W。他们的 InGaAs/GaAs VECSEL 工作波长是 985nm，泵浦光为 814nm 的光纤束耦合二极管模块，在泵浦光为 9W 的时候发现了热饱和现象。

Hastie 等人把热平面扩散技术应用到激射波长是 850nm 的 GaAs/AlGaAs VECSEL 上[30], [31]。用 SiC 代替蓝宝石作为热扩散平面，这时热导增加了一个数量级。采用泵浦光通过平面表面传输的方法，他们得到了最大输出功率为 0.5W 的圆形 TEM00 光斑，斜率效率为~32%。他们又进一步作了微片 VECSEL，由 VECSEL 半导体 DBR 和镀在蓝宝石表面的绝缘镜构成谐振腔。使用输出 2.5W 的 674nm 氮离子激光器以正常角度泵浦，得到的 GaAs /AlGaAs 微片 VECSEL 波长为 850nm；气体激光器的高光束质量使得泵浦光可以紧密聚焦为 25um 的光斑。这些器件在入射功率为 2.2W 时激射出功率大于 350mW 的 TEM00 模式激光。他们也制造了输出 1.7W 的 980nm InGaAs/GaAs VECSEL，使用的泵浦光输出 8W 的 810nm 光纤耦合二极管，工作物质维持温度在 20°C。如果工作物质维持温度在 0°C，则输出功率提高到 2.5W。但是输出光为圆形对称的多模光束。

最近几个研究结果表明了 VECSEL 功率缩放的潜力。Lutgen 等人制造了连续输出 8W 的 1um InGaAs/GaAs VECSEL[32]，使用的泵浦光是输出 808nm 的光纤耦合二极管模块。器件的效率相当的高，总的光光转换效率为 41%，这说明外延片生长的非常精密，质量非常高。器件的散射损耗小，有效增益高。采用衬底移除的方式进行热处理，最后把 7um 厚的半导体薄片焊接到铜质热沉上。薄片上泵浦光斑的直径~300um。对器件的热流进行了数字分析，发现热流与热流流走处的剩余衬底的厚度有很大的依赖关系。最近 Chilla 等人制造了输出 30W 的 980nm 激光器，采用 InGaAs/GaAs 材料体系，输入到增益结构上的泵浦光的净输出功率为 70W。他们的泵浦光光斑半径在 500-900um 之间可调，二个镜面形成的腔使得器件多模输出， M^2 的值在 3 左右。

Novalux 团队制造了电泵浦，高功率的 VECSEL[33]，他们把这种有特点的器件起名为 NECSEL。Novalux 报道的电泵浦 VECSEL 激射波长是 980nm，多模光连续输出 1W，单横模输出 0.5W，与单模光纤的耦合效率是 90%。采用线性三-镜耦合腔设计方案，有源区内的压应变 InGaAs 量子阱位于 P-掺杂的高反射率的 GaAs/AlGaAs DBR 和 n-掺杂的部分反射（反射率为 70-80%）的 DBR 之间。经过 n-DBR 的光横穿衬底，使得在激射波长处的光损耗较低。在衬底的表面镀上增透膜，这样就构成了完整的腔，这种情况下得到的出光孔径是 10-20um，输出功率为 10mW 的 TEM₀₀ 波。有源区形成了器件的高精度的共振亚腔，在某一温度下，激射的峰值波长必须与光学层的厚度相匹配，这个温度是与给定的注入电流所引起的热分布相一致的；由于光谱没有与冷的器件对准，所以提高了阈值电流。好的电学的设计就可以实现高的功率输出，因为这样可以使载流子在大孔径范围内有很精确的横向分布，同时降低电阻，热阻和光学损耗。考虑到热聚焦效应，球面镜可以控制腔内空间模式的分布。已经有报道连续输出 1W 的 NECSEL 了，出光孔径为 150um，模式较少，且 M^2 值小于 10。

1.3.6 面发射激光器的应用

1.3.7 VCSEL 的应用

VCSEL 有着如此多的优点,也就决定了其具有很多应用,也正是 VCSEL 的诸多用途促进了 VCSEL 的研究和商业化的发展。VCSEL 的主要应用与其波长密切相关,接下来就不同波长的 VCSEL 及其应用进行介绍。到目前为止,已经有可见光、850nm、980nm、1310nm、1550nm 以及中远红外波段的 VCSEL 被研制成功,这几乎涵盖了所有半导体激光器所能实现的波段。

(1) 蓝光 VCSEL

蓝光激光器的主要应用于光学存储,如高密度 DVD。同时蓝光又是三基色之一,在白光照明、信号灯等方面有重要应用。蓝光 VCSEL 离商业化还有一定距离。

(2) 红光 VCSEL

红光 VCSEL 波长为 650nm-670nm,主要用于光学存储、短距离高速光通讯和光互连、激光扫描打印、取代 He-Ne 激光器。典型应用有家庭网络互连、汽车内高速大容量数据传输等。因为好的出光质量和低成本,红光 VCSEL 也可以取代 He-Ne 激光器和传统红光 EEL 的应用,目前已经商业化。

(3) 780nm VCSEL

780nm 波长也是塑料光纤的一个低损窗口,因此 780nm VCSEL 主要用于短距离低成本高速数据通讯和光互连。780nm VCSEL 列阵可以应用于打印机。典型应用有家庭网络互连、数字视频、Gigabit 数据交换[34]等,已经有相关的 VCSEL 模块商业化。

(4) 850 nm VCSEL

因此 850 nm VCSEL 主要用于短距离高速数据通讯和光互连。它在短距离高速数据通讯和光互连应用中的性能和稳定性比 780nm VCSEL 强得多。目前 850nm VCSEL 列阵可以实现 225Gbps 的通讯速度[35]。

(5) 980nm VCSEL

高功率 VCSEL 中,980nm 激光是一个非常重要的波段。980nm 是掺铒光纤放大器的泵浦源,在光通信中有极为重要的应用。980nm 还是掺镨光纤激光器的泵浦源。依然是因为 VCSEL 优异的出光质量,因此有不少研究组从事 980nm VCSEL 的研究,利用它来替代边发射半导体激光器泵浦固体激光器,获得蓝绿光输出。980nm VCSEL 目前已经商业化。

(6) 1310nm VCSEL

1310 nm VCSEL 主要用于中距离高速数据通讯和光互连、光并行处理、光识别系统,它在城际网中有着重要的应用。它可以实现 10km、几个 Gbps 的高速数据传输。

(7) 1550nm VCSEL

该波长主要用于远距离高速数据通讯和光互连、光并行处理、光识别系统。

可以实现 50km、几个 Gbps 的高速数据传输。

(8) 中红外波段 VCSEL

该波段 VCSEL 可以用于这些化学物质检测。VCSEL 具有很好的出光质量，而且体积小，因此 VCSEL 是小体积、低价位、便携式气体检测仪的理想光源。

(9) 垂直腔面发射激光阵列

VCSEL 及其阵列是光子集成的重大突破，已有中小型阵列实现了商品化。

1.3.8 ops-VECSEL 的应用

1) 激光显示方面：

OPS-VECSEL 与全固态激光概念相结合，发展潜力巨大，特别是倍频激光器应用空间更宽广。数百毫瓦全固态蓝光激光器国外市场的价格在 1 万美元到 5 万美元。考虑批量生产后的市场价位下降因素，按平均价格 6000 美元计，市场贸易额达 6 亿美元，可见 OPS-VECSEL 的市场前景十分广阔。德国激光显示公司 (LDT) 开展了激光显示研究工作，该公司预测 2010 年世界激光显示市场为 570 亿美元。美国相干公司和德国 Osram 公司联合研发基于 OPS-VECSEL 的激光电视和投影系统。综上，该研究产业化前景很好。

2) 在泵浦光纤激光器方面：

OPS-VECSEL 是光纤激光器理想的泵浦源，因为圆对称的输出光束，便于与光纤进行高效率的耦合。光纤激光器是 21 世纪激光器的代表，在工业、医疗、通讯、军事等领域具有非常重要的应用，美国科学家预测在战略防御武器方面它将代替目前看好的化学激光器。10 年内，在许多领域它将取代或部分取代 CO₂ 激光和 YAG 激光等固体激光器。据预测，光纤激光的理想泵源具有非常大的市场，将具有约 200 亿美元的市场。

3) 作为信息载体：

在大气光通信、空间光通信、空潜通信、潜潜通信、探潜、激光引信、跟踪、制导、雷达、夜视、目标识别、对抗等领域将发挥重要的不可替代的作用。如可以作为激光测距机、信标机、前视雷达、防撞雷达、激光引信、光电对抗武器。

1.3.9 本论文的研究工作

本论文围绕 980nm 波段 GaAs 基 InGaAs 量子阱材料和 980nm 垂直外腔面发射激光器的理论，对 VCSEL 设计、制备工艺、以及光泵浦垂直外腔面发射激光器进行结构设计和实验研究等进行了以下方面深入系统的研究工作：

1、制作出衬底出光 VCSEL 单管和列阵器件。其中室温连续激射条件下单管器件最高功率达到 1.95W，列阵器件达到 1.35W，均达到国内领先水平。

2、对 VCSEL 器件的激射波长、输出光功率、阈值电流等随温度的变化进行实验分析研究。

3、对制备光泵浦垂直外腔面发射激光器的几个主要工艺流程进行深入研究，

制备了腐蚀装置、焊接装置，并对焊接、腐蚀工艺和清洗工艺做了优化。

4、在实验基础上分析了光泵浦垂直外腔面半导体激光器（OPS-VECSEL）的热管理，建立了一维静态热传导方程，并结合数学工具 matlab 解热传导方程，得出热沉的热导率及 DBR 热导率变化对器件温度的影响。

5、进行泵浦试验，得到了初步的测试结果，并对所得结果进行分析，对所存在的问题进行深入研究，并给出解决方案，据此，对器件结构和实验工艺进一步优化。

2 理论研究

2.1.1 VCSEL 热特性分析及设计

目前面发射器件的发热是发展高密度二维阵列的主要障碍[36], [37]。有源区内部的热功率密度很高,从而使器件温度升高并导致阈值电流密度的进一步升高。垂直腔面发射激光器的有源区温度在室温连续工作状态下,估计比衬底温度高 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$,相反在边发射器件中,有源区的温度升高只在 $2\sim 5^{\circ}\text{C}$ 之间。可见在二维阵列中,实现有效的热扩散是非常必要的。另外,器件的寿命随温度的升高呈指数下降。目前,有些结构的垂直腔器件的许多性能参数都已经很好,而寿命问题却一直悬而未决,器件发热不能不说是主要原因之一。要细致地研究器件的热特性,首先要确定其热源,而热源和电流分布是密切相关的。

2.1.2 电流传播模型

选用柱坐标,并假定坐标原点在 VCSEL 的窗口的中心, z 方向垂直于窗口并指向衬底。电流从 p 面接触电极注入,通过 p 掺杂电阻层和有源区流向 n 接触电极的过程中,由于 n 型布拉格反射镜和衬底的电阻率比 p 型布拉格反射镜小得多[38], [39],忽略 n 型衬底和 n -DBR 中的电压降,近似地认为电极电压等于结电压和 p 型布拉格反射镜电压降的和。底发射 VCSEL 的电流传播模型如图 2.1 所示:

电势 U 在数学上可用拉普拉斯方程定义为[40]:

$$\nabla \cdot (\sigma \cdot \nabla U) = 0. \quad (2.34)$$

图 2.1 中, s 为 P 面接触电极的半径, d_{cap} 是 p -DBR 上部的保护层的厚度, d_{all} 是整个器件的厚度。 n 型电极整个接触面的电压在边界定义范围内的变化为 0。假设顶部圆形接触的电压满足边界条件时,保护层内具有均匀的电流密度。对没有明确界限的器件边界,定义一个边界条件,例如考虑衬底与空气界面时,认为定义区域外的电压降为 0。

假定 p 电极电压为 U_0 , 该方程的边界条件为[41]:

$$U(r, z = 0) = U_0; \quad (2.35)$$

$$\frac{dU}{dr} = 0 \quad (\text{当 } r = s, \quad 0 \leq z \leq d_{cap}); \quad (2.36)$$

$$U(r, z = d_{all}) = U_{bot}(r) = 0. \quad (2.37)$$

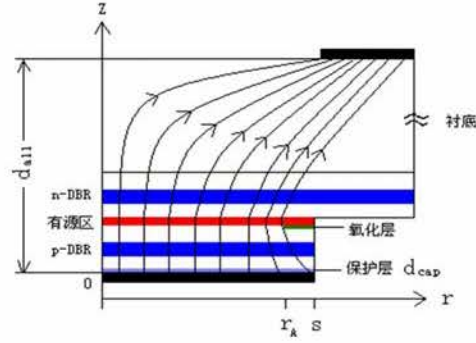


图 2.1 底发射 VCSEL 的电流传播示意图

电导率 σ 在方程(2.34)中用矢量模型定义为：

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_r & 0 \\ 0 & \sigma_z \end{pmatrix}, \quad (2.38)$$

这里 σ_z 和 σ_r 分别表示 VCSEL 的柱坐标中轴向和径向的电导率，并设定各个 VCSEL 区域内具有同样数值的轴向电导率 σ_z 和径向电导率 σ_r 。电导率由下列方程给出

$$\sigma_z = \frac{1}{\rho} = \frac{J_c d_{reg}}{V} (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}; \quad (2.39)$$

$$\sigma_r = \frac{1}{\rho} = \frac{\left(\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_2}{\rho_2} + \frac{d_3}{\rho_3} + \dots + \frac{d_n}{\rho_n} \right)}{(d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n)} \quad n=1, 2, 3, \dots, n+1, \quad (2.40)$$

这里 J_c 是流过薄层的电流密度， d_{reg} 和 d_n 分别表示该区域的厚度和第 n 层的厚度。

由电流平衡方程，电流注入区的电流 I 和有源区的电流密度 J_A 有如下关系。

$$\frac{dI(r)}{dr} = 2\pi r J_A(r); \quad (2.41)$$

$$J_A(r) = \sigma_z \cdot \nabla U(r). \quad (2.42)$$

上面方程组的边界条件为：

$$I(r) = I_A (0 \leq r \leq s); \quad (2.43)$$

$$I(r) = 0 \quad (r > s); \quad (2.44)$$

以及归一化方程

$$I_A = 2\pi \int_0^{r_A} J_A(r) r dr, \quad (2.45)$$

其中， I_A 是流过有源区的总的电流， r_A 是有源区半径。

2.1.3 热分布

垂直腔结构的半导体激光器的热行为非常复杂，许多参数都与温度有关。而器件的热源比边发射激光器要多，除了要考虑有源区发热以外，还要考虑由于 DBR 串联电阻引起的焦耳热，为简单起见，我们不考虑 n-DBR 及衬底的发热。由于电子的迁移率比空穴的迁移率大得多，n-DBR 的串联电阻小，电流分布分散，电流密度小，发热比上 DBR 要小得多，这个近似在阈值电流附近工作时，是可以接受的，同时我们还假设热源在 Z 方向上是均匀的，热流只由发热位置流向热沉，而流向器件表面的热流不计在内。

VCSEL 中的主要热源分布如图 2.2 所示。第一部分是由电流注入区的串联电阻发热引起的焦耳热，它的计算式表示如下：

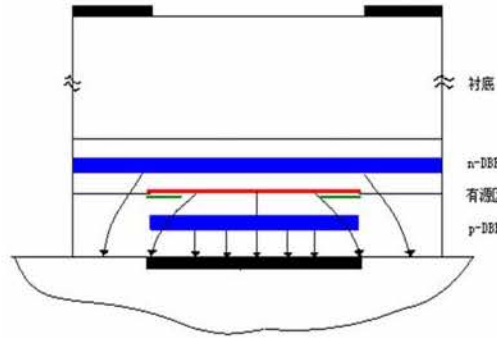


图 2.2 VCSEL 的热源分布

$$Q_{DBR} = I_A^2 R, \quad (2.46)$$

其中， I_A 是流过有源区的总电流， R 是 p-DBR 的电阻。第二部分电流限制区的焦耳热，用(2.47)式表示：

$$g_i = j^2(r) \rho_i, \quad (2.47)$$

其中， $j(r)$ 是器件的电流密度， ρ_i 表示氧化层 p-DBR 的电阻率。第三部分是有源区发热，它可以分为三部分：有源区中心的量子阱发热和上下限制层 AlGaAs 以及量子阱两边的空间层。量子阱发热可以用下面的公式来近似[42]：

$$g_a = \frac{U_a(r)(1-\eta_{sp}f_{sp})}{d_{QW}} [j_{th} + (j(r) - j_{th})(1-\eta_i)], \quad (2.48)$$

其中, d_{QW} 是有源区的厚度, η_{sp} 和 η_i 分别是自发发射和受激发射的内量子效率, f_{sp} 是自发发射光子从有源区逃逸的因子, j_{th} 是阈值电流密度。 $U_a(r)$ 表示整个有源区的电压降用式(2-49)表示:

$$U_a(r) = \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{j(r)}{j_s}\right), \quad (2.49)$$

上式中, j_s 表示 pn 结上的反向饱和电流密度。

在计算有源区发热的时候, 要考虑 j_{th} 、 η_{sp} 、 η_i 与温度的关系[43],

$$j_{th}(T) = j_{th}(300) \exp[(T-300)/T_0]; \quad (2.50)$$

$$\eta_{sp(i)} = \eta_{sp(i)}(300) \exp[-(T-300)/2T_0]. \quad (2.51)$$

最后, 在量子阱外面还有上、下阻挡层和限制层的发热, 也和量子阱区的发热一样用 $g_i = j^2(r)\rho_i$ 表示。

2.1.4 ops-VECSEL 理论分析及设计

VECSEL 想要获得好的增益特性必须要求量子阱准确地放在多层结构的驻波波峰处, 谨慎的设计增益芯片可以修正生长的错误并且可以预见一些激射特性。芯片结构生长在 GaAs 衬底上, 激射波长为 980nm, 我们的有源区 (图 2.3) 是由 14 个 8nm 厚的 InGaAs 压应变量子阱组成, 总厚度为

$$d_{ActReg} = 7\lambda/2$$

激射峰在常温低泵浦功率下是 980nm, 在多体效应和热效应的影响下可以允许 20nm 的波长飘移, 为了提高结构的稳定性我们在生长的过程中在量子阱的两侧分别生长 28.8nm 厚的 GaAsP 作为限制层, 这层 P 掺杂的材料有一定的压力应变特性。

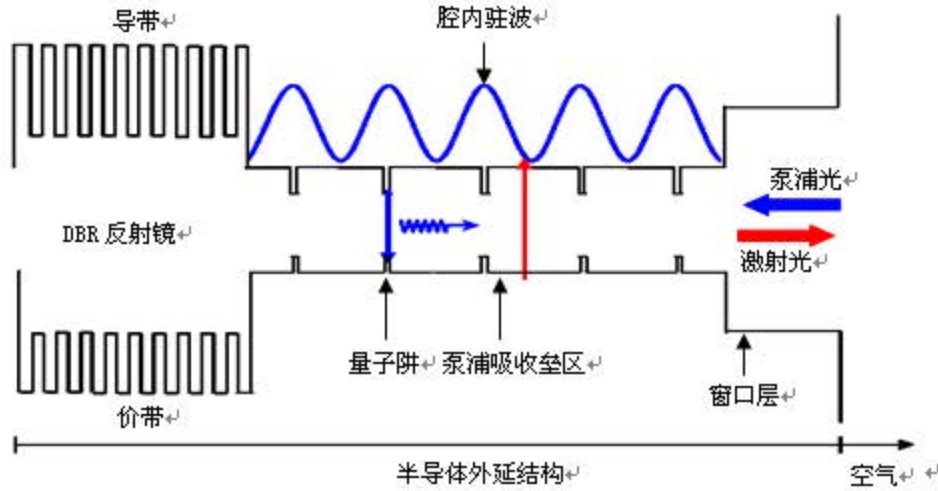


图 2.3 器件结构原理图

VECSEL 的活动腔镜的性质由量子阱的结构和其微腔结构设计有关，这方面的已有很多报道[29], [30]，这里我们对关于 VECSEL 设计的关键特性进行描述，并且详细的阐述一种近似方法来分析芯片结构[44]，这种方法非常便于设计和描述 VECSEL 的增益介质。

2.1.5 光腔内的发光点

对系统的宏观判断可以确定在一个光腔内的发光点的激励类型，图 2.4 可以了解这种几何结构。

一对反射平面中有一个光点，这个光点离反射率为 R_1 的平面的距离是 d_1 ，离反射率为 R_2 的平面的距离是 d_2 ，在图中可以看出观察者可以通过低反射镜（ R_2 ）的一侧看到无限对光点的虚像，这些相互干涉的虚光源产生干涉，干涉的光强分布可以由传输角度 θ 、距离 d_1 、 d_2 以及真空波矢量 k_0 表示：

$$I(\theta) = \frac{1}{|1 - R_1 R_2 \exp(-i\phi)|^2} (1 + R_1 - \sqrt{R_1} \cos(2\phi_1)) \quad (2.1)$$

这里：

$$\phi_1 = k_0 n d_1 \cos \theta,$$

$$\phi_2 = k_0 n d_2 \cos \theta, \quad (2.2)$$

$$\phi = \phi_1 + \phi_2.$$

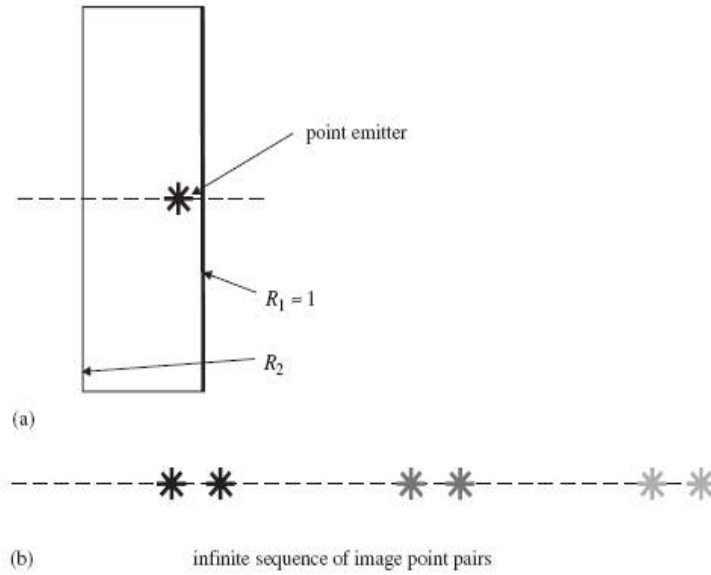


图 2.4 (a) 在两个反射镜中间的发光点 (b) 无限对光点的虚像

方程 (2.1) 是 Airy 方程和两光束干涉方程得到的, Airy 方程描述在激光波长处的谐振这里 ϕ 是 2π 的整数倍。两光束干涉方程描述光点是如何在驻波模的波峰处最优激励的。

这种 VECSEL 增益芯片的最基本的模型用发光点来代替量子阱, 用两个简单的反射面代替微腔, 阐明了这种结构的关键的设计和描述等问题。每个量子阱的吸收主要由其在驻波(两光束干涉方程)的具体位置决定, 错误的生长可以使量子阱偏离驻波波腹位置, 导致高的阈值和器件性能的恶化。结构的整体增益的大小由 Airy 方程在微腔内的谐振决定。另外可以通过测量芯片前表面的光致发光谱来得知芯片的一些特性, 光致发光谱是通过非常复杂的干涉之后得到的光谱, 所以它掩盖了量子阱发射的光谱。为了设计和评估 VECSEL, 最主要的有效数值计算工具, 这种工具应该可以计算包括 100 个或者更多界面的实际结构的这些效应。

2.1.6 泵浦设计

有源区中产生的废热的处理是激光器设计的一个主要部分。多数激光器都采用势垒泵浦的方式。此方式的优点就是具有高的泵浦吸收效率, 缺点是量子效率 $\lambda_{\text{pump}}/\lambda_{\text{lasing}}$ 相对较低。为了减少废热, 提高 VECSEL 的量子效率, 必须优化量子阱的深度以满足 (1) 量子阱中载流子被很好地约束, (2) 使废热最小化, 或者同时使激光器的量子效率最大化。

VECSEL 可以使用的另一种泵浦方式是量子阱内泵浦,就是泵浦光直接被量子阱吸收。由于泵浦波长和激光波长相接近,所以量子效率非常高,产生的废热也就比势垒泵浦的少很多。然而,非常小的吸收长度会限制泵浦吸收效率,为了解决这个问题,就必须增加量子阱的数目。不幸的是,量子阱数目的增多就会引起阈值上的问题。最近,Bejerdt [45]等人提出的简化的阱内泵浦方式克服了这个问题。在他们的阱内泵浦方式中,5 个量子阱分别处于腔内驻波信号和泵浦辐射信号的波腹处来增强增益和泵浦吸收。为了使驻波信号和泵浦激光的波腹重叠,必须满足下条件

$$\lambda_{pump} = \lambda_{lasing} \cos \alpha \quad (2-61)$$

其中 α 是泵浦激光的内部入射角。而且,为了提高泵浦吸收效率,在这个阱内泵浦的 VECSEL 中使用了固态微片激光器的外部多次泵浦光学元件。

2.1.7 温度分析模型[24], [25]

OPS-VECSEL 中增益结构的温度升高,可以通过一些解析方程模拟。图 2.5 给出了模型中用到的参数。其中, d 为薄的半导体材料(增益结构和 DBR 反射镜)的厚度,它的热导相对较低为 κ_{1d} 。热沉的热导为 κ_{3d} 。热沉与半导体材料完美键合。热源 P_{heat} 是一个半径为 ω (强度衰减 $e^{\frac{1}{2}}$) 的高斯横向分布源,其厚度可以忽略。温度分析的核心思想是把热传导分成两部分理想化的热流:一部分为半导体结构中高热阻材料和键合层这个薄区域内的一维热传导;另一部分是无穷大的散热器半个空间中的三维热传导,热沉的参考温度在无穷远处。

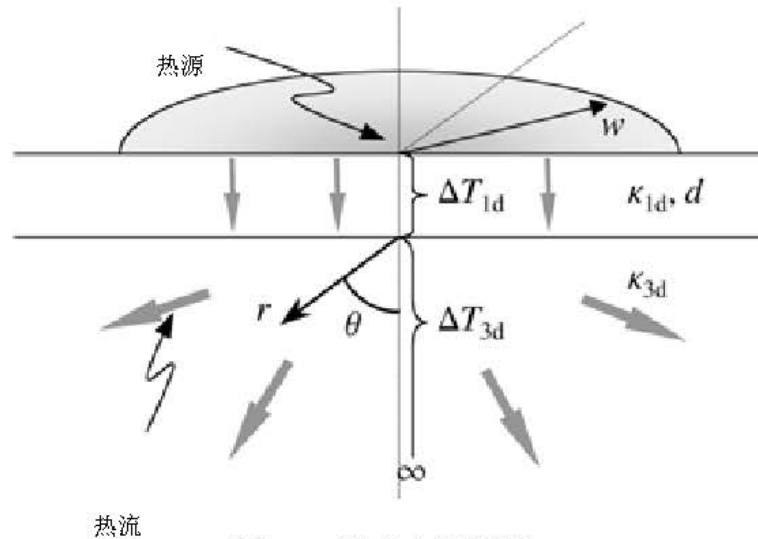


图 2.5 温度分析模型

泵浦光斑半径 ω_p 远大于半导体材料的厚度 d ，因此半导体材料到热沉的热传导是一维的，半导体温度由于热传导而下降了 ΔT_{1d} 。

$$\Delta T_{1d} = 2 \frac{P_{heat} d}{\pi \omega_p^2 \kappa_{1p}} \quad (3.21)$$

温度在热沉低边界处维持恒定，可是，为了计算的方便，我们假定热沉无穷大。这个假定看起来很让人迷惑，但是当热沉的厚度超过 3ω 时，根据这个假定能够得到令人满意的结果（误差 $<10\%$ ）。这是因为热阻大多源于热源附近，在那里热流经过一个最小的横截面。在应用了半个空间的无穷远处的边界条件时，能进一步计算热传导。我们使用球坐标系，并且热源处于坐标原点。

$$\rho_{r,\theta,\phi} = 2 \frac{P_{heat}}{\pi \omega_p^2} \exp\left(-2 \frac{r^2}{\omega_p^2}\right) \left(\frac{\delta(\theta - \pi/2)}{r}\right) \quad (3.22)$$

其中， δ 是 δ 函数， $1/r$ 因子代表横向厚度为常数的热源。热源中心相对于环境的温度升高可通过求解稳态格林函数方程得到

$$\Delta T_{3d} = 2 \frac{1}{4\pi \kappa_{3d}} \int \frac{1}{r} \rho dV = \frac{P_{heat}}{\sqrt{2\pi \omega_p \kappa_{3d}}} \quad (3.23)$$

其中系数 2 是因为考虑到计算的热流仅是半个空间的热流。

需要注意的是， ΔT_{1d} 依赖于加热的强度（与热能相对比）而 ΔT_{3d} 随着大的泵浦光斑增大了，但是加热强度维持恒定。为了区别这两种状况，我们定义参数 ξ 为 ΔT_{3d} 与 ΔT_{1d} 之比：

$$\xi \equiv \frac{\Delta T_{3d}}{\Delta T_{1d}} = \sqrt{\frac{\pi}{8}} \frac{\kappa_{1d}}{\kappa_{3d}} \frac{\omega_p}{d} \quad (3.24)$$

对于小的泵浦光斑， $\xi < 1$ ，这意味着温度的升高主要是由半导体中的一维热传导引起的。功率缩放的条件实现了，当泵浦光斑直径增加时，相应的泵浦能量也按比例增加，同时器件的温度、斜率效率和阈值强度近似没有改变。一旦我们能够提供足够的泵浦能量使泵浦强度恒定时，就能够使获得的输出能量随泵浦光斑面积线性的缩放。

$\xi > 1$ 时，热阻主要由热沉中的三维热传导控制。当维持泵浦强度恒定而增大

泵浦光斑时，温度升高了。通过增大器件来提高输出功率是可能的（例如，在高温条件下有好的特性的材料体系）。然而，温度升高对阈值强度和斜率效率的有害影响将最终限制了大尺寸器件的性能。

当 $\xi=1$ 时，我们定义 ω_{crit} 为临界半径，所以进一步增加泵浦光斑尺寸将会使热沉的热阻超过半导体结构的热阻。

$$\omega_{crit} = \sqrt{\frac{8}{\pi}} \frac{\kappa_{3d} d}{\kappa_{1d}} \quad (3.25)$$

为了获得高效率大功率的激光器，我们选择泵浦光斑尺寸大致等于 ω_{crit} 。在大多数情况下，半导体材料的热导和结构的厚度并不容许达到最优化。但是，使用高热导的热沉容许增加临界半径，因为临界半径与热导线性相关。我们还发现器件的最大输出功率与这个热导有二次依赖关系。比如说，铜热沉的热导约是 GaAs 材料热导的 10 倍，因此从键合到铜热沉上的增益结构中获取的功率将会是从生长在厚的 GaAs 衬底上的增益结构中获取的功率的 100 倍。

2.1.8 散热方式的选择

对于 OPS-VECSEL，目前普遍采用两种方法带走泵浦源和器件产生的废热：一是采用衬底腐蚀技术留下超薄（6-7 μm ）的器件，将其焊接到高导热热沉上；另一种是在器件出光面键合高导热的散热片作为 VECSEL 的内表面，衬底键合到高导热热沉上。我们设计的 OPS-VECSEL 结构是底发射结构，因此我们采用第一种方式将腐蚀后的外延片焊接到铜热沉上。再将铜热沉焊接到微通道热沉上，微通道热沉通水冷却，保证将激光器产生的热量迅速带走。

3 工艺研究

3.1.1 面发射激光器的工艺

3.1.2 光刻技术

光刻，又称为图形曝光，是利用事先制备的光掩模板，覆盖于涂有光刻胶的半导体外延片上，通过曝光、显影和腐蚀，来制备出一定形状的器件。光刻的实现是通过专门的光刻机，对于光电子器件的尺寸，一般不会小于其波长，所以制备光电子器件对光刻机的要求并不像大规模集成电路那样高。我们实验室所用光刻机为一台国产光刻机，可以制备 $1\mu\text{m}$ 以上图形。

光刻机的曝光方式一般可以分为遮蔽式曝光和投影式曝光，而遮蔽式曝光又分为接触式曝光和接近式曝光，前者掩模板与外延片直接接触，后者掩模板与外延片不接触，但紧密相邻。我们制备 VCSEL 采用的是接触式曝光，要求外延片与掩模版密切接触。

光刻的基本步骤：

(1) 外延片的清洗，(2) 匀胶，(3) 烘烤，(4) 曝光，(5) 显影，(6) 二次烘烤。

到这里，外延片就可以用于腐蚀而制作出形状了。

3.1.3 湿法腐蚀工艺研究

在半导体衬底上制作激光器结构时必须使用刻蚀技术。所谓刻蚀，就是以光刻技术形成的抗蚀剂图形作为掩膜，在晶片上进行微细加工的技术。刻蚀从技术上分有干法刻蚀和湿法刻蚀两种。干法刻蚀由于其可以精确控制精度而在面发射激光器制作中得以广泛应用，但它对晶片表面损伤较大，所使用的设备也非常昂贵，而湿法刻蚀对晶片损伤较小且成本低廉，但由于使用酸性溶液，会出现侧蚀，二者各有优劣，在现有的条件下，我们采用了湿法刻蚀的方法刻蚀出圆柱形台面结构，从而形成折射率导引型面发射激光器。

在 III-V 族 GaAs、GaAlAs、InGaAsP 材料中最为常见的选择性腐蚀液 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2\text{-H}_2\text{O}$ 系列。采用浓度为 98% 的 H_2SO_4 、30% 的 H_2O_2 和水。这种腐蚀液的性能和腐蚀速率主要取决于腐蚀液中硫酸的浓度，腐蚀为各向异性。沿不同的晶向腐蚀出台面或沟槽的形状很不相同，对于 (100) 的 GaAs 衬底，如果沿 (110) 晶向腐蚀则为倒台面形状，如果沿 (111) 晶向腐蚀则为“V”型沟槽正台面形状，而沿 (010) 晶向腐蚀则为垂直壁面形状。形成各种台面形状的原因是腐蚀液对 Ga 平面和 As 平面的腐蚀速率不同。

实验中，我们采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\text{:HBr:CH}_3\text{COOH}=1\text{:}1\text{:}1$ 体积比的溶液代替以往的腐蚀液进行腐蚀，得到了较好的腐蚀效果。这种腐蚀液的机理是： $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 是氧化剂，HBr 起络合作用， CH_3COOH 起缓冲作用，这三种成分中对腐蚀速率起主

要作用的是 $K_2Cr_2O_7$ ，所以我们在 HBr 和 CH_3COOH 的体积比一定的情况下，重点对不同配比体积的 $K_2Cr_2O_7$ 进行了研究。我们分别对

$K_2Cr_2O_7:HBr:CH_3COOH=1:1:1$ (20ml:20ml:20ml)

$K_2Cr_2O_7:HBr:CH_3COOH=3:4:4$ (15ml:20ml:20ml)

$K_2Cr_2O_7:HBr:CH_3COOH=1:2:2$ (10ml:20ml:20ml)

等不同的配比的腐蚀液进行了腐蚀速率的实验研究。图 3.1 是在相同的时间下、不同的腐蚀液配比对 $GaAs$ 的腐蚀深度的比较。可见随着 $K_2Cr_2O_7$ 配比的减少，腐蚀速率也逐渐减慢，而且配比为 3:4:4 和 1:2:2 的两种腐蚀液的腐蚀效果不好，台面两边的腐蚀深度不同，且腐蚀面不平整。

由图可见， $K_2Cr_2O_7:HBr:CH_3COOH=1:1:1$ 的腐蚀液在腐蚀深度为 $6\mu m$ 以前，腐蚀深度随腐蚀时间呈线形变化。在 Unimet-8318 型高倍显微镜下观察，台面两端的腐蚀深度基本一致，且腐蚀面平整，无腐蚀坑或凹凸不平的现象。实验中我们要求的腐蚀深度为 $5\mu m$ ，所以比较三种不同配比的腐蚀液， $K_2Cr_2O_7:HBr:CH_3COOH=1:1:1$ 符合要求。 $K_2Cr_2O_7:HBr:CH_3COOH=1:1:1$ 溶液的腐蚀深度不仅与腐蚀液的配比有关，而且随温度在变化。图 3.1 中腐蚀时的温度为 $22^\circ C$ ，其腐蚀速率为 $2.4\mu m/min$ ；在 $18^\circ C$ 时其腐蚀速率为 $2\mu m/min$ 。可见温度对腐蚀的速率有一定的影响，要想得到稳定的腐蚀速率，必须保证腐蚀时温度的恒定。

经过实验研究，我们得到了优化的湿法腐蚀条件，即在腐蚀液配比为 $K_2Cr_2O_7:HBr:CH_3COOH=1:1:1$ 、室温为 $22^\circ C$ 时，腐蚀速率为 $2.4\mu m/min$ ，为达到实验所需的腐蚀深度 $5\mu m$ ，腐蚀时间为 125 秒。图 3.2 给出这种腐蚀方法的扫描电镜照片。

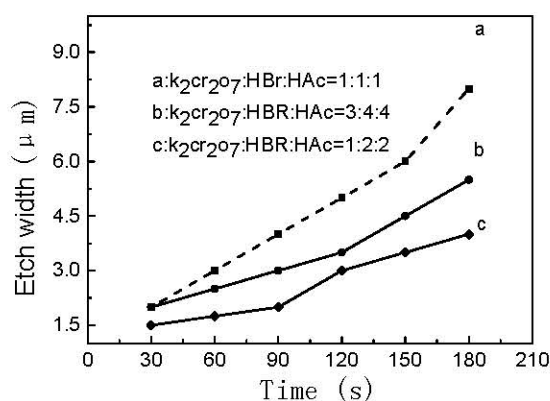


图 3.1 不同的配比比例时腐蚀深度随腐蚀时间的变化关系

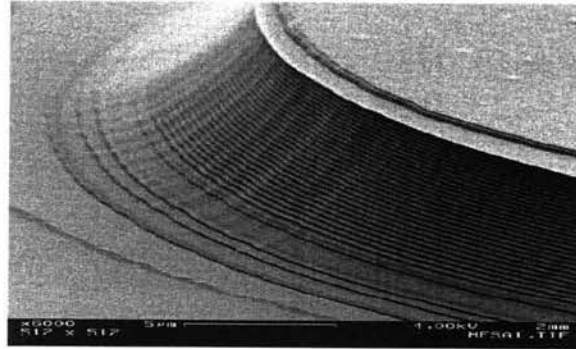
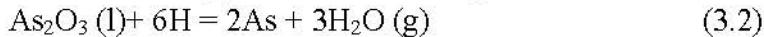
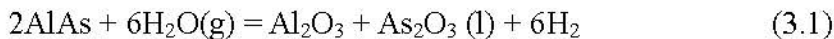


图 3.2 采用湿法腐蚀后的外延片电镜扫描

3.1.4 AlAs 氧化技术研究

根据 Raman 谱[46]和 Gibbs 自由能分析, AlAs 氧化会发生如下的反应[47]:



对于 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, 氧化产物是非晶态的 $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$, 氧化后该层会有变薄趋势, 主要是由于在 AlAs 中 Al 原子体积为 $(3.57\text{\AA})^3$, 在 Al_2O_3 中为 $(2.85\text{\AA})^3$, 理论上体积会有 20% 的收缩。但实际上纯 AlAs 氧化后的体积收缩约为 12-13%, $\text{Al}_{0.92}\text{Ga}_{0.08}\text{As}$ 约为 6.7%。体积的收缩会产生应力, 但对于 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ TEM 研究[48]^[16]并未发现有应力现象, 这也是常用 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 作为氧化限制层的原因之一。因为在 VCSEL 结构中, 氧化层距离有源区较近, 这种应力有可能会影响到有源区材料的带系。PL 谱研究发现, AlAs 层氧化后的体积收缩并未对有源层产生显著的应力影响[49]。

氧化设备其结构如图 3.3 所示, 一定流量的高纯氮气通过加热的水, 携带一定量水蒸气进入恒温的氧化室。氧化室内放有待氧化样品, 样品通过光刻腐蚀出台面, 露出要氧化的 AlGaAs 层。水蒸汽在气压作用下侧向扩散进 AlGaAs 层, 发生如(3.1)、(3.2)式的化学反应。高纯氮气起的作用是水蒸汽的载体。这种载体也可以是高纯氩气或一定比例的 H_2/N_2 , 但不可以是氧气, 如果是氧气, 氧化反应就不会发生[50]。这主要是因为, 氧化反应发生的关键在于 O^{-2} 的存在, 而不是氧分子。要保证氧化的均匀性和重复性, 必须保证氧化系统的稳定性, 这包括温度的稳定、进汽流量的稳定。

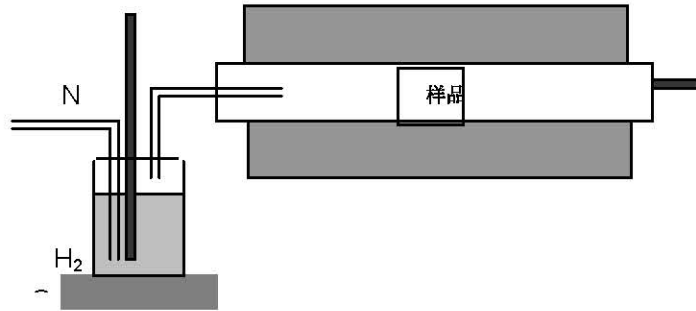


图 3.3 AlGaAs 湿氧化实验设备示意图

由于 AlAs 氧化后形成的氧化物折射率低（约 1.6），未氧化区域的折射率未发生变化。通过在显微镜下观察外延片的表面可以看到 AlAs 层横向氧化的情况，并可测量氧化宽度。AlAs 的氧化宽度不仅与炉温、氮气流量、水温有关系，还与 AlAs 的厚度、台面的直径等有关系。在实验中我们所用的 AlAs 层的厚度为 30nm。

3.1.5 光泵浦垂直外腔面发射激光器的工艺

光泵浦垂直外腔面发射激光器在结构上类似于一个半导体激光器泵浦固体激光器，由于是光泵浦，故不需要繁杂的电极制造过程，但由于器件工艺到最后要将芯片减到微米量级的厚度，并且由于是复合腔结构，故需要比电泵浦垂直腔面发射激光器更精确的工艺过程。下面就介绍一下具体的工艺过程。工艺流程框图如下：

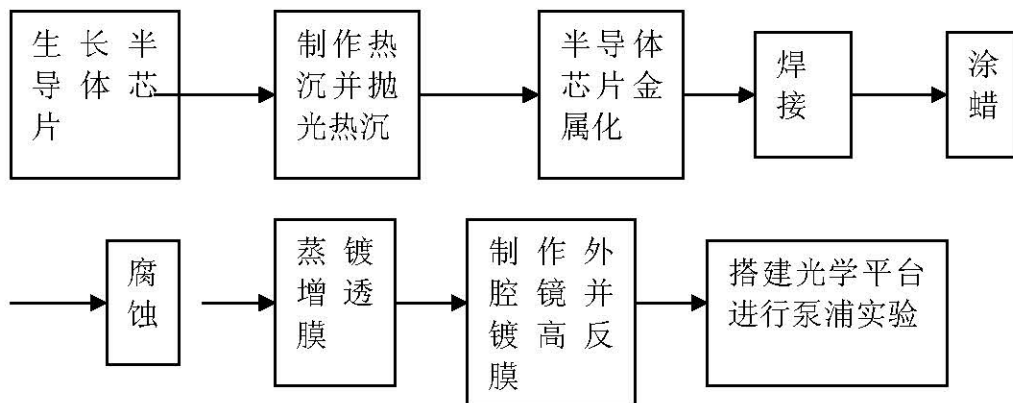


图 3.4 工艺流程框图

3.1.6 热沉制作与抛光

作为半导体外延片的载体以及外延片内部热量导出的关键部件，热沉材料的

选择至关重要。热沉材料的选择，首先要考虑材料的热导率，其次是热沉材料的线性膨胀系数（CTE）与外延片材料线性膨胀系数（GaAs 的线性热膨胀系数为 $6.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ^[23]）的匹配性，因为激光器工作时会产生大量的热量，如果不能及时将热量带走，就会使得整个激光器温度升高，如果外延材料与热沉材料的 CTE 不匹配，则在外延材料与热沉材料之间产生应力从而拉伤激光器管芯，在有源区引入位错或缺陷，劣化激光器的特性，使得器件寿命减少；如果应力过大，甚至会使激光器管芯断裂，造成激光器突然失效[51]，[52]。

表 3-1 常用热沉材料的性能参数

材料 \ 参数	热导率 (W/mK)	线 膨 胀 系 数 (K^{-1})	可加工性	材料成本	毒性	电阻
无氧铜	389	16.6×10^{-6}	好	低	无	低
氧化铍	250	6.3×10^{-6}	好	高	有	高
铜钨合金（90：10）	200	6.4×10^{-6}	差	高	无	低
CVD 金刚石	1500	11.4×10^{-6}	好	高	无	低
硅	140	2.6×10^{-6}	好	低	无	半导体
氮化铝	180	4.0×10^{-6}	好	低	无	低

选择热沉材料的时候，要选择热应力小、热导率高的材料。此外还要考虑热沉材料的可加工性能、原材料的成本、环保性以及电阻等，以优化制备高性能热沉的可行性，目前还没有同时满足热导率高、热应力小、线性热膨胀系数与外延材料相匹配、易加工、无污染、原材料成本低的可供选择的热沉材料。这里我们选用了铜和硅微通道作为热沉材料。

所有的表面均存在微观上的粗糙和宏观上的非平面，因此在连接时半导体外延片与热沉之间存在很多沟壑或空隙，其中都是空气，实际接触面积通常低于其表面积的 1%[53]。所以我们要尽量减小热沉表面的粗糙度，铜热沉由我们自行设计并制作，铜热沉采用无氧铜材料切割成 $3 \times 9 \times 12 \text{mm}^3$ 的小块，经过抛光之后即可使用。硅微通道热沉是我们与重庆师范大学合作制作的具体制作过程属于保密的范围故此不多作介绍，散热效果来说微通道热沉明显好于铜热沉，故我们以后的实验采用微通道的制冷方式。

热沉的抛光现在主要有以下方法[54]：

1) 机械抛光：机械抛光是靠切削、材料表面塑性变形去掉被抛光后的凸部而得到平滑面的抛光方法，一般使用油石条、羊毛轮、砂纸等，以手工操作为主，特殊零件如回转体表面，可使用转台等辅助工具，表面质量要求高的可采用超精研抛的方法。超精研抛是采用特制的磨具，在含有磨料的研抛液中，紧压在工件被加工表面上，作高速旋转运动。利用该技术可以达到 $\text{Ra} \approx 0.008 \mu\text{m}$ 的表面粗

糙度，是各种抛光方法中最高的。我们便选择了这种抛光方式。

2) 化学抛光：化学抛光是让材料在化学介质中表面微观凸出的部分较凹部分优先溶解，从而得到平滑面。这种方法的主要优点是不需复杂设备，可以抛光形状复杂的工件，可以同时抛光很多工件，效率高。化学抛光的核心问题是抛光液的配制。化学抛光得到的表面粗糙度一般为数 $10\ \mu\text{m}$ 。电解抛光、超声波抛光。

3) 电解抛光：电解抛光基本原理与化学抛光相同，即靠选择性的溶解材料表面微小凸出部分，使表面光滑。与化学抛光相比，可以消除阴极反应的影响，效果较好。电化学抛光过程分为两步：

(1) 宏观整平溶解产物向电解液中扩散，材料表面几何粗糙下降， $Ra > 1\ \mu\text{m}$ 。

(2) 微光平整阳极极化，表面粗糙度提高， $Ra < 1\ \mu\text{m}$ 。

4) 超声波抛光：将工件放入磨料悬浮液中并一起置于超声波场中，依靠超声波的振荡作用，使磨料在工件表面磨削抛光。超声波加工宏观力小，不会引起工件变形，但工装制作和安装较困难。超声波加工可以与化学或电化学方法结合。在溶液腐蚀、电解的基础上，再施加超声波振动搅拌溶液，使工件表面溶解产物脱离，表面附近的腐蚀或电解质均匀；超声波在液体中的空化作用还能够抑制腐蚀过程，利于表面光亮化。

对于铜热沉我们实验过程中选择了机械抛光的方式，我们实验室有专门的机械抛光装置，抛光过程中主要注意的问题是：固定热沉时要尽量把热沉对称排放均匀，磨料要从粗到细，换料的过程中一定把前面的磨料冲洗干净，磨好的热沉不能让别的东西划碰。

3.1.7 芯片金属化

所谓芯片金属化是指将芯片靠近 DBR 层的那面镀钛、铂、金，目的是为了跟 In 焊料发生化学反应增加焊接的强度。这一部分在焊接工艺的部分介绍，我们钛、铂、金合金是用电子束镀膜机来完成的。

3.1.8 芯片焊接

焊料的选择是极其关键的问题。因为焊料直接和管芯接触，焊料的好坏直接关系到管芯的寿命。焊料的导热性也是一个很关键的问题，因为半导体激光器在工作中要产生很高的热量。如果这些热量不能很快地传导出去，这些热量就会积聚在焊料附近，不但使焊料变热，使焊料的性能变坏，而且使激光器管芯变得很热，有可能使管芯很快烧毁。所以，焊料的好坏直接关系到器件的寿命。焊料中的空洞能减少器件的可靠性，空洞能提高半导体激光器芯片的温度。还会减弱焊接的强度，当器件碰到机械震动时，甚至使管芯脱离热沉。

焊料按其屈服强度的大小通常可分为两类：

1、硬焊料。它具有非常高的屈服强度，在通常运用中的应力作用下只发生弹性形变，相应的硬焊料的抗疲劳性非常好，同时由于不存在塑性形变，因此没有蠕变现象。但是另一方面，由于没有塑性形变的存在，它不能帮助减少热沉与

激光芯片衬底之间由于 CTE 的差别而引入的应力。

2、软焊料。屈服强度较低，在通常运用中的应力作用下发生塑性形变，具有非常好的延展性，在发生断裂前能够承受比较大的应力。因此软焊料的应用可以减少热沉与激光外延片衬底之间由于 CTE 的差别而在器件中引入的应力，适用于激光外延片与导热性好但是 CTE 与 GaAs 差别较大的热沉材料之间的焊接[55]，例如：CVD 金刚石、无氧铜和 AlN 等材料。与其它软焊料相比，纯 In 材料具有非常好的延展性，抗疲劳性以及裂纹传播率。因此，纯 In 焊料作为软焊料的代表是当前运用最广泛的大功率激光外延片与热沉的连接材料。同时，以纯 In 为载体加入其它金属可以得到一系列不同熔点的低温共晶焊料，同样具有与纯 In 类似的优点。

在焊接过程中，由于焊接材料被加热易与空气中的氧气发生反应，形成一层薄薄的氧化物。氧化层物质的熔点高，对焊料的浸润性差，它的存在阻止了焊料与热沉的接触，对焊接质量影响非常大。通常的解决方法是在焊接时使用助焊剂，以打破或减少金属原子与氧原子之间的链接，以得到纯净的金属表面。常用的助焊剂按其活性的强弱分为 7 个等级[56]：

R(Rosin)级：纯天然松香，活性很弱，助焊能力有限。

RAM(Rosin Mildly Activated)级：在纯松香中加入具有微活性的活化剂。

RA(Rosin Activated)级：松香中加入活性较强的活化剂。

RSA(Rosin Super Activated)级：松香中加入活性超强的活化剂。

SA(Synthetic Activated)级：合成式助焊剂加入活性超强的活化剂。

OA(Organic Acid)级：有机酸制成的助焊剂。

IA(Inorganic Acid)级：以更强的无机酸制成的助焊剂。

在电子产业中最常使用的助焊剂为 RAM 级或 RA 级，因为 RAM 级中活化剂的活性较低，焊接之后助焊剂残留物比较方便清洗。我们实验中选择松香作为助焊剂。

3.1.9 封边和腐蚀

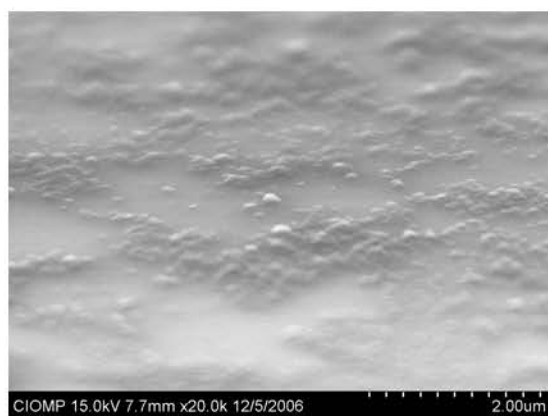
由于机械减薄之后的衬底厚度大约在 200um 左右，而最后外延片的衬底要全部腐蚀掉，这就要求对外延片封边以防腐蚀液的侧蚀，开始的时候我们封边用的是石蜡，由于石蜡的粘稠度较高，所以封边之后蜡层的厚度非常厚，这样影响后面的腐蚀的均匀性，并且腐蚀后封边的地方形成很高的台阶，不利于以后的泵浦实验以及测试。后来我们采用光刻胶的办法，由于光刻胶的粘稠度比较适合所以我们可以只对芯片的侧面进行封边，这样便不会造成腐蚀的台阶，并且腐蚀的均匀性很好。

由于是复合腔结构[57]我们对芯片表面的处理要求有很高的准确度。为了获得完整的结构和完好的表面质量，我们在结构设计中引入了腐蚀阻挡层。腐蚀的原理是：先氧化后形成络合物溶于溶液之中。采用不同溶液体系不同成份、浓度的化学腐蚀对半导体外延片表面的均匀性有着较大的影响[58]。不同溶液体系温

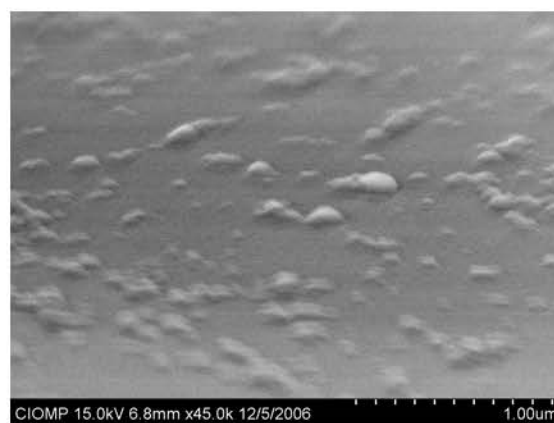
度变化对外延片表面的均匀性变化也有一定的影响,这是由于外延片表面发生化学反应的速率与温度有关,当溶液体系成份、浓度一定,温度升高,化学反应速率快,外延片表面的均匀性差。

实验过程中我们尝试了各种腐蚀溶液,在垂直腔面激光器的腐蚀工艺中通常采用硫酸系列对 GaAs 衬底进行化学腐蚀,我们首先进行了实验,在室温条件下腐蚀后的扫描电镜图片如图 3.5 (a),后来我们又采用了氨水系列以及柠檬酸系列腐蚀液进行腐蚀,在室温下其扫描电镜图片分别如图 3.5(b)、3.5 (c)

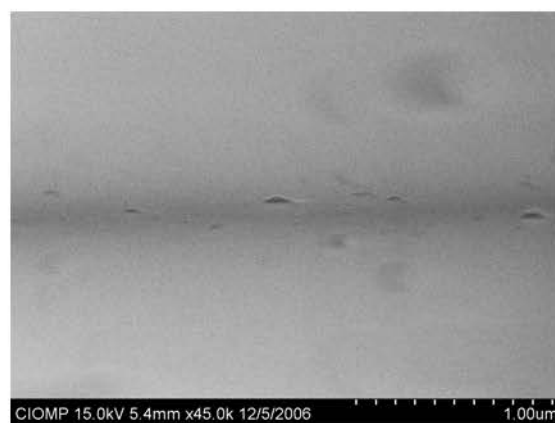
柠檬酸系列腐蚀液腐蚀后的扫描电镜图片明显好于硫酸和氨水系列的腐蚀液。故此我们选择柠檬酸系列腐蚀液。



(a)



(b)



(c)

图 3.5 (a) 硫酸系列溶液腐蚀后扫描电镜图片 (b) 氨水系列溶液腐蚀后扫描电镜图片 (c) 柠檬酸系列溶液腐蚀后扫描电镜图片

3.1.10 芯片表面镀增透膜

为了提高器件表面的抗损伤阈值和增加泵浦光和激光光的透射率，我们在腐蚀后的芯片表面镀了增透膜，图 3.6（a）和（b）为镀增透膜前后的反射谱，对比看出：镀增透膜后对器件没有影响。

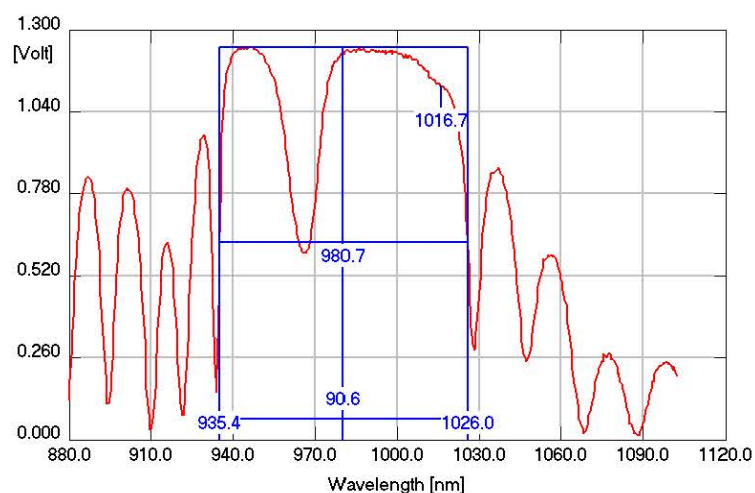


图 3.6（a）镀膜前反射谱

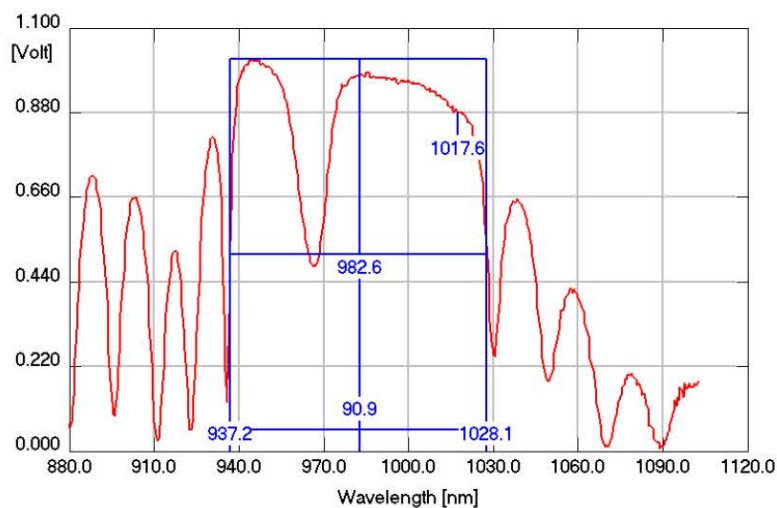


图 3.6（b）镀增透膜后芯片的反射谱

小结：本章主要介绍了整个工艺过程，重点介绍了腐蚀和焊接工艺，试验过程的很多实验装置都是由我们自己制作，并且达到了很好的效果，为我们下一步的泵浦实验打好了基础。

4 测试和热管理分析

上一章我们介绍了具体的工艺过程，为我们的实验做好了准备，这一章我们介绍一下具体实验的测试结果。

4.1.1 室温连续波条件下单管 VCSEL 器件光功率输出特性

室温条件下采用半导体综合特性测试仪对器件的伏安特性、光功率输出特性、光谱以及器件的发射远场等特性进行了测试。我们制作的面发射激光器窗口直径分别为：200 μm 、300 μm 、400 μm 、500 μm 、600 μm 、700 μm 和 800 μm 。每个直径的器件均达到可以室温连续电流激励条件下工作的性能，在此仅给出直径为 500 μm 器件的较详细的实验测量结果。

VCSEL 外延片采用金属氧化物化学气相沉积法 (MOCVD) 生长而成，有源区包括 3 个 8nm 厚的 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 量子阱和 10nm 厚的 GaAs 材料构成的势垒，激光波长约为 980nm。有源区夹在 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 空间层间，有源区及空间层构成一个波长的谐振腔。p-DBR 由 30 对 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$ 构成，反射谱中心波长为 980nm，理论上达到 99.9% 的反射率。为降低覆盖层的串联电阻，P 面掺 C ($1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$) 以减少电压降，同时不会增加吸收损耗。n 型 DBR 包括 20 对 Si ($2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$) 掺杂的 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$ ，提供 99.3% 的反射率。在 p 型 DBR 与空间层之间有一 30nm 厚的 AlAs 层，这一层经选择氧化后变成低折射率的坚固的隔离氧化物 Al_xO_y ，形成由氧化物包围的窗口，这样就可以减少横向电流扩展效应，产生对有源层的高效电流限制[59]。

p 面溅射一层 Al_2O_3 替代常见的 SiO_2 作为钝化层以防止短路。 Al_2O_3 导热性能好，对水汽敏感程度低，可以更好的提高器件性能。在 Al_2O_3 表面选择刻蚀出圆形台面，p 面欧姆接触采用 Ti/Pt/Au 结构，其中 Pt 是阻挡层，起着阻挡 Au 向激光器有源区扩散的作用，有利于提高激光器的稳定性和可靠性。为降低吸收损耗，n 面减薄到 180 μm 左右，采用双面对准工艺形成出光窗口，蒸镀多层 HfO_2 基 980nm 增透膜，以提高输出窗口的透射率。n 面的欧姆接触通过在衬底上蒸镀 AuGeNi/Au 形成。有源区的生热是 VCSEL 的主要热源，因此为达到有效散热的目的，采用底发射结构，将 p 面装配在金刚石热沉上[60]。图 4.1 是 500 μm 直径器件的光功率输出特性曲线，室温连续波条件下，器件的阈值电流为 880mA，500 μm 出光直径器件的最高输出功率可达 1.95W。同时由光功率输出特性曲线中可以看出，在高输出端，曲线没有显现出明显的光输出饱和现象。器件的功率转化效率为 16%，斜效率为 0.4W/A。从图中右侧的伏安特性曲线可以得到器件的导通电压为 1.6V，串联电阻为 0.13 欧姆，串联电阻比常规的低功率小直径面发射器件的串联电阻阻值小，这主要是器件的电流注入面积增大的原因。

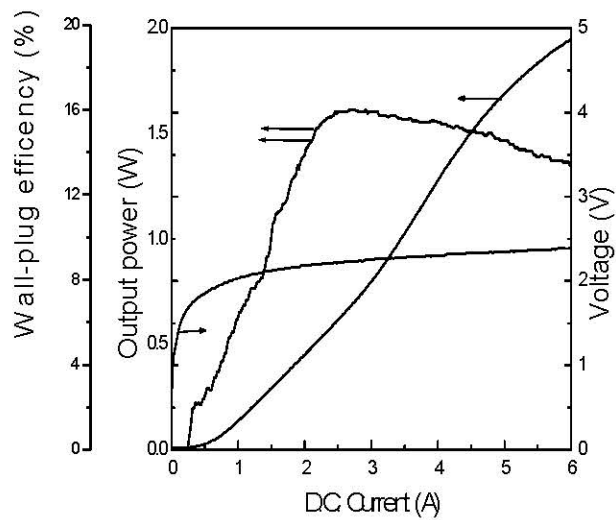


图 4.1 500μm 直径器件的 P-I、V-I 谱

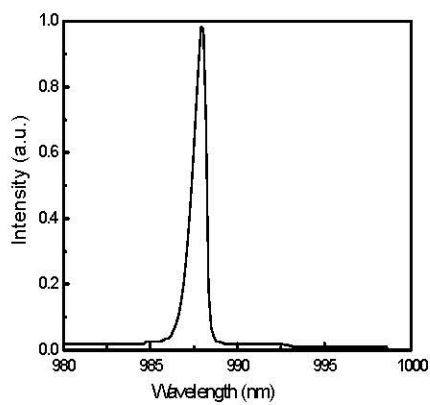


图 4.2 测试的器件的发射光谱图

图 4.2 是器件的发射光谱图，从中可以看出器件基本在单模状态下工作，发射光波长的峰值位置为 987nm，光谱的半高全宽为 0.9nm。

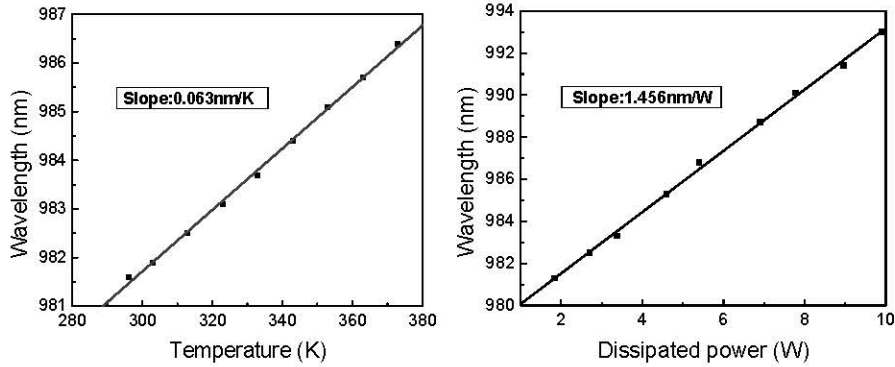


图 4.3(a)波长随温度的变化

(b)波长随消耗功率的变化

由上面的实验数据可知，器件的转换效率相对较低，这是由于连续电流激励状态下部分注入电流转化为器件生热。VCSEL 器件内部的生热用热阻 R_{th} 来表示

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{\Delta P_{diss}}, \quad (4.1)$$

定义为器件内部的温度上升 ΔT 和消耗的电功率 ΔP_{diss} 的比率，

$$\Delta P_{diss} = (u \cdot i - P_{out}), \quad (4.2)$$

P_{out} 是光输出功率， u 和 i 分别是器件的驱动电压和电流[61]。热阻用实验上测量的方法定义为 $R_{th} = C_1/C_2$ ， $C_1 = \Delta\lambda/P_{diss}$ ，是波长漂移与消耗功率的比率， $C_2 = \Delta\lambda/\Delta T$ ，是波长漂移与热沉温度的比率，为避免电流生热引起误差，实验采用的是脉冲电流激励。由于 VCSEL 的光腔很短，激射波长 λ 仅由谐振腔决定，而不是像传统的 F-P 腔 EEL 一样由增益峰决定[62]，波长漂移主要由谐振腔的平均折射率的变化以及半导体层的热膨胀决定，因此，模式的波长漂移由 DBR 反射镜和内腔的材料成分决定。图 4.3(a)为器件基模波长随温度的变化，测试电流为 2A，实验的结果是 $\Delta\lambda/\Delta T$ 近似为 0.063 nm/K，图 4.3(b) 所示波长漂移与消耗功率的比 $\Delta\lambda/\Delta P_{diss}$ 为 1.456 nm/W，最终我们得到器件的热阻为 23.1 K/W。

在光输出功率与器件出光窗口直径的关系曲线中 500~700 μm 直径器件的光功率均为 1.95W，是由于测试过程中器件注入电流受所采用的激光电源的最大输出电流限制所致。从我们的实验结果看，器件直径在 500~700 μm 为好。

4.1.2 器件温度特性的研究

垂直腔面发射激光器的谐振腔由两个极高反射率的分布布拉格反射镜 (DBR) 中间夹着一个有源区构成的。由于构成 DBR 的 GaAs、Al_{0.9}Ga_{0.1}As 材料存在较大的势垒差，且上下两个 DBR 的周期数都在 20 对以上，这种结构特点形成了面发射器件的高阻值特性，如此大的串联电阻使 VCSEL 在工作过程中温

升较大，影响了器件工作时的输出光功率[63]。与此同时，VCSEL 的谐振模式位置必须与量子阱的增益谱峰值位置相匹配，来实现 VCSEL 的激射。但 VCSEL 的模式位置与量子阱的增益谱位置都会受到器件温度的影响，随着温度的变化，这二者的位置都发生偏移，从而对 VCSEL 的输出特性产生影响。在此我们通过改变器件的温度对器件的激射波长、输出光功率、转化效率、器件阈值电流等随温度的变化进行实验研究。



图 4.4 VCSEL 变温测试装置

实验中我们采用的 VCSEL 变温测试装置如图 4.4 所示。温控装置由 AI708P 型人工智能调节器、加热片、铜热沉、支架、220V 电源、WRNK-112 型热电偶、散热片以及风扇等组成。AI708P 调节器的温度分辨率可达 0.5°C 。加热片的面积为 $40\text{mm}\times 40\text{mm}$ ，可以把铜热沉加热到 150°C 。热电偶的测量范围为 $0^{\circ}\text{C}\sim 1200^{\circ}\text{C}$ ，分度号为 K，它用来探测热沉的温度，然后把探测信号传给 AI708P，AI708P 通过继电器来对电路进行快速的通断，达到控制温度的目的，铜热沉的散热主要是通过散热片和风扇获得。

把 VCSEL 器件装在铜热沉上，由于铜具有良好的热导率，所以探测的铜热沉的温度近似为器件的温度。通过半导体激光器综合参数测试仪对 VCSEL 器件输出特性进行测试，得出 VCSEL 器件的输出特性参数随温度变化的关系。

4.1.3 器件激射波长随温度的变化关系

图 4.5 是我们实验测量的 $400\mu\text{m}$ 直径 VCSEL 的激射波长随温度的变化关系曲线。器件在 $2\times I_{\text{th}}$ 电流脉冲激励状态下，改变热沉温度测量器件激射波长的漂移。由测试实验数据可以看出，随着器件温度的升高，VCSEL 的激射波长在逐渐发生红移，红移速率大约为 0.06nm/K 。

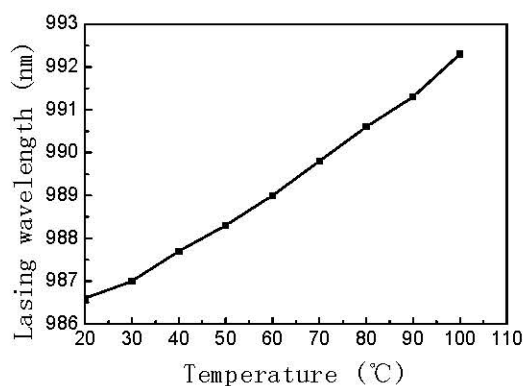


图 4.5 激射波长随温度的变化关系

4.1.4 器件输出光功率随温度的变化关系

图 4.6 是实验测量获得的 400 μm 直径 VCSEL 器件的光功率随温度的变化关系曲线。器件在 $2 \times I_{th}$ 电流激励下，改变热沉温度测量器件光输出功率的变化。室温条件下，器件的光功率输出为 370mW。100 $^{\circ}\text{C}$ 条件下器件的输出光功率降低到 200mW。从测量结果可以看出器件的输出光功率随温度的变化关系并不是简单的下降关系。20~40 $^{\circ}\text{C}$ 阶段器件输出光功率随温度升高有小幅提高的趋势，并且在 40 $^{\circ}\text{C}$ 达到最大值；随着温度的继续升高，输出光功率随之下降。分析其可能的原因是器件的谐振腔模位置和量子阱增益谱的峰值随温度的升高共同向长波方向漂移，由于漂移速率不同，先是逐渐靠拢，达到重合，后又逐渐远离，导致器件的阈值电流发生先减小，随之达到最小，最后不断增大，表现到器件的输出光功率上时，就显现出图 4.6 中的先增大、达到最大，后减小的变化趋势。为了进一步对这一现象进行实验分析，我们对器件的阈值电流随温度的变化进行了实验测量研究。图 4.6 右侧是器件的转换效率随温度的变化关系，变化规律基本与功率变化相同。

4.1.5 器件的阈值电流随温度的变化关系

改变热沉的温度对器件的阈值电流进行了实验测量。图 4.7 是器件阈值电流随温度变化的关系曲线。从测量结果可以看出的确出现了在上面我们分析的随温度的变化趋势，在小于 40 $^{\circ}\text{C}$ 的范围内器件的阈值电流随着温度的升高而降低，并在 40 $^{\circ}\text{C}$ 出现了最小值，随后温度升高，在大于 40 $^{\circ}\text{C}$ 后，器件的阈值电流随着温度的升高而升高与一般的边发射器件的变化趋势相同。与此同时，采用传统半

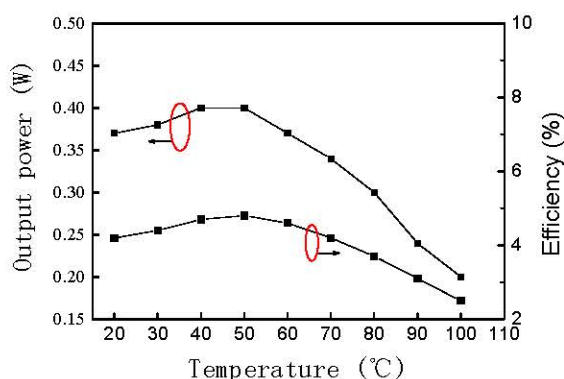


图 4.6 器件输出光功率以及功率转换效率随热沉温度变化的曲线

导体激光器的阈值电流随温度的变换函数关系[7]: $I_{th} = I_0 \exp(T/T_0)$ ，获得器件的特征温度 T_0 为 200K 左右，如此高的器件特征温度值可以预见器件具有很好的

温度稳定性。

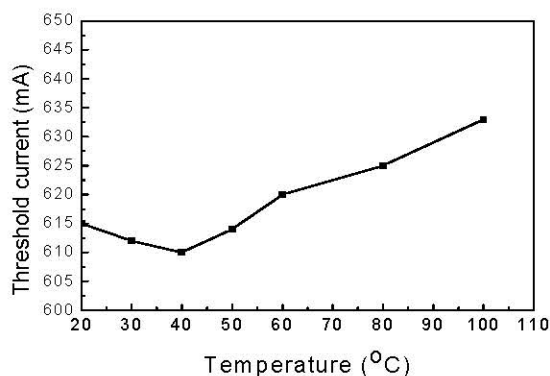


图 4.7 器件的阈值电流随温度的变化

4.1.6 ops-VECSEL 泵浦实验及结果

图 4.8 是我们泵浦实验的简图，我们用 808nm 的半导体激光器作为泵浦源，以一定的角度入射，带芯片的铜热沉用半导体制冷，在芯片的垂直方向上是外腔镜，另一侧为了让泵浦光多次入射到表面，设置一个反射镜，整个装置与 LD 泵浦固体激光器类似，各个装置用微调架固定在实验台上，进行泵浦实验，调节泵浦源和外腔镜的高度、俯仰和角度，同时变换腔长，用光谱仪记录器件的光谱特性。测得了初步的实验结果。

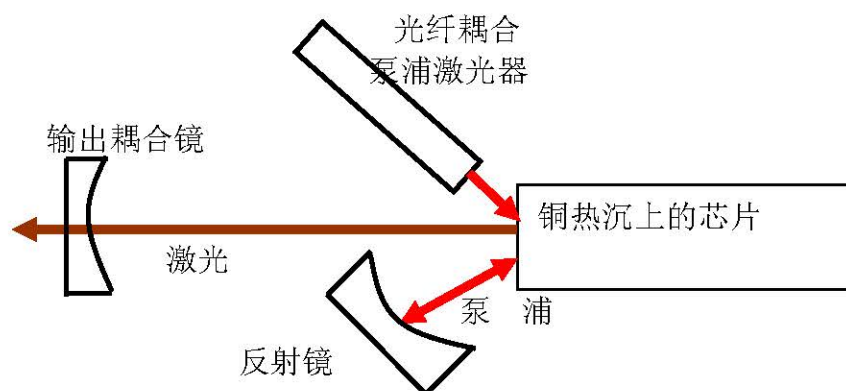
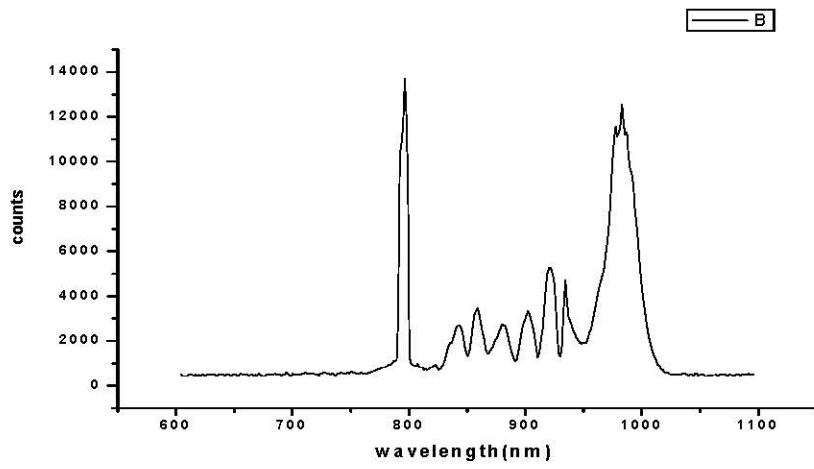
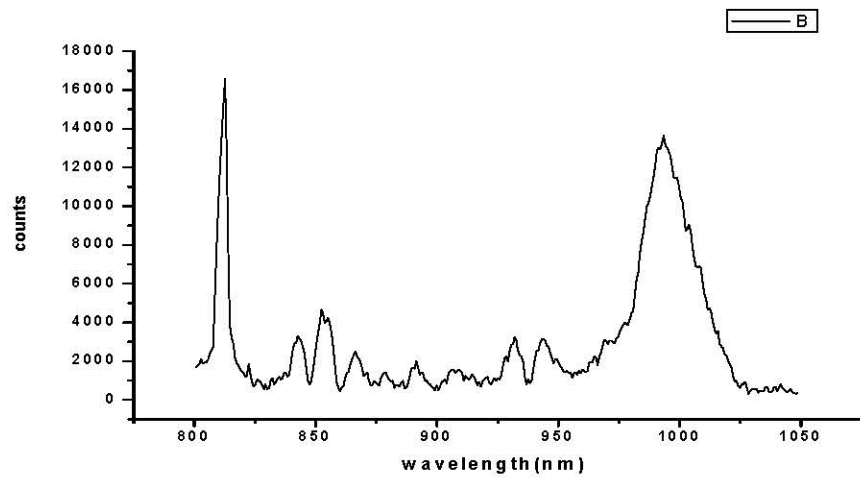


图 4.8 泵浦实验的简图

我们分别用脉冲和连续激光器对其作了泵浦实验，首先做了在连续激光器泵浦情况下的泵浦实验，下面是用连续输出功率为 20W，波长为 808nm 的半导体激光器（LD）泵浦时的荧光谱如图 4.9（a）、（b），继续加大泵浦光功率，谱线有降低的趋势可知器件已经达到热饱和，继续增大功率，器件的工作温度不断升高，半导体材料的有效增益随之减少，激光器没有形成激光。



(a)



(b)

图 4.9 (a) 20W 泵浦功率下的荧光谱 (b) 25W 泵浦功率些荧光谱

4.1.7 芯片的吸收谱和反射谱

为了确切知道我们芯片的生长质量我们对芯片的反射谱进行了测试，对反射谱的测试是为了证实 DBR 的生长质量，图 4.10 便是芯片的反射谱：

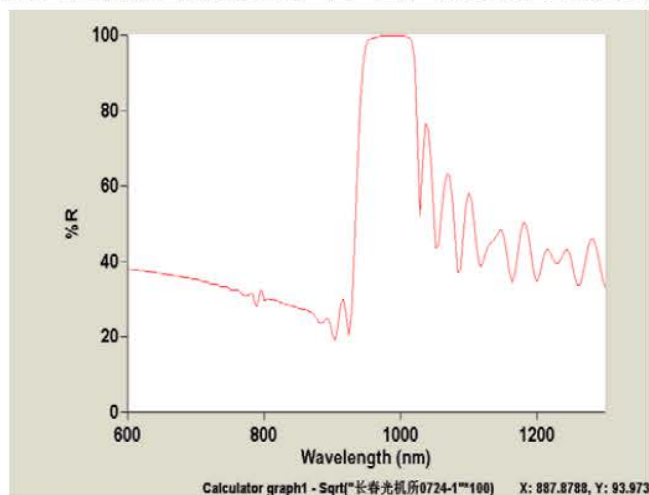


图 4.10 外延片的反射谱

从图中可以看出器件对 808nm 的泵浦光反射率在 30%左右，即器件对泵浦光的吸收为 70%左右，在 980nm 处反射率在 99.77%以上，基本能满足器件工作要求。为了增加对泵浦光和 980nm 激励光的透过率以及提高抗损伤阈值，我们考虑在其表面镀了一层增透膜。

确定完 DBR 生长没有问题，我们用化学腐蚀的方法将 DBR 除掉，以便测试有源层的一些特性。图 4.11 是我们除掉 DBR 之后测试的透射谱。

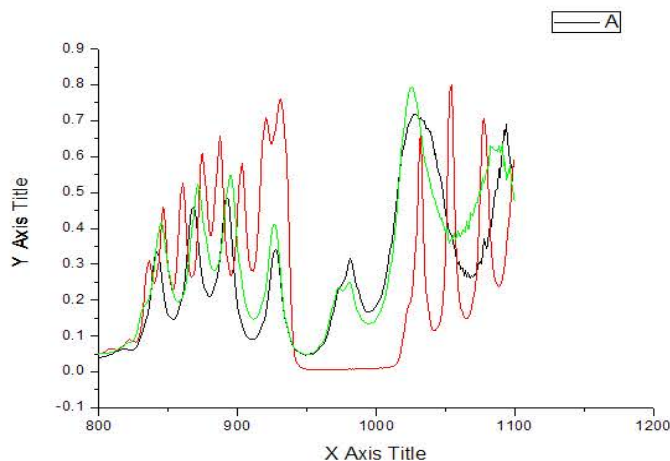


图 4.11 镀增透膜并除去 DBR 的芯片的透射谱

从上图我们可以看出器件对 808nm 的泵浦光的吸收很好，器件本身在吸收方面

没有任何问题。

4.1.8 芯片 PL 谱的测量

4.1.9 连续泵浦测试：

首先我们取两个样品，分别采用半导体制冷的方式和水冷的方式对其进行测试，图 4.12 是在不同的泵浦功率下测得的 PL 谱：

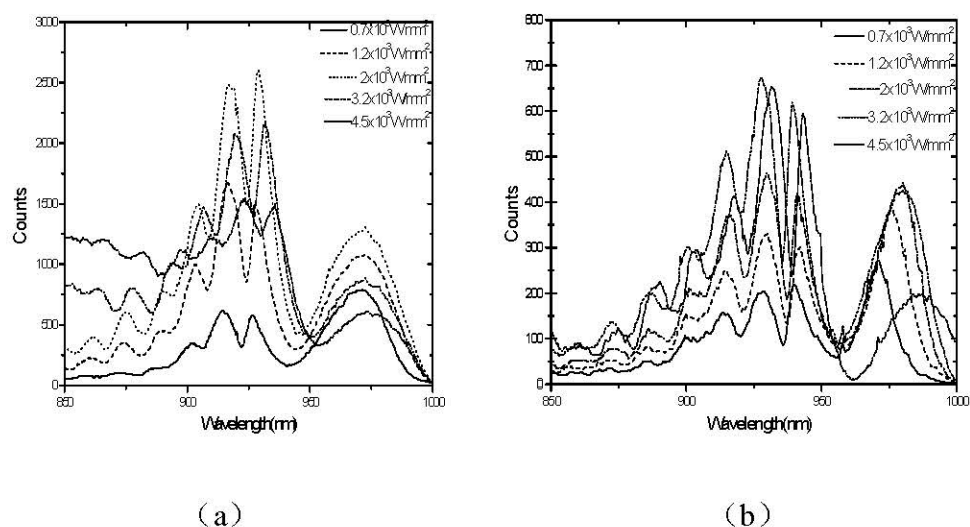
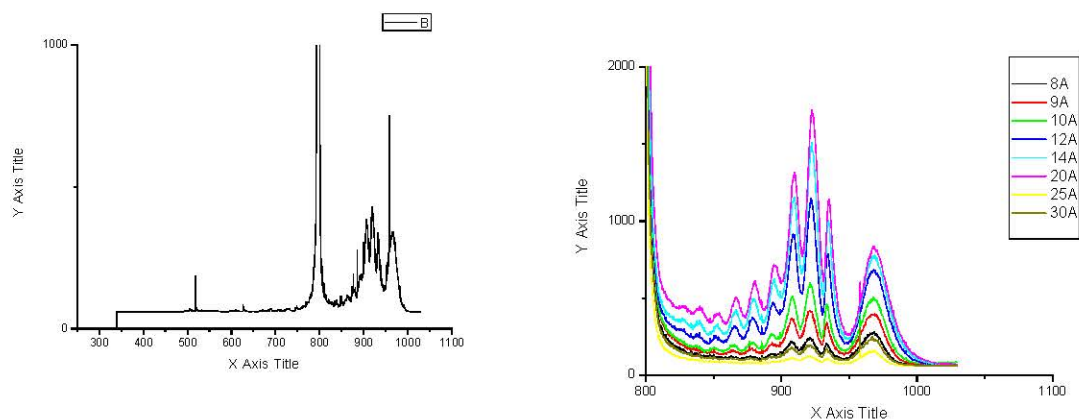


图 4.12 不同制冷条件下样品的 PL 谱 (a) 半导体制冷 (b) 水冷

可以看出水冷条件下能得到更大的增益，也就是说热效应是制约我们器件的主要因素，为此我们又进行了脉冲功率下的泵浦实验。

4.1.10 脉冲泵浦测试：

图 4.13 是我们在脉冲泵浦下测得的 PL 谱。



(a) 纳秒

(b) 毫秒

图 4.13 纳秒(a)与毫秒(b)脉冲电源泵浦时的光致发光谱

由图知脉冲泵浦时热效应明显小于连续时，光谱质量也有所提高。

鉴于势阱泵浦的热效应严重的现象，我们采用产生热较少的势阱泵浦工作方式，泵浦源是波长 940nm 的激光。图 4-14 给出这种方式的泵浦电流分别为 16, 25 和 37 安培的光致发光谱，可以看出这种泵浦方式不存在热效应现象。

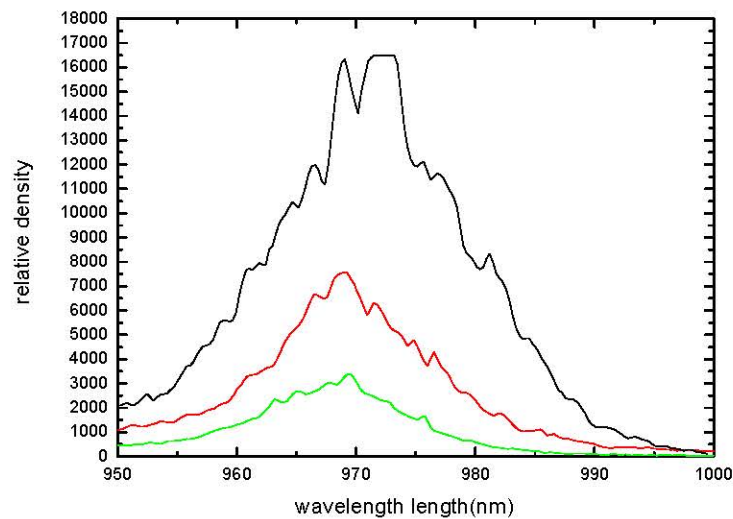


图 4.14 势阱泵浦 PL 谱

下面我们便针对这一热效应现象进行分析。

4.1.11 原因分析及解决方案

同半导体泵浦固体激光器一样，主要限制 OPS-VECSEL 工作效率的是散热问题，热沉的制作是 OPS-VECSEL 制作过程中的难点，散热问题[64]，0 成为 OPS-VECSEL 向更大功率发展的瓶颈。温度升高时激光器的有效增益减小，出现输出功率饱和，甚至停止工作。随着泵浦功率的增加，与热沉相连的增益材料有源区的热效应现象增加。量子阱中的载流子发生热逸出现象，产生非辐射复合，导致量子阱材料增益饱和，载流子寿命也容易饱和，大部分光生载流子没有扩散进量子阱区，而是在势垒层发生非辐射复合。随着泵浦功率的增加，载流子的热饱和现象导致设计的激光波长 980nm 处的强度比短波长处的要小。这说明泵浦光被吸收后剩余的热没有被及时的散走，使得有源区的温度一直持续在一个比较高的水平，导致势垒内产生的电子空穴对没有足够的时间运动到量子阱中。另外一个原因：当量子阱中载流子温度持续在一个很高的水平，载流子处于高能态，这些载流子会优先于 $n=1$ 的态而去布居 $n=2$ 的态。这种势垒间的非辐射复合和

$n=2$ 的态都对应于 920nm 波长，所以当泵浦光功率密度继续增加，器件的温度逐渐升高，920nm 处的 PL 谱的强度大于 980nm 处的。

引起增益降低主要有两个因素：第一，随着温度的升高单个量子阱的峰值增益降低，第二，这种器件在设计时把量子阱放在激光场的波腹位置（即周期谐振增益结构）；工作时由于热效应造成的折射率变化使激光场的波腹与量子阱的位置错开，致使吸收效率降低，耦合强度减弱，影响器件的正常工作。下面我们在理论上进行分析。

4.1.12 原因分析

4.1.13 计算模型

从热力学的观点来看，OPS-VECSEL 是一种被近似圆形的高斯光束在顶部加热的多层结构。所以在计算中，选择一个有径向和轴向两个变量的柱坐标系来进行模拟^[9]，如图 4.15 所示。

上述二维模型可以简化为一维的方式，主要基于以下两个条件：（1）泵浦光束的直径要远大于器件的厚度；（2）弱的径向热流。我们实验中所用的外延片的整体厚度为 6 微米，泵浦光直径是 $100\mu\text{m}$ ，故上述两种条件都满足。

如图 4.15 所示外延片可以看作是很多层不同厚度和热传导率的薄层，假设在每一层都有一个热源 $g_n = \text{常数}$ ，在这种情况下热传导方程便简化为一维形式：

$$\frac{d}{dz} \left(\lambda(z) \frac{dT(z)}{dz} \right) = -g(z) \quad (4.1)$$

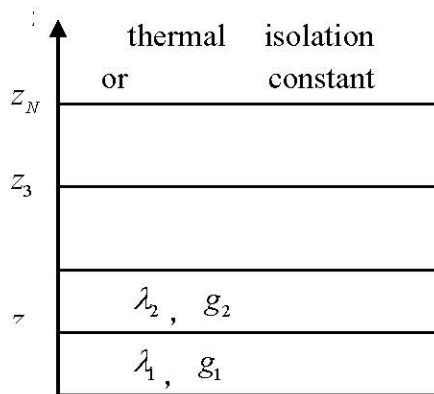


图 4.15 VECSEL 的几何模型

这里 $T(z)$ 表示与周围环境的相对温度， $\lambda(z)$ 是热导率， $g(z)$ 是热源，对于一个 n 层结构，（1）式可写作：

$$\frac{d^2}{dz^2} T_n(z) = -\frac{g_n}{\lambda_n} \quad (4.2)$$

其解为：

$$T_n(z) = -\frac{g_n}{2\lambda_n} z^2 + A_n z + B_n \quad (4.3)$$

对于一个薄器件来说可以假设结构的下表面温度是一个常数，上表面温度由热绝缘条件确定：

$$T(z=0) = T_b, \quad \frac{\partial}{\partial z} T(z_N) = 0 \quad (4.4)$$

这样系数 A_n 和 B_n 可以单独确定，对于上表面：

$$A_N = \frac{g_N}{\lambda_N} z_N \quad (4.5)$$

下面各层的递推公式为：

$$A_n = \frac{\lambda_{n+1}}{\lambda_n} A_{n+1} - \frac{z_n}{\lambda_n} (g_{n+1} - g_n) \quad (4.6)$$

由底层的边界条件得到：

$$B_1 = T_b \quad (4.7)$$

上面各层的递推公式为：

$$B_{n+1} = \left(\frac{g_n - 0.5g_{n+1}}{\lambda_{n+1}} - \frac{g_n}{2\lambda_n} \right) z_n^2 + \left(1 - \frac{\lambda_n}{\lambda_{n+1}} \right) A_n z_n + B_n \quad (4.8)$$

4.1.14 计算结果与实验结果比较

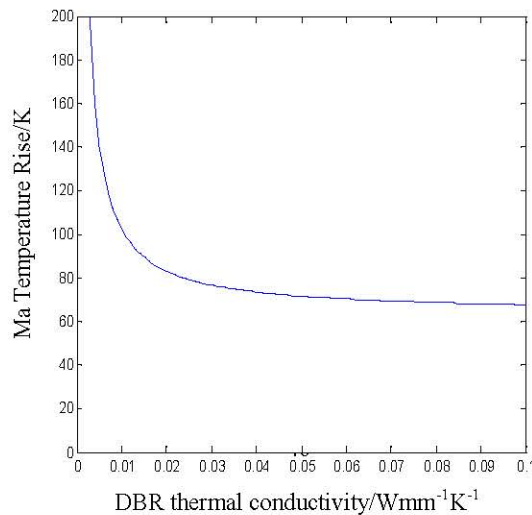


图 4.16 DBR 热导率与最大温升的关系

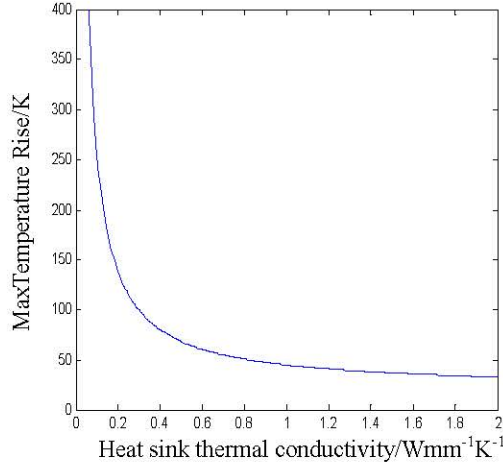


图 4.17 热沉的热导率与最大温升的关系

图 4.16 为计算的 DBR 热导率与器件最大温升之间的关系。从图中可见，在 DBR 热导率大于 0.06 W/mmK 后，器件的最大温升趋于一个相对稳定值。我们所用 DBR 热导率约为 0.061 ，符合设计器件的要求。

图 4.17 所示为低泵浦功率下，计算的热沉的热传导率与器件最大温升之间的关系。我们所用铜的热沉的热传导率为 0.39 W/mmK ，从图中可见散热效果不理想，所以如果采用金刚石（热导率为 2 W/mmK ）做热沉可以提高器件的性能，达到好的散热效果。

我们的 VECSEL 采用薄器件结构，采用 InGaAs/GaAsP 做有源区，AlGaAs 做吸收层，重复生长 12 个周期形成谐振周期增益结构。吸收层吸收泵浦光后产生光生载流子扩散进量子阱区复合发光。AlAs/AlGaAs 生长 30 个周期形成 DBR 多层反射结构。实验中采用腐蚀方法去掉衬底之后，将 6 微米厚的外延片直接焊接到铜热沉上。

为了测量有源区的温升，采用光致发光谱测量原理来估测有源区的温升。图 4.12 是在不同泵浦功率下，实验测量的光致发光谱。泵浦功率分别为 $0.7 \times 10^2 \text{ W/mm}^2$ 和 $2 \times 10^2 \text{ W/mm}^2$ 10W 的情况。

由图 4.12 可知，在不同泵浦功率下，器件的波长漂移量为 6.15 nm 。根据波长漂移与有源区温度变化的关系（4.4）：

$$\frac{1}{\lambda} \frac{\Delta \lambda}{\Delta T} = 9.1 \times 10^{-5} \quad (4.9)$$

得到 $\Delta T = 68.9620$ 度，有源区的温升为 68.96 度与计算所得的数据相符合。

4.1.15 结论

采用 matlab 求解一维热传导方程，分别得到热沉热导率与器件最大温升的关系和 DBR 热导率与器件最大温升的关系。理论上预测的温升与实验的测量结果一致。可以得知热效应是影响器件工作的主要因素。

4.1.16 解决方案

1、载流子限制层的设计及优化：

为了抑制载流子的热逸出及载流子寿命饱和，我们在 OPS-VECSEL 的吸收层中插入一层对工作波长透明的载流子限制层 (Al_xGaAs , $x=0.2-0.4$)，减少载流子在势垒区的非辐射复合几率。限制层的引入可以有效的减少非辐射复合产生的热效应，提高量子阱材料的光增益和器件输出功率。计算了器件的材料增益、自发发射、模式增益在优化前后的变化。计算结果见图 4-18 和 4-19。结果表明，传统结构的 OPS-VECSEL 的自发发射谱中来自势垒的发射都要强于量子阱的发射，相应的模式增益也较低。而优化后的 OPS-VECSEL，在材料增益、自发发射特性都有了改进，抑制了来自势垒的发射，增强了量子阱中载流子的复合几率。模式增益较传统结构，提高了 3—4 倍。

2、采用周期性多量子阱增益结构

周期性多量子阱增益物理机制的优点：（1）减小了材料对生长过程严格控制的依赖性；（2）减少了热效应引起的量子阱与驻波场波包位置间的失配，提高了光限制因子；（3）提高了器件工作的稳定性。在单量子阱结构中，由于热效应引起的折射率变化改变了谐振腔的光学厚度，量子阱将远离驻波波包位置，造成光限制因子减小，有效增益明显降低。为此提出周期性多量子阱（三阱）增益结构，采用三个窄量子阱代替单阱，这种结构可以明显减少热效应下增益与驻波场波包间的失配对器件稳定性和输出性能的影响。而且三量子阱结构可以增加量子阱的量子态，增加载流子在量子阱中的复合几率，减少热逸出。与传统周期性单量子阱结构相比，这种周期性多量子阱结构具有较高的光限制因子和较高的温度稳定性；由于多量子阱增益被展开在一个更宽的范围，这种几何结构的扩展降低了对外延生长条件和过程的过分要求。

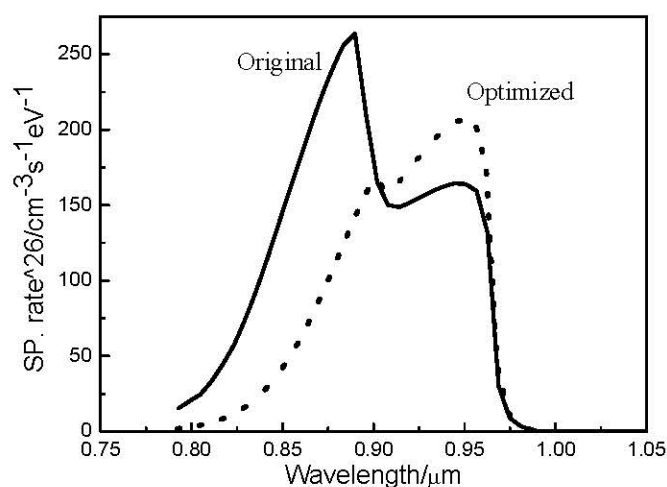


图 4.18 传统结构与优化后的自发发射谱

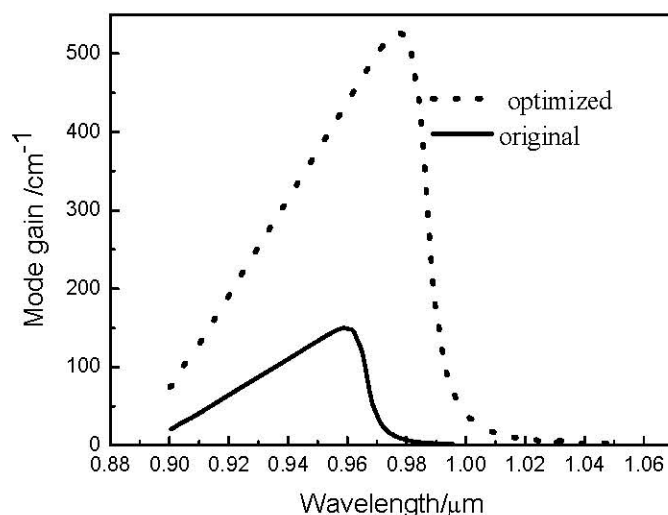


图 4.19 传统结构与优化后的模式增益谱

3、采用微通道散热技术

将边发射半导体激光列阵和迭阵工艺中的微通道散热技术移植到 OPS-VECSEL 中。将 OPS-VECSEL 焊接到 Si 基微通道散热片上，微通道热沉通水冷却，保证将激光器产生的热量迅速带走。这种方式比普通的铜质热沉获得更大的增益。

4、化学腐蚀的优化

经化学腐蚀后的外延片，其表面并不是一个严格的光学镜面，其表面粗糙度的大小将影响外延片对泵浦光的吸收。如果外延片的表面粗糙度过大，大部分泵浦光入射到外延片表面时将反射或散射掉，大大降低了对泵浦光的吸收效率，从而影响了器件的激射。我们以前采用硫酸系列和氨水系列的腐蚀液腐蚀效果不好，后来经过改进采用柠檬酸系列腐蚀液进行腐蚀，效果得到明显的提高。

5 总结

半导体激光器已经显示出强大的生命力，垂直腔面发射半导体激光器 (VCSEL) 具有发散角小、单纵模工作、低阈值等特性，尤其适用于二维面阵集成以及与其他光电子器件进行空间光互联集成，且在光计算和信息处理等方面都有着广泛的应用前景。目前对于 VCSEL 的设计和工艺进一步研究以及在量子水平上开展的 VCSEL 微腔的研究都是具有实际应用意义和前瞻性的研究课题。而光泵浦垂直外腔面发射激光器使这个家族中的又一支生力军。光泵浦垂直外腔面发射激光器将光泵浦固体激光器的一些优点与半导体激光器的波长、增益、散射和饱和等特性结合在一起，既能获得高功率输出，也能获得接近衍射极限的圆形输出光斑。另外光泵浦垂直外腔面发射激光器也具有波长可调和可腔内倍频的特性，这使其在通讯和显示以及泵浦光纤激光器等很多领域有广阔的应用前景。

本论文围绕 980nm 波段 GaAs 基 InGaAs 量子阱材料和 980nm 垂直外腔面发射激光器的理论，对 VCSEL 设计、制备工艺、以及光泵浦垂直外腔面发射激光器进行结构设计和实验研究等进行了多方面深入系统的研究工作，取得的主要创新性成果如下：

- 1、制作出衬底出光 VCSEL 单管和列阵器件。其中室温连续激射条件下单管器件最高功率达到 1.95W，列阵器件达到 1.35W，均达到国内领先水平。纳秒脉冲条件下单管器件最高输出功率达到 10.5W，达到国际领先水平。

- 2、对 VCSEL 器件的随温度的变化进行实验分析研究。优化了器件的制作工艺，包括湿氮氧化工艺、湿法腐蚀工艺、低欧姆接触合金工艺，制定出一套科学完整的器件制作工艺流程。

- 3、在实验基础上分析了 OPS-VECSEL 的热管理，建立了一维静态热传导方程，并结合数学工具 matlab 解热传导方程，得出热沉的热导率及 DBR 热导率变化对器件温度的影响。据此，提出了解决方案，对器件结构和实验工艺进一步优化。

- 4、进行泵浦试验，得到了初步的测试结果，并对所得结果进行分析和优化。

6 参考文献

- [1] 伊贺建一,小山二山夫.面发射激光器的基础与应用,北京:科学出版社, 2002, 7.
- [2] M.Kuznetsov, F.Hakimi, R.Sprague and A.Mooradian, High power ($>0.5\text{W}$ CW) diode-pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor lasers with circular TEM_{00} beams[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1997, vol.9, pp.1063-1065
- [3] F.Kunetsov, F.Hakimi, R.Sprague, A.Mooradian, Design and characteristics of high-power ($>0.5\text{W}$ cw) diode-pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor lasers with circular TEM_{00} beams[J]. IEEE J. Sel,Top, Quantum Electron, 1999, vol..5, No.3, pp.561-573
- [4] S.W.Corzine, R.S.Geels, J.W.Scott, R-H Yan, and L.A.Coldren, Design of Fabry-Perot surface-emitting lasers with a periodic gain structure[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1989,vol.25, pp.1513-1524
- [5] M.Y.A.Raja, S.R.J.Brueck, M.Osinski, C.F.Schaus, J.G.McInnery, T.M.Brennan, and E.M.Hammons, Resonant periodic gain surface-emitting semiconductor lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1989, vol.25, pp.1500-1512
- [6] A.Caprara, J.Chilla, and L.Spinelli, High-power, external-cavity optically pumped semiconductor lasers, United States Patent 6 438 153 (August 20, 2002)
- [7] H.Soda, K.Iga, C.Kitahara et al., GaInAsP/InP Surface Emitting Injection Laser, Jpn. J. Appl. Phys., 1979, 18:2329.
- [8] K.Iga, S.Ishikawa, S.Ohkouchi et al., Room temperature pulsed oscillation of GaAlAs/GaAs surface- emitting injection laser, Appl. Phys. Lett., 1984, 45:348.
- [9] F.Koyama, S.Kinoshita, K.Iga et al., Room temperature continuous wave lasing characteristics of GaAs vertical cavity surface-emitting lasers, Appl. Phys. Lett., 1989, 55:221.
- [10]R.S.Geels, S.W.Corzine, L.A.Coldren. InGaAs Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, IEEE J. Quantum Electron., 1991, 27:1359.
- [11]T.Baba, Y.Yogo, K.Suzuki et al., Near room temperature continuous wave lasing characteristics of GaInAsP/InP surface emitting laser, Electron. Lett., 1993, 29:913.
- [12]K.Uomi, Low threshold room temperature pulsed operation of $1.5\mu\text{m}$ vertical-cavity surface-emitting lasers with an optimized multi-quantum well active layer, IEEE Photon. Technol. Lett., 1994, 6:317.
- [13]H.Saito,K.Nishi, I.Ogura et al., Room-temperature lasing operation of a quantum-dot vertical-cavitysurface-emitting laser, Appl. Phys. Lett., 1996, 69:3140.
- [14]E.Hadji, J. Bleuse, N.Magnea, et al., Photopumped infrared vertical-cavity surface-emitting laser, Appl. Phys. Lett., 1996, 68:2480.
- [15]T.Someya, K.Tachibana, Y.Arakawa et al., Lasing oscillation in InGaN vertical cavity surface emitting lasers, 16th International semiconductor laser conference, 1998, PD-1,1-2.

- [16] W.W.Bewley, C.L.Felix, I.Vurgaftman, Continuous-wave mid-infrared VCSEL's, IEEE Photo. Tech. Lett., 1998, 10:660.
- [17] D. Choquette, J.F. Klem, A.J. Fischer et al., Room temperature continuous wave InGaAsN quantum well vertical-cavity lasers emitting at 1.3 μm , Electron. Lett., 2000, 36:1388.
- [18] J.A.Lott, N.N.Ledensov, V.M.Ustinov et al., Room-temperature continuous wave InAs-InGaAs quantum dots VCSELs on GaAs substrate emitting at 1.3 μm , In LEOS2000, IEEE Annual Meeting Conference Proceedings, 2000, 1:304.
- [19] F.Genty, L.Cerutti, A.Garnache et al., Type-I quantum-well VCSEL structure on GaSb emitting in the 2-2.5 μm range, IEE Proceedings Optoelectronics, 2002, 149:22.
- [20] H.Z.Xu, F.Zhao, A.Majumdar, et al., High power mid-infrared optically pumped PbSe/PbSrSe multiple-quantum-well vertical-cavity surface-emitting laser operation at 325 K, Electro. Lett., 2003, 39:659.
- [21] M.A.Wistey, S.R.Bank, H.B.Yuen et al., Monolithic, GaInNAsSb VCSELs at 1.46 μm on GaAs by MBE. Electron. Lett, 2003, 39:1822.
- [22] L.Cerutti, A.Garnache, A.Ouvrard et al., 2.36 μm diode pumped VCSEL operating at room temperature in continuous wave with circular TEM_{00} output beam. Electron. Lett., 2004, 40: 869.
- [23] M.Suzuki, H.Hatakeyama, K.Fukatsu, T.Anan, K.Yashiki, and M.Tsuji, 25-Gb/s operation of 1.1 μm -range InGaAs VCSELs for highspeed optical interconnections, presented at the Optical Fiber Commun. Conf., Anaheim, CA, Mar. 2006, OFA4.
- [24] Innerhofer E, Sudmeyer T, Brunner F, Haring R, Aschwanden A, Paschotta R, Honninger C, Kumkar M and Keller U [J]. Opt. lett.. 2003, vol28, pp.367-369
- [25] Holm M A, Burns D, Cusumano P, Ferguson A I and Dawson MD [J]. Appl. Opt. 1999, vol38, pp.5781-5784
- [26] Holm M A, Burns D, Ferguson A I and Dawson MD Proc. CLEO-US 2000 (San Francisco) pp.CTHJ-7
- [27] Garnache A, Kachanov A A, Stoeckel F and Houdre R [J]. Opt. Soc. Am.B—Opt. Phys. 2000, vol17, pp.1589—1598
- [28] Garnache A, Hwang W Y, Hoogland S, Martin W, Koulikov S, Permogorov D, Tropper A C, Paldus B and Kachanov A A Proc. IEEE 14th Indium Phosphide and Related Materials Conf. 2002, pp post-deadline paper 3
- [29] Alford W J, Raymond T D and Allerman A A J. Opt. Soc. Am.B—Opt. Phys. 2002, vol. 19, pp. 663-666
- [30] Hastie J E, Hopkins J M, Calvez S, Jeon C W, Burns D, Abram R, Riis E, Ferguson A I and Dawson M D [J]. IEEE Photon. Technol. Lett. 2003, Vol. 15, pp. 894-896
- [31] Hastie J E et al [J]. Electron. Lett. vol. 39, 2003, pp. 1324-1326
- [32] Lutgen S, Albrecht T, Brick P, Reill W, Luft J and Spath W [J]. Appl. Phys. Lett. 2003, vol. 82, pp. 3620-3622

- [33]McInerney J G et al[J]. Electron. Lett. 2003, vol.39, pp.523-525
- [34]Nayama, T.Nakamura, M.Funada et al., 780nm VCSEL for home networks and printers, Electronic Component and Technology Conference, 2004:1371.
- [35]Compound semiconductor, <http://compoundsemiconductor.net/articles/magazine/8/3/5/1>.
- [36]R.Bates, Considerations on geometry design of surface-emitting laser diodes, IEE Proc. Pt J. Optoelectronics, 1988, 135:233.
- [37]W.Nakwaski, Considerations on geometry design of surface-emitting laser diodes, IEE Proc. Pt. J. Optoelectronics, 1990, 137:129.
- [38]R.S.Geels, S.W.Corzine, J.W.Scott et al., Low threshold planarized vertical-cavity surface-emitting lasers, IEEE Photon. Technol. Lett., 1990, 2:234.
- [39]K.Tai, Y.H.Yang and Y.H.Wang et al., Drastic reduction of series resistance in doped semiconductor distributed Bragg reflectors for surface-emitting lasers, Appl. Phys. Lett., 1990, 56:2496.
- [40]Y.G.Zhao, Y.S.Zhang and X.L.Huang, Chinese J. of semiconductors, 1999, 20:963.
- [41]C.Angelos, S.Hinckley, R.r.Michalzik, V.Voignier, Simulation of current spreading in bottom-emitting vertical cavity surface emitting lasers for high power operation, SPIE, 2004, 5277:261.
- [42]Y.G.Zhao, J.G.Mconerney, Transient temperature response of vertical-cavity surface-emitting semiconductor lasers, IEEE J. Of Quantum Electron., 1995, 31:1668.
- [43]W.Nakwaski and M.Osinski, Thermal properties of etched-well surface-emitting semiconductor lasers, IEEE J. Quantum. Electron., 1991, 27:1391.
- [44]A.C. Tropper et al. Extended cavity surface-emitting semiconductor lasers [J]. Progress in Quantum Electronics, 2006, vol.30, pp.1-43.
- [45]S.Hoogland, School of Physics and Astronomy, University of Southampton, Southampton, 2003
- [46]C.I.H.Ashby, J.P.Sullivan, P.P.Newcomer et al., Wet oxidation of Al_xGa_{1-x}As: temporal evolution of composition and microstructure and the implications for metal-insulator semiconductor applications, Appl. Phys. Lett., 1997, 70:2443.
- [47]C.I.H.Ashby, J.P.Sullivan, K.D.Choquette et al., Wet oxidation of AlGaAs: The role of hydrogen, J. Appl. Phys., 1997, 82: 3134.
- [48]K.D.Choquette, K.M.Geib, H.C.Chui et al., Selective oxidation of buried AlGaAs versus AlAs layers, Appl. Phys. Lett., 1996, 69: 1385.
- [49]伊贺健一,小山二三夫.面发射激光器基础研究与应用,北京:科学出版社, 2002, 105.
- [50]K.D.Choquette, K.M.Geib, C.I.H.Ashby et al., Advances in selective wet oxidation of AlGaAs alloys, IEEE J. of Sele. Top. in Quantum Electron., 1997, 3:916.
- [51]A.R.Zakharian,J.Hader, J.V.Moloney, S.W.Koch,S.Lutgen,Experimental and theoretical analysis of optically pumped semiconductor disk Lasers[J]. Applied Physics letters, 2003,

- vol.83, pp.1313-1315
- [52] S.W. Corzine, R.S. Geels, J.W. Scott, R-H Yan, and L.A. Coldren, Design of Fabry-Perot surface-emitting lasers with a periodic gain structure[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1989, vol.25, pp.1513-1524
- [53] H. Haug and S.W. Koch, Quantum Theory of the Optical and Electronic Properties of Semiconductors, the 4th edition, World Science, 2004
- [54] 罗余庆, 康仁科, 郭东明, 金洙吉. 大直径硅晶片化学机械抛光及其终点检测技术的研究与应用[J], IC 制造技术, 2004, Vol.29, No.6, pp.25-29
- [55] J. Hader, S.W. Koch, and J.V. Moloney, Microscopic theory of gain and spontaneous emission in GaInNAs laser material[J]. Solid-State Electronics, 2003, vol.47, pp.513-521
- [56] J. Hader, N. Linder, and G.H. Döhler, k-p theory of the Franz-Keldysh effect[J]. Physical Review B, 1997, vol.55, pp.6960-6974
- [57] Z.H. Yang, J.R. Leger, and A.V. Shchegrov, Three-mirror resonator with aspheric feedback mirror for laser spatial mode selection and mode shaping[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2004, vol.40, pp.1258-1269
- [58] 郑红军, 卜俊鹏, 尹玉华, 白玉柯. GaAs 研磨片化学腐蚀均匀性的分析[J]. 功能材料与器件学报, 2000, Vol.6, No.4, pp.335-337
- [59] B. Weigl, M. Grabherr, C. Jung, R. Jäger, G. Reiner, R. Michalzik, D. Sowada, and K.J. Ebeling, High-performance oxide-confined GaAs VCSELs, IEEE J. Selected Topics Quant. Electron., 1997, 3:409.
- [60] M. Grabherr, R. Jäger, and M. Miller, Bottom-emitting VCSEL's for high-CW optical output power, IEEE Photon. Technol. Lett., 1998, 10:1061.
- [61] T. Wipiejewski, M.G. Peter, B.J. Thibeault, D.B. Young, L.A. Coldren, Size-dependent output power saturation of vertical-cavity surface-emitting laser diodes, IEEE Photonics Technol. Lett., 1996, 8:10.
- [62] W. Nakwaski and M. Osinski, Thermal properties of vertical-cavity surface-emitting semiconductor laser, in Progr. Opt., E. Wolf, Ed. New York: Elsevier Science, 1998, 38:165.
- [63] D. Wiedenmann, R. King, C. Jung, R. Jäger, and R. Michalzik, Design and analysis of single-mode oxidized VCSEL's for high-speed optical interconnects, IEEE J. Select. Topics in Quantum Electron., 1999, 5:503.
- [64] A.J. Kemp, G.J. Valentine, J.-M. Hopkins, et al. Thermal Management in Vertical-External-Cavity Surface-Emitting Laser: Finite-Element Analysis of a Heatspreader Approach [J]. IEEE, Quantum Electron, 2005, vol.41, pp.148-155.
- M. Szymanski. Thermal Management in Vertical-External-Cavity Surface-Emitting Lasers: An Analytical Approach [J]. Electron Technology, 2007, vol. 90, pp.1-4

7 硕士期间参加的课题

参加项目：

自然科学基金

1、量子阱内光泵浦半导体垂直外腔面发射激光器研究

项目批准号：60577003

2、电泵浦激励垂直外腔面发射半导体激光器列阵

项目批准号：60706007

8 宁宇在攻读硕士期间发表的论文目录

- [1]. 宁宇, 何春风, 秦莉, 王立军. 一种新型的光泵浦垂直外腔面发射激光器 [J].发光学报 已接收

9 宁宇个人简历

1999. 9-2003. 7 在吉林大学电子科学与技术专业学习

2004. 9-2008. 6 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激发态室学习

10 致谢

本论文是在我的导师的王立军研究员的悉心指导下完成的。王老师是我的良师也是我的益友，他严谨求实的学风、精益求精的工作态度、无私忘我的工作精神永远是我效仿的榜样。同时，他对我不倦的教诲、关心与帮助也使我受益终生。王老师把我带入到半导体光电子学这个充满生机和活力的研究领域，使我从对半导体光电子学的一无所知，到今天取得了一定的成绩。我的每一个进步都与王老师的指导密不可分。在此，对我的恩师王立军研究员致以衷心的感谢。

在我学习期间，宁永强研究员、刘星元研究员、卢洪波教授、秦莉老师、刘云老师、单肖楠博士后对我的学习和生活给予了大力支持和帮助。特别是秦莉老师，从立题调研到实验进展，最后到论文定稿，都给予莫大的帮助，在此表示衷心的感谢。

在实验期间，我们组的职工给了我莫大的帮助，特别要提到的是高志坚、王超、姚迪、尹红贺。

感谢何春风、李特、赵崇光、王祥鹏、崔锦江、李颜涛等同学对我学习和生活给与大力的支持和帮助。

研究生部武晓东主任、金东明老师、李海老师、魏洪老师、侯晓祯老师、陈方老师对我学习和生活都给予了极大的关怀，在此向他们表示衷心的感谢。

谨以此文献给我的父母、妻子及所有的亲人，以表达我对他们的爱。