

密级: \_\_\_\_\_



**中国科学院大学**  
University of Chinese Academy of Sciences

## 硕士学位论文

锥形半导体激光器温度特性及管芯焊接研究

作者姓名: \_\_\_\_\_ 黄海华 \_\_\_\_\_

指导教师: \_\_\_\_\_ 刘云 副研究员 \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 \_\_\_\_\_

学位类别: \_\_\_\_\_ 理学硕士 \_\_\_\_\_

学科专业: \_\_\_\_\_ 凝聚态物理 \_\_\_\_\_

培养单位: \_\_\_\_\_ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 \_\_\_\_\_

2012 年 11 月



**Y2370023**

**The Disquisitions of Temperature Characteristics of  
Tapered Semiconductor Lasers and Die Bonding Technology**

**By**

**Huang Hai-hua**

**A Dissertation Submitted to**

**Graduate University of Chinese Academy of Sciences**

**In partial fulfillment of the requirement**

**For the degree of**

**Master of Science**

**Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS**

**Nov. 2012**

## 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： 2012.11.22

## 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： 刘云  
日期： 2012.11.22 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： \_\_\_\_\_

# 锥形半导体激光器温度特性及管芯焊接研究

黄海华（凝聚态物理）

导师：刘云 副研究员

## 摘 要

锥形半导体激光器以其亮度高、光束质量好、制备工艺简单而被广泛应用于空间通讯、固体激光器泵浦、光纤放大器、医疗等领域，成为半导体激光器研究领域的热点。国内外对锥形半导体激光器的研究主要集中于其光束质量，而有关锥形半导体激光器温度特性的报道较少。温度一直是影响大功率半导体激光器性能的重要因素之一，半导体激光器在工作工程中，注入电流在芯片内部要产生部分热量，使器件的工作温度升高、发射光波长漂移并缩短器件的寿命。研究温度对锥形激光器性能的影响，掌握锥形激光器基本性能参数随温度的变化规律，对于指导锥形激光器的制备和应用就显得尤为重要。本论文主要研究了锥形半导体激光器的温度特性，对比相同有源层结构的条形激光器，我们分析了温度变化对这两种半导体激光器功率、特征温度、光谱以及远场特性的影响，分析结果表明锥形半导体激光器较条形半导体激光器特征温度高出近一倍，前者较后者具有更好的温度稳定性。

同时，作为工作之一，本论文还从工艺角度对单管焊接进行研究分析。针对实验室新进的德国 centrotherm VLO20 回流焊接炉设备，在国内首次采用还原性气氛下的 Au/In 等温凝固烧结工艺，制定了一整套较为完整的实验方案，初步确定了影响单管焊接质量的几个因素，主要包括：铜厚度、压力、回流焊接曲线（包括焊接温度，时间，温升等）以及表面环境（包括铜表面粗糙度及杂质颗粒数，芯片表面平整度及杂质颗粒数）。采用自主设计制作的夹具对以上因素分别进行

对比分析，初步确定了焊接流程工艺参数，为后期实现高功率单管焊接打下了一定的实验基础。通过 Au/In 焊料我们为器件实现了稳定可靠的物理支撑以及良好的散热。

**关键词：**锥形半导体激光器；温度特性；单管焊接

# **The Disquisitions of Temperature Characteristics of Tapered Semiconductor Lasers and Die Bonding Technology**

**Huang Hai-hua(Condensed Matter Physics)**

**Directed by Liu Yun**

## **Abstract**

Tapered semiconductor laser diodes was widely used for free space communications, optical pumping of solid state lasers, fiber amplifiers and medical treatment with its high brightness and high beam quality, and so has become the hotspot of the semiconductor laser field. Most of researches of tapered LD are focused on the beam quality, however, there are few reports available about the temperature characteristics of tapered LD. The temperature affects most of the characteristics of LD, so it is necessary to study the correlations between the temperature and LDs' characteristics. In this paper, we have discussed the temperature characteristics of both the tapered and broad-stripe structure semiconductor laser, including the power, characteristic temperature, spectral characteristic and far-field characteristics. The result has showed that the tapered structure ones have a higher thermal stability than the wide-stripe ones.

Besides, as a part of job in this paper, the die bonding technology has been studied. Also a set of experimental program has been developed with the new Germany reflow welding equipment which model is centrotherm VLO20. Several factors which affect the single emitter welding quality have been initially identified, that is the thickness of In, the pressure, welding curve (including Soldering temperature, time, temperature rise, etc ) and Surface environment (including the

surface roughness of indium, the number of impurities in it, the surface roughness of chip and the number of impurities in it ). the above factors have been analyzed with our own designed fixture comparative respectively, get the process parameters of the welding process. the foundation for achieving high power single emitter welding in the Later has been laid. Through the Au/In welding process the devices have realized stable and reliable physical support and good heat dissipation.

**Keywords:**tapered semiconductor lasers;temperature characteristics;die bonding

# 目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
目 录.....	V
<b>第 1 章 绪论.....</b>	<b>1</b>
1.1 半导体激光器的基本概念.....	1
1.11 半导体激光器的分类.....	2
1.12 半导体激光器的性能参数.....	6
1.2 锥形半导体激光器的发展状况及应用.....	11
1.3 本论文的研究工作.....	13
<b>第 2 章 锥形激光器的设计与制备工艺.....</b>	<b>15</b>
2.1 锥形激光器的结构设计.....	15
2.11 脊形波导区结构设计.....	16
2.12 锥形增益区结构设计.....	17
2.13 腔破坏凹槽的设计.....	19
2.21 材料生长.....	20
2.22 管芯工艺.....	24
<b>第 3 章 锥形激光器的温度特性.....</b>	<b>37</b>
3.1 半导体激光器的温度特性.....	37
3.2 锥形半导体激光器的温度特性.....	39
3.3 本章小结.....	45
<b>第 4 章 半导体激光器的烧结工艺.....</b>	<b>47</b>

4.1 烧结工艺概述.....	47
4.2 Au/In 烧结失效分析.....	49
4.2.1 Au/In 烧结失效因素.....	51
4.3 本章小结.....	54
<b>第 5 章 总结与展望.....</b>	<b>57</b>
<b>参考文献.....</b>	<b>59</b>
<b>在学期间学术成果情况.....</b>	<b>63</b>
<b>指导教师及作者简介.....</b>	<b>64</b>
<b>致 谢.....</b>	<b>65</b>

# 第 1 章 绪论

## 1.1 半导体激光器的基本概念

半导体激光器的有源层使用的一般是特定的半导体材料，如 GaAs 等，通过在器件内部发生受激辐射而发光的一类光器件。半导体激光器的工作原理是通过电注入或者光泵浦等特定的激发方法，在半导体材料的价带和导带之间，或者半导体材料的杂质能级与能带之间，实现非平衡载流子的粒子数反转，也成负温度状态，当负温度状态下的空穴和电子复合时，便会产生受激辐射作用。半导体激光器要发生受激辐射，必须有外界条件的激励。通常半导体光器件的的激励方式有以下几种<sup>[1]</sup>，即光泵式，高能电子束激励式和电注入式。光泵式半导体激光器，一般用 P 型或 N 型半导体材料（如 GaAs, InSb, InAs 等）做为有源层，以其他途径产生的光源作泵浦方式激励。高能电子束激励式半导体激光器，一般也是用 P 型或者 N 型半导体材料(如 PbS, CdS, ZnO 等)做有源层，通过器件外部不断照射的高能电子束流作为激励源进行激励。电注入式半导体激光器，一般是由硫化锌 (ZnS)、砷化镓 (GaAs)、磷化铟(InP)、硫化镉 (CdS) 等半导体材料制成的半导体激光二极管，通过在外外部连接引线注入电流的方式对器件进行发光激励，使器件有源区材料产生受激辐射而发光。半导体激光器是一种相干辐射源。与其他激光器一样，要使其产生相干辐射，也必须具备三个基本条件<sup>[2]</sup>。即：

(1) 在激射煤质（有源区）内部实现载流子的反转分布。所谓反转分布是指即处在高能态的粒子数比处在低能态的粒子数数量多很多（比如在半导体煤质内处在高能级的电子数比处在低能级的空穴数多）。可以通过给异质结加正向偏压，向有源层内注入一定的载流子来实现载流子的反转分布。

(2) 激射煤质内部产生了受激辐射以后，为了使其多次反馈并形成激光震荡，还必须有一个合适的谐振腔。对于常用的 F-P 腔半导体激光器而言，晶体的

[110]面一般都被用来当做自然解离面来形成谐振腔。

(3) 满足一定的电流阈值条件。只有注入的电流大于器件阈值，使激射煤质提供的增益足以克服器件内部各种损耗之和（包括出射光损耗），才能形成稳定的激光震荡。

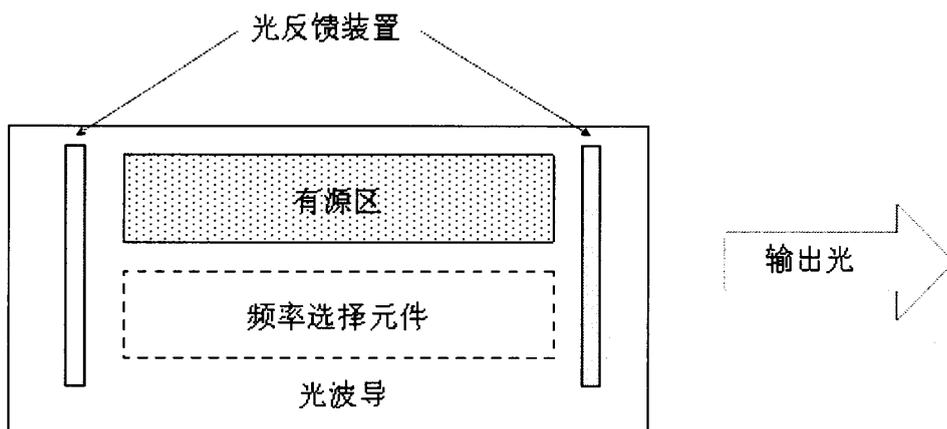


图 1-1 LD 通用结构

如图 1-1 所示，一个典型的半导体激光器二极管由下面几个部分功能构成：

▶有源区：通常由多个平行于材料生长方向的 p-n 结组成，它是载流子复合区，产生粒子数翻转并复合发出激射光的部分。

▶光反馈装置：提供产生激光的必要条件之一，即谐振腔，它能使激射煤质内产生的激射光在谐振腔内循环往复的来回震荡。

▶频率选择元件：提供模式选择作用，它决定谐振腔内所能够存在并震荡纵模模式。

▶光束的方向选择元件：光反馈装置决定器件的出光光束方向。

▶光波导：限制有源区内光场的横向传播，对器件性能影响明显。

### 1.11 半导体激光器的分类

(1) 按器件的材料分类：

短波长(0.85  $\mu\text{m}$ )波段, 采用 GaAlAs/GaAs 材料体系; 长波长(1.3  $\mu\text{m}$ ~1.55  $\mu\text{m}$ ), 采用 InP/nGaAsP 材料体系。

(2) 按出光方向与材料生长方向的平行或垂直关系分类:

边发射激光器 (EEL), 即侧面出光的一类激光器件。此类器件的出光方向平行于 p-n 结方向, 一般条形激光器便是采用边发射结构。

面发射激光器(VCSEL), 即正面出光的一类激光器件, 其出光方向垂直于 p-n 结方向, 它的发射结构又分成水平腔和垂直腔结构。

(3) 按平行于 PN 结方向的结构分类:

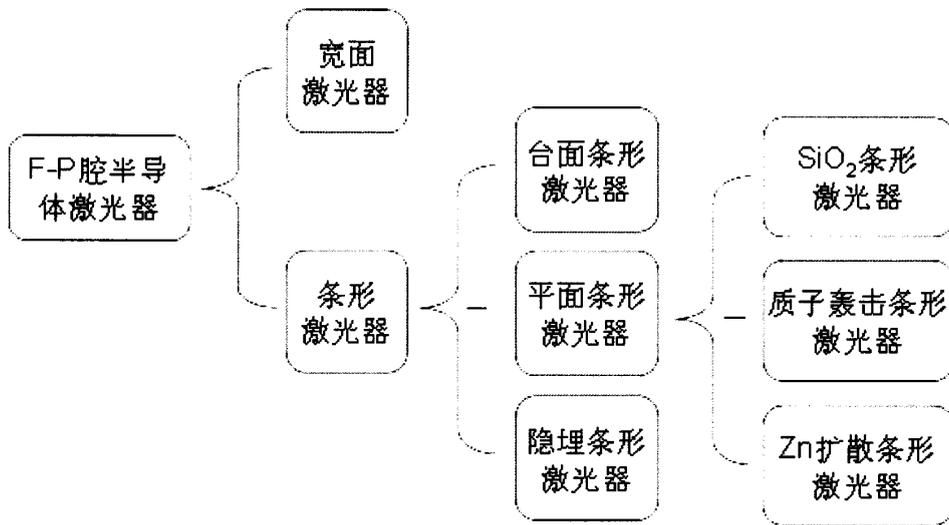


图 1-2 F-P 腔半导体激光器分类

(4) 按垂直于 PN 结方向器件结构的不同可以分为:

同质结激光器、单异质结激光器、双异质结激光器和量子阱激光器等。

(5) 量子阱半导体激光器

量子阱激光器<sup>[3,4]</sup> (Quantum well laser diodes, 简称 QWLD) 是指有源区采

用量子阱结构的半导体激光器。

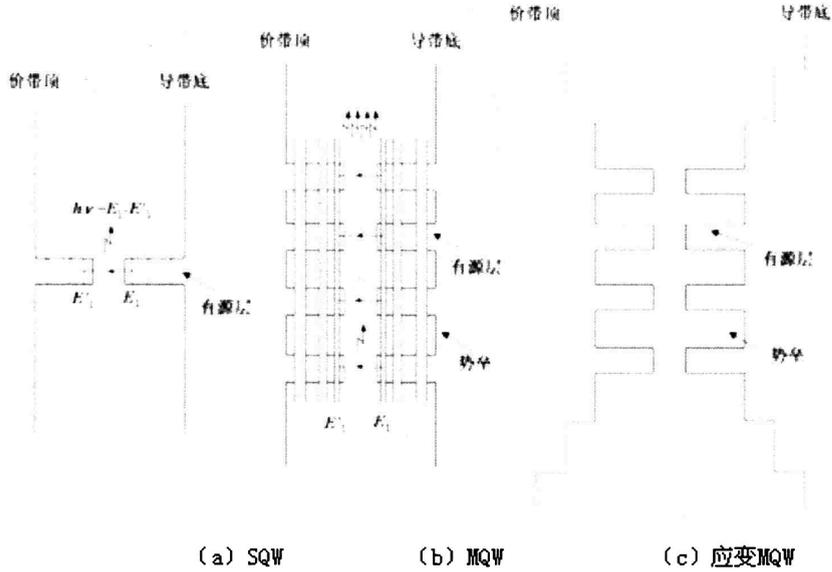


图 1-3 量子阱方案的能带示意图

同普通半导体激光器相比，量子阱激光器具有非常窄的有源区，一般为 1nm~10nm 量级，而前者则厚达 100nm~200nm。在如此薄的有源区，由于电子的德布罗逸波长大于有源区厚度，使得电子运动受限，态密度呈现阶梯状分布，并且形成超晶格结构。QWLD 有源层材料带隙很窄，上下层分别被一层或者多层宽带隙材料覆盖并交替排列呈周期结构，从而形成势能阱。

基于上述器件特点，一般量子阱激光器的阈值电流都比普通半导体激光器低很多，且输出功率也很高，光谱谱线窄，可调制速率高。

(6) 分布反馈式半导体激光器 (DFB) 和分布布拉格反射半导体 (DBR) 激光器

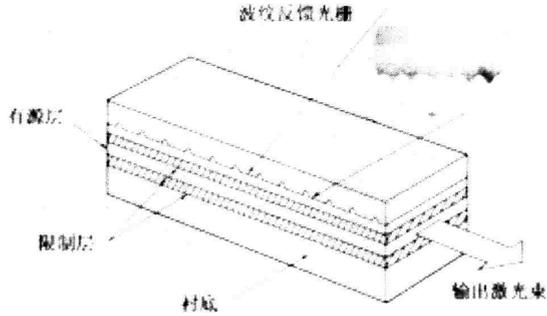


图 1-4 DBR 激光器的基本原理

同 F-P 腔半导体激光器相比，分布反馈式半导体激光器的最大不同在于器件内部提供光反馈的方式。分布反馈式半导体激光器是通过器件内部有源区一侧生长的厚度周期性变化波纹结构产生的，也成为光栅，不同厚度的光栅折射率不同，通过折射率的周期性变化提供光反馈作用，依靠沿纵向等间隔分布的光栅所形成的光耦合。这种结构的激光器件具有非常良好的动态单模特性和波长稳定性，温度漂移约为  $0.8\text{\AA}/^\circ\text{C}$ ，光谱谱线窄，线性度好。

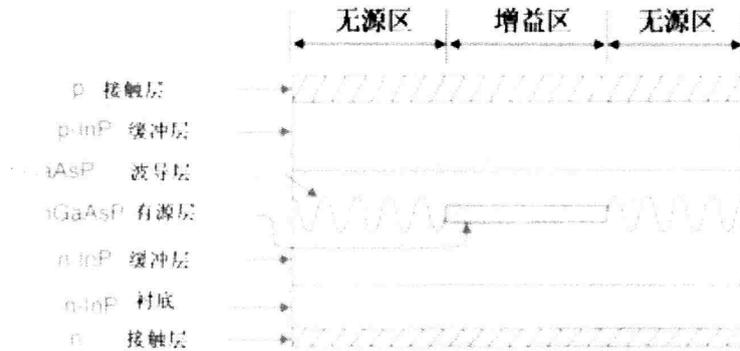


图 1-5 DBR 激光器的构成

DBR 半导体激光器结构中光栅的周期性沟槽是放在有源波导两外侧的。其原理是基于布拉格反射作用。布拉格发射是指在入射光被两种不同介质的交界面上周

期性的反射点反射，交界面本身可以取类似正弦波形或非正弦等不同的形状。

### 1.12 半导体激光器的性能参数

#### (1) 伏安特性

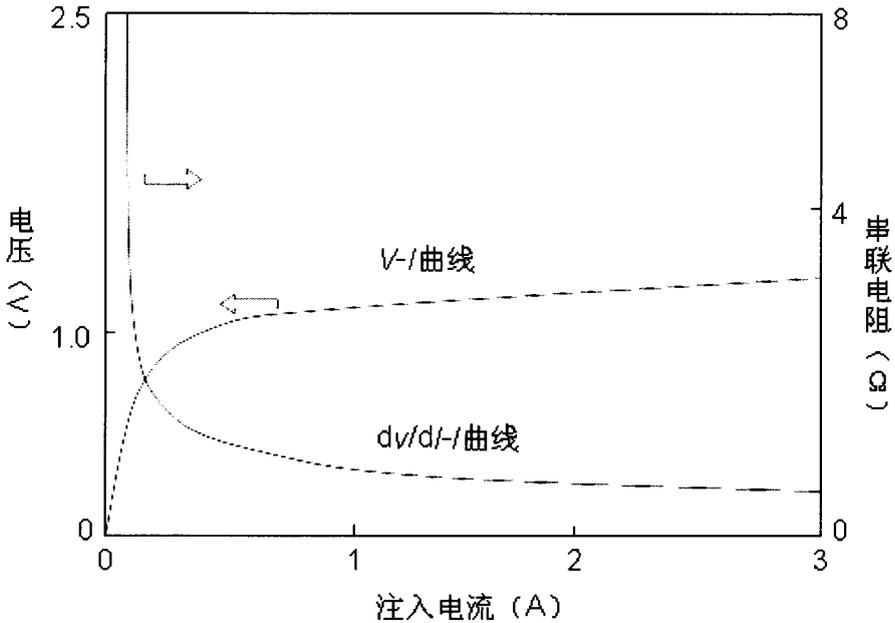


图 1-6 典型的半导体激光器 V-I 曲线和相应的 dV/dI 曲线

半导体激光器作为光电子器件，描述其电学性能也是很必要的，通常采用 I-V 曲线表示半导体激光器的电学性能。通过 I-V 曲线，我们能获得器件的结特性。对 I-V 曲线求导可以得到激光器的串联电阻，一般希望半导体光器件的串联电阻越小越好，过高的电阻容易是器件产生过多的热量，严重影响其性能。

#### (2) P-I 特性

P-I 特性揭示了 LD 输出光功率与注入电流之间的变化规律，因此是 LD 最重要的特性之一。

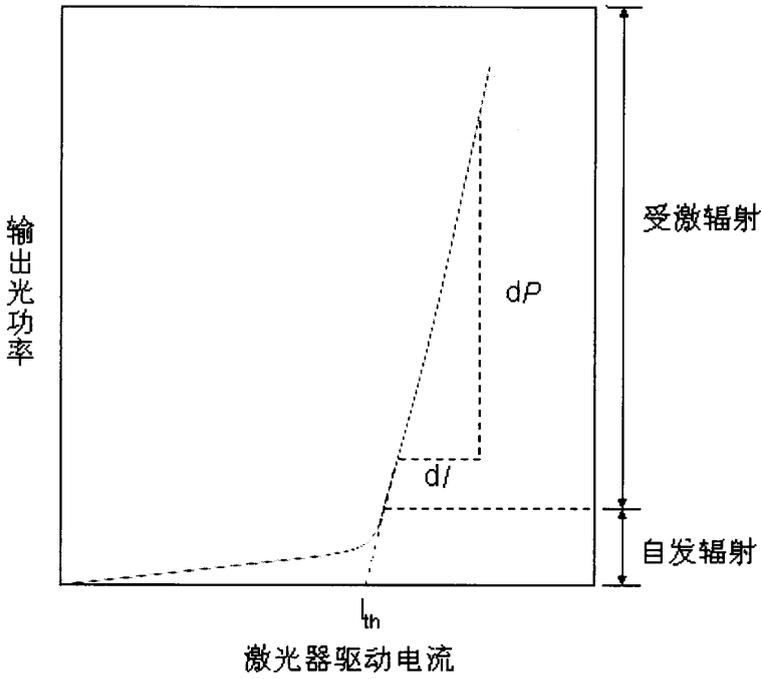


图 1-7 典型的半导体激光器 P-I 曲线

图 1-7 为典型半导体激光器的 P-I 特性曲线，一般而言，器件都得经过以下阶段：

当注入电流不大， $I \ll I_{th}$  时，由于注入的电流过小，器件内部难以形成粒子数翻转，有源区内以自发辐射为主，激光器只发射普通的荧光，光谱很宽，类似于半导体激光二极管（LED）。

随着注入电流的继续加大，有源区内处于高能态的粒子数多于处于低能态的粒子数，发生受激辐射。由上一节可知，激光器要发出激射光，除了要满足粒子数反转条件以外，还必须克服器件内部各种损耗之和，若注入电流仍小于阈值电流，尽管器件内部产生了粒子数翻转分布，但是谐振腔内部的增益还不足以克服器件损耗，依然不能在腔内建立起一定模式的激光振荡，半导体激光器发射的仅仅是较强的荧光，这一阶段被称为“超辐射”状态。

当注入电流达到并超过阈值电流以后，器件发射谱线尖锐、模式明确的激光，

光谱突然变窄并出现单峰（或多峰）。

从 P-I 特性曲线，我们可以获得器件的各种性能信息：

#### ① 阈值电流

半导体激光器的最重要性能之一就是阈值电流（密度），用符号  $I_{th}$  表示。从 P-I 曲线中我们可以很容易获得器件的阈值电流。所谓的阈值电流是指激光器从自发激射为主转变为以受激辐射为主时，注入的临界电流强度。通常我们要求激光器的阈值电流越低越好。

#### ② 功率线性度

所谓功率线性度是指 P-I 曲线的线性度，可以用来表示器件的实际输出功率同理论上的输出功率的差异大小，一般用百分数表示，数值越小，实际与理论值偏离的越小。

#### ③ 光输出饱和度

光输出饱和度是指理想的线性响应光输出的降幅。通过  $dP/dI$ -I 曲线上的最大的降幅可以测量出光输出饱和度。

#### ④ 半导体激光器的效率

半导体激光器是一种将电能转换成光能的光电器件，器件的效率越高，电光转换效率也越高。表示半导体激光器效率的方法有很多种，常用的有量子效率和功率效率。

功率效率定义为：

$$\eta_p = \frac{\text{激光辐射的光功率}}{\text{激光消耗的电功率}} = \frac{P_{ex}}{V_j I + I^2 R_s} \quad (1-1)$$

式中： $P_{ex}$  为激光器的发射光功率； $V_j$  为激光器的结电压； $R_s$  为激光器的串联电阻； $I$  为注入电流。

量子效率分为内量子效率、外量子效率和外微分量子效率。内量子效率定义为有源区里电子的电子-空穴对的复合过程分两种情况，一种是辐射复合，即在复合过程中发射光子；另一种是非辐射复合，这种情况下导带和价带的能量差以声子的形式释放出来，转换为晶格的振动。用  $R_r$  和  $R_{nr}$  分别表示辐射复合和

非辐射复合的速率。内量子效率 可以表示为：

$$\eta_i = \frac{R_r}{R_{nr} + R_r} \quad (1-2)$$

外量子效率的定义：

$$\eta_{ex} = \frac{\text{激光器每秒发射的光子数}}{\text{激光器每秒注入的电子-空穴对数}} = \frac{P_{ex} / h\nu}{I / e_0} \quad (1-3)$$

外量子效率不仅取决于内量子效率的高低，而且与载流子对有源区的注入效率、光子在谐振腔里的运输效率以及谐振腔端面上的取光率有关。由于  $h\nu \approx E_g \approx e_0V$ ，所以

$$\eta_{ex} = \frac{P_{ex}}{IV} \quad (1-4)$$

式中： $V$  施加在器件 p-n 结上的外加电压； $I$  是注入激光器件内部的电流强度。半导体激光器是阈值型器件，当  $I < I_{th}$  时，发射功率几乎为零；而  $I > I_{th}$  时， $P_{ex}$  随  $I$  线性增加，所以外量子效率是电流的函数，为了方便使用，定义外微分子量子效率为：

$$\eta_D = \frac{(P_{ex} - P_{th}) / h\nu}{(I - I_{th}) / e_0} \quad (1-5)$$

由于  $P_{ex} \gg P_{th}$ ，所以

$$\eta_D \approx \frac{P_{ex} / h\nu}{(I - I_{th}) / e_0} \quad (1-6)$$

外微分子量子效率不随注入电流的变化而变化。

#### ⑤ 半导体激光器的温度特性

温度对半导体激光器性能的影响是多方面的，一方面不断注入的电流会使器件内部温度升高，阈值电流随之增大，外微分量子效率随之降低，这将导致器件的输出功率不断下降，是制约半导体激光器性能提高的重要因素之一。通过获取不同温度条件下，器件的 P-I 曲线，我们就可以获知其温度性能。

### (3) 光谱特性

光谱特性描述的是激光器的纯光学性质，即输出光功率随波长的分布规律。

#### ① 峰值波长：

在输出光谱中，峰值强度最大的光谱所对应的波长被定义为峰值波长。对诸如 DBR、DFB 等类型半导体激光器来说，它们的激射峰很窄，峰值波长相当明显。

#### ② 中心波长 ( $\lambda_c$ )

在光源的发射光谱中，连接 50% 最大幅度值线段的中点所对应的波长称为中心波长。

#### ③ 线宽与谱宽

某一单独模式的宽度称为线宽，包含所有振荡模式在内的发射谱总的宽度称为激光器的谱宽。

在固定的调制条件和光输出功率下测量并获得的光谱宽度，其值可以根据下式来确定：

$$\nabla\lambda = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i (\lambda_i - \lambda_m)^2}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} \right]^{1/2} \quad (1-7)$$

$$\lambda_m = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} \quad (1-8)$$

式中， $\lambda_i$  是第 i 个光谱成份的波长； $\alpha_i$  是第 i 个光谱成份的相对强度。

对 DFB-LD 来说，采用 G.957 建议的最大 -20dB 宽度来定义。即在规定的

输出功率下主模中心波长的最大峰值功率跌落 20dB 时的最大全宽为光谱线宽。

#### ⑥ 边模抑制比 (SSR)

边模抑制比是指在发射光谱中, 在规定的调制 (或 CW) 和规定的输出功率时最高光谱峰值强度与次高光谱峰值强度之比。

#### (4) 光束特性

半导体激光器的重要应用之一是光纤耦合, 而影响激光器光纤耦合效率的因素之一便是激光器的光束特性。半导体激光器的光束特性包含两个方面, 即远场和进场辐射特性。所谓远场是指远离激光器出光断面的辐射光斑图样, 相应的, 进场则是指激光器出光断面的光功率强度分布图样。激光器的远场主要由出射光的横模以及光发散角来决定的, 决定进场的主要因素只有横模, 因此, 通过测量器件出射光的远场以及进场发光图样, 我们可以获得器件的横模模式特征。

## 1.2 锥形半导体激光器的发展状况及应用

1993 年, 发射波长为 980 nm 的锥形半导体激光器由美国麻省理工学院 (MIT) 的一个研究组首次报道<sup>[5][6][7]</sup>, 该报道为提高激光器件的光束质量开辟了另一种崭新的途径。从这以后, 不同波长不同结构的锥形器件以及其衍生结构的半导体激光器开始进入人们的视野。随着制备工艺的提高, 以及理论研究的进展, 锥形激光器的研究进入了另一个崭新的环境。表 1-1 列出了 05~09 年国外单管锥形激光器的部分研究进展。

表 1-1 锥形激光器单管研究现状

波长 (nm)	材料结构	器件结构 ( $\mu\text{m}$ )	最大功率 (W)	光束质量因子 $M^2/\text{功率(W)}$	年份
650	InGaP/AlGaIn P	$L_1=200,$ $L_2=1800, \theta=4^\circ$	1 CW	1.3/1	2009
808	GaAsP/AlGa As (SLOC)	$L_1=1000, W_1=3$ $L_2=3000, \theta=4^\circ$	16 pluse	2.6/9	2007

920	GaAs/AlGaAs (GaInAs QD)	$L_1=1000, W_1=4$ $L_2=2000, \theta=1^\circ$	0.9 CW	1.9/0.9	2007
980	InGaAs/AlGaAs	$L_1=500, W_1=3$ $L_2=2500, \theta=6^\circ$	12.5 CW	1.6/8.3	2005
1220	GaInNAs (LOC, DBR)	$L_1=1000, W_1=6$ $L_2=2000, \theta=5.44^\circ$	1 CW	1.4/1	2009

边发射半导体激光器垂直发散角一般高达  $30^\circ$ ，为了降低锥形半导体激光器（以下简称锥形激光器）的垂直发散角，提高器件的光束质量，锥形激光器一般采用具有低光限制因子的大光腔结构。所谓大光腔是指器件内部上下波导层厚度大于  $1\ \mu\text{m}$ 。锥形激光器以其工艺简单，器件光束质量高而被广泛采用。到目前为止，人们已经设计制备了两种类型的锥形激光器，一种是器件锥形全角接近光衍射角的宽波导结构，以实现高功率输出，另一种是器件锥形全角小于  $1^\circ$  的窄折射率波导结构。

2007 年德国柏林费迪南德布朗学院的弗朗科帝特玛耳 (Frank Dittmar) 等人<sup>[8]</sup>，制备了波长为  $808\ \text{nm}$  的锥形激光器，器件最大脉冲 (CW) 功率为  $16\ \text{W}$ ，且连续输出功率  $9\ \text{W}$  时光束质量因子仅为  $2.6$ 。器件采用了量子阱材料为 GaAsP/AlGaAs，总的波导厚度为  $3\ \mu\text{m}$  超大光腔 (SLOC) 结构，脊形波导区长度达  $1000\ \mu\text{m}$ ，宽度仅为  $3\ \mu\text{m}$ ，锥形增益区为长度为  $3000\ \mu\text{m}$ ，锥形全角为  $4^\circ$ 。2003 年麦·科拉克斯基<sup>[9]</sup>采用 GaInAs 做为量子阱、GaInAsP 作为波导层的大光腔结构制备出了波长为  $980\ \text{nm}$  的锥形激光器，其光束质量因子  $M^2$  小于  $3$ 。器件腔长  $2.5\ \text{mm}$ ，锥形全角仅为  $0.7^\circ$ 。于此同时，锥形激光器的衍生器件也被争相报道。2005 年卢亦思·波如耳 (Luis Borrueal)<sup>[10]</sup>等人就制备出了锥形增益区长度 ( $700\ \mu\text{m}$ ) 远短于脊形波导区长度 ( $1800\ \mu\text{m}$ ) 的竖笛激光器。器件有源层采用 InGaAs/InGaAsP 材料，锥形区全角为  $2^\circ$ 。在出光功率为  $1\ \text{W}$  时器件的光束质量因子小于  $3$ 。

随着技术的进步，工艺的提高，低阈值电流、高温稳定性的量子点结构半导体激光器已经进入实验阶段。W. Kaiser 等人<sup>[11]</sup>以 InGaAs/GaAs 作有源层材料

制备了量子点结构激光器，器件总腔长为 3mm，其中脊形区长 1mm，在器件锥形全角为  $1^\circ$  时，获得最大输出功率达 0.9W，光束质量因子为 1.9，波长随温度的漂移仅为 1.14nm/K，发光波长为 920nm。

制备有光栅结构的锥形激光器可以获得高亮度单频器件。如图 1-8 所示为刻有 DBR 的锥形激光器结构图。目前有报道 1062nm 波长的 DBR 锥形激光器在连续输出 10W 功率时，光束质量因子  $M^2$  仅为 1.2，电光效率达 50%，光谱线宽 17pm，倍频后可以输出 1.5W 的 531nm 的绿光。

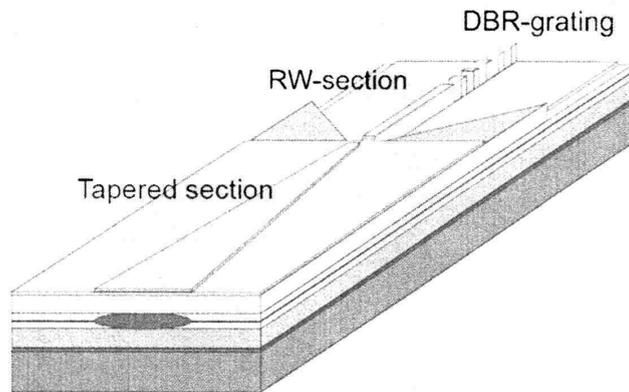


图 1-8 DBR 锥形激光器结构示意图

锥形激光器以其高的光束质量，简单的制备工艺而得到国内外研究人员的普遍认可，单管发光功率高达几十瓦，亮度达百兆每平方厘米量级，发光波长从最初的红光扩展到近红外和红外，国外的锥形激光器研究也已经从研究领域扩展到了实用阶段。

### 1.3 本论文的研究工作

本论文的研究内容主要包括两个部分，首先是锥形半导体激光器的设计制备及测试，然后对管芯焊接工艺进行了初步分析研究。

一、锥形半导体激光器的设计制备及测试。主要介绍了影响锥形半导体激光器性能的主要结构参数，并讲述了锥形激光器设计的原理思路，同时简要概括了

锥形半导体激光器的工艺过程。重点分析了锥形半导体激光器的温度特性。

二、管芯焊接工艺研究。主要从应用角度出发，分析了影响管芯焊接质量的主要因素，包括：焊接温度、管芯压力、钢厚度、芯片表面环境等。同时，使用不同的夹具对焊接工艺进行了摸索。

## 第 2 章 锥形激光器的设计与制备工艺

本章主要介绍锥形半导体激光器结构设计原理，以及半导体激光器的制备工艺。

### 2.1 锥形激光器的结构设计

如图 2-1 所示，锥形半导体激光器主要由两部分组成<sup>[12]</sup>：锥形增益区和脊形波导区。脊形波导区主要用来提供单模输出，并对锥形区反射回来的光进行模式过滤。锥形增益区用来对脊形区的光波进行放大，同时保持其单模特性，降低出光腔面的光功率密度，从而减少非线性效应的产生，抑制腔面光学灾变损伤。

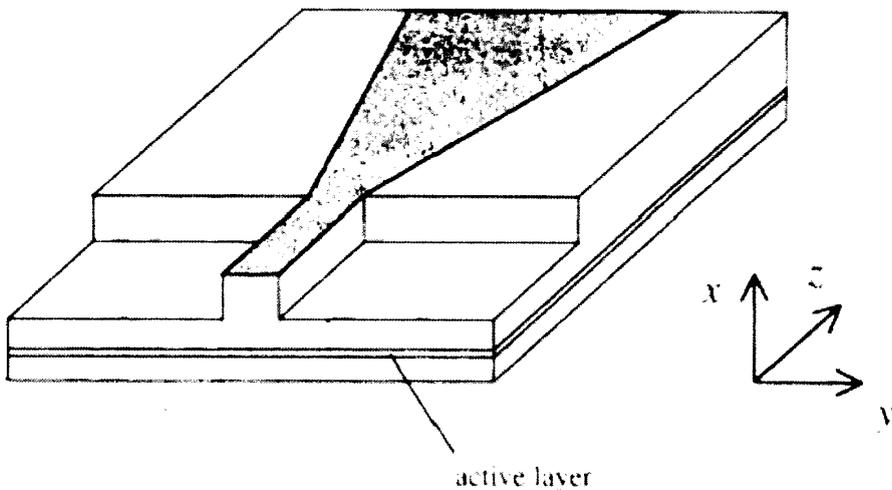


图 2-1 锥形半导体激光器结构简图

锥形激光器的结构设计主要包含以下几个部分：脊形波导区结构设计；锥形

增益区结构设计；腔破坏凹槽结构设计；器件整体结构设计。以下分别予以论述。

## 2.11 脊形波导区结构设计

锥形激光器同普通条形结构的激光器相比，优点主要体现在光束质量高，这源于锥形激光器脊形波导部分的模式选择作用。要想获得良好的光束质量，对锥形器件脊形部分的优化设计是至关重要的，需要结合器件单模输出的条件，对其脊形区的各种结构参数进行对比优化。

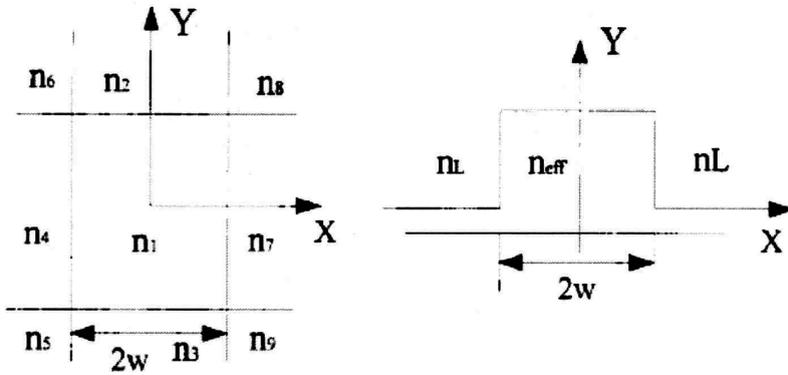


图 2-2 等效折射率近似法

图 2-2 为器件内部结构的等效折射率近似法示意图，其中左图为矩形介质波导的折射率分布，右图为用有效折射率来表示的等效平板波导。其中， $n_{\text{eff}}$  为脊形部分的等效折射率， $n_L$  为脊形两侧沿  $y$  方向的有效折射率。

对于 TE 模， $q$  的本征值方程为：

$$qd = 2 \tan^{-1} \left( \frac{\gamma}{q} \right) + m\pi \quad (2-1)$$

其中  $\gamma$  和  $q$  分别为波导的衰减常数和传播常数，同时有

$$\gamma^2 + q^2 = k_0^2(n_{\text{eff}}^2 - n_t^2) \quad (2-2)$$

$k_0$  为真空波速且  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $d$  为器件脊形波导区宽度且有  $d = W = 2w$ 。令:

$$D = dk_0 \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - n_t^2} \quad (2-3)$$

$$Q = \frac{q}{k_0 \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - n_t^2}} \quad (2-4)$$

式 (2-2)、(2-3)、(2-4) 带入方程 (2-1) 并进行归一化, 得到式 (2-5) 式:

$$QD = 2 \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{1-Q}}{Q} \right) + m\pi \quad (2-5)$$

当  $Q \rightarrow q$  时, 获得零阶模, 基模截止条件为  $0 < D < \pi$ , 即

$$0 < 2W \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - n_t^2} < \lambda \quad (2-6)$$

因此, 脊形波导结构对一阶侧模的截止宽度为<sup>[13]</sup>:

$$W = \frac{\lambda}{2\sqrt{n_{\text{eff}}^2 - n_t^2}} \quad (2-7)$$

等效折射率  $n_{\text{eff}}$  和  $n_t$  与材料有关, 不同材料有不同的等效折射率。经分析计算, 我们发现, 脊形波导区要获得单模输出, 其宽度和脊形波导两侧的剩余覆盖层厚度有一个对应关系, 脊形波导区腐蚀深度与基模截止宽度亦如此<sup>[14]</sup>。分析发现, 若剩余覆盖层过厚, 脊形波导区和剩余覆盖层两者之间的折射率之差变小, 这会降低脊形部分对脊形区光场的限制效果, 导致载流子很容易向脊形区两侧扩散, 并增加了器件的阈值, 降低器件的发光效率。若剩余覆盖层太薄, 脊形波导区和剩余覆盖层两者的折射率之差增加, 由式 2-7 可知, 这将导致截止宽度增大, 脊形区将出现高阶模, 使得脊形波导区无法提供单模输出。理论和实验表明, 脊

形波区导宽度应该在  $2.5\mu\text{m}$ - $5\mu\text{m}$  范围之间，剩余覆盖层厚度在  $0.1\mu\text{m}$ - $0.3\mu\text{m}$  之间。

## 2.12 锥形增益区结构设计

锥形增益区主要对脊形波导区的单模激光进行放大，同时要能保持光的单模特性，尽量避免高阶模的产生。锥形增益区的结构设计主要考虑的是锥形角度的选取。

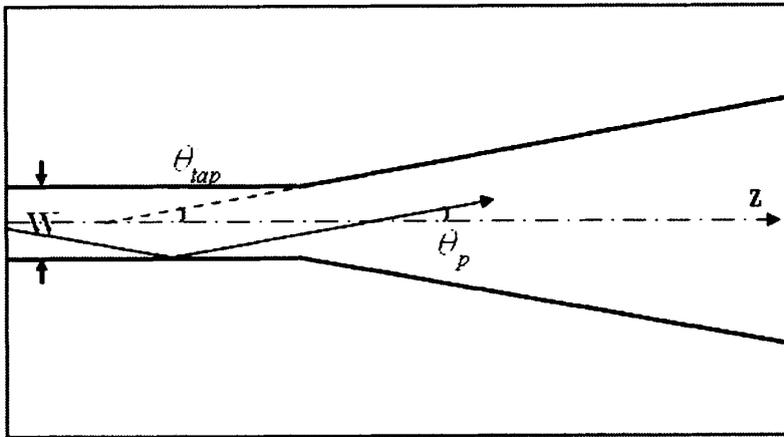


图 2-3 锥形激光器 P 面俯视图

图 2-3 为锥形激光器 P 面俯视图。图中箭头曲线表示的是激光器中光场的传播方向， $W$  为脊形波导区宽度， $\theta_p$  为单模发散角， $\theta_{tap}$  为锥形区角度。为了维持锥形增益区光场不至于产生高阶模<sup>[15,16]</sup>，锥形区角度  $\theta_{tap}$  应该不大于单模发散角  $\theta_p$ 。

单模发散角计算公式如下：

$$\theta_p = \frac{\lambda}{nW} \left[ \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left( \frac{b}{1-b} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2-8)$$

$$b = \frac{n_{nef}^2 - n^2}{n_{nef}^2 - n^2} \quad (2-9)$$

式中  $n$  为半导体材料的折射率,  $n_{eff}$  为当脊形波导的宽度为  $W$  时所对应的有效折射率, 并且当波导宽度  $W$  趋近无穷时的有效折射率为  $n_{eff-n}$ 。由式 2-8、2-9 我们不难发现, 器件的单模发散角的大小, 主要决定于脊形波导区宽度  $W$  和  $b$ , 而  $b$  又取决于器件的有效折射率  $n_{eff}$ 。一般情况下, 计算出的不同器件材料、不同结构器件、不同发光波长所得到的单模发散角为  $6\sim 7^\circ$ , 因此在制备器件结构式通常选用锥形区角度不大于  $6^\circ$ 。

### 2.13 腔破坏凹槽的设计

为了抑制高阶模耦合进入脊形波导区, 需要在锥形区和脊形区之间刻蚀腔破坏凹槽。如图 2-4 所示, 腔破坏凹槽一般刻蚀到有源层一下, 同器件出光方向成一定角度, 槽成长方形。本论文中设计的锥形激光器腔破坏凹槽尺寸为: 长  $85\mu\text{m}$ , 宽  $4\mu\text{m}$ , 与出光方向夹角为  $45^\circ$ 。

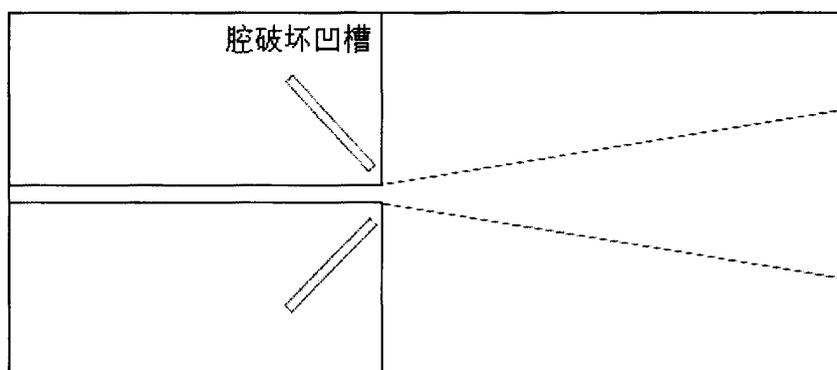


图 2-4 锥形激光器中的腔破坏凹槽结构

### 2.14 器件整体结构设计

锥形半导体激光器区别于条形激光器, 它是一种复合型器件, 由功能不同的

锥形增益区和脊形波导区组成，不同的锥形区和脊形区长度对器件性能影响显著。脊形波导区过短，对模式过滤不充分，无法实现器件的单模输出；过长则会降低器件功率，增大器件产生非线性效应的风险。锥形增益区过短，不利于器件功率增加，同时过窄的出光腔面将导致出光腔面的光功率密度大大增加，容易造成腔面光学灾变损伤。考虑到有限的器件腔长，为了兼顾高的光束质量，和大的输出功率，需要对锥形增益区和脊形波导区的长度进行试验优化。

本论文中涉及到的器件总体腔长为 2500 $\mu\text{m}$ ，锥形增益区长度 1750 $\mu\text{m}$ ，脊形波导区长度 750 $\mu\text{m}$ 。

## 2.2 半导体光器的制备工艺

半导体工艺技术的提高对半导体激光器的制备工艺产生了深远的影响，一直以来半导体激光器的制备工艺都是依赖于半导体工艺技术，换句话说，作为半导体器件的一种，半导体激光器的制备工艺完全可以通过光电子器件技术全部完成。

作为光电子器件的一种，半导体激光器制造技术涉及材料、精细加工、精密光学器件制造、化学等学科和技术。其制造过程中的许多工艺步骤和大规模集成电路的工艺技术是相容的。

半导体光电子器件工艺的关键技术之一是器件材料的外延生长，常用的外延材料包括 II-VI 族、III-V 族、Si、Ge、GaAs 等。器件外延结构多以异质结为主，组分变化大、层次多、结构复杂、制作难度大、对仪器设备的要求也是很高的。常用的外延设备有：MOCVD、MBE 等。

半导体光电子器件工艺的另一个关键技术就是精细加工技术，就是在在半导体外延片或者衬底上，通过一定的加工技术制造出所需要的三维图形，最常用的技术之一就是光刻。由于光衍射极限的限制，光刻精度也是有限的。目前超大规模集成电路的光刻精度已经接近衍射极限，达到 0.13  $\mu\text{m}$ 。光电子器件要求 0.2  $\mu\text{m}$  甚至更小的加工精度，因此对光刻技术提出了更高的要求，对平整度、均匀性、可重复率要求也更高。这就使得人们对刻蚀技术的研究更进一步。精细加工技术已经成为半导体器件工艺的核心技术之一，备受关注。

## 2.21 材料生长

半导体激光器材料生长手段主要有：金属有机化合物化学气相沉积（MOCVD）、分子束外延（MBE）和液相外延（LPE）技术。

### 金属有机化合物化学气相沉积法

原理：利用金属有机化合物作为源物质的一种化学气相沉积(CVD)工艺，其原理为利用气相反应物，通过一系列严格控制将原材料输送到加热生长区，在此生长区，原材料分解后的元素化合形成具有一定光、电性能的晶体材料<sup>[17]</sup>。

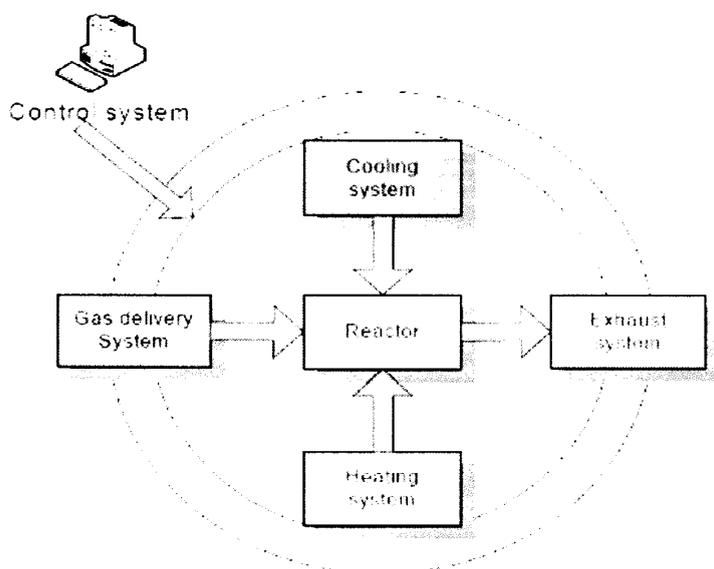


图 2-5 MOCVD 系统组成

MOCVD 技术在薄膜晶体生长中具有以下特点：

1. MOCVD 技术可在非常低的温度条件下生长半导体薄膜材料，从而能有效地减少材料内部的各种缺陷，并降低杂质含量，可有效减少互扩散和自掺杂；
2. 能精确控制材料生长厚度，且精度可以达到原子大小量级；
3. 通过质量流量计方式，能很轻松地控制化合物的掺杂含量和组分；
4. 能高效迅速控制气源地开合，从而能很灵活得改变反应物的含量和组分，

生长得到的薄膜材料组分突变，界面陡峭；

5. 生长面积大，薄膜材料组分均匀，且重复性很高，适用于工业化生产。

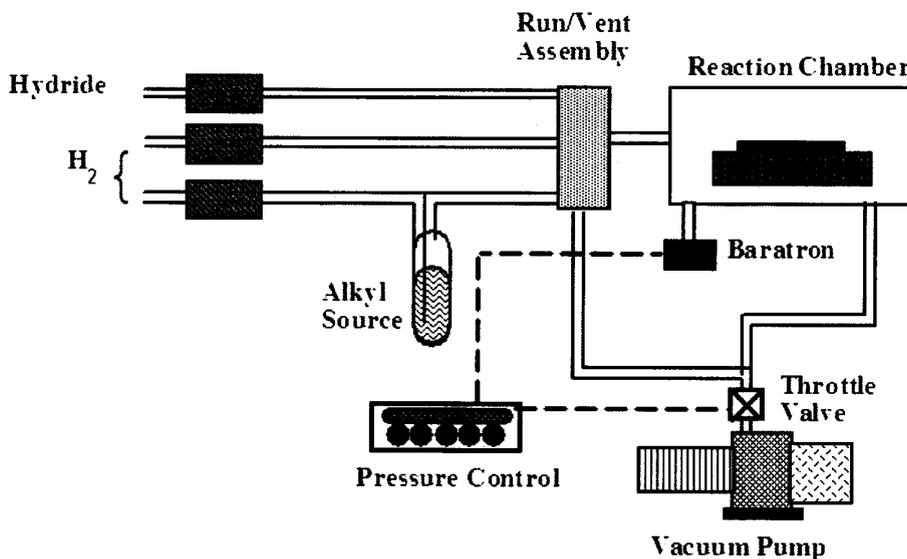


图 2-6 MOCVD 结构简图

### 分子束外延法

分子束外延法是一种制备极薄的单层或多层单晶薄膜的一种技术，它是在超真空的条件下，把一定比例的构成晶体的各个组分以及掺杂粒子以一定的热运动速度喷射到热的衬底表面来进行晶体外延生长的技术<sup>[18]</sup>。

分子束外延的优点：

1. 生长速率精确可控。设备炉内材料源向衬底表面以“分子束流”的形势不断喷射出原材料的原子（或分子），这些原子（分子）将直线喷洒到衬底，然后通过薄膜厚度检测仪等手段可以精确得控制材料的生长速度；

2. 薄膜厚度精确可控。同 MOCVD 一样，MBE 的生长速率缓慢，大约 0.01~1nm/s 量级，因而可以将薄膜的厚度精度控制到原子量级；

3. 可实现选择性外延生长。能高效迅速控制气源地开合，从而能很灵活得改变反应物的含量和组分，从而实现选择性外延生长；

4. 可在非常低的温度条件下生长半导体薄膜材料，从而能有效地减少材料内部的各种缺陷，并降低杂质含量；

5. 装备高能反射电子衍射等装置，可实现薄膜材料的厚度的实时监测和原位观察。

缺点：

生长速率慢；设备成本、维护运行成本高。量产最大的一次 7 片 6 英寸的设备，不适用于厚膜生长可大规模生产。

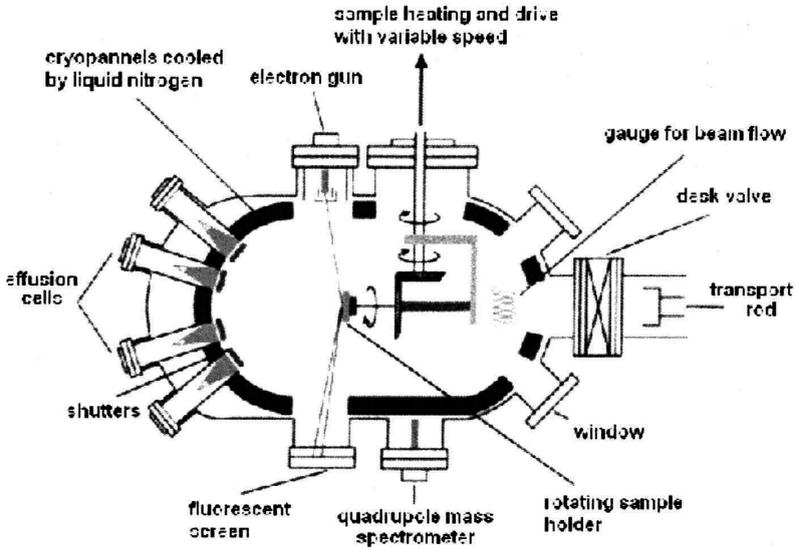


图 2-7 分子束外延结构简图

液相外延：

液相外延是指反应物以液体溶液的形势存在，达到一定条件后在溶液中反应并析出固相物质，沉积后在溶液底部形成薄膜的一种方法。1963 年尼耳松发明液相外延法以后，该法变从此成为制备薄膜主要方法之一，尤其是应用于生成各种电子器件。衬底材料和薄膜材料不同的称为异质外延，反之称为同质外延。液相外延又可以分为倾斜法、滑舟法和垂直法三种，其中倾斜法是指将溶液和衬底分别置于反应容器的两端，并将容器向衬底一侧倾斜，反应开始后在溶液内析出

的反应物在重力等作用下向衬底沉积并生成薄膜的一种方法；滑舟法是指溶液被放置在多个槽内，再放置在石墨舟中，石墨舟可以左右滑动，控制薄膜的生长成分；垂直法是将溶液放在石墨坩锅中，而衬底则放在衬底架上，并置于溶液上方位置。在外延生长过程中，需要对溶液进行冷却，冷却的方法可以分为很多种，最常用的方法有四种：平衡法、突冷法、过冷法和两相法。

与其他外延方法相比，液相外延法具有以下几种优点：

1. 同前两种方法相比，液相外延设备都很简单，成本低；

2. 薄膜的生长速率很快；

3. 由于反应在液体中进行，掺杂剂的可选择种类很多；

4. 薄膜生长依靠析出的产物自然沉积，生成的薄膜完整性好，且薄膜内部缺陷密度比衬底低；

5. 设备简单，操作便捷，生产过程中没有剧毒等有害物质的参与，操作安全，生成的薄膜纯度较高。

LPE 的不足在于，液相外延生长的薄膜表面均匀性不如气相外延好，析出产物的分凝系数不同将使得薄膜材料组分和含量难以控制，不适合生长较厚薄膜，且对衬底晶格常数和外延层晶格常数匹配要求较高，若两者相差太大，将影响薄膜生长。

## 2.22 管芯工艺

半导体激光器管芯工艺主要包括以下几个步骤：精细加工<sup>[19]</sup>（包括光刻和刻蚀技术）、镀膜、氧化。本节重点介绍精细加工技术。

外延生长和精细加工已经成为半导体光电子器件制作技术<sup>[20]</sup>的两大支柱。从广义上说，外延也属于一种薄膜淀积技术。顾名思义，外延就是“向外延伸”，它是一种在单晶的衬底材料（比如硅、锗单晶）基础上，在沉积一层厚度、组分、光电性能都满足要求的新单晶层（通常称之为外延层）的一种特殊薄膜制备工艺，这种技术的提出，为半导体工艺技术解决了许多问题，是近代电子工业技术的最重要进步之一，它为开发新器件新材料提供了另外一种非常重要的技术方法。一般把外延分为同质外延和异质外延，这是根据衬底材料和外延材料的异同来分类的，若二者材料不同则称之为异质外延，反之则成为同质外延；或者根据衬底和

外延材料掺杂浓度的差异,也可分为反外延和正外延,所谓反外延是指在轻掺杂衬底上生长重掺杂的外延,反之则成为正外延。一般情况下外延层结晶方向和衬底结晶方向是一致的,其他特性如厚度、电阻大小、电导类型等都可以按照技术人员的要求进行选择性的生长和制备。精细加工技术是指加工微小尺寸零件的生产加工技术。从广义的角度来讲,精细加工包括各种传统精密加工方法以及和传统精密加工方法完全不同的方法,如切削技术,电铸加工,电解加工,电火花加工,激光加工,微波加工,电子束加工,超声波加工,化学加工外延生产,粒子束加工,等离子体加工,磨料加工,光刻加工技术等。从狭义的角度来看,精细加工主要是指和半导体光电子技术相关技术(诸如集成电路制造技术)有关的一种加工技术,精细加工和超精细加工技术是在半导体集成电路制造技术特别是大规模集成电路和计算机技术的基础上发展的,是信息微电子时代和光电子时代的关键技术之一。

精细加工技术包括光刻技术和刻蚀技术。所谓光刻技术是指利用光学-化学反应原理和化学、物理等方法,将所需要的图形传递到半导体材料或衬底上,形成有效图形窗口或功能图形的工艺技术。光刻手段包括很多种,常用的有光学光刻以及电子束曝光、极紫外光刻、X射线光刻技术等。刻蚀技术是指将已经光刻好图形的半导体基片进行选择性的腐蚀或剥离的技术。

#### 光刻技术

光学光刻可以分为接触式、接近式复印曝光以及投影成像曝光技术。接触式复印曝光是传统的曝光方式,这种曝光方式是利用 300~450nm 的紫外光进行曝光。所谓的接触式是指掩膜版和涂有光致抗蚀剂的半导体材料互相接触,因而这种方法容易损伤掩膜版,降低掩膜版的使用寿命以及芯片的成品率,且光刻的分辨率和对准精度低。但是这种方法设备简单,精度高,操作方便效率高,成本低廉。

## Contact Printer

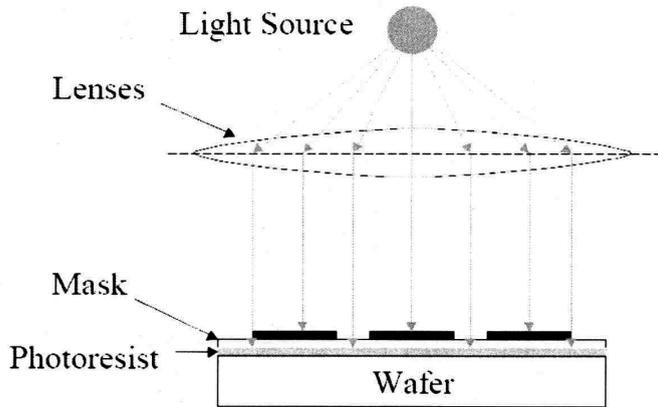


图 2-9 接触式曝光原理图

接近时复印曝光技术同接触式复印曝光相比，避免了掩膜版和衬底的直接接触，因而减少了玷污和磨损，这种技术要求掩膜版和基片保持一定的距离，通常为  $5\sim 50\ \mu\text{m}$  之间，利用高度平行的光束进行曝光，因而难以获得高的光刻精度。

## Proximity Printer

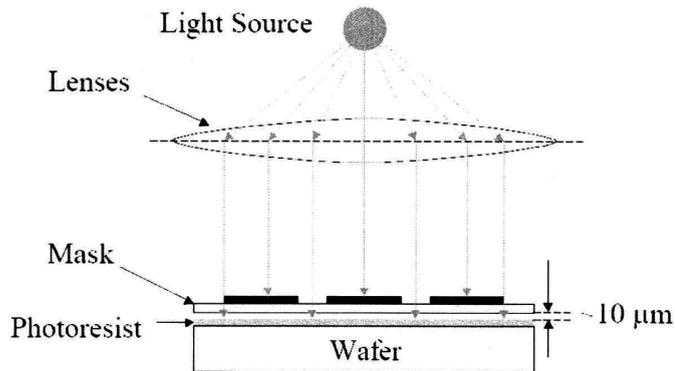


图 2-10 接近时曝光原理图

投影成像曝光技术是将利用成像的方式将掩膜版上的图像投影至半导体基片上，掩膜版不会接触到基片，故而不会带来磨损，于此同时，投影成像又能有效地克服光学衍射效应，可以大大提高分辨率和对准精度。投影成像曝光技术还可以细分为 1:1 的透射式投影曝光和投影分布重复曝光。透射式投影曝光是将掩膜版上的整个版面图形等比例的复制到基片上，而分布重复曝光是将只含一个或若干个芯片图形的中间掩膜版复制到基片上。分布重复曝光是目前半导体生产中广泛采用的技术。

## Projection System

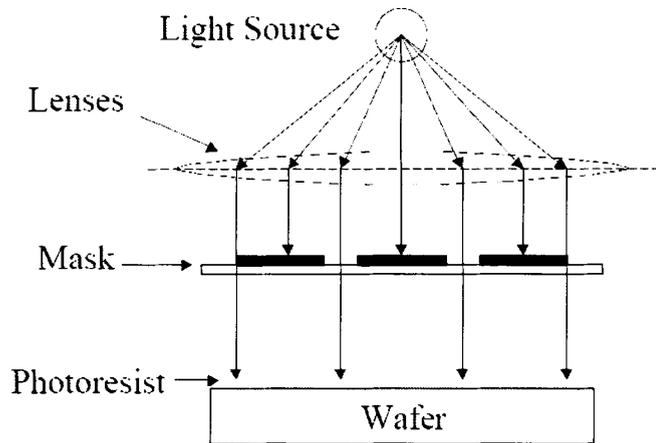


图 2-11 投影式曝光原理图

20 世纪 80 年代，利用光学光刻技术在 InGaAsP 半导体外延片上刻制出了一级光栅 ( $0.23 \mu\text{m}$ ) 和二级光栅 ( $0.46 \mu\text{m}$ )，使得 DFB 和 DBR 激光器得以实现。除了光学光刻技术以外，电子束光刻技术也已经发展成为常用的实验技术，其加工能力优于 80nm。利用电子束曝光技术，可以在同一外延片上刻蚀出 40 个波长不同的激光器所需的光栅，其相邻激光器的光栅周期差别仅仅 0.11nm。

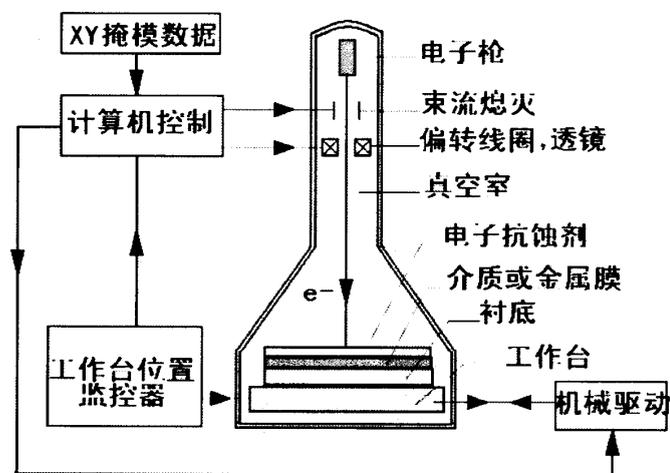


图 2-12 电子束曝光原理图

13nm 极紫外光也称软 X 射线，以它作光源的光刻为软 X 射线光刻技术，可以光刻出 50nm 线宽的图形。X 射线波长短，无散射，焦深大，其加工能力已达 70nm。

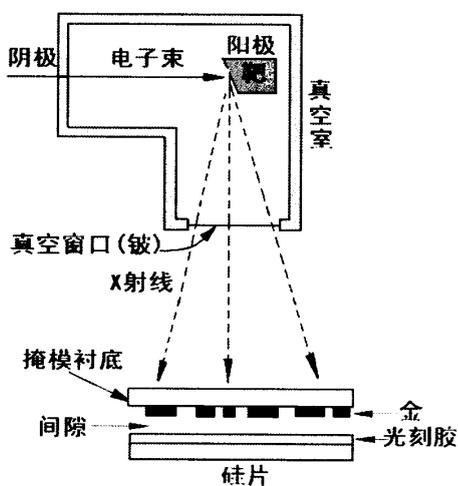


图 2-13 X 射线曝光原理图

### 刻蚀技术

根据曝光束的不同，刻蚀技术可以分为光刻蚀（也简称光刻），X射线刻蚀、电子束刻蚀、离子束刻蚀。按刻蚀机制可以分为干法刻蚀、湿法刻蚀、等离子刻蚀。

所谓湿法刻蚀是指将样品浸没于一种化学溶剂中，溶剂和暴露的膜反应，形成可溶解的副产品。光刻胶掩蔽膜对刻蚀剂具有较高的抗刻蚀性，这种工艺控制困难，溶剂微粒还容易导致缺陷数量增多，缺乏各向异性，且不能生产小特征尺寸的产品，对于特征尺寸小于 $2\mu\text{m}$ 的工艺，就难以利用湿法刻蚀。

干法刻蚀是一种最新迅速发展起来的刻蚀技术，被半导体加工行业广泛采用。它是利用电浆（plasma）来对进行半导体薄膜材料进行刻蚀加工的一种技术，要求刻蚀环境的真空度达到 $10^{-0.001}\text{Torr}$ 。干法刻蚀包括两种刻蚀机制，一种是离子轰击（ion-bombardment），另一种是化学反应（chemical reaction）机制。

#### 光刻步骤：

光刻主要由曝光、显影、刻蚀等主要步骤组成。为了增强图案传递的精确性和可靠性，整个过程还包括涂胶、去水烘烤（Dehydration），涂底（Priming），软烤（Soft Bake）和硬烤（Hard Bake）等步骤。

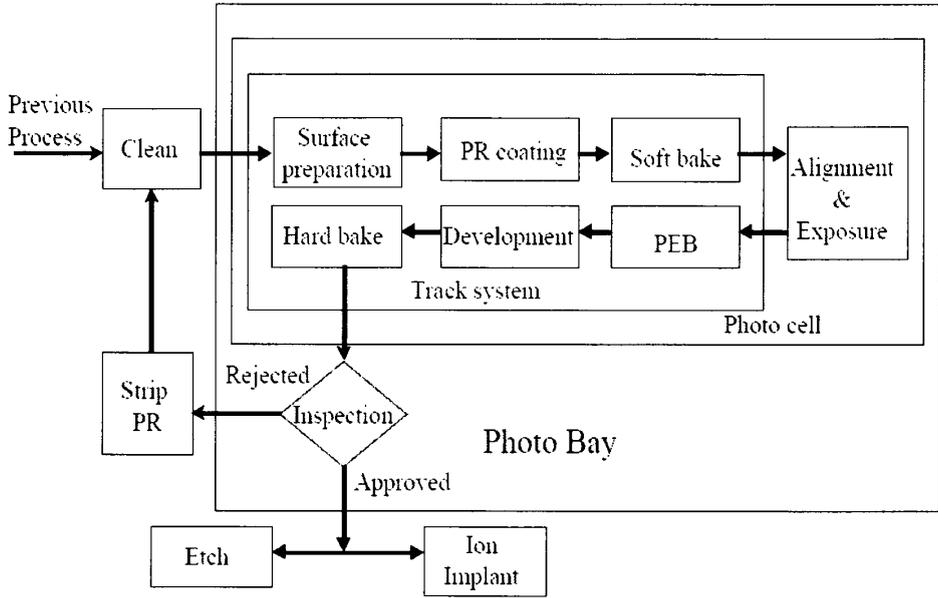


图 2-14 光刻工艺步骤

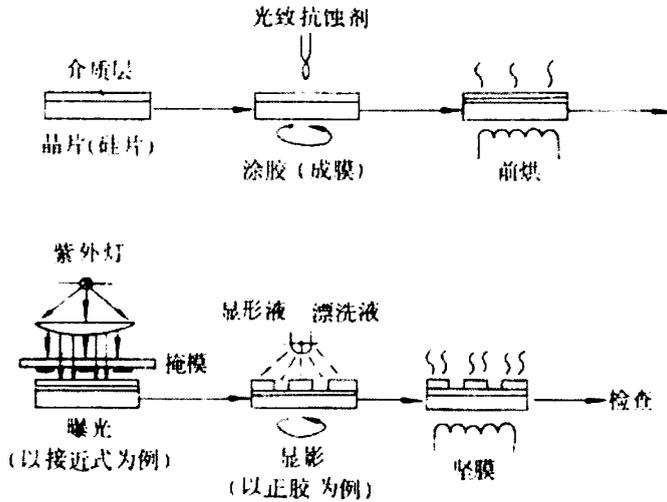


图 2-15 正胶光刻工艺流程

图 2-9 为采用正胶光刻图形的大致流程，我们采用的曝光方式是接触式复印曝光。

### 镀膜

半导体激光器制备过程中涉及的镀膜过程有：管芯工艺中蒸镀  $\text{SiO}_2$  绝缘介质膜；P 面蒸镀 Ti/Pt/Au，N 面蒸镀 Au/Ge/Ni/Au 以及镀膜面高反膜和增透膜。

#### 蒸镀 $\text{SiO}_2$ 绝缘介质膜

一般使用  $\text{SiO}_2$  做为大功率半导体激光器的绝缘介质膜。在半导体材料表面蒸镀  $\text{SiO}_2$  绝缘介质膜的主要方法有：射频溅射沉积、等离子体化学气相沉积（CVD）和热蒸发。射频溅射沉积是利用气体放电产生的高能粒子（一般为正离子）轰击靶材，将靶材表面的原子打出并沉积在半导体材料表面。利用射频溅射沉积制备的  $\text{SiO}_2$  介质膜为无定形结构，电阻率约为  $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$  量级，击穿电场强度为  $2 \times 10^6 \text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$ ，折射率介于 1.4 至 1.47 范围内，所制得的介质膜具有良好的绝缘性。

为了使材料表面沉积的  $\text{SiO}_2$  绝缘介质膜覆盖均匀无空洞，要求沉积的介质膜具有一定的厚度。与此同时，过厚的介质膜又会阻碍芯片内部热量的传递，这将大大降低器件的使用寿命。常用的  $\text{SiO}_2$  绝缘介质膜厚度介于 100nm 至 300nm 之间，且膜表面针孔需要被严格监控，沉积速率为 4nm/min。

#### 制备金属膜

为了降低器件热阻，需要在芯片 P、N 面分别蒸镀金属膜，获得良好的欧姆接触。根据不同的材料以及掺杂浓度，选择不同的膜材料和厚度。

采用电子束蒸发法，在器件 P 面依次蒸发 Ti/Pt/Au，膜的总体厚度为 200nm。其中 Ti 起到增加膜的粘附性的作用，Pt 为过渡层。

器件 N 面最外层衬底为  $n^+$ -GaAs 材料，掺杂浓度高（达  $10^{18} \text{cm}^{-3}$  量级）。在其上依次蒸镀 Ge/Au/Ni/Au。然后通过高温退火使 Ge 原子渗透到 GaAs 层形成高掺杂，进一步降低器件的串联电阻。

图 2-10 所示是单管器件刻蚀过程的侧视图。(a) 在芯片 P 面刻蚀沟道，两个沟道之间便是台面；(b) 在 (a) 基础上再沉积一层  $\text{SiO}_2$  绝缘层，之后在该绝缘层之上刻蚀出电流注入窗口；(c) 在 (b) 基础上，在芯片表面分别蒸镀 Ti/Pt/Au

金属膜，最后把电流窗口两侧的金属刻蚀掉，P面结构完成。

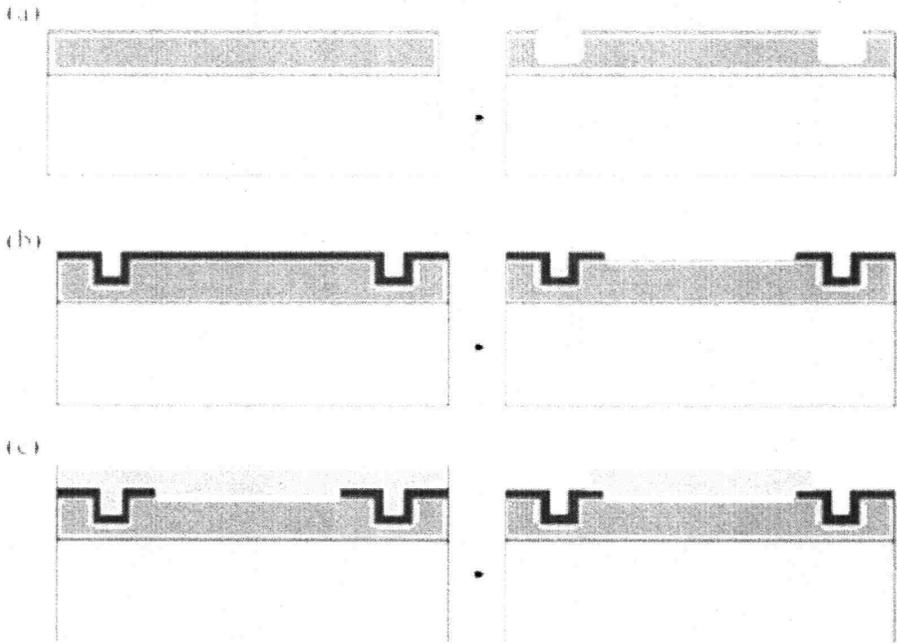


图 2-16 半导体激光器单管刻蚀过程的侧视图

#### 制备腔面膜

P面N面金属膜蒸镀完成以后，需要把芯片解理成Bar条，并在Bar条前后腔面分别蒸镀增透膜和高反膜。

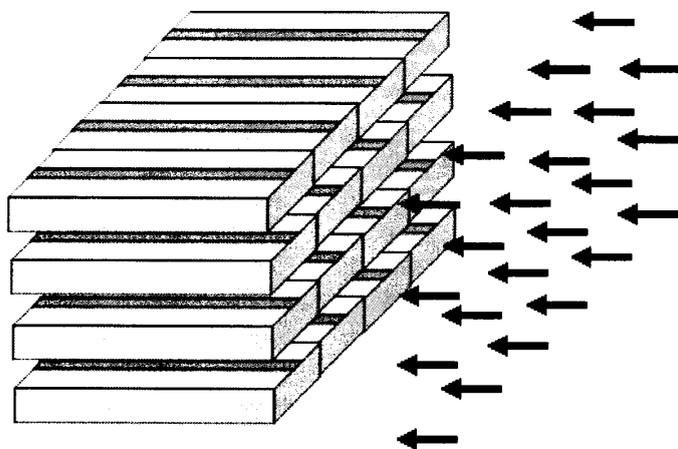


图 2-17 镀腔面膜示意图

图 2-11 为蒸镀腔面膜示意图。半导体激光器出光腔面的光功率密度高，能达到  $107\text{W}/\text{cm}^2$  量级，如此大的出光功率很容易损坏腔面，这要求出光腔面不仅要光学性能好，还得具有很高的损伤阈值条件。若腔面膜损伤阈值低，在如此高的出光功率密度情况下很容易被氧化，并在腔面膜和半导体材料之间生成深能级复合中心，发生电子和空穴对的非辐射复合从而产生大量的热，造成出光腔面温度急剧增加，腔面附近有源区的禁带宽度变窄，又增强了出光腔面出的光吸收，直至腔面被烧坏甚至使得器件失效<sup>[21]</sup>。提高器件损伤阈值的手段有以下几种：

1. 高真空或惰性气体氛围下解理腔面；
2. 腔面钝化（硫化）；
3. 采用无铝量子阱有源区结构。

选择腔面膜材料的原则有：

1. 膜系材料纯度高，光学性能好；
2. 附着力和稳定性强；
3. 膜材料的热膨胀系数和芯片材料要相近；
4. 晶格匹配。

## 2.23 封装工艺

一旦所有器件制造与测试完成，激光器芯片将被装备到管壳中。装备和封装过程是选择性能良好的器件，将他们放入管壳，用引线将器件上和管壳上的电极互相连接起来。封装将为芯片提供一种保护。

器件封装主要提供以下 4 个重要的功能<sup>[22]</sup>：

1. 保护器件以免由环境和传递引起损坏；
2. 为器件的信号输入和输出提供互联；
3. 为器件提供物理支撑；
4. 为器件提供良好的散热环境。

半导体激光器的封装主要包括以下几个方面：首先将已经解理并镀好腔面膜的管芯烧结在热沉上，然后在芯片表面打上电极以及引线，最后将器件封装到管壳中，可采用真空密封或高纯氮气密封。以下介绍几种常用的半导体激光器封装手段：

To 封装（同轴封装），即 Transistor Outline 封装技术，To 封装成本低，寄生参数小，工艺简单，技术成熟使用方便灵活，被广泛应用于 LD、2.5Gb/s 以下 LED、光接收器和组件的封装。

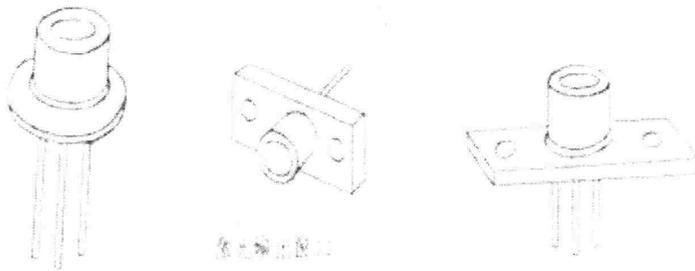


图 2-18 To 封装外貌图

插拔式同轴封装

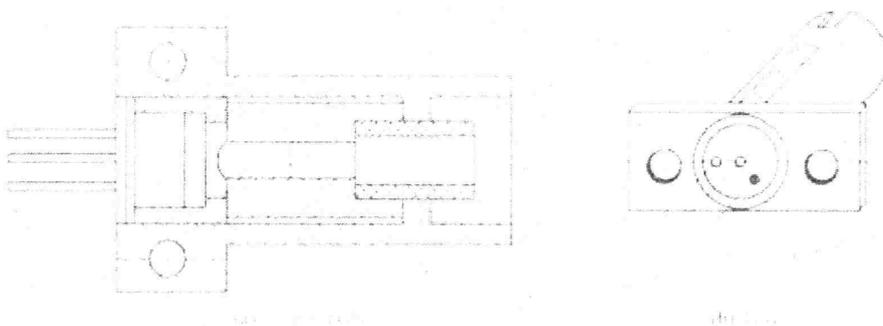


图 2-19 插拔式同轴封装示意图

### 窗口式同轴封装

此类封装的激光器芯片焊接的散热载体上，当外部环境改变时，整个器件内部的探测器芯片可以通过探测激光器芯片背面的光，来获知芯片发光强度的变化，通过改变外加电路的电流进行反馈，保持芯片工作状态的温度而不随工作环境的改变而改变。

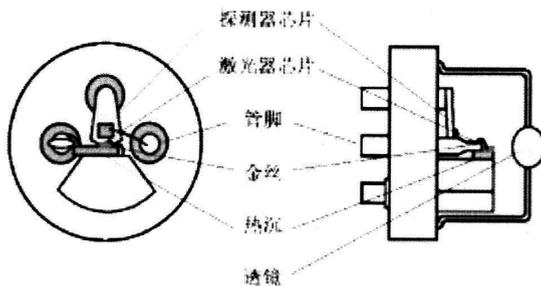


图 2-20 窗口式同轴封装示意图

除了 To 封装以外，还有蝶式封装、子载体封装等技术。

### 2.3 本章小结

本章主要介绍了锥形半导体激光器的结构设计，包括脊形波导区、锥形增益区、腔破坏凹槽以及器件的整体结构的设计；介绍了半导体激光器的制备工艺，包括材料生长工艺，如 MOCVD、MBE、以及 PECVD；管芯工艺，具体介绍了

半导体工艺技术中的精细加工技术，主要包括光刻和刻蚀，以及封装工艺。在封装工艺一节，主要介绍了 To 封装中的几种常用封装技术。

## 第3章 锥形激光器的温度特性

温度一直是影响大功率半导体激光器性能的重要因素之一，半导体激光器在工作工程中，注入电流在芯片内部要产生部分热量，使器件的工作温度升高、发射光波长漂移并缩短器件的寿命。研究温度对锥形激光器性能的影响，掌握锥形激光器基本性能参数随温度的变化规律，对于指导锥形激光器的制备和应用就显得尤为重要。

### 3.1 半导体激光器的温度特性

温度影响半导体激光器的性能是多方面的，包括出光功率，出光光谱以及光电转换效率等多种性能参数。不断增加的芯片温度将降低器件的性能，随着温度的升高，光电转换效率降低，同时器件的出光波长和寿命也将随之改变。

#### 特征温度

所谓的特征温度  $T_0$  是用来表征器件性能随温度的变化情况，特征温度越高，器件的温度稳定性越好。选取不同温度情况下（比如室温  $25^\circ\text{C}$  和高温  $85^\circ\text{C}$ ）器件的 L-I 曲线，并分别获得两种温度条件下器件的阈值电流，根据式 3-1，我们就能获得器件的特征温度。

$$T_0 = \frac{T_U - T_D}{\ln\left(\frac{I_{thTU}}{I_{thTD}}\right)} \quad (3-1)$$

其中  $I_{thTU}$  和  $I_{thTD}$  分别为温度  $T_U$  和  $T_D$  下的阈值电流。

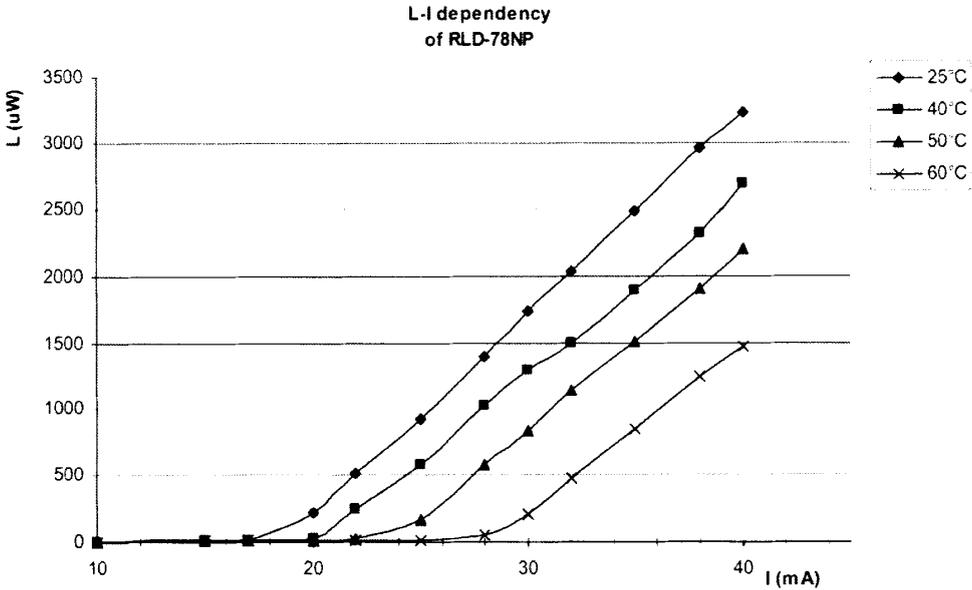


图 3-1 不同温度条件下典型 LD 器件的 P-I 曲线

图 3-1 为典型的半导体激光器在不同温度下的 P-I 曲线，当电流强度达到并且超过阈值电流时，开始发出激光光。

根据式 3-1，我们从图 3-1 中获得所需数据，经过处理以后我们得到器件 RLD-78NP 的特征温度为 72.8℃，而一般类似结构的典型器件的特征温度为 50~75℃之间。此特征温度器件可以用于光电连接器。

#### 斜率效率

阈值电流越低越好，同时，出光功率随注入电流的增加也需要考虑其中。事实上，出光功率和电流的关系也被称作斜率效率  $\partial f$ ，不同器件的斜率效率不同。斜率效率被定义电流每改变 1mA，出光功率的变化，如下图所示为：

$$\partial f = \frac{dP}{dI} \quad (3-2)$$

根据前面已有的定义，随着温度的增加，器件的性能降低。这是由于器件内部辐射变化所导致的。如果注入电流保持恒定，随着温度的增加，器件的出光功

率也将降低。一般用于通信的半导体激光器斜率效率变化为 100~400mW/A。

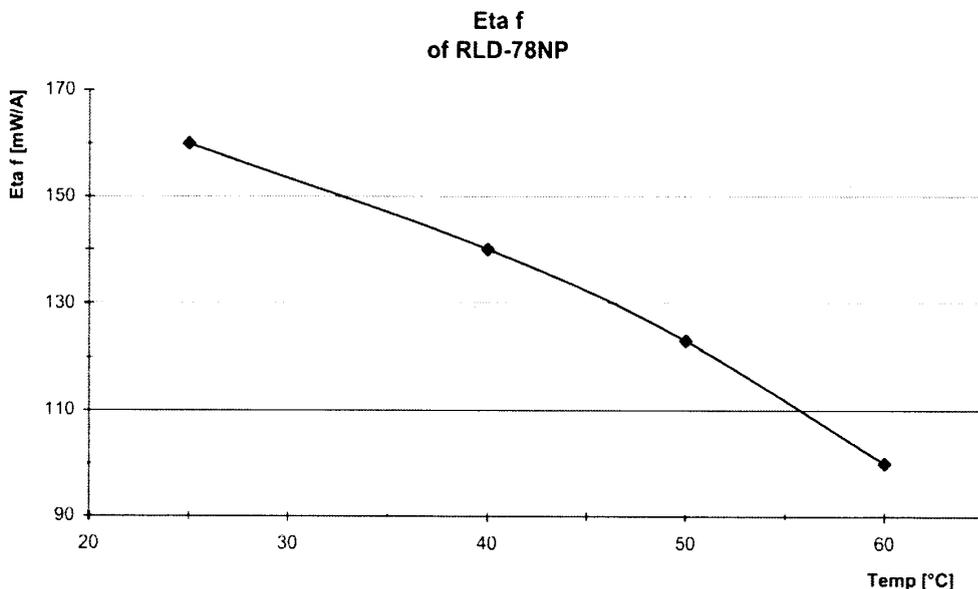


图 3-2 RLD-78NP 型半导体激光器的斜率效率随温度的变化

### 光谱特性

所谓的光谱是指器件发射出的一系列不同波长的激光谱。同 LED 器件不同，半导体激光器光谱线宽很窄，为 0.1~1nm 量级。一个典型的法布里罗布腔半导体激光器出射光包含多个不同纵模的谱线，它由器件材料以及腔长决定。

LD 器件的光谱也是温度函数，随着温度的变化而变化。不断增加的温度使得器件材料的晶格常数和折射率增加，这使得器件光谱向着长波长方向漂移。同时，不断增加的注入电流将在器件内部产生大量焦耳热，并使得器件温度增加，反过来又加大了器件向长波长漂移的速度，这一现象被称为模式跳变。

## 3.2 锥形半导体激光器的温度特性

大功率高亮度半导体激光器以其电光转换效率高，体积小而被广泛应用于切割、焊接、材料表面处理、固体激光器泵浦、光纤放大器以及空间通信等领域 [26,27,28,29]。为同时实现高功率和高光束质量输出，主要发展了有以下四种结构类

型的半导体激光器：锥形半导体激光器、 $\alpha$ 分布反馈半导体激光器( $\alpha$ -DFB lasers)、抗共振反射光波导激光器(ARROW lasers)<sup>[30]</sup>，以及主控振荡功率放大器(MOPA's)<sup>[31]</sup>。在这四种结构器件中，基于锥形增益区脊形波导结构的大功率锥形半导体激光器又以其相对简单的器件结构，低廉的制作成本而被广泛采用。

限制锥形半导体激光器功率的提高并造成其光束质量退化的主要因素是非线性效应(nonlinear effects)，包括自聚焦(self-focusing)和光丝效应(filamentation)<sup>[32]</sup>。国内外对锥形半导体激光器的研究主要集中于选取不同的脊型区长度和锥形区角度<sup>[33,34,35]</sup>，采用低模式增益因子<sup>[36,37]</sup>，特殊电极结构<sup>[38,39]</sup>来改善锥形激光器的这一缺陷，而有关锥形半导体激光器温度特性的报道较少。温度一直是影响大功率半导体激光器性能的重要因素之一<sup>[40]</sup>，半导体激光器在工作工程中，注入电流在芯片内部要产生部分热量，使器件的工作温度升高、发射光波长漂移并缩短器件的寿命。研究温度对锥形激光器性能的影响，掌握锥形激光器基本性能参数随温度的变化规律，对于指导锥形激光器的制备和应用就显得尤为重要。

本节主要介绍波长为 850 nm 的锥形半导体激光器的温度特性。

#### 器件结构

器件外延片是通过金属有机化合物化学气相淀积(MOCVD)生长得到的，具体结构参数详见表 1。其中，p 型层和 n 型层分别掺杂 Zn 和 Si。

表 1 AlGaInAs/AlGaAs GRIN-SCH SQW 结构各层厚度、组分及掺杂浓度

层数	材料	x/y取值	厚度 ( $\mu\text{m}$ )	掺杂浓度 ( $\text{cm}^{-3}$ )
11	GaAs		0.2	$p > 2.0 \times 10^{19}$
10	$\text{Al}_x\text{GaAs}$	0.55-0.05	0.05	$p = 1.0 \times 10^{18}$
9	$\text{Al}_x\text{GaAs}$	0.55	1.2	$p = 4.0 \times 10^{17} - 1.0 \times 10^{18}$
8	$\text{Al}_x\text{GaAs}$	0.25-0.55	0.15	$p = 2.0 \times 10^{17}$
7	$\text{Al}_x\text{GaAs}$	0.16	0.01	垒层
6	$(\text{Al}_x\text{Ga})\text{In}_y\text{As}$	0.13/0.14	0.007	阱层
5	$\text{Al}_x\text{GaAs}$	0.16	0.01	垒层
4	$\text{Al}_x\text{GaAs}$	0.55-0.25	0.15	$n = 1.0 \times 10^{18}$

3	Al <sub>x</sub> GaAs	0.55	1.2	n=1.0×10 <sup>18</sup> -1.0×10 <sup>17</sup>
2	Al <sub>x</sub> GaAs	0.05-0.55	0.05	n=2.0×10 <sup>18</sup> -1.0×10 <sup>18</sup>
1	GaAs		0.3	n=2.0×10 <sup>18</sup>

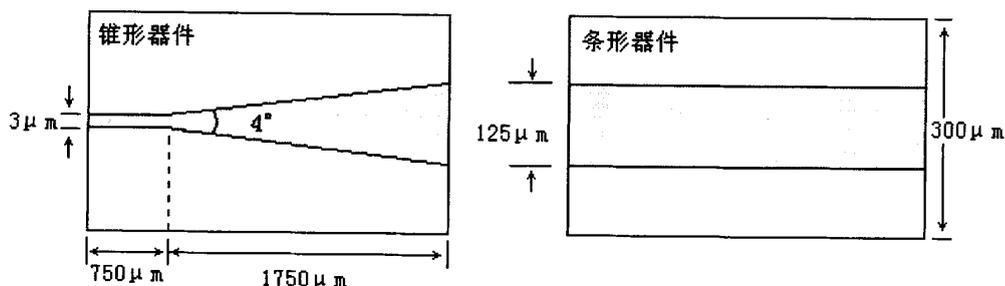


图 3-3 锥形激光器和条形激光器的结构示意图

图 3-3 为锥形和条形激光器的结构示意图。如图所示，锥形激光器主要由两部分组成，包括提供单模输出的脊形部分和实现功率放大的锥形部分，器件总腔长为 2500 μm。其中，锥形区锥形角度 4°，长度 1750 μm，腐蚀深度为 0.2 μm；脊形区长度 750 μm，宽度 3 μm，腐蚀深度为 1.3 μm。条形激光器总腔长为 2500 μm，条宽 125 μm，腐蚀深度 0.2 μm。采用标准光刻技术和湿法腐蚀技术制备器件的台面部分，再沉积一层 SiO<sub>2</sub> 作为绝缘层，在台面上光刻出电极窗口，分别于 n 面和 p 面分别蒸镀 Au/Ge/Ni 和 Ti/Pt/Au 做电极，前后腔面分别镀反射率为 98% 的高反膜和 5% 的增透膜，最后解理成 300 μm×2500 μm 的单管激光器。

### 测试分析

图 2 为占空比 0.5% (t=50 μs, f=100 Hz) 脉冲电流注入条件下，测得的锥形器件在 20 °C-70 °C 范围内锥形器件的 P-I 曲线。从图中可以看出，随着温度的升高，器件的输出功率下降，在该温度段内其最大输出功率由 0.97 W 下降到 0.70 W。当注入电流高于激光器阈值时，器件的输出功率满足以下关系式：

$$P = \eta_i \eta_{ex} \frac{a_m}{a_i + a_m} \frac{hv}{q} (I - I_{th}) \quad (3-3)$$

其中  $\eta_i$  为内量子效率， $\eta_{ex}$  为外量子效率， $a_i$  为内损耗， $a_m$  为端面损耗。随着温度的升高，器件的内损耗及载流子泄露增加，导致内量子效率减小，外微分量子效率降低，从而造成输出功率下降。同时，温度的升高又造成注入的载流子能量分布变宽，透明载流子浓度增加使得器件阈值也随之升高。

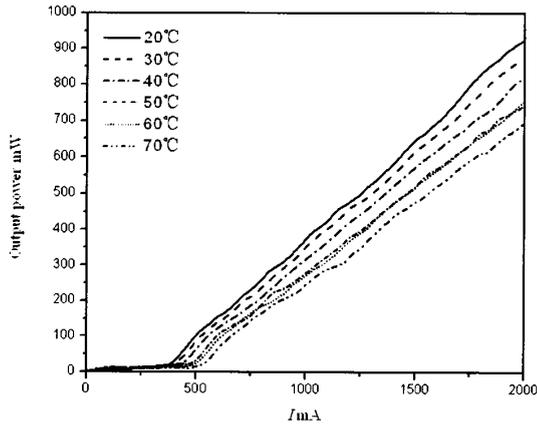


图 3-4 20-70°C 范围内锥形器件的 P-I 特性曲线

$J_{th}$  与温度的关系主要取决于增益系数随温度的变化。随温度增加，损耗系数增加，漏电流增加，内量子效率降低，这些都使  $J_{th}$  增加，如图 3 所示。根据实验测定， $J_{th}$  随  $T$  的变化满足指数关系<sup>[41]</sup>：

$$J_{th}(T_r + \Delta T) = J_{th}(T_r) \exp\left(\frac{T - T_r}{T_0}\right) \quad (3-4)$$

其中， $T_r$  为室温； $J_{th}(T_r)$  为室温下的阈值电流密度； $T_0$  表征半导体激光器温度稳定性的重要参数，通常称为特征温度，它与激光器所使用的材料和结构有关。从式中不难看出， $T_0$  越大， $J_{th}$  随温度变化越小，激光器的温度特性越好。从(2)式我们可以得到：

$$J_{th}(T) \propto \exp\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (3-5)$$

如图3所示,我们把 $\ln J_{th}$ 作为纵坐标, $T$ 作横坐标,拟合以后所得直线斜率的倒数便是器件的特征温度,实验测得锥形器件和条形器件的特征温度分别为164 K和96 K,前者远高于后者。影响特征温度的因素主要包括三个方面,即注入载流子泄露,俄歇复合和价带间的光吸收。从图3中我们不难看出,条形器件的电流密度低于锥形器件,有源层中载流子分布较锥形稀疏,为达到阈值必须加大注入,结果使得泄露的载流子浓度增加,特征温度较锥形低。另外,C.Y.Liu<sup>[42,43]</sup>等人发现,窄的条形区宽度以及合适的高度都能显著提高激光器的特征温度。在本文中,锥形器件3  $\mu\text{m}$ 宽的脊形区以及宽度渐变的锥形区条宽明显窄于条形器件,同时,锥形器件较深的腐蚀深度对注入电流的侧向扩散有限制作用,均使得锥形器件特征温度显著提高。

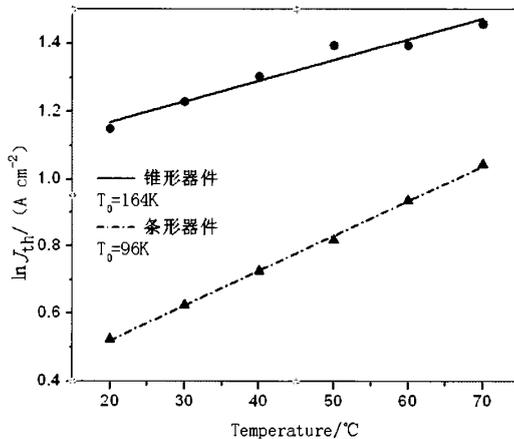


图 3-5 器件的阈值电流密度随温度的变化

在占空比 0.5% ( $t=50 \mu\text{s}$ ,  $f=100 \text{ Hz}$ ) 1000 mA 脉冲电流注入条件下, 分别

测量了锥形器件和条形器件在不同温度下的光谱，结果如图 4 所示。实验测得锥形器件和条形器件的波长漂移分别为 0.25 nm/K 和 0.28 nm/K。

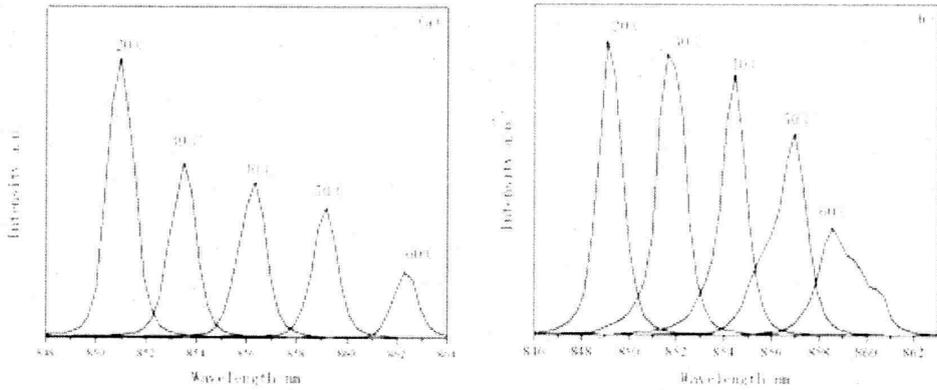


图 3-6 1A 脉冲电流，不同温度条件下两种器件的光谱图 (a) 条形器件；(b) 锥形器件

图 5 为两种器件的半高宽随温度的变化。从图中我们可以看出，在低于 40 °C 时锥形器件光谱半高宽为 1.12 nm，较条形窄 0.12 nm。当温度继续升高时，锥形器件光谱明显变宽，而条形器件光谱略有窄化。究其原因，我们认为，随着温度的升高，锥形器件中脊形部分折射率改变降低了自身的模式过滤作用并产生高阶模，且由于锥形器件未刻蚀隔离沟道，使得温度变高后，前后腔面之间的多模式震荡破坏了锥形器件光束质量，光谱变宽。对于条形器件，温度的升高使得器件内损耗增加，增益降低，满足激射条件并形成激射的光模式变少，光谱略有变窄。

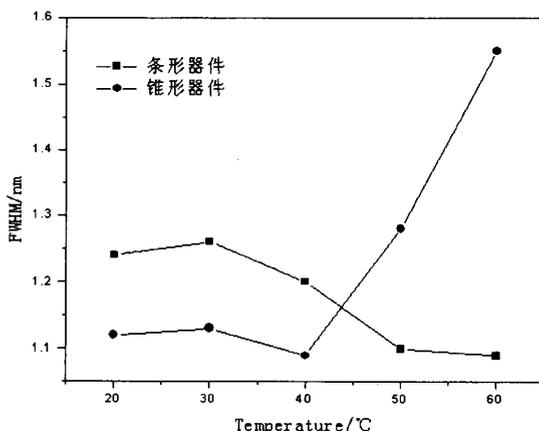


图 3-7 器件半高宽随温度的变化

### 结论

采用相同外延结构分别获得了发射波长为 850 nm 的锥形结构半导体激光器和条形结构半导体激光器。在 20°C-70°C 范围内，随着温度的升高锥形器件的功率由 0.97 W 下降到 0.70 W。通过对比二者的阈值电流密度，我们发现锥形器件的特征温度明显高于条形器件达到 164 K。在温度不高于 50 °C 条件下，锥形器件光谱较条形窄，波长随温度的漂移略低于条形器件。

### 3.3 本章小结

本章首先介绍了半导体激光器的温度特性，主要包括特征温度、斜率效率以及光谱特性随温度的变化，为第二小节介绍锥形半导体激光器的温度特性做好理论基础。在第二小节首先介绍了锥形和条形器件的结构，然后重点分析介绍了 850 nm 波长的锥形半导体激光器的温度特性，包括阈值电流密度、光谱、以及半高宽随温度的变化，并从中得出了两种器件的特征温度。从分析中可以看出，在 20°C 到 50°C 范围内，制备的同有源层结构的锥形激光器比条形激光器具有更好的温度特性。



## 第 4 章 半导体激光器的烧结工艺

正如第二章所言，封装工艺对激光器性能有非常巨大的影响，成熟稳定优良的封装工艺能大大提高器件的发光功率，降低器件阈值电流、增加器件效率和使用寿命。为了提高器件各项性能，研究半导体激光器的封装工艺是非常必要的。

### 4.1 烧结工艺概述

芯片烧结工艺是半导体激光器封装的非常重要的一环，良好的烧结工艺不仅能为芯片提供牢固的物理支撑，同时还能改善器件的散热性能，提高器件的输出功率，降低器件阈值电流（这里指烧结前后所测器件 P-I 曲线中的阈值，区别于理论上的阈值影响因素）。芯片烧结对半导体激光器性能的影响有着至关重要的作用。

目前，应用比较多的芯片焊接材料可以分为以下几种：合金硬焊料或软焊料、玻璃焊料和有机焊料。有机焊料焊接性能好价格低廉，在商业应用范围广泛，但是由于有机材料导电能力不足、散热效果不好，因而在对可靠性要求较高的场合依然使用合金焊料。

合金焊料又可分为合金软焊料和合金硬焊料，他们有各自的优缺点。合金软焊料焊接温度低，可焊接大块材料，但是焊接速度慢，有时甚至需要助焊剂，不能应用于高温场合。合金硬焊料焊接速度快，焊层稳定性好，耐高温可应用于高温场合。但是焊层内残余应力高，容易造成芯片碎裂，因而只能用于焊接小块材料。而且硬焊料延展性不如软焊料，这要求芯片和衬底具有相差不大的热膨胀系数，以免焊接冷却过程中由于膨胀系数不一致而导致两者撕裂。

本论文中涉及的芯片烧结工艺采用 Au/In 焊料，其中 In 是软焊料。依赖的是 Au/In 等温凝固反应。等温凝固是指：高熔点反应物 A 和低熔点反应物 B，在

比 B 的熔点略高、A 熔点低很多的恒定温度下反应，生成固溶体（或金属间化合物）。其特点为所形成的固溶体（或金属间化合物）往往具有比反应物具有更高的熔点或相变温度。

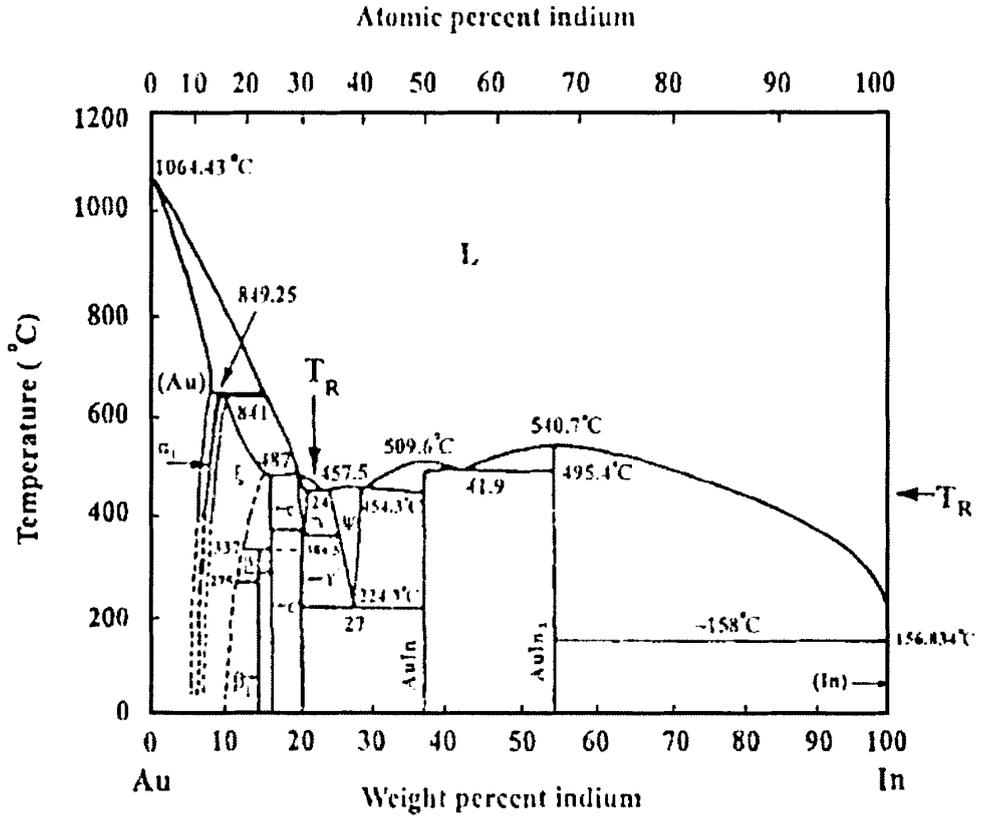


图 4-1 Au/In 等温凝固相图

图 4-1 为 Au/In 等温凝固相图，从图中我们可以看出，Au 熔点为 1064°C，In 熔点为 156°C，在 In 组分达到 38%~54%之间，两者发生固溶反应生成 AuIn 和 AuIn<sub>2</sub> 固溶体，其中 AuIn 熔点为 509°C，AuIn<sub>2</sub> 熔点为 540°C。等温凝固是一种固液反应，由于反应过程中有液相存在，固反应过程比普通固固扩散反应要快。与此同时，为了防止焊接过程中芯片被烧坏，要求焊接温度不得高于 400°C，而 AuIn 等温凝固可以在 200°C 左右提供快速焊接烧结，是一种方便可靠的焊接技

术。

## 4.2 Au/In 烧结失效分析

采用德国进口的 Centrotherm VLO20 回流焊接炉, 进行 Au/In 烧结失效分析。



图 4-2 VLO20 实物图

Centrotherm VLO20 真空焊接系统能将空洞率减小到 2%, 而典型回流焊接范围为 20%。使用各种气体诸如 纯 N<sub>2</sub>、纯 H<sub>2</sub>、N<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub> 混合气体 (氮氢比为 95:5), 微量助焊剂。系统可以使用无铅焊膏和焊片工艺而不需额外的助焊剂。它有以下几个特点:

1. 工艺温度可达 450℃;
2. 极好的温度均匀性;
3. 真空度可达到 10<sup>-5</sup> mbar;
4. 极短的工艺周期。

实验所选用的夹具为自组装夹具, 其结构如下图:

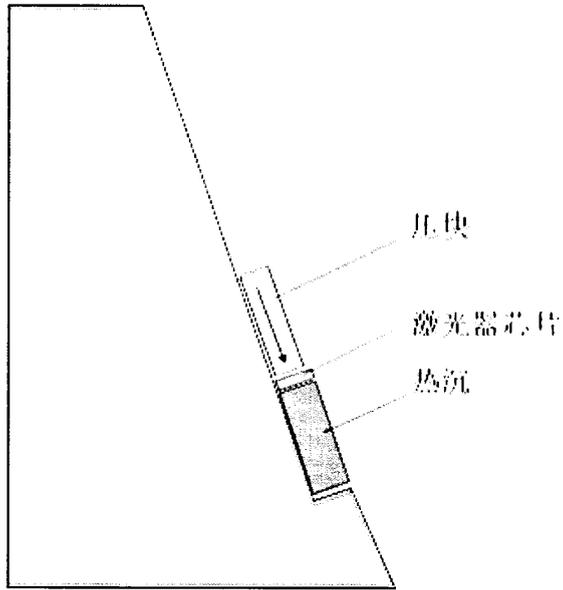


图 4-3 自组装夹具侧视图

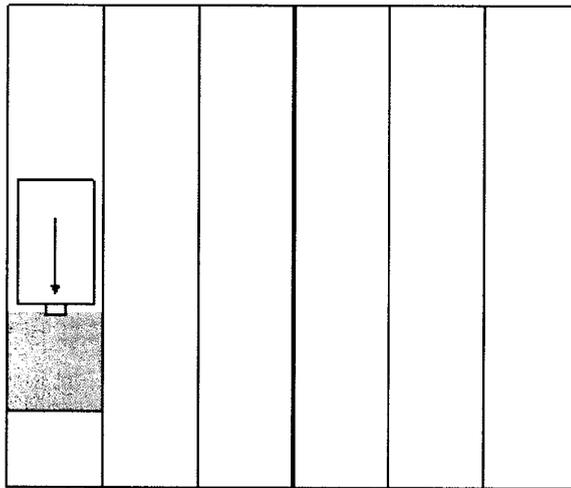


图 4-4 自组装夹具结构正视图

如图 4-3、4-4 所示，夹具有倾斜凹槽，槽中依次放置热沉，芯片，压块。其中压块可以选择 1 块或 2 块以提供不同的压力。

焊接炉能提供快速升温，高真空或者还原气体氛围的焊接环境，整个过程由提前设置好的系统程序自动控制。整个焊接过程大致为：抽真空-充氮气-抽真空-充入保护性气体-升温-保温-升温-焊接-抽真空-降温-充氮气。整个焊接程序可人为设置。

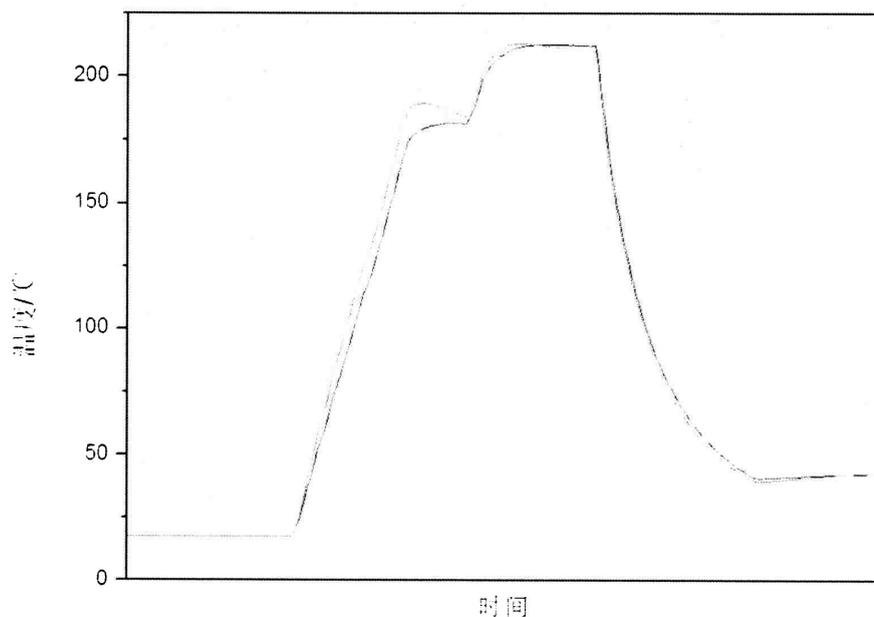


图 4-5 焊接温度曲线图

图 4-5 为回流炉焊接温度曲线图，先升温至 170℃，保温，再升温至 220℃ 焊接，最后降温。

#### 4.21 Au/In 烧结失效因素

##### 一、温度过高

过高的温度使得 In 在融化后沸腾并产生气泡，严重影响封装效果。



图 4-7 为芯片焊接断层的扫描电子显微镜图片，图中中间区域以外的偏白色部分为 In 层，是焊接过程中芯片和热沉上的 In 接触不良所致。  
压力不足

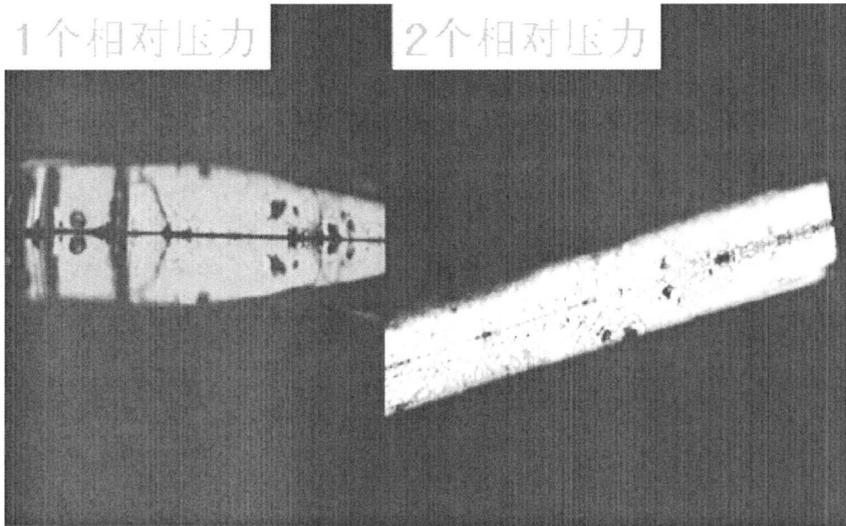


图 4-8 不同压力下焊接显微镜图

图 4-8 分别为 1 个相对压力和 2 个相对压力条件下，管芯的焊接显微镜图片。从图中可以很明显的看出，在 2 个相对压力条件下，管芯和热沉贴附的更为紧密，中间空隙较少。

## 二、其他因素

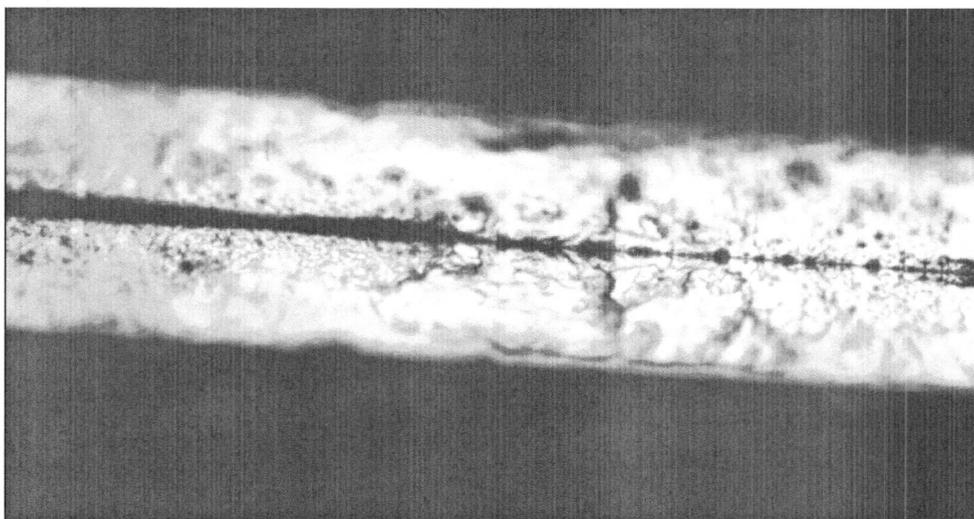


图 4-9 芯片焊接失效图

如图 4-9 所示，焊接过程中出现大量空洞，且芯片和焊料粘接不严密，也是导致焊接失效的原因之一。



图 4-10 芯片焊接失效图

图 4-10 为芯片 P 面显微镜图片，从图中可以看出，芯片表面的金层不够牢固，并且开始脱落，容易导致芯片烧结失效。

试验中我们还发现，若 In 层过厚，焊接过程中金层将被过厚的钎层消耗掉使得焊层出现空洞，严重降低焊接质量，切过后的钎层容易导致出现爬钎现象，使得器件短路失效。并且，芯片表面环境对焊接效果的影响也是明显的，表面灰尘越多，金层不均匀，粘接不牢固，都是导致焊接失效的原因。

### 4.3 本章小结

本章主要介绍了芯片烧结工艺的原理，焊接工艺过程中所采用的夹具结构。分析了导致烧结失效的几个因素，总结如下：

#### 1. 温度

过高的温度将导致热沉上的 In 层起泡，并导致芯片产生位移，并在焊接层内部产生气泡，严重影响焊接质量。

#### 2. 压力

压力不足将导致芯片和 In 层浸润不良，焊接以后会产生大量空洞。

#### 1. 回流曲线

回流焊接时的预热温度、焊接温度，以及两种温度的持续时间对焊接质量的影响也是很大的。

#### 2. 表面环境

芯片表面灰尘数量多少，金层是否脱落，以及 In 层的均匀度是否良好都将影响焊接效果。实验要求表面环境越高越好。



## 第 5 章 总结与展望

从半导体激光器的首次提出到现在已经过去将近半个世纪，在这半个世纪里，半导体激光器从最初的超低温下微秒脉冲工作到现在的室温下连续可靠工作，从最初的同质结型激光器发展到现在的 300 多种结构类型，应用领域涉及军事、通信、加工、电子等等——半导体激光器发展不可谓不大，影响范围不可谓不广。

和普通的激光器相比，半导体激光器具有体积小，结构简单，成本低廉，效率高，寿命长，波长范围广，易于批量化生产等诸多优点。随着人类技术水平的不断提高，尤其是 MOCVD 和 MBE 以及精细加工等技术的不断发展，半导体激光器的制造工艺也随之提高，各种器件类型层出不穷，大有取代传统激光器的趋势。全世界科研人员对半导体激光器的研究也是方兴未艾。

半导体激光器的发展历史，就是一部同影响器件性能的各种因素斗争的历史。在这些影响因素里，温度一直是阻碍激光器性能提高的因素之一。本论文主要分析研究了锥形半导体激光器的温度性能，从分析中我们可以看出，锥形激光器不仅在光束质量方面比普通条形器件有优势，在温度特性上也比后者好。同时，本论文还分析了半导体激光器的工艺技术，详细介绍了锥形激光器结构设计思路，分析了半导体激光器烧结工艺的几种失效因素，这对提高半导体激光器的散热性能至关重要。

经过近半个世纪的发展，可以毫不夸张的说，半导体激光器已经涉及到各行各业。大到空间通信，小到扫描仪；从现代激光武器，到激光医疗都有半导体激光器的身影。半导体激光器的发展向着两个方向发展，即信息型激光器，以传递信息为目的。另外一种是大功率方向的激光器，可以用于泵浦固体激光器，激光武器，激光加工等领域。从 1990 年后开始，半导体激光器的出光功率有了质的飞跃，国外 1000W 级的大功率器件以及实现了商品化，国内也已经达到六百瓦

水平。从激光出光波长上看，目前蓝（蓝绿）光半导体激光器已经研制成功，百毫瓦量级的紫外半导体激光器也已经进入研究领域。从激光器种类上看，分布反馈激光器，分布布拉格反射激光器，集成双波导激光器，高功率无铝激光器，中红外半导体激光器，单极性注入半导体激光器以及量子级联激光器等也已经成为半导体激光器研究领域的新热点。单极性注入半导体激光器的原理是利用价带或者导带内的子能级间电子跃迁实现激光辐射，这种类型的激光器通常采用量子阱结构，目的是使价带或者导带内存在足够多的子能级。单极性半导体激光器能获得很大的输出光功率。量子级联半导体激光器采用的是同一种材料不同厚度叠加后，就能获得不同波长的激光辐射，这种类型激光器不需要冷却系统，因而应用前景广泛。低维半导体激光器（如量子线激光器、量子点激光器）的研究也在如火如荼的进行着。

半导体激光器的研究方向，一直在朝着滴阈值电流密度，不同激射波长，长工作寿命，室温连续工作，单频单模，窄线宽发展。

可以预见，在不久的将来，半导体激光器将在军事、通信、医疗、加工等领域发挥越来越重要的作用，将人类社会的发展做出不可磨灭的贡献。

## 参考文献

- [1] 半导体激光器[J]. 中国光学与应用光学文摘, 2004,(03):44
- [2] 江剑平.半导体激光器 [M].北京: 电子工业出版社, 2000:52.
- [3] 何兴仁。半导体激光器发展现状与趋势[ J] . 光电子技术与信息。1999, 12(4): 14-20.
- [4] 常利民. 量子阱半导体激光器概述[J]. 半导体光电, 1991,(03):38-40
- [5] J.N.Walpole, E.S.Kintzer, S.R.Chinn, et al., in Proc. Conference on lasers and Electro-Optics, edited by A.M.Johnson and R.C.Lind (Optical Society of America, Washington, DC, 1992 ), paper CWN1.
- [6] J. N. Walpole, E. S. Kintzer, S. R. Chinn et al. High-power, strained-layer InGaAs/AlGaAs tapered traveling wave amplifie [J]r. Appl. Phys. Lett. 1992, 61: 740 - 742.
- [7] E.S.Kintzer, J.N.Walpole, S.R.Chinn, et al. High-power, strained-layer amplifiers and lasers with tapered gain regions [J]. IEEE Photon. Technol. Lett. 199, 35: 605 - 608.
- [8] D.Frank, K.Andreas,S.Bernd, et al. 9-W Output Power From an 808-nm Tapered Diode Laser in Pulse Mode Operation With Nearly Diffraction-Limited Beam Quality [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2007, 13(5): 1194-1199.
- [9] M. Krakowski, S.C. Auzanneau, E Berlie. 1 W high brightness index guided tapered laser at 980nm using Al-free active region materials [J]. Electronics Letters. 2003, 39(15): 1122-1123.
- [10] L.BorrueI, I.Esquivias, P.Moreno. et al. Clarinet laser: Semiconductor laser design for high-brightness applications [J]. Appl. Phys. Lett. 2005, 87(10): 101104-1-101104-3.

- [11] W.Kaisera, J.P.Reithmaier, A.Forchel. et al. Theoretical and experimental investigations on temperature induced wavelength shift of tapered laser diodes based on InGaAs/GaAs quantum dots [J]. Appl. Phys. Lett. 2007, 91(5):051126-1-051126-3.  
曲博文。808nm 锥形半导体激光器的设计[C]: [硕士学位论文]。长春: 长春理工大学。2010。
- [12] 郭长志。半导体激光模式理论[C]。人民邮电出版社。1989。
- [13] 魏星。近衍射极限高功率锥形半导体激光器[C]: [硕士学位论文]。长春: 长春理工大学。2006。
- [14] D. Marcuse. Radiation losses of step-tapered channel waveguides [J]. Applied Optics.1980, 19(21): 3676.
- [15] S.Alexander, Logginov, Nikolai N. Numerical simulation of flared planar semiconductor optical amplifier [J]. SPIE. 1998, 3283: 997-1005.
- [16] 王培峰。大功率半导体激光器端面泵浦全固态激光器研究[C]: 博士学位论文。长春: 中科院长春光机所。2011。
- [17] 崔岩。“光电子技术”课程的教学体会[J]. 中国科技信息, 2009,(11)
- [18] 庄述鹿, 孟福坤。长波半导体激光器的工艺与发展[J].激光与红外, 1985,05
- [19] 余佳. 光电子技术——“光谷”的基石[J]. 安徽科技, 2001,(01)
- [20] 曲宙。808nm 高占空比大功率无铝半导体激光线阵特性分析[C]: 硕士论文。郑州: 中国人民解放军信息工程大学。2007。
- [21] 何友军。半导体激光器的热特性及封装技术研究[C]: 硕士论文。上海: 中国科学院研究生院上海微系统与信息技术研究所。2003。
- [22] Zhu Liyan,Fu Xiuhua.The technical development of the 850 nm high-luminance semiconductor laser's film [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology(长春理工大学学报), 2007,30 (1): 18-20 (in Chinese).
- [23] Stephane Marijouis,Stefan Morgott,Alexis Schmitt,et al.Modeling of the performance of high-Brightness tapered lasers [J].Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering.2000,3944:396.
- [24] Luis Borrueal,Ignacio Esquivias,Pablo Moreno.Clarinet laser:semiconductor laser design for high-brightness applications [J]. Applied Physics Letters. 2005,87(10):1-3.

- [25] Liu Yun, Liao Xinsheng, Qin Li, et al. Oxygen-free copper microchannel heat sink of high power semiconductor laser [J]. Chin. J. Lumin. (发光学报), 2005, 26(1): 109-114 (in Chinese).
- [26] S. D. DeMars, K. M. Dzurko, R. J. Lang, et al. Angled grating distributed feedback laser with 1 W single-mode, diffraction limited output at 980 nm [C]. Tech. Dig. CLEO. 1996: 77-78.
- [27] C. Smudzinski, D. Botez, L. J. Mawst, et al. Three-core arrow-type diode laser: novel high-power, single-mode device, and effective master oscillator for flared antiguided MOPA's [J]. IEEE J. Select. Topics Quantum Electron. 1995, 1: 129-137.
- [28] S. O'Brien, D. F. Welch, R. A. Parke, et al. Operating characteristics of a high power monolithically integrated flared amplifier master oscillator power amplifier [J]. IEEE J. Quantum Electron. 1993, 29: 2052-2057.
- [29] L. Goldberg, M. R. Surette, D. Mehuys. Filament formation in a tapered GaAlAs optical amplifier [J]. Appl. Phys. Lett. 1993, 62(2304): 2044-2051.
- [30] YANG Ye, Liu Yun, Qin Li, et al. Electro-optic properties of 850 nm high-brightness tapered lasers [J]. Chin. J. Lumin. (发光学报). 2011, 32(6): 593-597 (in Chinese).
- [31] Ole Bjarlin Jensen, Andreas Klehr, Frank Dittmar, et al. 808 nm tapered diode lasers optimised for high output power and nearly diffraction-limited beam quality in pulse mode operation [J]. SPIE. 2007, 6456: 1-10
- [32] M. Mohrle, H. Roehle, A. Sigmund, et al. High-performance all-active tapered 1550 nm InGaAsP-BH-FP lasers: Indium Phosphide and Related Materials Conference [C]. Berlin: Gmbh, 2002.
- [33] M. Mikulla, A. Schmitt, M. Walther, R. Kiefer, et al. 25-W CW high-brightness tapered semiconductor laser-array [J]. IEEE Photonics Technology Letters. 1999, 11(4): 412-414.
- [34] Gregory C. Dente, et al. Low confinement factors for suppressed filaments in semiconductor lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics. 2001,

37(12):1650-1653.

[35] P.Salet, F.Gerard, T.fillion, A.Pinquier, et al. 1.1-W continuous-wave 1480-nm semiconductor lasers with distributed electrodes for mode shaping. IEEE Photonics Technology Letters.1998, 10 (12): 1706-1708.

[36] Li Jing, Liu Yuanyuan, Ma Xiaoyu. High-brightness tapered diode lasers emitting at 980nm with electrically separated ridge waveguide and tapered section [J].Chinese Journal of Semiconductors.2007, 28 (8): 1302-1306 (in Chinese).

[37] MINORU ITO,TATSUYA KIMURA,et al.Temperature stabilization in semiconductor laser diodes [J].IEEE Journal of Quantum Electronics.1981,17(5):796-798.

[38] 江剑平.半导体激光器 [M].北京：电子工业出版社，2000:84-85.

[39] C.Y.Liu,S.F.Yoon,W.J.Fan,et al.Ridge width effect on the characteristic temperature of GaInAs triple quantum well ridge waveguide lasers:International Quantum Electronics Conference 2005 and the Pacific Rim Conference on lasers and Electro-Optics 2005[C].Japan:2005.

[40] C.Y.Liu,Y.Qu,S.Yuan,S.F.Yoon.optimization of ridge height for the fabrication of high performance InGaAsN ridge waveguide lasers with pulsed anodic oxidation [J].Appl.Phys.Lett.2004,85(20):4594-4596.

## 在学期间学术成果情况

### 发表文章:

1. 黄海华, 刘云, 杨晔等. 850 nm 锥形半导体激光器的温度特性研究[J]. 中国光学

## 指导教师及作者简介

### 指导教师简介

刘云(1960-): 女, 长春人, 副研究员, 硕士生导师。参加省部级课题及国防科研重点工程项目多项, 发表及合作发表学术论文百余篇, 主要研究方向: 大功率半导体激光列阵技术的研究。

### 作者简介

黄海华(1987-): 男, 江西抚州人, 汉族, 2006-2010年就读于燕山大学, 材料物理专业, 获学士学位; 2010年9月攻读长春光机所凝聚态物理专业硕士研究生。主要研究方向: 半导体光电子器件。

Email: [wong2h@163.com](mailto:wong2h@163.com)

## 致 谢

本论文是刘云副研究员的指导下完成的。刘老师严谨求实的学风、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，她对我不倦的教诲、关心与帮助也使我受益终生。刘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刘老师的指导密不可分。在此，对我的恩师刘云副研究员致以衷心的感谢。

在我学习期间，王立军研究员、单肖楠副研究员、宁永强研究员、秦莉研究员、佟存柱研究员、曹军胜副研究员、曾玉刚副研究员、王彪副研究员、付喜宏助理研究员、张金龙助理研究员、张星助理研究员、尹宏贺助理研究员对我的学习和生活给予了大力支持和帮助。特别是王老师，宁老师和秦莉老师，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。

本论文的许多分析和实验，以及测试工作得到了杨晔博士、张志军博士、汪丽杰博士、张俊博士、张建博士、张建伟博士、张祥伟博士、张金胜博士、贾鹏、李秀山等人的通力合作，在此表示感谢。

研究生部蒋大鹏主任、姜磊老师、王静轩老师、方秀军老师、魏洪老师、陈方老师、李海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。