
密级:



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

博士学位论文

光通信用高速半导体激光器的研制及可靠性研究

作者姓名: 薛正群

指导教师: 苏 辉 研究员 中国科学院福建物质结构研究所

学位类别: 理学博士

学科专业: 凝聚态物理

研 究 所: 中国科学院福建物质结构研究所

2017 年 11 月

**Fabrication of InP high speed laser and the study on reliability of the
laser devices**

By

Xue Zhengqun

Dissertation Supervisor: Professor Su Hui

A Dissertation Submitted to

University of Chinese Academy of Sciences

In partial fulfillment of the requirement

For the degree of

Doctor of Philosophy

Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese

Academy of Sciences, P.R.China

November, 2017

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明。

签名：_____ 日期：_____

关于论文使用授权的说明

本人完全了解中国科学院福建物质结构研究所有关保留、使用学位论文的规定，即：中国科学院福建物质结构研究所有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；中国科学院福建物质结构研究所可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

签名：_____ 导师签名：_____ 日期：_____

摘 要

随着信息向高容量方向发展,以及单模光纤技术、半导体科学技术、量子物理等的发展,InP 基边发射半导体激光器成为光通信中的核心信号发射源。随着人们对信息容易日益提高的需求,高速直调半导体激光器成为大容量光纤通信系统中的关键器件,其大量应用在数据中心、手机基站、波分复用等领域。然而目前国内关于高速 InP 激光器可以查询到的研究报道较少,同时缺少产业化的产品;长期以来高速 InP 激光器市场主要被三菱、住友、Macom、Avago、Oclaro 等欧美和日本企业所占有。

本论文从半导体激光器的工作原理和芯片制备工艺出发;着重从影响高速调制半导体激光器性能的关键因素进行分析,并开展不同批次的对比、分析和优化试验;并对器件可靠性进行分析开展加速应力寿命试验。在博士期间取得了如下的成绩和创新成果:

(1) 完成了外延材料的生长优化,实现了 8、10、12 层量子阱外延结构的对比试验,并结合采用 BCB 填充以及倒台脊型波导结构实现了室温和 85℃下直接调制带宽达 10GHz 的半导体激光器芯片。

(2) 采用 AlGaInAs/InGaAsP 混合材料结构,以压应变的 InGaAsP 作为量子阱,以张应变的 AlGaInAs 做为量子垒,来优化量子阱中的导带和价带差,实现量子阱对电子的良好限制并且优化空穴在价带阱中的分布,来降低量子阱中的态密度有效降低阈值、提高微分增益。在试验中我们分别制备了 5 层量子阱和 10 层量子阱的试验片,测试结果显示材料的注入效率偏低,同时材料的内部损耗偏大,因此合理优化材料生长质量是下一步的重点。

(3) 对激光器可靠性进行分析,得到改善器件可靠性降低失效比例的几个主要方法:①改善材料的生长质量,降低材料位错和缺陷;② 避免管芯解离腔面的损伤特别是存在指向脊波导结构的损伤,避免在腔面局部光强过于集中;③避免金直接与 InP 相接触引起金在材料内部的快速迁移,导致失效;④规范芯片制备过程中的静电防护措施;⑤避免在应用中存在器件注入电流、电压、使用环境温度过载等现象。

(4) 对 AlGaInAS 多量子阱 RWG-FP 半导体激光器进行热阻的测量和分析,得到试验器件的热阻为 183K/W。对激光器进行不同的通电电压试验,试验结果表明:

在高温应力作用下，激光器材料内部的波导层、量子阱、量子垒中的 Al、Ga、In 元素原子发生迁移，使得材料的组分发生变化；并使器件的波长发生不可逆的蓝移、光场模式有效折射率增加、器件工作电压增大，高温的过程伴随着器件性能的衰退。这些结果表明在实际应用过程中，当激光器的温度累积超过 200℃时或者存在超过 400mA 左右的电浪涌，即便在较短的时间内也会对器件造成不可逆的损坏作用。试验结果对进一步分析器件在高温下的失效机理以及改善器件的高温性能提供试验基础。

(5) 对激光器芯片进行正装 (LD-B) 和倒装封装 (LD-A)，并对两种不同封装形式的激光器进行光电参数测量和加速老化试验。结果显示：与常规封装器件相比，采用倒装结构器件的饱和电流从 135mA 提高至 155mA，饱和输出功率从 37mW 提高至 42mW，热阻从 194K/W 降低至 131K/W；-1.5V 偏压下，85℃环境温度下，倒装和正装激光器的漏电流分别为 40nA 和 488nA。最后对两种器件在 85℃环境温度、75mA 电流下进行加速老化试验；老化结果显示：采用倒装工艺制备器件经过 3024 小时老化后器件出光功率有所升高，采用正装封装器件经过 2160 小时老化后其出光功率整体出现退化。试验结果表明高温累积是导致半导体激光器出现退化甚至失效的主要原因，倒装工艺有效改善了器件的散热特性，提高了器件的使用寿命。

关键词：光通信，高速 InP 激光器，波长蓝移，可靠性，倒装

Abstract

As the development of information to high capacity, as well as the development of optical fiber, semiconductor science and technology, quantum physics and so on, InP based edge emitting laser has become the key signal transmitter in optical communication. With the increasing demand for information, the high directed modulation laser have becoming the key devices for optical communication system which are widely used in data center, 4G/LTE, WDM etc. For a long time, the market of high speed InP laser is mainly occupied by MITSUBISHI, Sumitomo, Macom, Avago, Oclaro and other foreign enterprises. While the domestic lack of corresponding research reports and without this device.

From the working principle and processing of diode laser, this dissertation focuses on the key factors which affecting the performance of high speed lasers, and different experiments were carried out to compare, analyse, and optimize the performance of laser devices. On the other hand, the reliability of devices was analyzed and accelerated life test of the devices was carried out, and the following achievements and creative results were obtained:

- (1) The epitaxial structure were optimized, and the experiments of 8, 10 and 12 AlGaInAs MQWs epi-wafer experiments were carried out. By using the method of a reverse mesa and the BCB processing, we realized the laser chip with a directed modulation bandwidth above 10G, under the room temperature and 85°C ambient temperature.
- (2) The AlGaInAs/InGaAsP active layers with compressive strain InGaAsP well and tensile strain AlGaInAs barrier are adopted to optimized the conductive band and valance band thus to optimized the electrons and the holes in the quantum wells to reduced the state density in the well which could reduced the threshold and increase differential gain of laser. The two kind epi-wafer with number of 5 and 10 quantum wells were compared, the results show that the injection efficiency of both materials are low and the internal loss of the material are large. Therefore, optimization of material growth is the key point in the next step.
- (3) By analysing the reliability of laser diode, we got the following methods to improve the reliability of the device. ①Improving growth quality and reducing dislocation and defects of the epitaxial materials. ②Avoiding large localization light intensity and

damage on the facet. ③Avoiding Au directly contact with the III-V materials which can cause the metal migrate into material and lead to failure of the device. ④Standard the ESD protection method during the processing of LD device. ⑤Avoiding over stress of injection current, voltage, environmental temperature as the device are under used.

(4) The wavelength/temperature coefficient of AlGaInAs MQWs FP laser devices are measured by analyzing the wavelength changed with ambient temperature at the same heating power. Also, the wavelength of device changed with heating power under RT are measured, and the thermal resistance of device is calculated to be 183K/W. The laser devices were biased under different forward voltage, and the tested results show that under a high temperature stress, the Al, Ga and In atoms in the waveguide, quantum well and barrier layers of epi-wafer migration and the composition of these layers changing. Therefore, the wavelength of the laser shift blue, the n_{eff} of the optical mode increased and the operation voltage of device increased. The performance of devices degraded under the high temperature. These results show that in the actual application, when the temperature of the laser is accumulated over 200 degrees C or an electric surge of more than 400mA, it can cause an irreversible damage to the device, even in a relatively short of time. The results will more provide the foundation for failure mechanism analysis and performances improvement of device under high temperature.

(5) The laser chips were packaged in two kind of p-side up and p-side down, the output parameters of the devices were measured and the aging experiment are carried out. The characteristics of the two kind laser showed: compared to LD-B, the saturated current of LD-A is increased from 135mA to 155mA, the saturated output power is increased from 37mW to 42mW, and the thermal resistance is decreased from 194K/W to 131K/W. The leakage current of LD-A and LD-B under 85°C and -1.5V bias are 40nA and 488nA, respectively. Finally, accelerated aging test were carried out under 75mA and 85°C, the results show that the output power of LD-A devices after a aging time of 3024h is increasing, while the output of LD-B is decreased after a aging time of 2160h. These results indicated that the accumulation of high temperature is the main cause of the degradation or even failure of the semiconductor laser. The p-side down package improve heat dissipation and increased lifetime of the device.

Key words: Optical communication, High speed InP laser, wavelength blue shift, Reliability, p-side down package

目 录

摘 要.....	IV
Abstract.....	VI
目 录.....	VIII
第一章 绪论.....	1
1.1 光通信的发展.....	1
1.2 半导体激光器的发展.....	2
1.3 光通信半导体激光器的应用前景.....	5
1.4 高速半导体激光器的国内外发展现状.....	9
1.5 论文的主要研究内容和结构安排.....	11
1.5.1 研究对象.....	11
1.5.2 论文主要研究内容.....	11
1.5.3 论文章节安排.....	11
第二章 半导体激光器工作原理.....	13
2.1 激光产生的原理.....	14
2.2 法布里-珀罗 (FP) 半导体激光器.....	16
2.3 分布反馈式 (DFB) 半导体激光器.....	20
2.4 激光器强度噪声特性.....	26
2.5 激光器速率方程.....	29
2.5.1 速率方程稳态解.....	31
2.5.2 激光器强度调制.....	32
2.5.3 影响激光器直调的因素.....	34
2.6 小结.....	35
第三章 半导体激光器工艺.....	37
3.1 材料外延生长.....	37
3.1.1 分子束外延.....	37
3.1.2 金属有机化学气相沉积.....	39
3.2 光刻工艺.....	41

3.3 湿法腐蚀和刻蚀工艺.....	45
3.4 薄膜工艺.....	48
3.4.1 PECVD 沉积 SiO ₂ 、SiN _x 工艺.....	49
3.4.2 金属薄膜工艺.....	51
3.5 光学膜系设计.....	53
3.5.1 光学膜系理论基础.....	53
3.5.2 增透膜设计.....	56
3.5.3 高反膜设计.....	61
3.6 常规激光器工艺过程.....	64
3.7 小结.....	65
第四章 高速半导体激光器的研制和分析.....	66
4.1 量子阱材料的选择和制备.....	66
4.2 有源区和波导的优化.....	68
4.3 高速半导体激光器的研制.....	71
4.3.1 材料外延生长.....	71
4.3.2 芯片制备.....	73
4.3.3 芯片的测试.....	75
4.3.4 混合式结构量子阱.....	83
第五章 半导体激光器可靠性和加速寿命试验.....	85
5.1 半导体激光器可靠性表征.....	86
5.2 半导体激光器失效规律分布.....	87
5.3 半导体激光器失效分析.....	88
5.3.1 半导体激光器主要失效原因.....	88
5.3.2 可靠性分析技术.....	92
5.3.3 改善器件可靠性方法.....	92
5.4 加速应力寿命实验.....	93
5.5 热特性对半导体激光器性能的影响.....	97
5.5.1 半导体激光器热阻测试.....	97
5.5.2 器件高温下的波长蓝移及其分析.....	99

5.6 倒装封装对半导体激光器性能改善的分析.....	101
5.7 加速寿命试验结果分析.....	104
5.8 小结.....	108
第六章 结论与展望.....	110
参考文献.....	112
致 谢.....	119
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果.....	120

第一章 绪论

1.1 光通信的发展

早在古代人们就开始使用和利用光，如蜡烛、燃烧的物体、太阳光等被用来照明，这主要是利用人眼对光的感知，从而通过光来识别周边的环境，这其实也类似于以光作为“信息传递”的一种方式。然而要以光来作为通信，则更多地被赋予了传输声音、图形、数字信息、视频信息等，这是常规方式所无法实现；光在自由空间由于空气的损耗和自身光束的发散，无法传输更远；同时也无法加载信息。1880年，贝尔实现以光作为载体携带声音信号传输，这也证实了光可以传输和传递信息，但由于上述的各方面因素使得应用无法实现。1960年，梅曼实现了红宝石激光器的工作，激光具有良好的方向性、发散角度相对较低、光斑能量相对集中等，这几个优点正是使得光能够进一步提高输出距离，实现以光为载体通信的一个基本条件。

1962年美国通用电气公司的 Hall 采用两个镜面构成谐振腔成功实现了 GaAs 同质材料 PN 结的激光输出^[1]，这是早期的半导体激光器，GaAs 半导体激光器的实现，使得激光的波段更进一步的得到拓展，典型的 GaAs 基材料激光器其波段覆盖：从红光到 1 μm 的波长；同时其波长可调，这种光源对于光通信的应用更具实用化。

1966年英国标准电信实验室的华裔科学家高锟和 Hockham 首次从理论上指出了利用低损耗的光纤可以作为光传输的波导，并能长距离地传输光信号，这使得光纤通信进入应用化成为可能^[2]；因此有针对性地降低光信号在光纤里的损耗是实现光信号长距离传输的前提，当时做的最成功的是美国康宁玻璃公司，1970年，该公司成功地实现了用于通信用途的低损耗石英光纤（其损耗在 20dB/km 左右）^[3]；于此同时国内也在开展低损耗光纤的研究，其中典型的如长飞光纤，技术工艺的改进使得单模石英光纤的质量得到优化。低损耗的光纤除了在 850nm 波长（GaAs）附近有低的损耗，在 1310nm、1550nm 波段有更低的损耗；而 InP 基半导体激光器（其波段覆盖 1260-1625nm 波长）的实现，更加推进了光纤通信的应用化。

目前在商业化应用上的光纤，其单模光纤的损耗在 1310nm 波长处低于 0.32dB/km；在 1550nm 处具有最低的光损耗，其损耗低于 0.2dB/km。同时在

1304-1324nm 波长附近可以达到零色散，为最低色散；在 1550nm 色散 $\leq 18\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ ；低损耗光纤的商业化量产和成本的不断降低极大程度地推动了光纤通信的发展。

1977 年，AT&T 在芝加哥等地安装了光电话网络，这些成功的应用促进了光纤光学电话系统的发展，到了 1980 年代，1310nm、1550nm 成为了单模光纤电话系统的标准光源。1990nm，bell 实验室成功实现了传输速率达 2.5Gb/s 的 7500 公里传输；光通信的发展和商业化应用其主要得益于低损耗光传输波导：光纤，以及光源：半导体激光器的发展-光通信中信号发射的主要光源。如今光通信在人们的生活中有着越来越多的应用，如：光纤入户，可是实现电视电话网络的信号传输采用单根光纤就可以实现；数据中心；波分复用等领域。

1.2 半导体激光器的发展

上个世纪六十年代梅曼发明激光器之后，当时人们就有想法：是否可以采用半导体增益材料作为激光的工作介质；1962 年，Rediker 等人采用掺杂 Zn 的方法来实现 III-V 族材料 P-GaAs，制备 GaAs PN 结，在低温环境温度下结果显示 GaAs 发光二极管有较高的出光效率，即有较好的量子效率^[5]。试验结果也表面了 GaAs 材料具有良好的光增益，可能可以作为激光工作的增益介质。而 Bernard 等也指出了激光器要工作的条件：即通常说所的粒子数分布反转，电子和空穴的费米能级差要足够大。

基于如上的研究结果和基础，1962 年，Hall 等人成功实现了 GaAs 同质二极管的激光辐射，在液氮氛围下采用脉冲测试，激射波长为 840nm，这就是最早发明的半导体激光器^[6]。在同一年，Quist 等人也实现了 GaAs 材料系的激光辐射^[7]；此后，Holonyak 等人也实现了 GaAsP 红光激光二极管。此时，与激光器相关的一些材料制备、芯片设计和工艺、器件不同温度下的光电性能参数等研究结果也陆续地报道和发表。早期的激光器属于半导体激光器发展中最早的一个阶段：同质结半导体激光器，由于相同的材料系很难实现对载流子的限制，导致载流子利用率低；此外这类激光器由于材料间无法形成较大的折射率差，因此也无法实现对光场的有效限制；这类激光器的缺点是：激光器阈值很高，通常在 $1\times 10^5\text{A}/\text{cm}^2$ 量级，要实现激光器工作通常需要在很大的注入电流下工作，大的工作电流使得器件只适合在低温的氛围下工作，这严重限制了器件的实用和器件的可靠性问题。

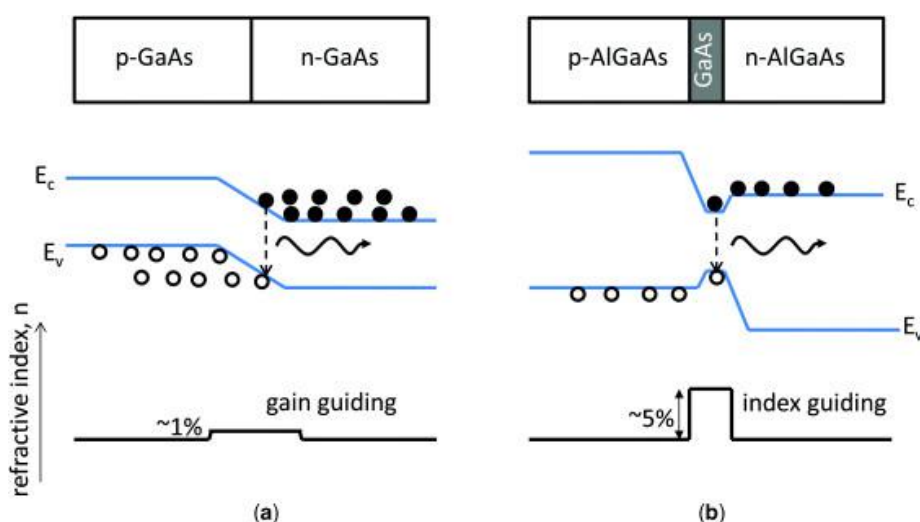
1963 年 Kroemer 和前苏联科学家 Alferov 提出了异质结的概念:即采用不同半导体材料组成 PN 结的方法,如果一种禁带宽度较小的半导体材料上下分别对应着禁带宽度大的材料,使得能带不连续形成一个落差,其形成一个类似阱的结构,这种结构与同质结相比,有效地提高了载流子的限制能力从而提高了载流子的注入效率;此外不同材料形成折射率差,增加光场的限制,进一步降低阈值。1967 年,IBM 公司 Woodall 成功实现了在 GaAs 衬底上通过 LPE 技术生长 AlGaAs^[8];此后 Bell 实验室的 Panish 成功实现了 AlGaAs/GaAs 单异质结半导体激光器^[9],其室温阈值电流密度接近 $8 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$;此外, Rupperecht 等人也实现了类似的 AlGaAs 异质结半导体激光器^[8]。此时半导体激光器的发展进入了一个新的阶段:异质结激光器。采用不同材料形成的异质结构能形成导带和价带的能带差,从而实现载流子和空穴的限制,有效提高了其注入的效率;与同质结构半导体激光器相比,异质结半导体激光器有效地降低了器件工作的阈值,提高输出光功率,提高了器件的工作温度。

此后,异质结半导体激光器制造工艺和不断的改进和优化,1970 年,Alferov 实现了 AlGaAs 双异质结半导体激光器,器件在室温下连续通电工作,并且其具有更低的阈值电流^[10]。同年, Hayashi 等也实现了室温下激射的双异质结半导体激光器^[11],其在室温下阈值电流密度在 $2 \times 10^2 \text{ A/cm}^2$ 左右,这与单异质结半导体激光器相比其阈值电流密度又有了很大程度的降低。

双异质结结构使得半导体激光器的性能得到了大幅的提升,其采用禁带宽度差对载流子进行限制产生了高的增益;同时采用折射率差对光子进行限制,降低了损耗,提高了辐射复合效率。此后对双异质结半导体激光器开展了大量的研究和优化工作。随着低损耗光纤技术的发展,人们开始更加关注光损耗更低的 1310nm 和 1550nm 波段,而以 InP 为基底的 InGaAsP 四元材料系可以实现波长覆盖 1310 和 1550。1977 年,林肯实验室成功实现了激射波长 1310nm 的 InP 基异质结半导体激光器,此后又陆续实现了 1550nm 波段的激射。1977 年, AlGaAs 双异质结半导体激光器的使用寿命已经达到 2 万小时左右^[12];同年半导体激光器应用在光纤电话网络中,商业化的应用使得半导体光电子相关的科学领域,如材料生长科学、微纳器件加工工艺、可靠性稳定性科学等研究不断的发展,同时器件整体的性能参数进一步的提升,其主要有如下几个方面:(1)为了进一步降低阈值,先后研

究出了横向增益和折射率波导，其中折射率波导至今仍然是常用的一种激光器波导结构；（2）连续工作、无控温下输出功率不断增加；（3）随着 GaN、GaAs、InP 材料系激光器的发展，其波长也覆盖了从可见光到近红外，应用范围也覆盖了：数据存储、数据中心、光通信、泵浦、工业加工等领域。

到了上世纪 80 年代，由于量子力学发展的应用以及半导体材料新外延生长工艺的发展，如：金属有机化学气相沉积（MOCVD）、分子束外延（MBE）等工艺技术，使得半导体材料生长的精度和厚度更加可控，出现了厚度在 nm 量级的应变多量子阱结构；量子阱结构其实是结构更加精细的异质结结构。量子阱结构的应用，使得半导体激光器总体性能得到了提高，量子阱材料组分的精确控制，使得其更易俘获载流子和空穴，从而降低了器件的阈值，提高了输出功率；而通过对波导结构和量子阱区域进一步控制可以控制光场分布和器件远场特性；此外载流子和光子的集中能有效降低电子和光子相互作用时间，提高弛豫频率，提高器件的调制速率。此外，应变多量子阱结构能进一步对空穴子能带进行调整，使得激光器性能得到了进一步的提高。图 1.1 为半导体激光器不同发展时期的结构图如：同质结激光器、异质结激光器、量子阱激光器。图 1.2 为随着技术的进步，激光器阈值电流密度逐步降低，器件输出功率逐步提高，材料损耗降低，注入效率增大；其最主要的关键点在于异质结、量子阱、量子点等结构的出现。



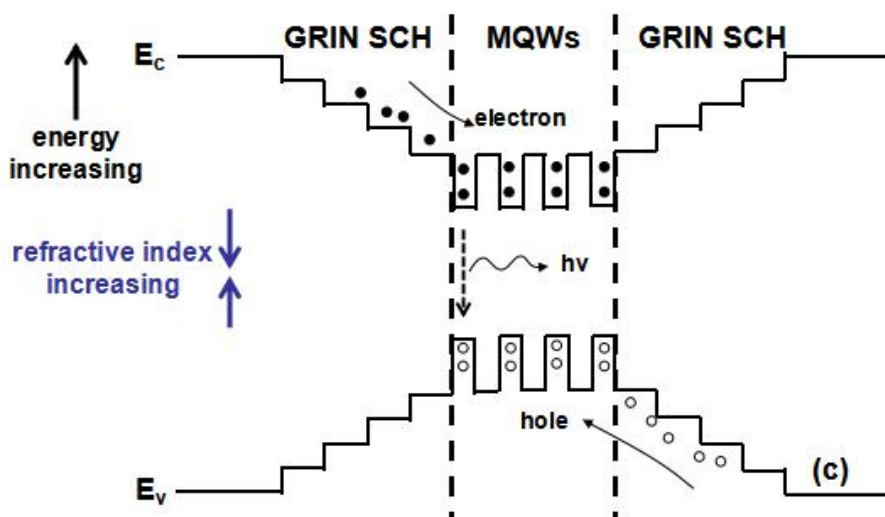


图 1.1 (a)同质结(b)异质结和(c)多量子阱半导体激光器结构对比

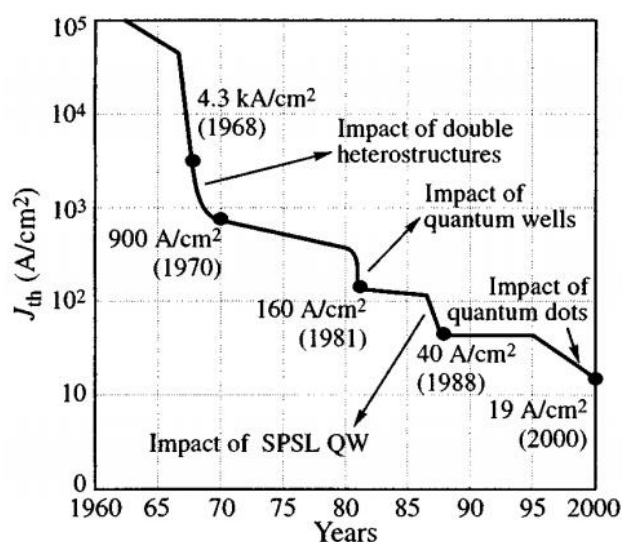


图 1.2 半导体激光器阈值电流随着时间技术发展的变化

1.3 光通信半导体激光器的应用前景

通常我们具体讲到半导体激光器往往与其分类或应用有关；激光器的分类往往与这些因素相关：材料体系、工作的波长、具体的应用领域、谐振腔或波导的结构等。半导体激光器有许多分类方法；按发光波长分类，可以分为：紫外和蓝绿 GaN 基激光器（400~490nm）；红光波段 AlGaAs 半导体激光器（720~760nm），AlGaInP 激光器（630~680nm），近红外波段 GaAs 基半导体激光器（808、980nm），光通信波段 InP 基半导体激光器 1260-1675nm。

按照谐振腔分类，激光器可以分为：法布里-珀罗（Fabry-Perot, FP）半导体激光器，分布反馈式（Distributed feedback, DFB）半导体激光器，分布布拉格反射

(Distributed Bragg reflector, DBR) 半导体激光器, 垂直腔面发射 (Vertical Cavity Surface Emitting, VCSEL) 半导体激光器, 外腔 (External Cavity, EC) 半导体激光器。半导体激光器按照载流子限制和光子限制结构又可以分为: 脊型波导结构 (Ridge waveguide, RWG), 掩埋异质结结构 (Buried heterostructure, BH)。不同种类或结构半导体激光器其应用领域各不相同, 下面我们着重讨论光通信用 InP 基半导体激光器及其应用的前景。

如表 1.1 所示为光通信的不同波段表, 其不同波段也代表了不同的发展时期, 波长覆盖从 1260nm-1675nm。

表 1.1 光通信不同波段表

频带	备注	波长(nm)
O 带	Original 原始波段	1260-1360
E 带	Extended 扩展波段	1360-1460
S 带	Short Wavelengths 短波长波段	1460-1530
C 带	Conventional 常规波段	1530-1565
L 带	Long Wavelengths 长波长波段	1565-1625
U 带	Ultralong Wavelengths 超长波长波段	1625-1675

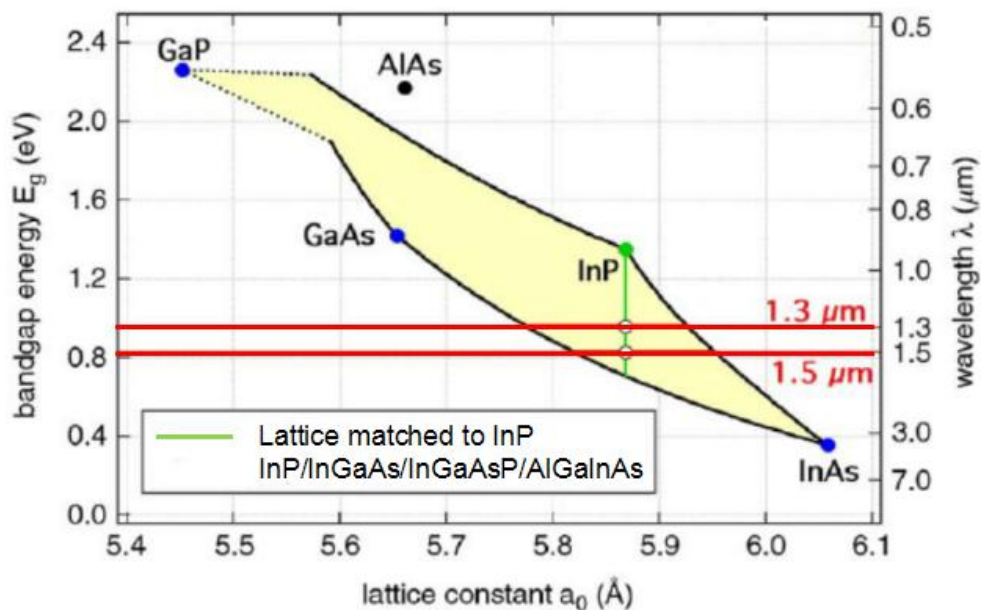


图 1.3 不同材料的晶格常数、发光波长和禁带宽度的关系

如图 1.3 所示为 InP 基半导体激光器的材料系，为了实现与 InP 基底材料的晶格匹配并实现激射波长在光通信波段。InP 材料与 InAs、GaAs、GaP、AlAs 材料相互组合可以实现晶格匹配的外延材料。不同组合材料的能带宽度和晶格常数近似遵守 Vegard's law。对于四元材料系 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ ，材料的晶格常数及其禁带宽度满足如下关系式，从式中可知，通过调整不同材料配比的组分，可以调整组合材料的晶格和禁带，进而达到调整发光波长的作用。

$$\begin{aligned} E_g(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}) = & xyE_g(\text{InAs}) + x(1-y)E_g(\text{InP}) + (1-x)yE_g(\text{GaAs}) \\ & + (1-x)(1-y)E_g(\text{GaP}) + \delta_{E_g} \end{aligned} \quad (1.1)$$

$$\begin{aligned} a(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}) = & xya(\text{InAs}) + x(1-y)a(\text{InP}) + (1-x)ya(\text{GaAs}) \\ & + (1-x)(1-y)a(\text{GaP}) + \delta_a \end{aligned} \quad (1.2)$$

$$\lambda = 1.24 / E_g \quad (1.3)$$

半导体激光器是光通信中光信号的发射器件，它们是光网络的基本核心部件。它们具有尺寸小、可直接高速调制、可大量生产、高集成度等特点，使其成为光通信中的理想和唯一的选择，被广泛使用，应用前景广阔。近年来，全球光通信产业正在飞速发展，大量铺设和升级光网络；目前国家也力推三网融合战略工程，使得网络、有线电视、电话网加快融合，从而降低资费标准，使得人们获取信息的渠道更加丰富，同时通过光纤入户的方式来实现三网融合在普通家庭的应用。十三五期间国家继续加大对光通信市场的扶持力度；三大营运商：电信、联通、移动也将在十三五期间继续加大通信基础设施的建设，持续促进宽带容量提速、费用降低，三大营运商在有线、无线业务方面的投资计划超过千亿；国内光通信的强劲需求也将推进“宽带中国”、“智慧城市”的加快建设；普遍提高国内有线无线的数据传输速率，同时对于国内的光通信有源厂商和无源厂商都是自身发展的一个良好机会。

如下图为光通信用激光器的一些主要应用领域：如有线电视、光纤到楼/户、4G 手机基站、数据中心、波分复用以及一些军事应用领域。

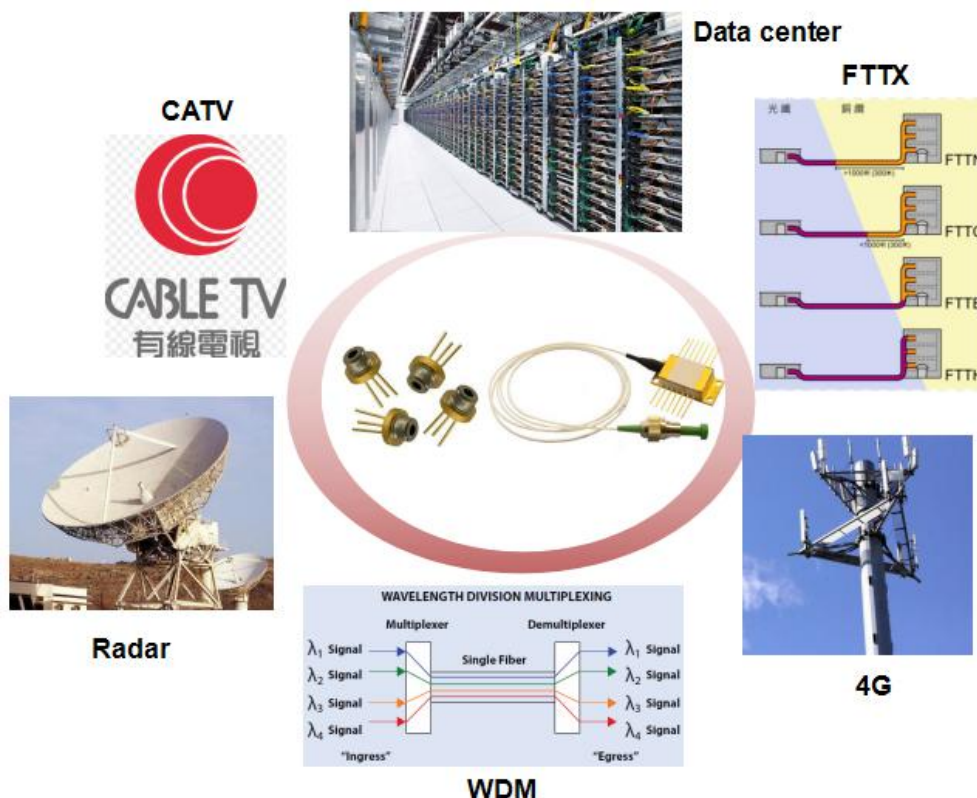


图 1.4 光通信用半导体激光器的一些典型应用领域

目前在应用的光通信系统中单通道速率可达 10Gb/s，其中 DFB 由于其光谱线宽窄，受到色散而引起的光谱展宽小，特别适应用在高速调制上；同时在光通信上又由于具有两个最低窗口：色散最低窗口 1310nm，损耗最低窗口 1550nm，因此高速调制的 1310nm DFB 和 1550nm DFB 是光通信中的重要器件。但是直接调制往往会产生频率啁啾限制了调制速率和传输距离；目前正在研究并已经商业化在应用的电吸收调制激光器 EML，可以实现调制速率达到 40GHz。同时为了充分利用光纤的带宽（200THz）提高信息容量，出现了波分复用（WDM）、时分复用（TDM）等技术；其中在波分复用领域，对激光器要求其激射波长稳定性能好，同时波长可以精细调整，这些应用领域有促进了可调谐半导体激光器的产生和应用。目前已经商业化应用的可调谐激光器可以达到几十 nm 量级波长可调的范围。同时为了在单芯片上进一步扩充信息容量，出现了高速率多波长集成芯片，如 10×10Gb/s、4×25Gb/s 的 100G 芯片；以及应用于其他领域的低噪声、窄线宽等半导体激光器。

早期将半导体激光器应用在有线电视领域的是美国 Ortel 公司，在有线电视领

域通常采用高线性度 DFB 激光器，高线性度激光器出光功率线性好、出光功率高，调制噪声低，适合用在有线电视领域。

宽工作温度范围、高直调速率、窄线宽 DFB 激光器是光纤入户网的关键器件之一。由于光接入网 EPON/GPON 是无源网络，其激光器与探测器为了降低能耗和成本采取无温控的做法。国际标准为了适应不同地域，要求激光器和探测器在-40 到 85℃下都要能无控温地工作。半导体激光器发展要求往：低能耗、低成本、高速率、高输出功率等方向发展；于此同时，Si 基光子集成技术也将是下一个的重要研究方向，如 Avago、Binoptics、三菱等公司也开展了相关的研究。

总体来看，光通信用半导体激光器从发明问世到商业化应用的快速发展，也是伴随着量子力学、半导体技术、材料生长技术、光电子技术等的发展而发展，半导体激光器从材料到芯片到封装再到系统使用也包含了上述相关领域的学科知识及其应用。此外，半导体激光器本身也在随着社会需求而不断创新和发展，如：扩展新的应用需求，进一步优化器件性能参数：如更低阈值、更高效率、更加稳定的可靠性等。

1.4 高速半导体激光器的国内外发展现状

半导体激光器经过了多年的发展，已经成熟地应用在光纤通信等相关系统领域，但与国外相比国内光通信的起步和累积还与之有相当的一段差距；与光通信发达的国家和地区如：美国、日本、欧洲等相比，中国光通信市场的半导体激光器还处于低端水平；这些国家在半导体激光器上有着多年的理论研究结果、以及完善的器件工艺和技术解决方案，其在该领域拥有明显的核心技术优势。特别是三菱、EMCORE、Cyoptics(已被 AVAGO 收购)、Binoptics（已被 MACOM 收购）、Oclaro、JDSU、Finisar 等公司拥有领先的激光器制备技术，同时在高端和高性能半导体激光器方面长期垄断着国内的产品供应。

在高性能激光器领域，如：高速直调激光器、电吸收调制激光器、窄线宽激光器等器件方面；器件的技术和市场长期被国外垄断。因此，研发和实现在高端光芯片上具有自主核心的技术是改变现阶段局面的关键因素。

随着通信技术的进一步发展，对高速率、大容量的要求越来越显著；高速直调半导体激光器是第五代移动网络(5G)、数据中心、DWDM、CWDM、LAN WDM 中重要的信号传输光源。目前国内在光通信 InP 基高速调制激光器方面可以公开查

询到的相关科研报道较少：河北工业大学韩威、孟桂超等通过理论和试验对外延的有源区进行设计和优化，并对波导结构进行计算和优化。并优化材料生长工艺参数，实现了 1.55 微米波长高速激光器，阈值电流 12mA，-3dB 带宽 8.5GHz^[13,14]。武汉光迅科技王定理等采用倒台脊型结构来制备 InP/AlGaInAs RWG 半导体激光器，并通过填充聚合物的形式来降低器件的寄生电容，测试结果显示：250 微米腔长芯片室温和 80℃ 下的频率响应带宽分别为：11GHz 和 9.2GHz^[15]。此外，国内在高速激光器领域更多的为激光器高速封装的设计^[16,17]。

国外在制备高速激光器的研究方面已经有较长的研究时间和经验，Lipsanen 等采用 InGaAsP 多量子井，并采用 Fe: InP 来制备半绝缘结构 BH 激光器，器件测试结果表面在 90mA 电流下，其直调带宽达到 20G 左右^[18]。Gutierrez 等采用 5 层 InGaAsP 量子井制备 RWG 结构 1.55 微米激光芯片，室温，在 200mA 注入电流下，其-3dB 带宽在 20G 左右^[19]。Furtado 等也相应地采用 10 层 InGaAs 量子井制备 Fe: InP BH 结构激光器芯片，测试结果显示腔长 200 微米时，在 90mA 注入电流下其频率响应带宽 20G 左右^[20]。Hideki 等采用常规脊型结构制备 InP/AlGaInAs 激光器芯片，采用 BCB 填充来降低寄生电容，测试结果显示：室温下芯片的直调带宽可以达到 26G，85 摄氏度下其直调带宽达到 14G^[21]。此外，国外的 AOI、Macom、住友、三菱等公司已经实现了直接调制 10G、25G 芯片的量产。因此实现具有自主技术的高速直调激光器芯片对于国内光通信的进一步发展具有重要的意义。

高速半导体激光器制备的难点在于激光器在设计和制备过程中要综合平衡如下的多方面因素：（1）量子阱数目：有源区量子阱数目过多则会导致大电流下载流子在阱内分布不均、注入效率低；量子阱数目过少，会导致增益过低。（2）掺杂浓度：掺杂浓度过大会导致光损耗偏大，而掺杂过小会使得载流子的限制和欧姆接触的性能变差。（3）脊型结构的影响：过大的有源区体积，提高增益饱和，但是容易出现高阶的横向模式，并使得发散角增大；过小的有源区体积容易导致增益不够，出现增益饱和。（4）器件 RCL 参数的平衡。

此外，半导体激光器从研究到投入使用可靠性是最为重要的指标，在实际的实用过程中往往导致激光器失效的主要因素为有源区累积了大量的热导致材料发生不可逆的衰退；因此，分析激光器在高温下的参数变化和退化情况对于改善激

光器的可靠性具有重要意义，论文最后采用倒装封装形式来改善激光器的热特性，使得激光器的输出参数和寿命都得到了进一步的改善。

1.5 论文的主要研究内容和结构安排

1.5.1 研究对象

1310nm 高速直调半导体激光器的研制，主要包括材料的选择、设计和外延生长，芯片工艺的制备，芯片光电参数的测量和分析，以及下一步优化等。接着对激光器激光器的热特性进行分析，进一步采用倒装工艺制备激光器，并对正装和倒装器件的光电特性和寿命进行测量和对比。

1.5.2 论文主要研究内容

论文的主要研究内容可以分为如下几个方面：

(1) 半导体激光器的工作原理，噪声特性，载流子和光子相互作用特性。半导体激光器工艺，主要包括外延材料、光栅工艺、光刻工艺、薄膜工艺、刻蚀腐蚀工艺等。

(2) 高速半导体激光器的研制：量子阱材料的选择和设计、芯片工艺的制备和优化，芯片的测试及其结果的分析 and 进一步的优化。

(3) 分析热特性对激光器的影响，分析激光器在不同热环境下其光电参数的变化及其物理机理。

(4) 分析倒装特性对半导体激光器性能的影响，并对比与常规封装的差异；分析和对比二者加速寿命试验结果。

1.5.3 论文章节安排

论文分为六章，如下：

第一章 绪论，介绍了光通信半导体激光器发展历程和应用前景，及其国内现状和面临的问题，以及研制高速半导体激光器并研究和改善半导体激光器可靠性的目的和意义。

第二章，介绍激光器工作原理，分析激光器的强度噪声特性及其稳态动态特性，对影响器件调制速率的特性进行分析。

第三章，分析 InP 边发射激光器的主要工艺，包括：材料生长、薄膜工艺、光刻工艺、湿法干法工艺等。

第四章，1310nm 直调半导体激光器的研制，通过工艺的优化和对比实现了室温 and 高温直接调制带宽 10GHz 的半导体激光器芯片。

第五章，激光器可靠性研究，分析影响器件可靠性的几个主要因素，包括芯片工艺过程产生的缺陷、过载等，包括 ESD 和 EOS；分析了不同应力下的加速寿命试验计算模型。对激光器的热特性进行分析，并分析激光器在高温下的退化；采用倒装的工艺，并和常规封装器件相对比，来验证倒装工艺对器件整体性能和可靠性的改善作用。

第六章，结论和展望，论文总体工作的总结和下一步工作的计划。

第二章 半导体激光器工作原理

1905 年，为了解释光电效应，爱因斯坦进一步提出了光子假说：常规的光在传播时具有波动的特性，光还具有粒子性，即其具有波粒二象性。光子的能量和动量可以表示为： $E = h\nu$ ， $P = h\nu/c$ ，其中 h 为普朗克常量， ν 为频率， c 为光速，其能量和动量是与其频率相关的物理量。

早期的光电效应发现了金属对入射其表面的光产生吸收形成光电流。对于半导体材料来说，其由原子组成，核外电子按照一定的轨道绕原子核运动，其具有不连续、分立的能量值，这些能量为电子的不同能级。当光入射时与金属中的电子相互作用，电子吸收光子能量后逃离原子核束缚形成自由电子。

在热平衡下，其电子占据 E 能级概率为：

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_f}{kT}\right)} \quad (2.1)$$

$f(E)$ 为费米分布函数， k 为玻尔兹曼常量， T 为开尔文温标， E_f 为费米能级。根据上式我们可以知道当 $E = E_f$ 时， $f(E) = 1/2$ ，说明费米能力为被电子占据概率为 50% 的能级。 $E < E_f$ 时， $f(E) > 1/2$ ； $E > E_f$ 时， $f(E) < 1/2$ 。

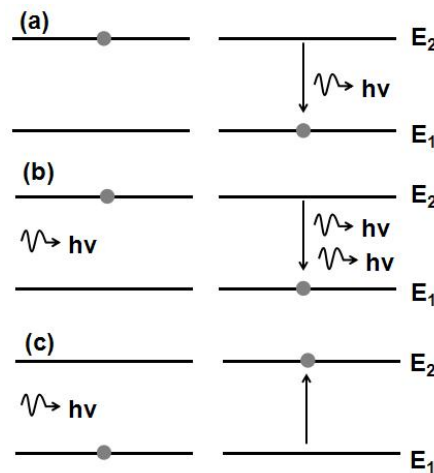


图 2.1 光与物质间相互作用三种形式 (a) 自发辐射 (b) 受激辐射 (c) 受激吸收

光子与物质的相互作用，其是光子原子核外电子的相互作用；光入射到材料时，如图 2.1 所示，光与材料相互作用产生如下几种物理现象：自发辐射、受激辐

射、受激吸收。(1) 自发辐射, 如图 2.1 (a) 所示, E_1 和 E_2 为原子的两个能级状态, E_1 为低能级态, E_2 为高能级态; 通常处在高能级的电子不易稳定, 容易自发地从高能级跃迁到低能级, 并发射出具有能级差的光子。自发辐射发生在不同的能级间, 这种叠加形成了一个宽的光谱。自发辐射源由于其宽发散的光源, 辐射谱宽宽, 因此在今天我们日常生活中的照明类光源其多数为自发辐射光源, 典型如: 白炽灯、霓虹灯、LED 灯等。

(2) 受激辐射, 如图 2.1 (b) 所示, 入射光子激发处于高能级的电子使其跃迁到低能级, 并伴随着生成一个物理状态与入射光子一致的光子, 受激辐射是个光放大。

(3) 受激吸收, 如图 2.1 (c) 所示, 入射光子的能量被电子吸收引起电子向高能级跃迁的过程。利用这种现象可以形成常规的应用, 如: 探测器, 吸收光后形成电流, 通过偏压检测光电流, 分析入射光强度噪声等特性。

2.1 激光产生的原理

激光的产生其一方面是利用了受激辐射的原理, 对于半导体材料由于掺杂、材料缺陷等因素, 光在材料内部传播是逐步损耗的一个过程, 因此要使得受激辐射产生光输出, 则光在传播过程中至少要抵消光在传输过程中而引起的损耗。

假设, 材料中低能级上的电子密度为 N_1 , 高能级上的电子密度为 N_2 ; 通常地在热平衡的条件下, $N_1 > N_2$, 载流子主要是从低能级跃迁到高能级, 此时材料无增益作用。要使得材料对光具有增益的作用, 则从高能级跃迁到低能级的概率相对要大, 即此时 $N_1 < N_2$, 即载流子反转分布。

通常地激光工作必须满足如下的几个基本条件: (1) 增益介质: 在某种条件下可以实现高能态粒子数多于低能态粒子数; 典型如量子阱结构; (2) 激励源: 使材料产生增益的条件, 材料在激励源作用下, 粒子迅速填充到高能级, 使得高能级粒子数大于低能级粒子数; 光在这类物质中传输时其具有放大的作用; 半导体激光器通过注入电流到阈值(透明)以上时, 其具有对光的增益放大作用; (3) 谐振腔: 如果光只是在材料内部纯粹放大而无反馈的话, 则输出光为宽光谱的相干光, 这种光具有其特定的应用领域, 然而对于激光, 其要求工作在某些特定的波长, 谐振腔便具备这一功能, 其具有对光进行反馈的作用, 激光器的两个腔

面对应着一定的纵模。

(1) 受激发射速率

$$r_{21}(st) = B_{21}n_2p_1n_{ph}(E_{21})$$

半导体材料受激发射速率一般满足如上关系式, B_{21} 为单位时间从 E_2 到 E_1 的受激辐射跃迁几率, n_2 为 E_2 能态的电子浓度, p_1 为 E_1 能态的空穴浓度, $n_{ph}(E_{21})$ 为光子密度, E_1 和 E_2 分别可表示为价带和导带。

$$p_1 = \rho_v(E_1)(1 - f_1)$$

$$n_2 = \rho_c(E_2)f_2$$

其中 $\rho_v(E_1)$ 和 $\rho_c(E_2)$ 分别为能量 E_1 和 E_2 的态密度, f_1 和 f_2 分别为电子占据能量 E_1

和 E_2 的概率, $f_1 = \frac{1}{1 + \exp[(E_1 - E_{fv})/kT]}$, $f_2 = \frac{1}{1 + \exp[(E_2 - E_{fc})/kT]}$ 。则受激发

射速率可表示为:

$$r_{21}(st) = B_{21}n_{ph}(E_{21})\rho_c(E_2)\rho_v(E_1)f_2(1 - f_1) \quad (2.2)$$

(2) 受激吸收速率

$$r_{12}(abs) = B_{12}p_2n_1n_{ph}(E_{21})$$

其中 B_{12} 为单位时间内电子从 E_1 跃迁到 E_2 的几率, n_1 为 E_1 能态的电子浓度, p_2 为 E_2 能态的空穴浓度。

$$p_2 = \rho_c(E_2)(1 - f_2)$$

$$n_1 = \rho_v(E_1)f_1$$

受激吸收速率为:

$$r_{12}(abs) = B_{12}n_{ph}(E_{21})\rho_c(E_2)\rho_v(E_1)f_1(1 - f_2) \quad (2.3)$$

(3) 自发发射速率

$$r_{21}(sp) = A_{21}n_2p_1 = A_{21}\rho_c(E_2)\rho_v(E_1)f_2(1 - f_1) \quad (2.4)$$

其中 A_{21} 为单位时间内电子从 E_2 自发辐射跃迁到 E_1 的几率。自发辐射光对相干光无贡献, 因此要满足受激辐射, 则必须满足净受激发射速率大于等于零。即:

$$r_{21}^{net}(st) = r_{21}(st) - r_{12}(abs)$$

$$r_{21}^{net}(st) = B n_{ph}(E_{21}) \rho_c(E_2) \rho_v(E_1) (f_2 - f_1)$$

即要求 $f_2 - f_1 > 0$ ，得到

$$E_{fc} - E_{fv} > E_2 - E_1 = E_{21} \quad (2.5)$$

此为粒子数分布反转的条件，即导带能级上被电子占据的几率大于价带能级上被电子占据的几率，称为 Bernard-duraffonrg relation。

光 I 在腔内沿纵向传播时，其单位距离强度的增加为材料的增益 g。

$$\frac{dI}{dz} = gI$$

$$I = \nu E_{21} n_{ph}(E_{21})$$

$$\frac{dI}{dt} = \nu E_{21} \frac{dn_{ph}(E_{21})}{dt}$$

ν 为群速， dn_{ph}/dt 为单位时间内光子数的变化，即净受激发射速率。则增益系数为：

$$g = \frac{n_r}{c} \frac{r_{21}^{net}(st)}{n_{ph}(E_{21})} = \frac{n_r}{c} B \rho_c(E_2) \rho_v(E_1) (f_2 - f_1) \quad (2.6)$$

上式表明材料中的光增益系数与净受激发射速率成正比。

2.2 法布里-珀罗（FP）半导体激光器

假设光子以如下的平面波在腔内传播

$$E(z) = E_0 \exp(-ikz)$$

$$\tilde{k} = \tilde{n} k_0$$

$$\tilde{n} = n - in'$$

其中材料复折射率为 $\tilde{n}$ ，复折射率实部为折射率，虚部为损耗， k_0 为真空中波数，令 $n' = \alpha \lambda_0 / 4\pi$ ， $\alpha = -g + \alpha_i$ 为损耗系数， α_i 为材料内部损耗。要使得激光器激射，则激光在腔内来回往返一周应满足其光强不低于起始位置的光强，即材料对光产生的增益等于光在材料中传输而引起的损耗，如下图所示，则有：

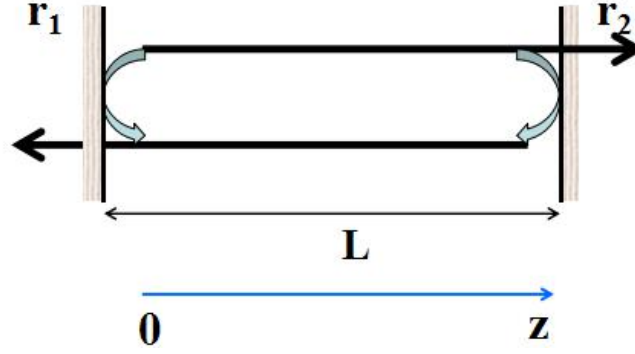


图 2.2 激光腔内谐振示意图

$$r_1 r_2 E_0 \exp(-ik2L) = E_0$$

$$r_1 r_2 \exp(-i \frac{4\pi n}{\lambda_0} L) \exp[(g - \alpha_i)L] = 1$$

此时我们得到：

$$r_1 r_2 \exp[(g - \alpha_i)L] = 1 \quad (2.7)$$

$$\exp(-i \frac{4\pi n}{\lambda_0} L) = 1 \quad (2.8)$$

根据反射系数与反射率的平方关系，我们得到阈值增益满足：

$$g_{th} = \alpha_i + \frac{\ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right)}{2L} \quad (2.9)$$

即材料产生的增益要抵扣掉材料的内部损耗和腔面损耗才能维持激光器稳定的工作。

典型的 FP 和 DFB 半导体激光器，其腔面和光栅是对器件的光产生谐振反馈的主要结构。如图 2.3 所示，载流子通过脊型波导结构注入到波导和量子阱，并被束缚在量子阱中，但注入的载流子使得光在纵向传播时产生的增益能够抵消总体损耗时，则形成纵向稳定振荡的激光器。

如图 2.4 所示，典型外延结构，主要包括波导和量子阱结构。能带结构和折射率一般呈梯度或线性变化渐变，靠近有源区其材料禁带宽度变小，这种能带结构对载流子起到良好的限制作用，提高内量子效率；同时靠近有源区其材料的折射

率增大。

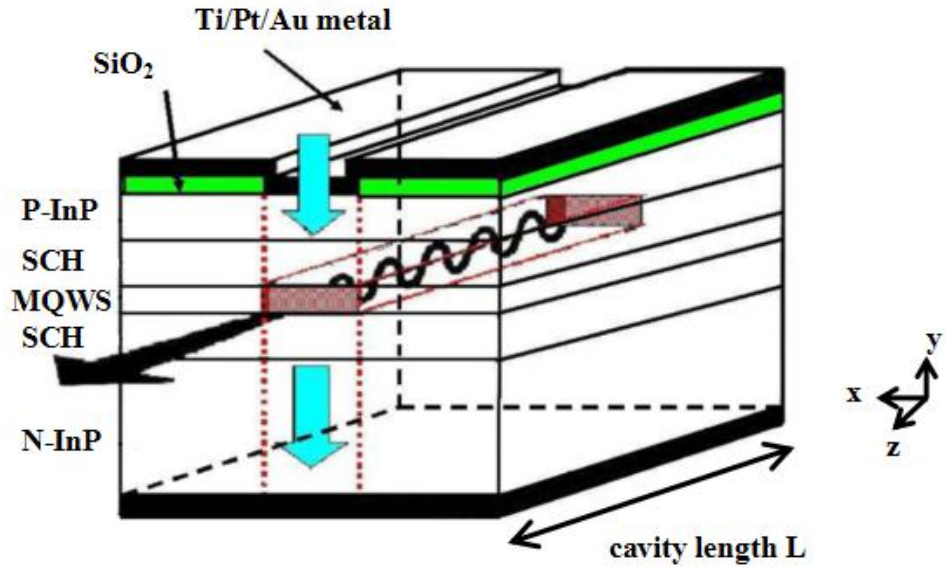


图 2.3 常规 RWG-FP 半导体激光器结构示意图

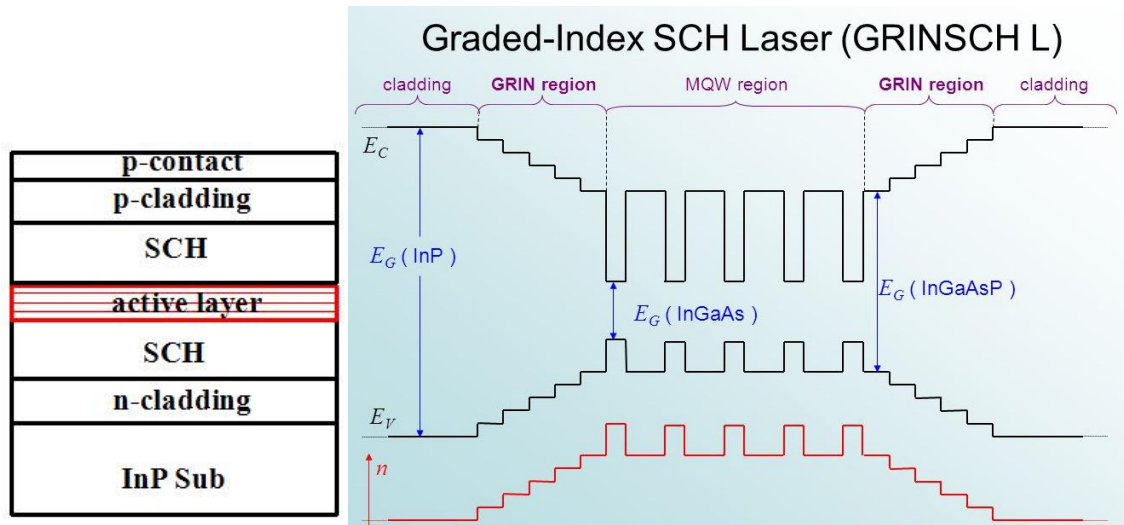


图 2.4 常规激光器外延结构和能带图

对于 FP 半导体激光器来说，其激光器前后腔面通过对光进行发射反馈从而达到模式的选择作用，当注入电流大于阈值电流时，在腔内，波长和纵向腔长满足如下关系，才能形成振荡：

$$2n_{\text{eff}}L = m\lambda \quad (2.10)$$

其中 n_{eff} 为模式有效折射率， L 为激光器腔长， m 为大于等于 1 的整数，当 $m \gg 1$ 时，相邻模式的激射波长差为：

$$\Delta\lambda = \lambda_m - \lambda_{m+1} = \frac{2n_{\text{eff}}L}{m(m+1)} \approx \frac{\lambda_m^2}{2n_{\text{eff}}L}$$

腔面模式频率间隔 Δf ：

$$\Delta f = \frac{c}{2n_{\text{eff}}L}$$

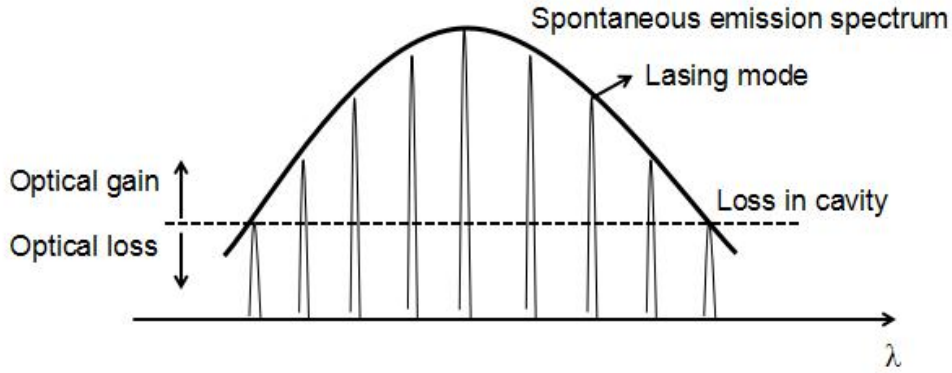


图 2.5 FP 激光器的材料增益和腔面模式关系

图 2.5 所示为 FP 的材料增益曲线和腔面模式的关系，FP 半导体激光器中不是所有满足关系式 (2.10) 的腔面模式都能实现激射。当注入载流子达到阈值或阈值以上时，只有增益大于材料内部损耗和腔面损耗的纵模才能实现激射。在腔面模式与增益谱匹配中，靠近增益峰的纵模最先激射。但并非所有的模式随着电流的增加而都能增益大于损耗，因为最靠近增益峰的模式最先激射同时其消耗了大量的载流子；另一方面当电流逐步增加时，半导体激光器由于材料的热效应而使得注入效率下降，因此最终能稳定工作的为靠近增益峰的一些腔面模式；甚至当材料的增益谱线过窄时，可能会出现单模式的激射。

多纵模半导体激光器，在实际应用中由于其光谱谱宽较宽，而常规单模光纤存在色散（除 1310nm 波段附近），色散的存在使得光谱会发生展宽，为了不使得前后两个脉冲间由于色散而产生相互的叠加和误码，通常会降低多模激光器的传输距离或减小其调制速率；然而 RWG-FP 半导体激光器经过多年的发展，由于其

具有成本低、良率高、制作工艺简便成熟、可靠性高等优点，是使用最多的一种器件结构。

2.3 分布反馈式（DFB）半导体激光器

常规激光器由于其宽谱宽而导致的色散展宽情况比较明显，这限制了器件在应用中的调制速率和传输距离。而窄谱宽激光器能有效降低色散，提高传输距离，具有重要应用意义。这种为单模激光器，目前分布反馈式激光器是最常见的一种；其采用在腔内沿着纵向周期分布的光栅结构来实现模式的反馈，达到单波长的选择作用。

DFB 激光器也具几十年的发展历史，1971 年，H.Kogelnik 首先提出了 DFB 半导体激光器的概念，并在玻璃衬底上实现一种光栅的制备。1973 年，Nakamura 用光泵浦周期性光栅结构的方法实现了第一只 DFB 激光器。1975 年，Scifres 和 Nakamura 实现了室温、连续工作的 DFB 半导体激光器，早期的 DFB 主要集中在 GaAs 材料系，DFB 半导体激光器的发展与半导体激光器技术的发展密切相关。早期的 DFB 半导体激光器也面临着阈值大、寿命短、制备工艺复杂等问题。

随着 70 年代光纤技术的飞速发展，出现了 1310nm 和 1550nm 采用光纤来传输具有最低的色散和最低的损耗窗口，人们开始研究适合在光纤里传输的半导体激光器。80 年代初，人们开始开发 InGaAsP/InP 材料系 DFB 半导体激光器，采用该材料系不含 Al，不容易出现氧化而引起的可靠性问题。1981 年，日本东京工业大学成功实现了第一只 1.5 μm 的 DFB 半导体激光器；1988 年我国半导体激光器专家罗毅和东京大学的多田邦雄也展开了一系列增益耦合 DFB 激光器的研究；此后微纳制备工艺技术、材料生长技术等快速发展，实现了含 AlGaInAs 高注入效率量子阱的制备，至今 DFB 激光器已经商业化地应用在各种光通信系统中。

通常采用耦合波方程来分析 DFB 的纵模特性。对于半导体激光器其在 xy 方向收到光学波导结构限制，其沿着纵向（z）波动方程可以表示为：

$$\frac{d^2 E}{dz^2} + \varepsilon k_0^2 E = 0 \quad (2.11)$$

E 为电场强度， ε 为介电常数， $k_0 = 2\pi / \lambda_0$ 为真空传播常数（ λ_0 真空波长），光栅周期的变化使得 ε 具有如下关系：

$$\varepsilon = \bar{\varepsilon} + \sum_l \Delta\varepsilon_l \exp\left(\frac{i2\pi l}{\Lambda} z + i\varphi\right) \quad (2.12)$$

其中 $\bar{\varepsilon}$ 为平均介电常数， $\Delta\varepsilon_l$ 为微扰， φ 为 $z=0$ 处的光栅相位。通常地波动方程可以有如下的解：

$$E = A \exp(-i\beta z) + B \exp(i\beta z) \quad (2.13)$$

其代表了 A、B 在腔内，沿着相反方向传播两个光模式的振幅。其中传播常数为 $\beta = n_{\text{eff}} + ig_{\text{th}}/2$ ， n_{eff} 为等效折射率， g_{th} 为阈值增益。将 (2.12) 和 (2.13) 代入到波动方程，同时忽略光模式振幅 A、B 随距离 z 的二阶导数，可以得到：

$$\begin{aligned} \frac{dA(z)}{dz} \exp(-i\beta z) - \frac{dB(z)}{dz} \exp(i\beta z) = & -i[\kappa A \exp(-2i\Delta\beta \cdot z) + i\varphi + i\beta z] \\ & + [\kappa^* B \exp(2i\Delta\beta \cdot z) - i\varphi - i\beta z] \end{aligned} \quad (2.14)$$

光栅耦合系数为 $\kappa = \frac{\Delta\varepsilon_l k_0^2}{2\beta}$ ，其代表了光栅的强弱，与 FP 激光器腔面反馈大

小的作用类似；耦合系数为实数时光栅为折射率耦合型，此时 $\kappa^* = \kappa$ ；为纯虚数时，光栅为增益耦合型，耦合系数与光栅的形状位置相关。令：

$$\Delta\beta = \beta - \beta_0 \quad (2.15)$$

其中 $\beta_0 = \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda_b} = \frac{m\pi}{\Lambda}$ 为布拉格传播常数， m 为衍射级次， λ_b 为布拉格波长，

则有：

$$\Delta\beta = \beta - \beta_0 = \left(\frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda_0} - \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda_b} \right) + ig_{\text{th}}/2 = \delta + ig_{\text{th}}/2 \quad (2.16)$$

其中 δ 代表了对布拉格条件的波数偏离。根据式 (2.14) 我们可以得到如下耦合模方程^[22-26]：

$$\frac{dA(z)}{dz} = -i\kappa^* B \exp(2i\Delta\beta z - i\varphi) \quad (2.17)$$

$$\frac{dB(z)}{dz} = i\kappa A \exp(-2i\Delta\beta z + i\varphi) \quad (2.18)$$

此时电场可以表示为：

$$E = E_f \exp(-i\beta_0 z) + E_b \exp(i\beta_0 z) \quad (2.19)$$

其中 E_f 为向前波电场, E_b 为向后波电场:

$$E_f = A \exp(-i\Delta\beta \cdot z)$$

$$E_b = B \exp(i\Delta\beta \cdot z)$$

则耦合波方程可以表示为:

$$\frac{dE_f}{dz} = -i\Delta\beta E_f - i\kappa^* E_b \exp(-i\varphi) \quad (2.20)$$

$$\frac{dE_b}{dz} = i\Delta\beta E_b + i\kappa E_f \exp(i\varphi) \quad (2.21)$$

上述耦合波方程的常规解为:

$$E_f = E_{f1} \exp(-i\gamma z) + E_{f2} \exp(i\gamma z) \quad (2.22)$$

$$E_b = E_{b1} \exp(-i\gamma z) + E_{b2} \exp(i\gamma z) \quad (2.23)$$

其中 γ 为复传播常数, 根据 (2.20) 至 (2.23) 式, 我们得到了如下的关系式:

$$\gamma = \sqrt{(\Delta\beta)^2 - \kappa^* \kappa} \quad (2.24)$$

同时根据上述公式我们可以得到:

$$E_{b1} = \frac{\kappa \exp(i\varphi)}{-\gamma - \Delta\beta} E_{f1} = r_{g1} E_{f1} \quad (2.25)$$

$$E_{f2} = \frac{\gamma - \Delta\beta}{\kappa \exp(i\varphi)} E_{b2} = r_{g2} E_{b2} \quad (2.26)$$

根据下图可以从耦合波方程, 得到 DFB 激光器的振荡条件, 此时边界条件为:

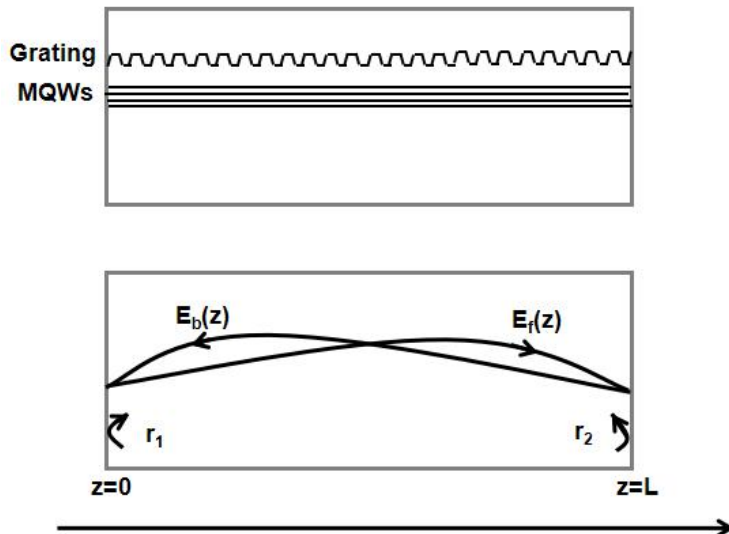


图 2.6 折射率耦合型 DFB 激光器

$$E_f(0) = r_1 E_b(0) \quad (2.27)$$

$$E_b(L) = r_2 E_f(L) \quad (2.28)$$

上式中 r_1 、 r_2 分别为两个腔面的反射系数，对于 DFB 激光器来说其反射系数有如下关系式：

$$r_i = \sqrt{R_i} \exp(j\phi_i) \quad (2.29)$$

其中 R_i 和 ϕ_i 分别为对应腔面的反射率和反射相位。则根据上述的边界条件和耦合波方程，我们可以得到：

$$(r_{g2} - r_1)E_{b2} - (r_{g1}r_1 - 1)E_{f1} = 0 \quad (2.30)$$

$$(r_{g2} - r_2)\exp(-i\gamma L)E_{f1} - (r_{g2}r_2 - 1)E_{b2} = 0 \quad (2.31)$$

则根据上述两式我们可以得到 DFB 的振荡条件为：

$$\frac{(r_{g2} - r_1)(r_{g1} - r_2)}{(1 - r_1r_{g1})(1 - r_2r_{g2})} \exp(-i2\gamma L) = 1 \quad (2.32)$$

从上式来看，DFB 维持震荡的条件与传播常数和反射系数有关，总体来看维持 DFB 震荡的模式与布拉格条件偏离数、模式阈值增益、端面反射相位、反射率等因素相关^[27-32]。从式（2.32）可以看出满足该振荡条件的 δ 和 g_{th} 可有与许多组合，然而实际情况是对于具有最低阈值增益的模式最容易实现振荡；主模降低了其余模式的增益，DFB 激光器主模和边模的阈值增益差 Δg_{th} 能代表其单模特性，该值越大单模越稳定。对于 DFB 激光器来说由于解离而在腔面留下不可控制的随机相位是导致该器件成品率低的一个主要因素。

对于折射率耦合型 DFB 激光器，其通过出光和背光面蒸镀高透和高反膜，来破坏两端的对称性，提高单模输出比例；但是通过这种方法来提高成品率也有限，同时也存在其他的缺点。

如果在 DFB 激光器中，在原本周期均匀的光栅中引入一个非均匀的结构： $\lambda/4$ 相移区，这种引入被证明能够消除双模简并，实现单模工作；均匀光栅结构和 $\lambda/4$ 相移光栅结构如下图所示。均匀光栅 DFB，在反射布拉格波长存在最易实现

激射的两个模式。四分之一相移光栅破坏了光栅的均匀性，在光栅处增加半个周期光栅，使得腔内形成一个模式。但该结构制作复杂，同时对两个端面镀完减反膜后，其单边的输出功率低，不利于产业化生产。另外，也有采用增益或损耗耦合型光栅，对于这类激光器，其主要是在有源区上引入周期性的增益或损耗微扰；但该方法工艺复杂、制造成本高、成品率低，同时其光栅制作在有源区内部，这使得很容易在有源区引入了材料缺陷，容易产生产品长期工作的可靠性问题，这些因素使得目前该方法还未见批量的生长报道。

如下图为均匀光栅和 1/4 波长相移光栅示意图。对于常规的折射率耦合光栅来说，其光栅通常刻写在有源层的上方或下方，光场模式耦合到光栅层，同时光栅对特定进行反馈放大实现单纵模输出。

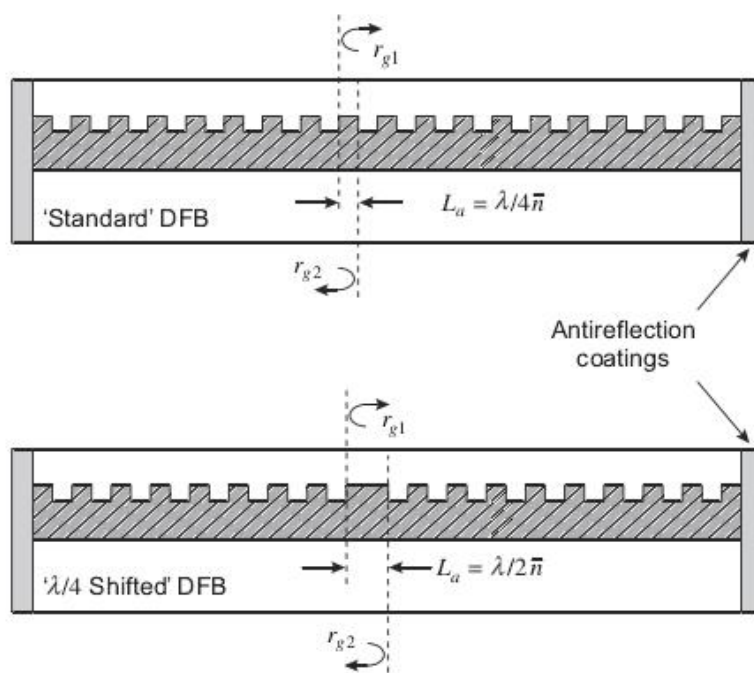


图 2.7 均匀光栅结构和 1/4 波长相移光栅结构

光栅制备工艺

光栅是 FP 和 DFB 半导体激光器的差异所在，通常地光栅制备的质量决定了激光器中单模特性和成品率。InP 基半导体激光器光栅通常采用双光束曝光的方法来制备，其原理如图 2.7 (a) 所示。He-Cd 激光光束经过针孔和准直、扩束之后，经过分束器分成两束光，这两束分束光被反射后，在样品表面汇合产生干涉，干

涉而形成的条纹对表面胶进行曝光形成周期均匀光栅，接着采用湿法腐蚀或干法刻蚀III-V族材料形成周期性光栅；其形成的光栅节距或周期 Λ 有如下关系式：

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2 \sin \theta \cos \varphi} \quad (2.11)$$

$$\Lambda = \frac{m \lambda_0}{2n} \quad (2.12)$$

其中 λ 为 He-Cd 激光波长，一般为 441.6nm， θ 、 φ 分别为样品台的倾斜角和光线入射到样品台上的入射角；式（2.12）光栅周期和反馈波长 λ_0 的关系， n 为等效折射率， m 为级次。

采用双光束全息法也可以制造 $\lambda/4$ 相移光栅。如图 2.7（b）所示，在制备 $\lambda/4$ 相移光栅时同时采用正光刻胶和负光刻胶的办法；通过光刻和分次涂胶的方法在衬底上同时涂上正、负光刻胶，最后样品同时曝光。利用正负光刻胶曝光显影结果的相反性，在其相连的区域形成相移光栅结构。另外还有采用相位调制掩膜版的方法来实现相移光栅，即在曝光时，采用带有相移光栅图形的光刻版做掩膜版。

此外，采用电子束光刻也是制备光栅较为常用的一种方法，电子束光刻可以实现高精度和周期可调的光栅结构，但其制作过程效率偏低，无法大量应用。另外可以采用该方法来制备高精度带有相移区域的光刻版，通过 X 射线曝光来制备该结构光栅。

虽然相移光栅 DFB 具有高成品、单模特性好的优点，但其要求采用高反来破坏两个端面反馈，这降低了光功率的利用率，同时增加了能耗；此外该工艺制备过程相对来说更加复杂些，因此目前采用折射率耦合的均匀光栅仍是批量化制备 DFB 激光器主要方案。当然对于 DFB 激光器来说其宽温度范围内的高边模抑制比仍然是其最为关键的指标之一。

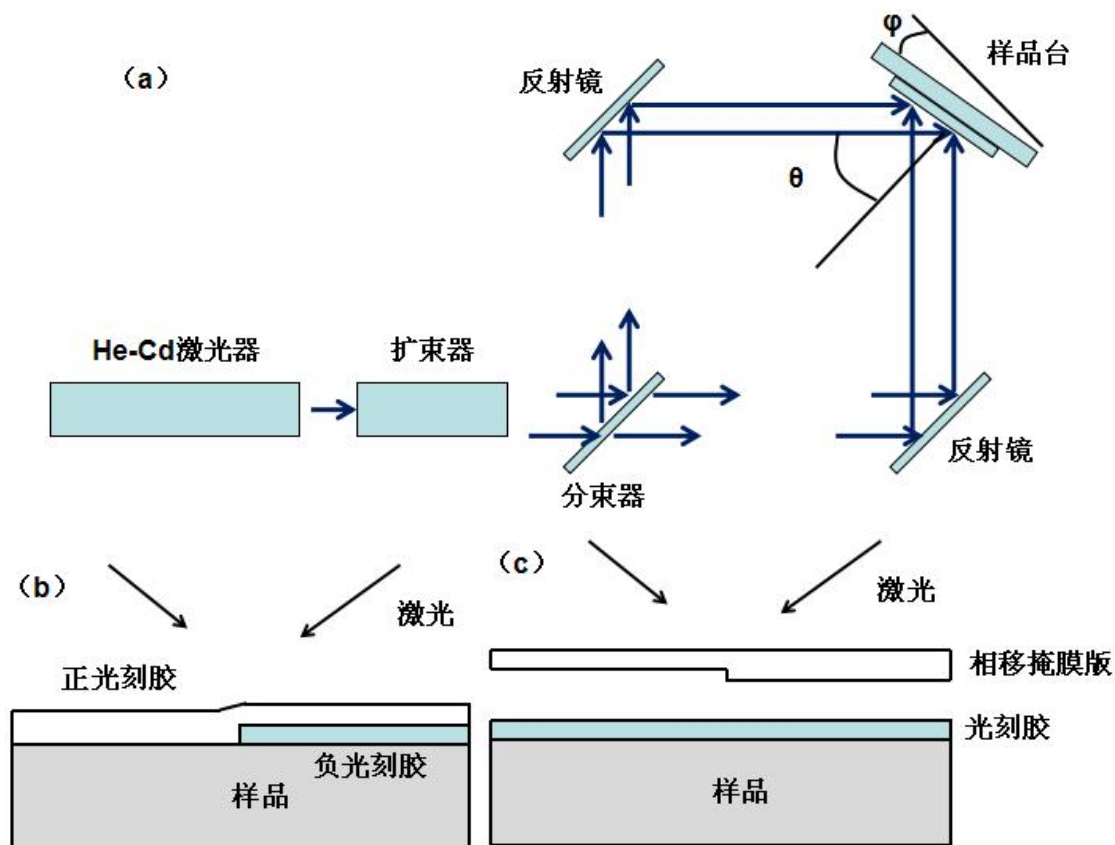


图 2.7 (a)双光束全息光栅制备示意图, (b)正负胶制备相移光栅, (c)相位掩膜版制备相移光栅

光栅制备完成后需对光栅进行二次生长掩埋, 常规的生长温度下, 容易使得光栅表面发生质量输运从而使光栅变形; 在实际生长过程中通过调整温度或者是增加 PH_3 压强, 或者是生长前通 PH_3 等优化这种现象。

2.4 激光器强度噪声特性

激光器在工作时, 腔内光强沿着纵向不是均匀分布, 当载流子注入时, 在光强腔的地方消耗了载流子, 而在光强相对较弱的地方载流子增加, 当载流子继续增加产生的增益使得腔内的其余模式发射激光, 这种非均匀性而引起的模式跳变为空间烧孔。

对于在大电流注入条件下, 此时载流子密度更大, 越容易导致载流子在腔内沿着纵向的浓度分布不均从而导致光场和增益分布不均产生空间烧孔, 由此优化实现纵向的载流子和光强的均匀分布, 决定了大电流下激光器单模工作的稳定性; 空间烧孔导致器件在工作过程中产生模式跳变和多模工作, 同时器件的强度噪声也随之大幅增加, 强度噪声的主体在于模式间的功率分配, 半导体激光器的相对

强度噪声（relative intensity noise, RIN）也衡量了器件模式工作稳定性的特性。

半导体激光器的强度噪声（RIN）可以表示为：单位时间内光功率起伏的均方值对光功率平均值的变化：

$$RIN = \frac{\langle \delta P(t)^2 \rangle}{P_0^2} \quad (2.13)$$

$$\langle \delta P(t)^2 \rangle = S_{\delta P}(\omega) \cdot 2\Delta f \quad (2.14)$$

其中 $S_{\delta P}(\omega)$ 为功率谱密度， Δf 为测试的带宽，实际的测试带宽要考虑到频率的正负，因此带宽为 $2\Delta f$ 。则有：

$$\frac{RIN}{\Delta f} = \frac{2S_{\delta P}(\omega)}{P_0^2} \quad (2.15)$$

$$RIN(dB/Hz) = RIN(dB) - 10\log_{10}(\Delta f[inHz]) \quad (2.16)$$

由于激光器内载流子和光子存在相互作用，当器件工作在弛豫频率附近时其强度噪声显著增强；在激光器内部，存在载流子和光子间的相互作用，载流子浓度的增加，提高了增益和腔内的光子密度；另一方面光子密度的提高也增加了消耗了腔内的载流子浓度，载流子浓度降低导致了增益饱和，而增益饱和使得光子密度降低；光子密度降低，其降低了消耗载流子的速度，从而使得载流子浓度继续增加，减小了增益饱和效应；此后又继续重复上述的过程，这样一个载流子和光子间相互作用的过程为弛豫振荡。当频率超过弛豫振荡频率时，这种载流子和光子间相互耦合的作用变弱甚至消失，因此激光器的强度噪声随着频率增加，到弛豫频率附近达到最大，随着频率继续增大，其噪声又迅速降低。

半导体激光器强度噪声通常包含了激光的强度噪声、热噪声以及散粒噪声。对于任何的半导体器件都存在热噪声（又称 Johnson or Nyquist noise），热噪声是载流子无规则热运动叠加在规则的运动上形成的，这种无规则的运动导致了电子器件两端电压和电流出现随机的涨落，热噪声与温度相关。器件的热噪声电流均方值为：

$$\langle i_{th}^2 \rangle = \frac{4kTB}{R} \quad (2.17)$$

其中 k 为玻尔兹曼常量， T 为开尔文文编， B 为探测器的带宽， R 为探测器负载。因此实际情况下，探测器的热噪声功率为：

$$N_{th} = 4kTB \quad (2.18)$$

1918 年肖特基发现电子管以及发射电子数目的无规则起落。对于在半导体中，散粒噪声通常指由于半导体器件内电流的随机涨落而造成载流子数目的起伏，它是多数半导体器件的一种主要噪声。散粒噪声电流均方值可以表示为：

$$\langle i_{shot}^2 \rangle = 2qI_{dc}B \quad (2.19)$$

其中 q 为电子电量， I_{dc} 为探测器产生的光电流， B 为探测器带宽，通常可以归一化为 1Hz，因此每 Hz 带宽散粒噪声功率可表示为：

$$N_{shot} = 2qI_{dc}R \quad (2.20)$$

对于探测器来说其通过探测光功率转换成电功率，因此探测器的平均探测电功率为：

$$P_{AVG(elec)} = (rP_{AVG(opt)})^2 R_L = I_{dc}^2 R_L \quad (2.21)$$

则根据上述公式散粒噪声的相对强度值为：

$$RIN_{shot} = \frac{N_{shot}}{P_{AVG(elec)}} = \frac{2qI_{dc}R_L}{I_{dc}^2 R_L} = \frac{2q}{I_{dc}} \quad (2.22)$$

因此在测试的总的强度噪声中应该扣除散粒噪声和热噪声，则激光器的强度噪声为：

$$RIN_{Laser} = RIN_{System} - \frac{2q}{I_{dc}} - \frac{N_{th}}{P_{AVG(elec)}} \quad (2.23)$$

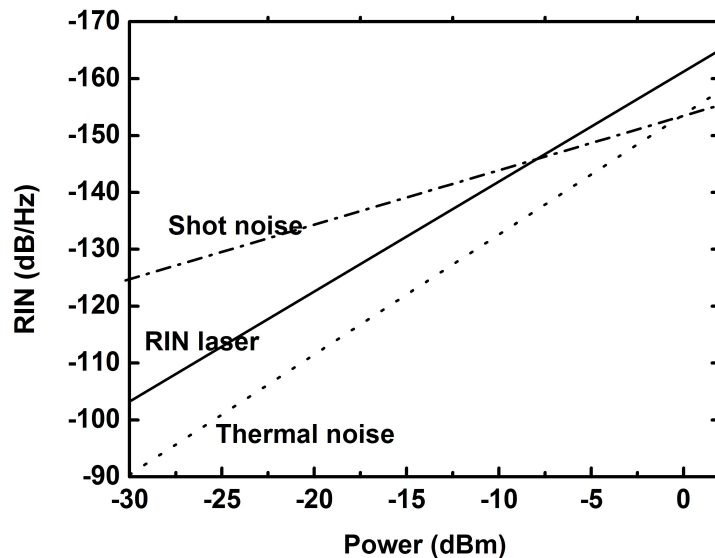


图 2.8 不同输出功率下的噪声变化

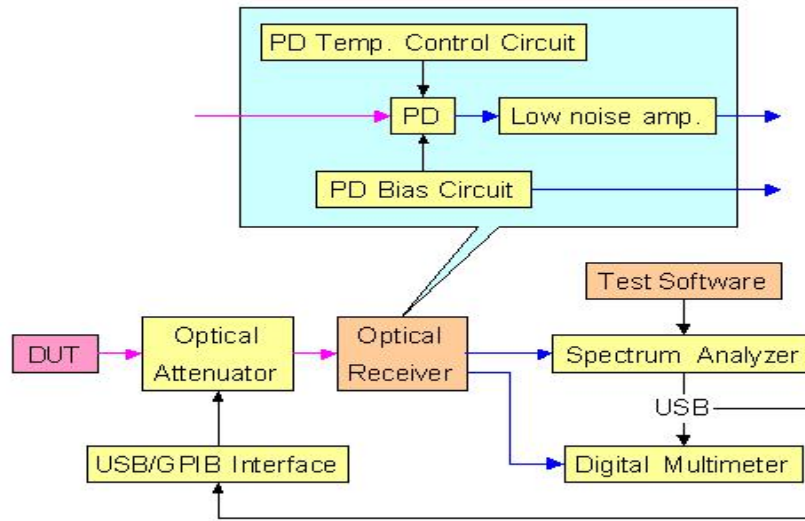


图 2.9 RIN 测试示意图

图 2.8 为半导体激光器在不同输出光功率下其内部的噪声变化；在低输出光功率下，激光器的噪声主要为热噪声主要作用；随着激光输出功率的增加，三种噪声都降低，散粒噪声降低相对缓慢，知道功率增加至某一值时，热噪声成为其主要噪声。图 2.9 为半导体激光器相对强度噪声测试的示意图，激光信号进过衰减器之后进入探测器和电放大器，并对电放大器的输出电谱进行测量，此外可以通过探测器的光电流反馈调整光衰减器来调整激光器输出，激光器测试的噪声要经过校准扣除其余的噪声。

2.5 激光器速率方程

激光在介质中传输的波动方程为：

$$\nabla^2 E - \mu_0 \varepsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} (E) = 0$$

其中 μ_0 为磁导率， ε 为物质的介电常数，在分析半导体激光器的动态特性时，通常采用速率方程，其描述了激光器腔内载流子和光子随时间的变化及其相互的联系^[36]。为了进一步分析半导体激光器，我们假定如下的条件，虽然经过简化，但其与实际情况相符。①激光器单纵模工作；②载流子和光子沿纵向均匀分布；③增益材料增益与载流子有如下关系 $g = g_0(N - N_{tr})$ 。根据载流子的连续性方程，我们有：

$$\frac{dN}{dt} = \mu_n E \frac{dN}{dx} + \mu_n n \frac{dE}{dx} + D_n \frac{d^2 N}{dx^2} - R + G$$

其中 μ_n 为电子迁移率, E 为电场强度, $-R$ 为由于辐射复合和其他因素引起的载流子减少, G 为由于注入引起的载流子增加, 上式中前三项为载流子和电场的不均匀而引起的, 假设材料内部载流子浓度和电场强度均匀, 则有:

$$\frac{dN}{dt} = -R + G$$

其中 G 与注入载流子有关系式: $G = J/qV$; $-R$ 主要有两方面: ①受激辐射复合: $g(N)S = \Gamma g_0(N - N_{tr})$; ②自发辐射和非辐射复合: N/τ_N 。基于上述载流子速率方程可以表示为:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{J}{qV} - \Gamma g_0(N - N_{tr})S - \frac{N}{\tau_N} \quad (2.24)$$

光子速率方程可以表示为如下关系式, 其中第一项为受激辐射产生的光子, 第二项为损耗和出光而引起的光子减少, 最后一项为自发辐射耦合进激光的比例, 增加了相干光。

$$\frac{dS}{dt} = \Gamma g_0(N - N_{tr})S - \frac{S}{\tau_p} + \Gamma \beta_{sp} \frac{N}{\tau_N} \quad (2.25)$$

对于实际的情况, 当载流子继续注入时, 腔内的光子无法继续保持线性增大, 当注入达到一定程度时, 由于各方面的因素导致增益降低甚至趋向饱和, 为此我们引入了饱和项 $(1 + \varepsilon S)^{-1}$, 则速率方程可以写为如下形式:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{J}{qV} - \frac{\Gamma g_0(N - N_{tr})S}{1 + \varepsilon S} - \frac{N}{\tau_N} \quad (2.26)$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\Gamma g_0(N - N_{tr})S}{1 + \varepsilon S} - \frac{S}{\tau_p} + \Gamma \beta_{sp} \frac{N}{\tau_N} \quad (2.27)$$

其中 N_{tr} 为增益和损耗平衡材料达到“透明”时的透明载流子浓度, τ_N 为载流子寿命, τ_p 为光子寿命, Γ 光场限制因子为增益区与光场重叠的比例, ε 为增益饱和系数, β_{sp} 自发辐射因子, J 为注入载流子密度, V 为有源区体积。从上式中可以看出半导体激光器内部的载流子和光子是变化的, 同时其相互之间互相影响。

2.5.1 速率方程稳态解

分析耦合速率方程的稳态解，有助于理解稳态下激光器的内部特性，载流子和光子密度达到稳定值时 N_0 、 S_0 ；有 $dN_0/dt = 0$ ， $dS_0/dt = 0$ ，此时 (2.26) 和 (2.27) 可以表示为：

$$\frac{J}{qV} - \frac{\Gamma g_0(N_0 - N_{tr})S_0}{1 + \varepsilon S_0} - \frac{N_0}{\tau_N} = 0 \quad (2.28)$$

$$\frac{\Gamma g_0(N_0 - N_{tr})S_0}{1 + \varepsilon S_0} - \frac{S_0}{\tau_P} + \Gamma \beta_{sp} \frac{N_0}{\tau_N} = 0 \quad (2.29)$$

①当注入电流在阈值以下时， $S_0=0$ ， $J = \frac{qVN_0}{\tau_N}$ ；②当注入电流在阈值处，此时

$J_{th} = \frac{qVN_{th}}{\tau_N}$ ， N_{th} 为阈值载流子浓度；③当注入电流超过阈值时 $J > J_{th}$ ，由于增益饱和

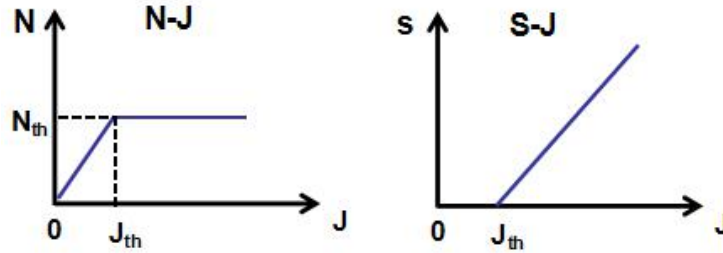
和需要较大的注入电流，此时我们暂时不考虑增益饱和的影响，如果忽略自发辐射对激射模的贡献，则 $\beta_{sp}=0$ ，此时有：

$$N = N_{th} = \frac{1}{\Gamma g_0 \tau_P} + N_{tr}$$

$$S = \frac{\tau_P}{qV} (J - J_{th})$$

对于半导体激光器当其制备完之后其上述参数基本为常数，忽略激光器内部的增益饱和、自发辐射等因素，当激光器实际工作在阈值以上时其载流子维持在阈值载流子浓度。因此总体来看有：

① $J < J_{th}$ ， $N = J\tau_N / qV$ ， $S=0$ ；② $J \geq J_{th}$ ， $N = J_{th}\tau_N / qV$ ， $S = \tau_P(J - J_{th}) / qV$ 。



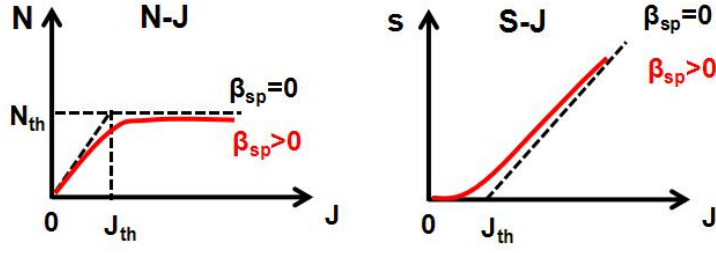


图 2.10 考虑和不考虑自发辐射影响下的载流子浓度和光子浓度稳态值

2.5.2 激光器强度调制

通常半导体激光器在应用时有大信号调制和小信号调制^[37,38,39]。

小信号调制通常被用来分析激光器内部的动态特性；在调制时激光器腔内的载流子和光子随时间的变化可以用一个常量加一个随时间变化的小变化量来表示。将上述速率方程求微分得到了速率方程为：

$$d\left(\frac{dN}{dt}\right) = d\left(\frac{J}{qV}\right) - d\left(\frac{\Gamma g_0(N - N_{tr})S}{(1 + \epsilon S)}\right) - d\left(\frac{N}{\tau_N}\right) \quad (2.30)$$

$$d\left(\frac{dS}{dt}\right) = d\left(\frac{\Gamma g_0(N - N_{tr})S}{(1 + \epsilon S)}\right) + d\left(\frac{\Gamma \beta_{sp} N}{\tau_N}\right) - d\left(\frac{S}{\tau_P}\right) \quad (2.31)$$

将上述两式展开得到：

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(dN) &= \left(\frac{1}{qV}\right)dJ - \left(\frac{\Gamma g_0(N_0 - N_{tr})}{(1 + \epsilon S_0)^2}\right)dS - \left(\frac{\Gamma g_0 S_0}{1 + \epsilon S_0} + \frac{N}{\tau_N}\right)dN \\ \frac{d}{dt}(dS) &= \left(\frac{\Gamma g_0(N_0 - N_{tr})}{(1 + \epsilon S_0)^2} - \frac{1}{\tau_P}\right)dS + \left(\frac{\Gamma \beta}{\tau_N} + \frac{\Gamma g_0 S_0}{1 + \epsilon S_0}\right)dN \end{aligned}$$

我们假设系数：

$$A = \frac{\Gamma g_0(N_0 - N_{tr})}{(1 + \epsilon S_0)^2} - \frac{1}{\tau_P}, B = \frac{\Gamma \beta}{\tau_N} + \frac{\Gamma g_0 S_0}{1 + \epsilon S_0}, C = -\frac{\Gamma g_0(N_0 - N_{tr})}{(1 + \epsilon S_0)^2}, D = -\left(\frac{\Gamma g_0 S_0}{1 + \epsilon S_0} + \frac{N}{\tau_N}\right)$$

从而上述方程可以写成矩阵形式：

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} dS \\ dN \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dS \\ dN \end{bmatrix} + \frac{dJ}{qV} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

得到：

$$\frac{dJ}{qV} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} dS \\ dN \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dS \\ dN \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

为了获得在正弦调制电流 $dJ(t)$ 下的小信号响应 $dN(t)$ 和 $dS(t)$ ，在高于阈值的工作电流 J_0 基础上再叠加一个微小的电流调制信号 $J_1 \exp(j\omega t)$ ，则有：

$$J(t) = J_0 + J_1 \exp(j\omega t)$$

$$N(t) = N_0 + N_1 \exp(j\omega t)$$

$$S(t) = S_0 + S_1 \exp(j\omega t)$$

其中 J_0 ， N_0 ， S_0 为稳态值， J_1 ， N_1 ， S_1 为调制的变化幅度；则小信号的解析解为：

$$dJ(t) = j\omega J_1 \exp(j\omega t)$$

$$dN(t) = j\omega N_1 \exp(j\omega t)$$

$$dS(t) = j\omega S_1 \exp(j\omega t)$$

带入上述矩阵表达式有：

$$\begin{aligned} \frac{j\omega J_1 \exp(j\omega t)}{qV} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} (j\omega S_1)^2 \exp(j\omega t) \\ (j\omega)^2 N_1 \exp(j\omega t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j\omega S_1 \exp(j\omega t) \\ j\omega N_1 \exp(j\omega t) \end{bmatrix} \\ \frac{J_1}{qV} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -A + j\omega & -B \\ -C & -D + j\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ N_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.33)$$

该矩阵的行列式为：

$$\Delta = AD - BC - (A + D)j\omega - \omega^2$$

采用 Cramer 法则得到小信号调制的载流子浓度和光子浓度为：

$$N_1 = \frac{J_1}{qV} \frac{(-A + j\omega)}{\omega_r^2} H(\omega) \quad (2.34)$$

$$S_1 = \frac{J_1}{qV} \frac{B}{\omega_r^2} H(\omega) \quad (2.35)$$

其中调制传递函数 $H(\omega)$ 为：

$$H(\omega) = \frac{\omega_r^2}{\omega_r^2 - \omega^2 + j\omega\gamma} \quad (2.36)$$

$$\omega_r^2 = \frac{\Gamma g_0 S_0}{\tau_p (1 + \varepsilon S_0)} - (1 - \beta_{sp}) \frac{\Gamma g_0 (N_0 - N_{tr})}{\tau_N (1 + \varepsilon S_0)^2} + \frac{1}{\tau_N \tau_p} \quad (2.37)$$

$$\gamma = \frac{\Gamma g_0 S_0}{1 + \varepsilon S_0} - \frac{\Gamma g_0 (N_0 - N_{tr})}{(1 + \varepsilon S_0)^2} + \frac{1}{\tau_N} + \frac{1}{\tau_p} \quad (2.38)$$

其中 ω_r 为弛豫振荡角频率，弛豫频率为激光器内部在恢复到稳态前腔内的光子和载流子相互作用的一个过程。 γ 阻尼因子，代表弛豫衰减速度。

上式中 ω_r 的最后两项之和影响很小，因此弛豫频率可以近似为：

$$\omega_r = \left(\frac{\Gamma g_0 S_0}{\tau_p (1 + \varepsilon S_0)} \right)^{1/2} \quad (2.39)$$

同时根据如下关系式：

$$\tau_p = \frac{c}{n} (\alpha_i + (1/L) \ln(1/R))$$

$$P = \frac{h\nu c}{2n} \ln(1/R) \frac{S_0}{1 + \varepsilon S_0} wd$$

可以得到：

$$f_r = \frac{\left(\frac{2\Gamma g_0 (\alpha_i + \ln(1/R)/L) P}{h\nu wd \ln(1/R)} \right)^{1/2}}{2\pi} \quad (2.40)$$

$h\nu$ 为光子能量， w 、 d 、 L 分别为波长的宽度、厚度和长度， α_i 为材料内部损耗， R 为腔面反射率。

2.5.3 影响激光器直调的因素

光通信网络正不断向更高速率、更大容量的方向发展，提高半导体激光器的调制速率是直接提高单位时间内信息传输容量的有效手段，目前 avago、三菱、NEC 等也在高速激光器上部署作为研究重点。直调激光器由于制作结构相对简便、成本低等优点，在应用市场中也占有重要的比例。半导体激光器由于载流子和光子的相互作用导致调制频率通常被限制在弛豫频率附近。因此在实际中通过合理设计芯片提高其弛豫振荡频率是提高激光器调制速率最重要的一个环节。另一方面器件的波导结构、电容、电阻、电感等参数对于器件在高速调制下工作也有很重要的影响作用^[40-46]。

(1) 弛豫振荡频率：

$$f_r \propto \sqrt{I - I_{th}} / \tau_p \quad (2.41)$$

从上述的关系式中我们可以知道，降低阈值、提高输出功率和降低光子寿命是提高弛豫频率的最直接方法。提高出光功率可以通过提高注入电流来实现，但注入电流不可能无限增加，当激光器工作在高电流状态容易使得大信号调制产生畸变，同时大电流下产生的热量累积也往往使得器件容易出现可靠性的问题。降低光子寿命可以通过增加光子密度的方法来实现，这里最简单的做法是减小激光器的腔长、激光器脊波导宽度，但这些都是相互制约的，减小腔长可以适当地提高输出降低光子密度，但容易产生输出饱和，特别是大电流下；而减小脊宽的道理也是一样的，脊宽减小使得有源区体积变小，导致电流密度增大，这也引起了大电流下可靠性的问题。此外弛豫频率还与器件的阈值相关，合理地降低阈值能提高该频率，激光器拥有低的阈值则其材料的量子效率必定较高、同时材料损耗较低，即增益材料的微分增益高，这在外延片结构设计时要求对外延材料的量子阱、波导结构、掺杂分布等因素进行总体的分析和优化，提高量子阱的注入效率降低阈值增益，是提高半导体激光器弛豫频率的一个重要方法。

(2) 电学寄生参数：由于 RC 时间限制，半导体激光器的调制通常也被器件总体的电容、电阻和电感参数所限制。器件电感主要与器件封装因素相关，封装电极引线采用短而粗的引线能有效降低器件电感。

减小串联电阻和电容也是一方面因素；通常激光器的串联电阻主要来源：体材料电阻、电学接触电阻和结区等效电阻。对于优化设计的有源区，通常通过降低欧姆电阻和材料电阻为主要方法，目前较为常规的方法是激光器脊型波导结构采用倒台的方法，提高欧姆接触面积来降低接触电阻，同时将管芯减薄至合理厚度来降低材料电阻，从而降低器件整体串联电阻。电容主要来源于两方面：有源区、金属覆盖区域；脊型波导凹槽区域采用低介电常数的填充介质能有效减少寄生电容，如 BCB 胶、PI 胶等；另外优化减小激光器表面金属覆盖区域也能在一定程度上降低器件的电容。

2.6 小结

本章主要对激光器的工作原理进行分析。分析了不同结构 FP、DFB 半导体激光器的工作特性、材料增益、损耗、模式选择特性；这对后续分析激光器模式的

跳变优化芯片设计具有一定的作用。并分析了激光器的噪声特性、噪声来源和噪声测量方法；最后对激光器载流子和光子相互作用的动态和稳态特性进行分析，并分析影响激光器直调速率的因素和改善方法；这对于改善器件噪声、提高弛豫频率具有一定的作用。

第三章 半导体激光器工艺

当今世界半导体行业和技术不断发展，半导体器件占有经济的比重也逐步增加，其在日常生活中变得越来越常见，如发电用的太阳能电池板、照明用的 LED 等、户外大屏幕显示、手机等各类电器中的芯片和处理器等等。而半导体器件的制备其主要过程依赖于半导体工艺；半导体工艺对工艺环境和工艺设备有很强的依赖，常规的机械加工无需再洁净室环境下进行，因其对加工精度和环境洁净度的要求无需太严格即可。而常见半导体芯片微纳加工则对其加工的工艺环境有较高的要求，如温湿度、洁净室颗粒数等，即便在一模一样的加工共一下，温湿度的浮动、尘埃颗粒的影响往往会对产品质量造成严重的影响甚至影响到产品的可靠性问题。半导体工艺总体的过程可以概述为：利用设备对原始材料进行微纳加工，并通过各种测试和表征手段来评价加工结果的好坏，最后到成品产出的一个过程。下面将对不同工序半导体激光器工艺进行介绍，主要有材料生长工艺、光刻工艺、薄膜工艺、干法刻蚀和湿法工艺。

3.1 材料外延生长

材料生长通常是通过物理、化学等反应生成所需材料成分的一个过程；在外延材料生长中，通常以同质衬底片作为生长基底，随着材料生长技术的进步，生长设备越来越精密，精度越来越高，其中 III-V 半导体材料外延生长最常用到的工艺：分子束外延(MBE)和金属有机化学气相沉积(MOCVD)；这两种生长技术在半导体科研和生产领域占据着越来越重要的作用。

3.1.1 分子束外延

分子束外延是在超高的真空度环境中（约 10^{-8} Pa），由热蒸发而产生的材料分子束在衬底上形成薄膜的过程^[47]。分子束外延的优点是材料厚度控制精度高，其可以实现低的沉积速率 0.01nm/s，可以实现单层分子（原子）层单晶结构。分子束外延可以精确控制化合物半导体的组分以及掺杂浓度分布，同时其低的生长温度有利于提高生长质量，对化合物半导体微观结构和特性的研究具有重要作用。

如下为 MBE 系统的生长室结构图。通常地在样品进入到生长室之前一般会对样品的进行一系列的分析 and 处理，在符合特定条件下进入生长室腔体，并在特定

的温度和真空度下沉积薄膜材料。

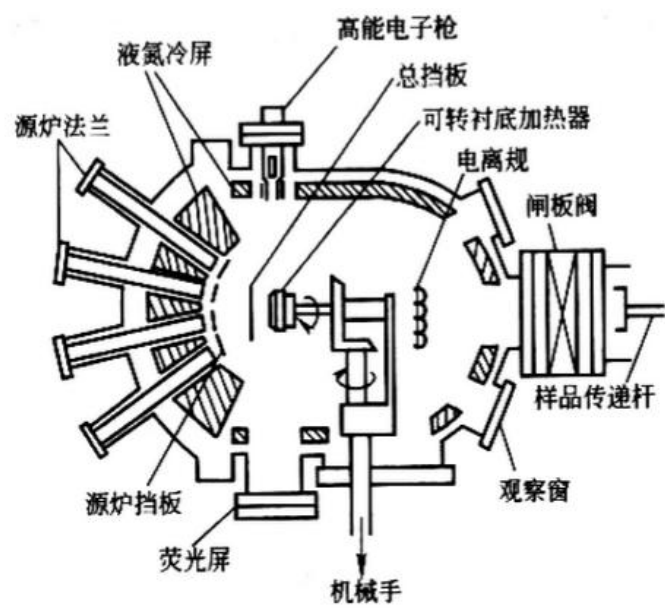


图 3.1 MBE 生长室结构示意图

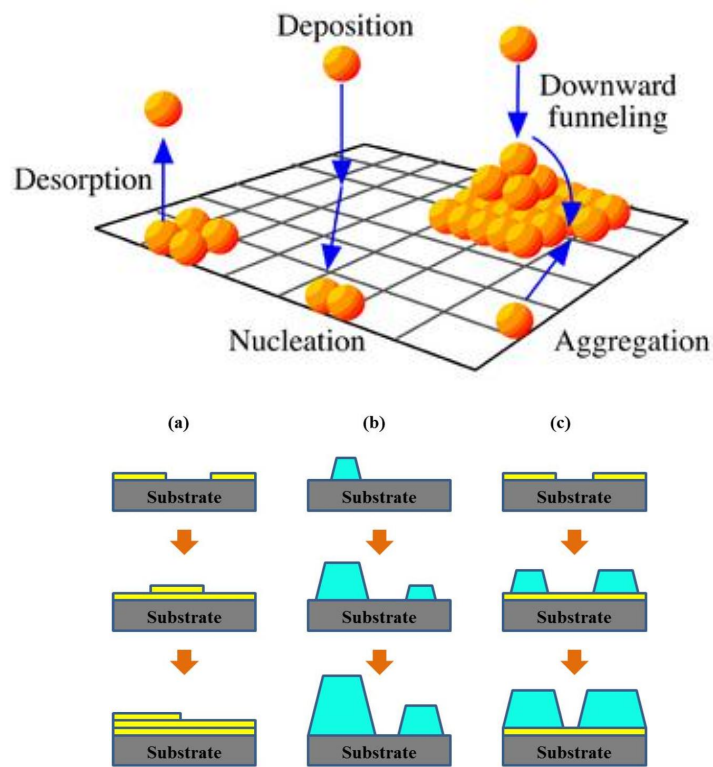


图 3.2 薄膜形成与生长过程

薄膜生长一般有三种模式：岛状生长、层状生长、层-岛状生长(S-K 模式)^[48]，如图 3.2 所示。

岛状生长：沉积材料的原子与衬底的表面接触能力较差，使得被沉积物自我组合堆积形成岛状。如导体在绝缘体表面的生长过程。岛状生长过程其大致有如下三个阶段：（1）材料在衬底表面累积形成晶核；（2）随着材料的进一步沉积晶核逐渐长大，形成岛状结构；（3）相互分离的岛随着材料的进一步沉积岛状结构材料逐步增大。

层状生长：当沉积材料原子与衬底表面接触能力良好时，如相近或同质的材料，则沉积原子与衬底相结合；并且沉积物质在衬底表面沿着衬底呈现平面扩展生长方式，这种生长方式使得衬底表面相当于铺上一层被生长材料，这种生长方式为层状生长。如III-V或II-VI族同质材料生长，生长材料多数为单晶生长。

层-岛状生长(Stranski-Krastanov 模式)：这种生长方式一般在刚开始生长为层状生长方式，当层状生长到一定厚度时转为岛状生长，导致生长方式发生这种转变因素较多，主要为材料内部某些能量相互作用或释放的结果形式。如在异质材料生长过程中，由于两种材料的晶格适配导致适配的晶格间存在应力，当材料生长到一定厚度时则形成岛状结构，这主要是晶格适配应力释放引起的，如量子点结构的生长。

MBE 与 MOCVD 相比，可以使用更多种类的掺杂源，同时可以实现掺杂的高精度分布。另外 MBE 的低温生长特点和低生长速率，可以获得许多独特的掺杂分布和合金组分，这些功能是常规 CVD 所没有的。另外 MBE 还可以获得一些新的结构如场效应晶体管、超晶格等。但目前 MBE 由于其生长速度慢，生长效率低，因此还很难应用在常规批量化生产领域。

3.1.2 金属有机化学气相沉积

金属有机物化学气相沉积 (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)，是将源通过精密控制的质量流量系统，将源运输至加热生长的腔体内，在材料生长腔体内，高温使得源材料发生分解在衬底表面复合形成新材料的薄膜生长工艺过程。MOCVD 外延技术有上世纪六十年代洛克威尔公司提出来，上世纪 80 年代以来 MOCVD 技术得到了迅速的发展，其在高精度薄膜，特别是现在半导体光电器件的基础：纳米量级精细结构和量子阱，方面上具有良好的优越性能。该设备集成了各种自动化科学控制技术、材料生长技术等方面的有点，是半导体材料生长的主要设备，其自动化程度高、生长材料结构精细，但其成本、维护和使用昂

贵。目前已大量用于 GaN、GaAs 基和 InP 基半导体光电子器件的外延结构材料生长上；是半导体行业最重要和最具备核心技术的专用设备。目前在应用的 MOCVD 设备主要有 AIXTRON 和 VEECO 这两大厂商生产。

MOCVD 采用 II 族、III 族的金属有机源（MO 源，Al、Ga、In 的甲基或乙基化合物）和 V 族、VI 族的氢化物作为生长源，生长源在腔体内由于高温分解反应形成特定的化合物半导体材料。生长源通过气体的精确携带至反应腔体内。

MOCVD 基本化学反应式：



其中 M、X 分别为 III 族和 V 族元素，R 为有机基团，n 为整数。如 GaAs、InP 材料的生长反应式：

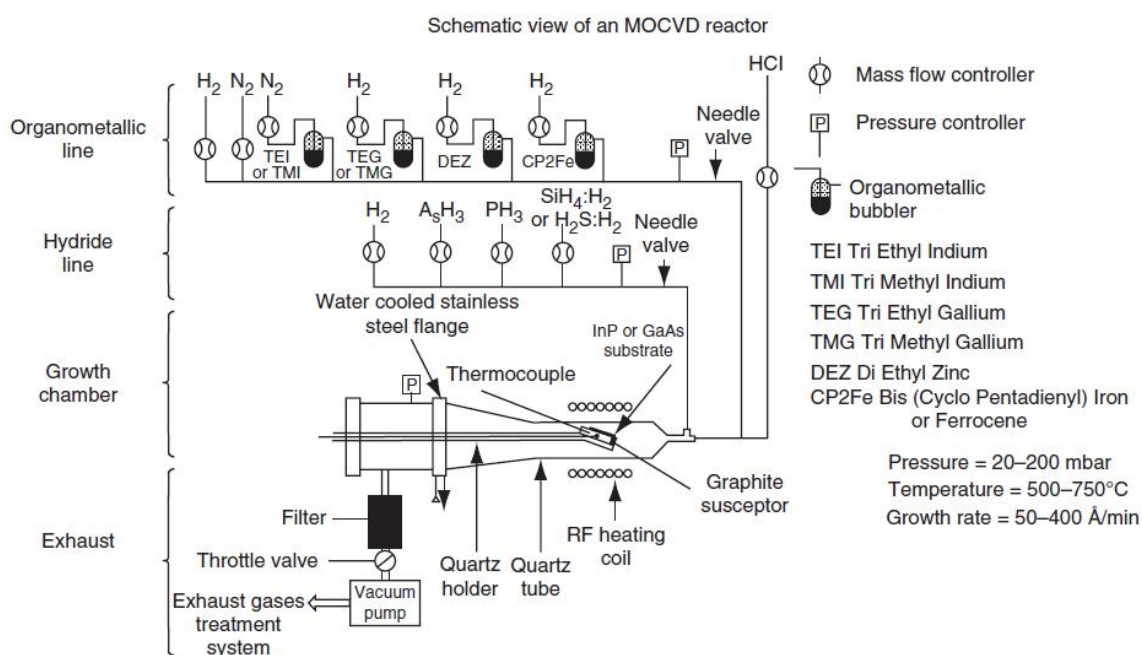
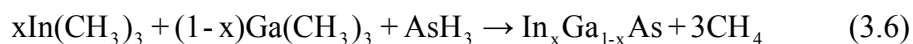
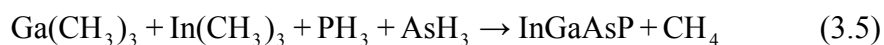
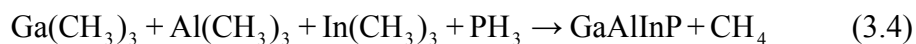


图 3.3 MOCVD 反应腔体示意图

图 3.3 为 MOCVD 反应腔体示意图, MOCVD 生长 InP 基材料时, III 族源采用: 三甲基镓 (TMGa), 三乙基 (TEGa), 三甲基铟 (TMIn), 三甲基铝 (TMAI); V 族源采用砷烷 (AsH_3)、磷烷 (PH_3)。硅烷 (SiH_4), 二乙基锌 (DEZn) 分别作为两种不同的掺杂源材料。相应的材料表征方法有: X 射线衍射 (XRD, 晶体), Hall (载流子浓度), ECV (掺杂浓度), PL (发光均匀性)。

MO 外延生长技术有如下的优点: (1) 精确控制反应源的比例来实现组分精确的化合物材料生长。(2) 通过改变金属有机物的量, 可以实现大范围内的生长速率可控, 既可以生长体材料, 也可以生长厚度精确的量子阱结构。(3) 反应腔体温度在较大范围内可调, 容易制备不同材料体系半导体材料。(4) 外延材料生长质量好、均匀性好, 易于掺杂, 适用于产业化生产和科学研究。

3.2 光刻工艺

光刻是一种设计图形转移的过程, 转移媒介为光刻版, 转移物体为待加工的半导体。这些几何图形确定了半导体激光器中的各种区域, 如脊型波导形成区域、介质层开孔区域、金属膜区域。经过光刻相应后的图形, 通过干法和湿法等工艺转移至待被加工物体上。

常规的半导体芯片制备过程中所采用的光刻设备, 其曝光光源多数在紫外波段, 其分辨率大概在微米或亚微米量级。光刻是半导体芯片微纳加工的关键工艺, 其光刻结构的精度对加工芯片的性能有重要影响。其中对光刻结果有直接影响的主要是: 洁净室、光刻设备、掩膜版、光刻工艺方法等。

在半导体芯片或集成电路等制备过程, 对环境的洁净度有一定的要求, 空气中的尘埃颗粒或由于人员走动而引起的尘埃等, 会随机地落到半导体材料的表面, 引起了材料生长的位错, 同时可以落在芯片表面、光刻胶表面、掩膜版表面等区域, 都会对光刻的结果产生影响, 而影响到产品的可靠性。半导体工艺洁净室必须要严格控制尘埃粒子数、环境的温度、环境的湿度等。

目前洁净厂房的洁净度等级标准, 依据国家标准 (GB50073-2001), 其等同于国际标准 ISO1466-1 中的规定, 洁净厂房内空气中悬浮粒子及其洁净度等级见下表, 同时在实际过程中通常为了降低人员走动而引起的尘埃颗粒增加, 采用在洁净室地面做架空层的办法。

表 3.1 空气洁净度等级

洁净度等级	尘埃最大允许数/m ³		微生物最大允许数	
	≥0.5μm	≥5μm	浮游菌/m ³	沉降菌/皿.30min
100 级	3500	0	5	1
10000 级	350000	2000	100	3
100000 级	3500000	20000	500	10
300000 级	10500000	60000	-	15

光刻的光刻机是专门用于半导体芯片制备过程中光刻的设备，目前半导体激光器、LED 等半导体光电子芯片制备使用的主流光刻机是 SUSS MA6 光刻机，该设备有如下的优点：

- (1) 准确的高精度间距设置，可实现更高的良率
- (2) 工艺参数可存储调用，节省再设置的时间并提高工艺的一致性
- (3) 高质量的曝光系统：采用低衍射镜头，可实现高分辨率和极佳的厚胶边缘质量
- (4) 高亮度光源，可减少工艺时间
- (5) 智能曝光控制单元，可显示光源强度与寿命
- (6) 原位单面或双面对准，可选用特定的紫外固化波长。背面对准目前已经是一个重要的技术手段，特别是在微系统技术领域拥有重要的应用。
- (7) 能实现对不同尺寸和不规则样品尺寸的光刻。
- (8) 设备可以实现 0.7μm 的分辨率，正面对准精度+/-0.5μm，曝光面积达到 150mm×150mm。

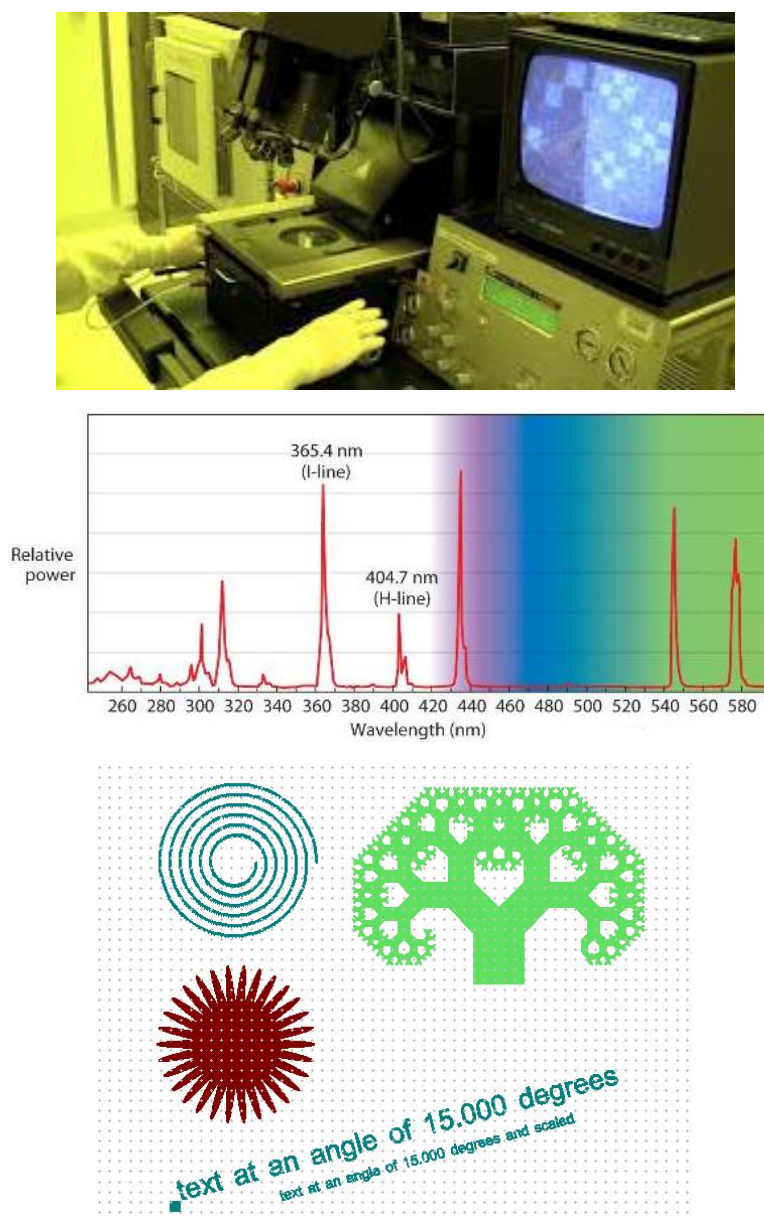


图 3.4 MA6 光刻机及其典型曝光汞灯光谱、掩膜图形

如图 3.4 所示为典型光刻汞灯光谱，其光谱主要分布在紫光 and 紫外部分，其光谱中主要用到的谱线有 G-line、H-line、I-line 这三种，其波长分别在 436nm、405nm、365nm 左右。其中半导体工艺中常用的 AZ 系列胶（如 5214）、SPR 系列胶（如 955）等都对 I-line 敏感，部分对 G-line 和 H-line 敏感。

常规光刻工艺要用到的就是掩膜，在制作掩膜时通常采用计算机辅助设计系统完整地描绘要实现的图形和功能，用 CAD 产生的数据来驱动图形发生器，即电子束光刻系统，将图形转移至对电子束敏感的掩膜层上，通常掩膜是由镀有铬金

属的玻璃制成，将图形转移至掩膜上的铬层，对图形区域的铬层进行处理即可以得到掩膜。通常掩膜图形的绘制和设计采用软件的选择也较多，可以根据具体情况来选取，同时在掩膜设计上，可以结合模拟等数据产生方法来实现多种不同结构图形掩膜的制备。如上图所示为：不同形状的掩膜图形；在实际的试验过程中掩膜版的图形精度也影响到了试验结果的精度。

常规 InP 激光器芯片主要有这几个工序步骤：InP 外延片清洗，旋涂增粘剂和光刻胶，曝光前软烘，去除片子边缘厚胶，光刻对准和曝光，显影前后烘，显影，显影后硬烘。

(1) 清洗：常规半导体清洗工艺主要是为了去除样品表面的污染物，如：颗粒、有机物、工艺残留物、离子等。此外进一步对样品表面用氮气吹干或烘干能去除样品表面水蒸气降低样品表面的亲水性，提高胶的粘附性；常规半导体清洗根据清洗液的特性，一般采用丙酮、异丙醇加热清洗，接着去离子水冲洗、氮气吹干等工序。

(2) 旋涂增粘剂和光刻胶：通常在样品表面涂上光刻胶之前一般会在样品表面涂一层 HMDS，HMDS 增加了光刻胶与基底材料的附着性，避免样品表面涂覆光刻胶不均匀或者是样品表面出现无光刻胶区域，其中光刻胶在样品表面覆盖的情况与匀胶工艺相关。其中决定匀胶因素的主要有两方面：匀胶厚度和胶均匀性。匀胶厚度与胶状态、黏附性、转速、时间等因素相关。另一方面，匀胶速度越快、时间长都对提高匀胶的均匀性有帮助。

(3) 曝光前软烘：该步骤为对胶的进一步处理提高黏附性；另一方面经过软烘后胶膜一定程度地变硬，能降低光刻胶对掩膜版的脏污情况，提高掩膜使用寿命。

(4) 边缘厚胶的去除：常规的匀胶会在片子的边缘形成胶厚的问题以及片子底部边缘粘有光刻胶的问题；这种厚胶边缘可能会影响芯片与版之间对准时的平行度，从而影响曝光的对准，常规下可以不考虑去除厚胶边，但当这种情况对光刻结果有严重影响时，应该考虑去除这种厚胶边缘。常规的去掉样品厚胶边的方法有：采用化学溶液如用棉签蘸丙酮溶液小心擦除样品边缘的厚胶；采用曝光的方法，对边缘胶进行曝光而通过常规显影去除。

(5) 光刻对准和曝光：光刻的对准和曝光是该工艺最主要的过程。对准或套刻是在片子是依据一定的位置来进行对齐，特别是在多次光刻工艺中，对光刻线条的位置有很高精度的要求这种情况下一般要求有一个物理位置上的标记作为参考，

来进行光刻的对准。常规的对准标记有：晶向解离变，这种标记能节约芯片，但有对准精度又依赖与解离边的精确度。最为常见的是芯片上标记，这种标记常见的有：十字形、千分尺以及偏移量查看标记，这些标记的制作要参考多方面的因素，因根据具体的设备条件、工艺能力、以及芯片自身的工艺精度要求来定。在曝光过程中我们要对曝光的能量和时间进行优化和监控，良好的曝光结构图形清洗无残留。一般曝光方法有：接触、真空、投影曝光等。接触曝光：该方法光刻版和光刻胶直接接触，曝光结果的分辨率高，但影响版的使用寿命。真空曝光：曝光时版与光刻胶之间有一段距离，提高掩膜版使用次数，但工艺结果相对较差，特别是小线条的光刻结果。投影曝光：在光刻版和胶之间采用聚焦透镜，提高了分辨率，但设备结构复杂价格昂贵。另外降低曝光波长和采用电子束光刻等工艺技术也可以实现良好的工艺线条，然而由于光刻过程相对较为复杂，效率相对偏低，设备价格昂贵，不利于产业化。

(6) 显影前后烘：热板 110-130℃，1min，后烘的目的是减小光刻时的驻波效应；同时使曝光区域光刻胶能溶解于显影液。

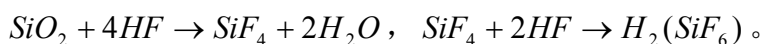
(7) 显影：形成图形结构。显影应控制合理时间不宜过长，过长容易导致图形变形甚至需要返工。而如果显影时间不够，则曝光区域残留光刻胶，容易对后续工艺产生影响，同时显影时间不够还容易引起曝光边缘光刻胶侧壁不垂直。

(8) 硬烘：热板 100-130℃，1-2min，硬烘的目的一般是蒸发掉光刻胶内残留的溶剂，同时对光刻胶进行坚膜，提高光刻胶在后续工艺的掩膜能力，同时进一步提高与基底的黏附能力。

3.3 湿法腐蚀和刻蚀工艺

湿法腐蚀和干法刻蚀是激光器芯片制备过程重要的工艺，通过湿法和干法工艺对材料进行加工形成具有特定功能的结构。

在 InP 激光器芯片加工过程中湿法腐蚀主要是采用特定浓度和配比的溶液在特定的温度下对特定图形区域的材料进行化学性腐蚀，达到所需结构的一个过程。湿法工艺通常与腐蚀的温度、浓度、工艺方法等相关。通常对腐蚀温度敏感的腐蚀材料，一般在恒温水域中进行控温腐蚀；而对浓度敏感的腐蚀材料，通常对腐蚀液进行稀释，提高工艺控制窗口。如 SiO₂ 在 HF 溶液中腐蚀的反应情况为：



湿法腐蚀在半导体工艺中使用也较为广泛，其成本相对低，主要为化学液体，可以实现稳定的工业化批量生产，对湿法设备相对也要求简单，但对危险腐蚀液的腐蚀过程应严格遵照科学腐蚀过程，避免发生危险，湿法腐蚀一般呈现各向同性的腐蚀特定。但湿法也存在其缺点，特别是对腐蚀各向异性有很高要求的工艺过程，湿法腐蚀不适合；此外，湿法腐蚀过程由于溶液中液体的浓度无法保证完全均匀、溶液的温度也有所差异，以及液体的流动情况等各方面因素综合，使得湿法腐蚀的结果往往均匀性偏差。因此对于制备亚微米和纳米量级图形尺寸的时候，容易造成线条的不均匀，影响实验结果。

总体来说，与干法腐蚀相比湿法腐蚀具有如下的优缺点；优点：腐蚀过程容易进行，对设备要求不高，易于实现，成本低；缺点：腐蚀过程各向异性较难控制，同时腐蚀过程容易不均匀，对于腐蚀高精度线条容易产生较大的误差。在半导体激光器制备过程中，因根据具体的情况，综合的考虑和分析。如表 3.2 为常见的激光器材料系的湿法腐蚀工艺和具体备注。

表 3.2 常见材料湿法腐蚀表

材料	腐蚀溶液	备注
光刻胶	KOH、丙酮	
SiO ₂	HF(49%)	腐蚀速率依赖于膜的致密性、掺杂等因素
	BOE	速率为纯 HF 的 1/20，速率依赖致密性和掺杂
SiN _x	HF(49%)	各项同性，对 SiO ₂ 有选择性，对 Si 没有
GaAs 及相关化合物: GaAs, AlGaAs, AlGaInAs	H ₂ SO ₄ :H ₂ O ₂ :H ₂ O 4:1:1 3:1:1 3:1:1	腐蚀速率快，腐蚀边缘呈弧形 50℃, 3.1um/min 50℃, 3um/min 0℃, 1um/5min
	H ₃ PO ₄ :H ₂ O ₂ :H ₂ O 3:1:50 1:1:35	室温下，腐蚀半绝缘或 n 型材料 73~75nm/min 98~100nm/min
	HCl:H ₂ O ₂ :H ₂ O 15:5:80	室温下，腐蚀半绝缘或 n 型材料 85-90nm/min
	饱和溴水:HBr:H ₂ O 1:1:0.5	室温下，腐蚀半绝缘或 n 型材料其中 n-GaAs 腐蚀深度随腐蚀时间的增加而趋向平缓 第一分钟：118nm

	1:1:1 1:1:2 1:1:3	第一分钟: 112nm 第一分钟: 120nm 第一分钟: >60nm
	HCl:H ₂ O 2.8:1 2.9:1 3:1	腐蚀 InP, 不腐蚀 GaAs, 对含 Al 组分小于 0.2 材料不腐蚀, 含 Al 组分增加其腐蚀速率增强, 对 In _{0.52} Al _{0.48} As 室温腐蚀速率如下: 13.8nm/s 12.1nm/s 11nm/s
InP 及相关 化合物: InP, AlGaInP	饱和溴水:HBr:H ₂ O 1:17:510 10:17:120	腐蚀温度 20~23℃ 第一分钟 28nm 第一分钟 126nm
	HCl:H ₃ PO ₄ :H ₂ O ₂ 1:1:1	腐蚀温度 20~23℃ 390~400nm/min
	HCl:H ₃ PO ₄ :H ₂ O HCl:H ₃ PO ₄	腐蚀 InP, 但不腐蚀 InGaAsP
	HCl:H ₂ O ₂ 1:1	腐蚀 InP 速率要远大于 InGaAsP 速率
	HBr:HNO ₃ 1:1	腐蚀 InGaAsP 速率要远大于 InP 速率
	HBr:HNO ₃ :H ₂ O 1:1:5	腐蚀 InGaAsP 速率要远大于 InP 速率
GaP, InGaP	HCl:HNO ₃ :H ₂ O 2:1:2	室温下, 腐蚀速率: 185~200nm/min
	HCl:H ₃ PO ₄ :H ₂ O 1:1:1	室温下, 腐蚀速率: 100nm/min

常规采用化学腐蚀液腐蚀一般都呈现出各向同性, 在进行图形转移时, 各向同性有个缺点就是在图形以外的区域存在横向腐蚀的情况; 为了提高芯片制备过程中良好的各向异性, 实现高笔直度的刻蚀结果, 人们采用干法刻蚀。干法刻蚀: 在高频电场下, 刻蚀气体被激发成等离子体, 并对待刻薄膜的表面进行物理撞击和化学反应的刻蚀过程, 实现刻蚀的目的。与湿法相比干法刻蚀选择比和各向异性良好能形成笔直的刻蚀结构, 此外其设备和使用成本也相对较高。

目前半导体芯片加工过程中使用较多较常见的干法设备有：反应离子刻蚀（Reactive Ion Etching, RIE），感应耦合等离子刻蚀（Inductively Coupled Plasma, ICP）。干法刻蚀由于其具有良好的选择比，因此在实际半导体激光器制备过程中常用光刻胶、SiO₂ 等作为掩膜对 SiO₂、InP 等材料进行刻蚀，此外还可以单独对光刻胶进行干法刻蚀，同时刻蚀的侧壁笔直性良好。RIE 和 ICP 刻蚀的比较：①RIE 刻蚀离子密度低，ICP 可以实现高离子密度；②RIE 刻蚀离子密度和离子能量不可控，ICP 通过控制射频功率实现离子的可调可控；③RIE 刻蚀离子能量低，刻蚀速率低；ICP 刻蚀特别是在低压下，ICP 也可通过保持高离子流量来维持刻蚀速率。如下表为常用半导体激光器的干法刻蚀气体及其说明。

表 3.3 常见材料干法刻蚀气体表

材料	刻蚀气体	备注
光刻胶	O ₂	对其他薄膜选择性高
SiO ₂	SF ₆ , CF ₄ /O ₂ , CF ₄	接近各向同性，增大离子能量或降低起亚能改善给相同性程度
	CF ₄ /H ₂ , CHF ₃ /O ₂ , C ₂ F ₆	非常各向同性
	CHF ₃ /C ₄ F ₈ , CO	各向同性
SiN _x	CF ₄ /O ₂	各项同性，对 SiO ₂ 有选择性，对 Si 没有
	CF ₄ /H ₂	非常各项异性，对 SiO ₂ 没有选择性
	CHF ₃ /O ₂ , C ₂ H ₂ F ₂	非常各项异性，对 SiO ₂ 和 Si 都有选择性
InP/InGaAs/InGaAsP	CH ₄ /H ₂	对其他薄膜选择性高
Si	SF ₆ , CF ₄	各向同性或接近各向同性
	CF ₄ /O ₂	各向同性或接近各向同性
GaAs	CCl ₄ /SF ₆ , BCl ₃ /SF ₆	对其他薄膜选择性高

3.4 薄膜工艺

薄膜材料是材料科学中一个重要的方向；薄膜材料是采用不同的设备和工艺过程再衬底基片上沉积一层具有微纳米量级厚度和特定功能材料，其材料的性质可与衬底材料相同或不同，通过对材料进行组合可以实现不同的功能。薄膜材料迅速发展主要有如下原因：（1）随着微纳工艺的进步，薄膜材料可实现的生长材

料种类越多，同时通过合理设计和匹配其可以实现更多的功能。（2）薄膜是科学研究的热点，通过对薄膜进行各种方法的调控可以实现一些原本所不具备的功能。

（3）此外在已有的应用领域上薄膜及其组合可以实现越来越多的应用功能。如今薄膜的应用领域越来越多如：光学镜头、太阳能、各种隔热和导热薄膜、汽车玻璃薄膜等等。

在半导体器件工艺过程中，薄膜也是一种较为常见和重要的工艺，半导体激光器中的薄膜主要有三个方面：（1）用于激光器芯片及其制备过程中的介质膜和钝化膜，常见的有： SiO_2 和 SiN_x 膜；（2）用于电接触和载流子注入的金属膜，常见的有：Ti、Pt、Au、Cr、Ni、GeAu 等金属；（3）用于半导体腔面的光学膜系，常见的有：Si、 Al_2O_3 、SiO 等。在这里我们主要介绍介质膜和金属膜的工艺过程，而光学膜系的设计和工艺后续将着重讨论。

3.4.1 PECVD 沉积 SiO_2 、 SiN_x 工艺

PECVD^[49,50]（等离子体增强化学气相沉积）为在生长腔体内反应气体在等离子体作用下，在被加热衬底表面发生化学反应形成薄膜的一个过程。PECVD 由于等离子独特的作用使得在较低温度下也可以沉积，这种特点使得 PECVD 被大量应用在半导体加工过程中，低温生长避免了温度对材料质量的二次破坏，同时薄膜具有良好的覆盖性能，特别是对台阶结构，容易实现批量化生产；但对设备投入要求高、对气体纯度要求高。

图 3.5 所示为 PECVD 设备结构示意图。气体通过上电极的喷淋头进入腔体，在高频电场作用下，生成等离子体，与置于下电极的加热样品反应生成介质薄膜。

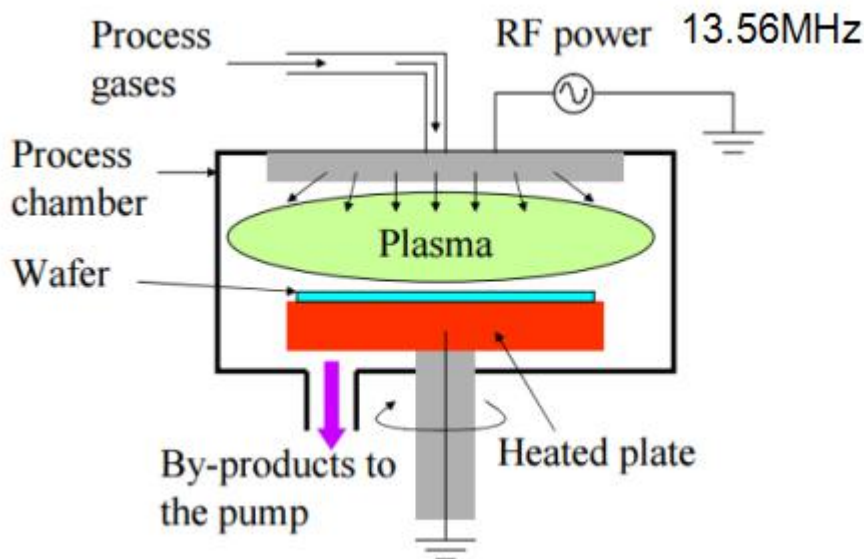
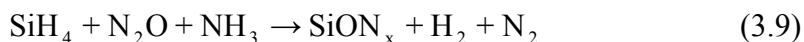
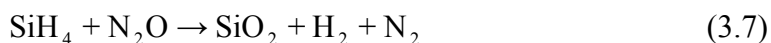


图 3.5 PECVD 设备结构示意图

常规 PECVD 生长工艺过程中需要用到如下气体： N_2 、 N_2O 、 NH_3 、5% SiH_4/N_2 、80% $\text{CF}_4/20\%\text{O}_2$ 。其主要可用于沉积这几种薄膜： SiO_2 、 SiN_x 、 SiON_x 、a-Si。其主要反应过程如下式所示：



其中常用 SiO_2 和 SiN_x 的厚度不一样其颜色也将变化，如表 3.4 和表 3.5 所示分别为不同厚度的氮化硅与氧化硅的颜色对比表。在实际工艺过程中我们可以根据厚度和颜色的关系来合理判断生长的介质膜厚度是否有比较大的偏差，同时通过观察整片的颜色是否均匀来判断生长的厚度是否有过大的不均匀性。在实际工艺过程中可以采用椭偏仪等手段对生长薄膜的折射率、厚度、均匀性进行监控，此外可以采用 HF 或 BOE 等腐蚀溶液对生长介质层进行腐蚀，以此来反馈介质层的材料密度和生长质量。

表 3.4 不同厚度氮化硅与颜色对比表

厚度(nm)	颜色	厚度(nm)	颜色
0-20	硅本色	130-150	黄色
20-40	褐色	150-180	橙黄色
40-50	黄褐色	180-190	红色
55-73	红色	190-210	深红色
73-77	深蓝色	210-230	蓝色
77-93	蓝色	230-250	蓝绿色
93-100	淡蓝色	250-280	浅绿色
100-110	极淡蓝色	280-300	橙黄色
110-120	硅本色	300-330	红色
120-130	淡黄色		

表 3.5 不同厚度氧化硅与颜色对比表

厚度(nm)	颜色	厚度(nm)	颜色
50	棕褐色	345	绿色
75	棕色	350	绿色到黄绿色
100	紫红色	365	黄绿色
125	蓝色	375	黄绿色
150	浅蓝至金属蓝	390	黄色
175	浅黄绿色	412	橙色
200	浅黄色	426	粉红色
225	浅橙黄色	443	紫红色
250	橙黄色	465	红紫色
275	红紫色	480	蓝紫色
300	蓝色到蓝紫色	520	绿色
310	蓝色	560	绿黄色
325	蓝色到蓝绿色	600	粉红色

3.4.2 金属薄膜工艺

常规半导体激光器制备过程中主要采用如下几种方法进行激光器管芯的电极金属制备：热蒸发、电子束蒸发、磁控溅射、电镀。

热蒸发：在真空腔体内，通过电阻加热的方式使待蒸发金属材料熔化和蒸发，蒸发金属原子沉积在衬底表面形成金属薄膜。这种传统电阻加热的蒸发方式具有设备相对简单实用成本低等优点；但该方法加热温度有限，无法实现高熔点材料的蒸发，此外热蒸发通过控制电阻加热来蒸发，蒸发速率与加热温度相关，无法精细控制，并且存在蒸发物与坩埚反应的现象。

电子束蒸发：在生长腔体内，电子束打到蒸发源表面，使其融化并蒸发，沉积到样品表面。这种加热方法与传统的热蒸发有明显的区别。首先电子束能量高，能蒸发熔点更高的材料，同时其加热时只对局部材料进行加热，可以通过对电子束束斑的精确控制，来避免电子束打到坩埚上使得坩埚产生反应，这对于制备高纯度薄膜是重要的一方面因素；电子束蒸发过程中可以通过晶振片探测膜厚。但电子束蒸发设备相对来说结构更加复杂、成本相对较高；蒸发过程可使腔内残余气体电离，影响薄膜质量；蒸发过程产生的射线对人体有一定的影响。

溅射金属：真空中等离子体产生氩离子，其在电场作用下加速撞击待蒸发金属靶材，被撞击出来的靶材金属溅射到样品的表面。磁控溅射具有如下优点：能沉积复杂的合金材料、难熔金属和非金属；对于大部分材料，只要可以制成靶材，就可以采用磁控溅射工艺；磁控溅射出的金属原子加速向衬底运动使得金属薄膜与基底的结合性能较好，磁控溅射的这种过程使得蒸镀的金属膜致密性和均匀性好，并且台阶覆盖好；此外，可以实现不同材料的混合溅射，也易于实现产业化等；但磁控溅射其靶材溅射沉积速率偏低。

电镀金属：金属电镀加工技术已有较长的一段历史；电镀是指在含有欲镀金属的溶液中，通过电解离的方式，使溶液中金属离子在被镀衬底表面形成金属薄膜的一种过程法。可以采用电镀方法实现蒸镀的金属很多，在半导体芯片制备过程中的金属如：钛、铂、金、锗、镍等；此外，电镀不仅可以实现单种金属的蒸镀工艺，还可以实现多种金属的蒸镀。金属的电镀在实际应用过程中一般有如下几个方面的作用：对被镀样品起到防腐蚀、防磨损作用；对被镀样品起到导电或绝缘的性能等。电镀设备通常由五部分组成：阴极阳极（待镀的金属和被镀的样品）、电镀溶液、电镀槽、整流器（还原溶液金属离子并沉积）。

电镀也是半导体激光器中镀金属电极的一种工艺，但并不是最常见的一种金属工艺；其具备金属利用率高、容易实现微米量级的厚金属工艺；但其电解液需要更换，成本高、同时要实现高精度和高温的金属电镀设备，设备价格昂贵仍然

是一方面因素。

3.5 光学膜系设计

光学膜系主要用在激光器的腔面镀膜，芯片的腔面镀膜是其制备工艺中重要的一个环节^[52-58]；良好的光学膜系设计能实现稳定的激光器镀膜工艺，同时优化的镀膜方案又能为激光器的性能参数留有余量，这对提高管芯的良率具有重要的作用。这里我们着重介绍光学膜系设计的理论原理、试验和理论分析对比的结果。

随着现代科技的发展，光学膜系越来越多地应用到各个领域。在半导体激光器技术领域，光学薄膜技术是一个重要的方向，如何选择合适的材料系，实现器件性能的最大优化是优化半导体激光器性能的一个重要手段。对于半导体激光来说，当激光器沿着晶向解离后，其激光器的前后端面为晶体的光滑解离面；对于 InP 基半导体激光器而言，其前后端面的反射率相等，大致在 28%-30% 左右。当激光器腔面未镀膜，通电后，其前后出光端面的出光功率基本相等；而在实际应用过程中只需要单边出光即可，因此对于激光器来说这种工作方式提高了能耗。为了进一步利用背面出光，人们研究采用在激光器出光的背光端面蒸镀高反射率薄膜，用来将背面出射的光反射回腔内，从而在相同的工作电流下提高了出光功率。对于背光端面的镀膜要求不同的器件大致上一致，其主要有两个作用：（1）保护端面，提高出光；（2）控制背光大小，对于有背光监测功能的器件，背光可以反馈激光器的实际工作情况。对于出光端面来说，不同的器件其出光端面的膜系会有所区别：（1）对于常规的 RWG-FP 激光器来说，出光端面的膜，起到了保护芯片端面的作用，同时通过调整出光端面膜的反射率可以调整芯片的阈值、出光功率等参数，使得器件的工作参数达到实际的需求。（2）对于 DFB 激光器、SLD 等器件，这种出光面镀膜不单要调控出光功率和阈值等参数，同时考虑到的还有如何有效抑制腔面模式的反馈形成多模等因素。（3）对于高速调制器件来说，在保证出光和阈值的前提下，还要考虑的因素有：如何在合理的范围内降低阈值，提高腔内光子密度，降低光子寿命等。

3.5.1 光学膜系理论基础

（1）单层膜情况：

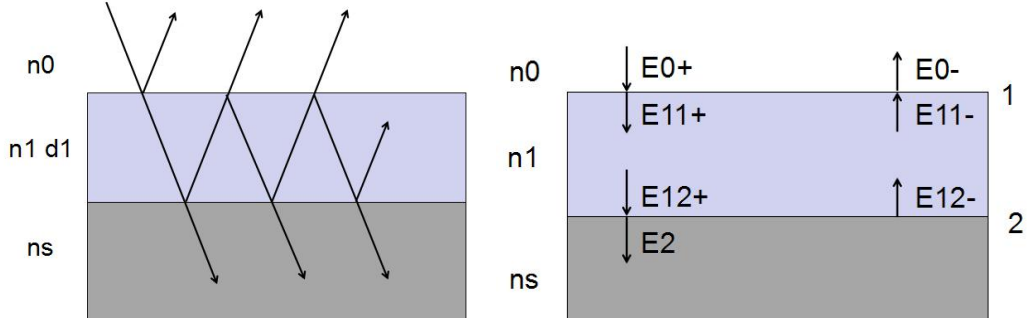


图 3.6 单层薄膜的光入射情况

光是一种电磁波，它的传播可以用电场分量 E 和磁场分量 H 来描述。如图 3.6 所示为光入射至单层膜的情况，其中 n_0 、 n_1 、 n_s 分别为入射介质、薄膜、基底的折射率， d_1 为薄膜的厚度， E 、 H 分别为电场强度和磁场强度，在界面 1 有如下关系，但对于存在非垂直入射的情况我们采用修正导纳来作为折射率在这种情况下近似的修正值，对于垂直情况用折射率替代：

$$E_0 = E_{11}^+ + E_{11}^- \quad (3.11)$$

$$H_0 = H_{11}^+ + H_{11}^- = \eta_1 (E_{11}^+ - E_{11}^-) \quad (3.12)$$

$$E_{11}^+ = E_{12}^+ \exp(i \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1 \cos \theta_1) \quad (3.13)$$

$$E_{11}^- = E_{12}^- \exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1 \cos \theta_1) \quad (3.14)$$

其中则 E_0 和 H_0 可以表示成如下关系：

$$E_0 = E_{12}^+ e^{i\delta_1} + E_{12}^- e^{-i\delta_1} \quad (3.15)$$

$$H_0 = \eta_1 (E_{12}^+ e^{i\delta_1} - E_{12}^- e^{-i\delta_1}) \quad (3.16)$$

其中 $\delta_1 = \frac{n_1 d_1 2\pi}{\lambda} \cos \theta_1$ 为该层膜厚的位相厚度，将上式写成矩阵形式有如下关系式：

$$\begin{bmatrix} E_0 \\ H_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{i\delta_1} & e^{-i\delta_1} \\ \eta_1 e^{i\delta_1} & -\eta_1 e^{-i\delta_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{12}^+ \\ E_{12}^- \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

同样地，在界面 2 有如下的边界条件：

$$E_{12}^+ + E_{12}^- = E_2 \quad (3.18)$$

$$H_{12}^+ + H_{12}^- = H_2 \quad (3.19)$$

$$\eta_1 E_{12}^+ - \eta_1 E_{12}^- = H_2 \quad (3.20)$$

因此我们可以得到:

$$E_{12}^+ = (\eta_1 E_2 + H_2) / 2\eta_1 \quad (3.21)$$

$$E_{12}^- = (\eta_1 E_2 - H_2) / 2\eta_1 \quad (3.22)$$

所以有如下关系式:

$$\begin{bmatrix} E_{12}^+ \\ E_{12}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2\eta_1} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2\eta_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_2 \\ E_1 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

可以得到:

$$\begin{bmatrix} E_0 \\ H_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{i\delta_1} & e^{-i\delta_1} \\ \eta_1 e^{i\delta_1} & -\eta_1 e^{i\delta_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{12}^+ \\ E_{12}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & \frac{i \sin \delta_1}{\eta_1} \\ i\eta_1 \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_2 \\ H_2 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$E_0 \begin{bmatrix} 1 \\ Y \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_s \end{bmatrix} E_2 \quad (3.25)$$

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & \frac{i \sin \delta_1}{\eta_1} \\ i\eta_1 \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_s \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

因此有 $E_0 \begin{bmatrix} 1 \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} E_2$, 其中 M_1 为薄膜的特征矩阵, $\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix}$ 为薄膜和基片组合的特

征矩阵。则反射系数 r 和反射率 R 分别为:

$$r = \frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} = \frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C}, \quad R = \left| \frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right|^2 \quad (3.27)$$

(2) 多层光学薄膜

如下图所示为: 每层膜的电场强度、磁场强度和折射率分布, 1 至 $k+1$ 为 k 层膜包括衬底的各层分界面。对于多层膜, 我们可以先参考单层膜的计算情况。

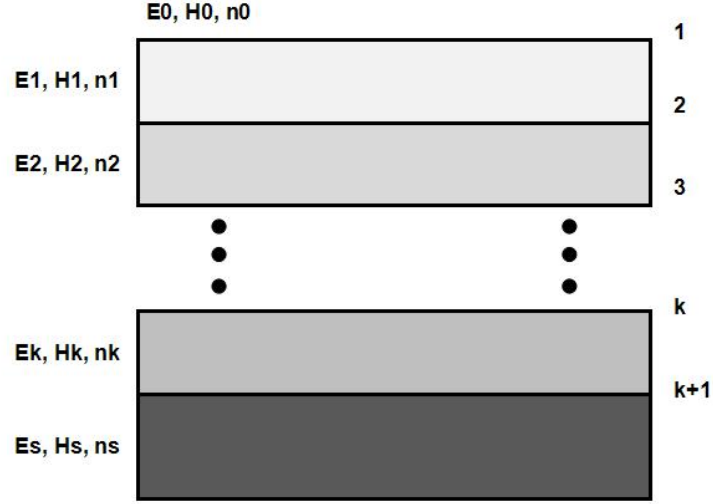


图 3.7 多层膜传输矩阵示意图

根据上述单层膜的特性我们可以得到：

$$\begin{bmatrix} E_0 \\ H_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & \frac{i \sin \delta_1}{\eta_1} \\ i \eta_1 \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_2 \\ H_2 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$$\begin{bmatrix} E_2 \\ H_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_2 & \frac{i \sin \delta_2}{\eta_2} \\ i \eta_2 \sin \delta_2 & \cos \delta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_3 \\ H_3 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

类似地对于 k 层薄膜则有：

$$\begin{bmatrix} E_0 \\ H_0 \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i \sin \delta_j}{n_j} \\ i n_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} E_s \\ H_s \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i \sin \delta_j}{n_j} \\ i n_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ n_s \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

最后得到多层膜的反射率为：

$$R = \left| \frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right|^2 \quad (3.32)$$

3.5.2 增透膜设计

增透膜主要是提高光的透射，其具有较多的应用，如镜片、相机镜头等，相机镜头一般要求人眼敏感的黄光增透最强，而该波长以外的红光和蓝光波长则增

透弱，反射强，因此在日常的生活中光学镜头或镜片我们考到的红光或偏紫光的颜色较多。再如在汽车车窗的玻璃膜，我们总是希望能看清车外面的环境而不希望车外面的人能看清车内的情况，因此车窗薄膜一般采用可见光波段从外面入射进来透射强而反射弱的特点。此外还有许多与我们日常生活息息相关的应用如：汽车后视镜、电视、照明灯。常规应用的增透膜材料一般有：MgF₂、TiO₂、ZnSe、ZnS 等，但实际在应用至 InP 半导体激光器时还应做综合考虑。

(1) 单层光学增透膜设计

单层膜是实现增透膜最简单的一种做法。如下图 3.8 所示，其中 r_1 、 r_2 为光在界面 1 和 2 的反射系数。减反膜要求了反射的光要尽量的小，则说明了反射的光其相互间作用应该是相互抵消的一个结果，使得总体的反射光减弱了。

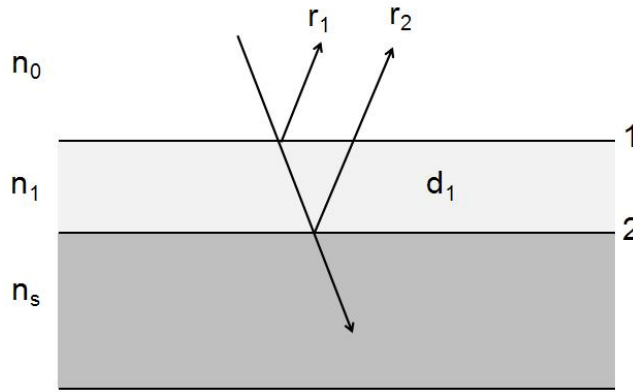


图 3.8 单层高反膜示意图

要使得反射光束产生相干相消则必须要满足两束光的相对相位差为 180° ，即：

$$\delta = d_1 \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\pi}{2} \quad (3.33)$$

则有 $d_1 = \lambda/4$ ，同时反射光束的振幅必须相等，则有：

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} = r_2 = \frac{n_1 - n_s}{n_1 + n_s} \quad (3.34)$$

得到 $n_1 = \sqrt{n_0 n_s}$ ，即要实现单层膜的增透作用，则要求其薄膜光学厚度为四分之一波长，同时折射率接近上述关系式。对于入射介质为空气来说 $n_0=1$ ，则 n_1 可以近似为接近 $\sqrt{n_s}$ 。此时薄膜与基底组合特征矩阵为：

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & \frac{i \sin \delta_1}{\eta_1} \\ i \eta_1 \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_s \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

对于垂直入射的情况其中 $\delta_1=2\pi n_1 d_1/\lambda$ ，则有：

$$R = \left(\frac{n_0 - Y}{n_0 + Y} \right)^2 \quad (3.36)$$

对于常规的半导体激光器，我们要找其有效折射率，则必须最为简便的额方法是对制备后的器件进行光谱测试，根据其模式间隔和腔长我们可以计算其有效折射率。如图 3.9 所示为常规 1310nm FP 激光器的光谱根据其腔长我们可以计算其有效折射率为 3.457 左右；有效折射率对于分析半导体激光器工作时其真实的薄膜反射率具有准确的参考意义。

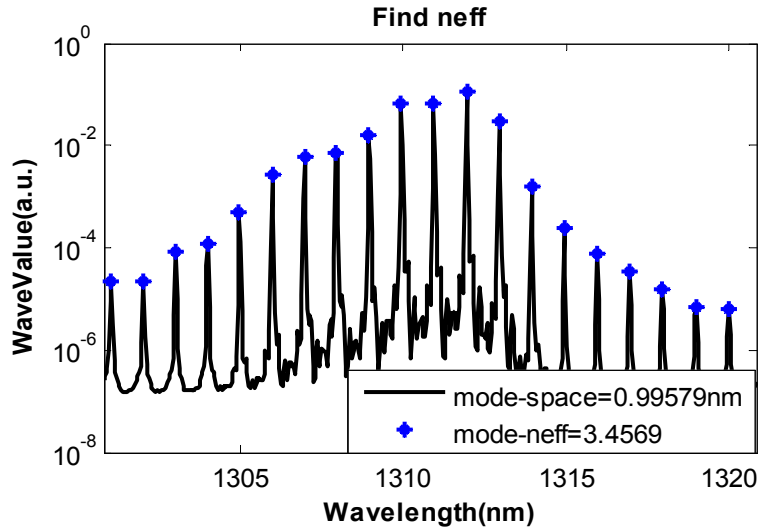


图 3.9 半导体激光器有效折射率计算

对于具体应用的半导体激光器来说，在单层增透膜上，目前我们常规采用较多的为单层 Al_2O_3 膜或者是单层 SiO_2 膜，主要是这两种材料的折射率平方与基底的折射率近似，同时其反射率可调控的空间较大；对于 InP 基半导体激光器不同的公司或研究团队会采用不同的材料，其思考和考虑的出发点也不尽相同，这里我们以最为常用到的材料为例，着重讨论激光器光学增透膜的设计思路。光学膜设计采用传输矩阵方法，并对制备的薄膜进行理论和试验结果的对比，同时试验的结果又可以反馈给理论，修正使得理论上的分析更加贴近实际；从理论设计到具体试验结果的结合目的是为了实现在更加稳定可控的工艺。

对于实际情况， Al_2O_3 或 SiO_2 膜的折射率是随波长而变化的，在实际的设计和制备中我们也将参考相关文献查询的折射率结果。对于实际的情况，当膜厚为 $\lambda/4n$ 时，则反射率最低；例如在 1310nm 处， Al_2O_3 膜折射率约为 1.6 左右，则当单层 Al_2O_3 膜厚度为 205nm 为左右时在 1310nm 附近有最低的折射率。如图 3.10 所示，从图中可以看出，随着膜厚的增加其最低反射率向长波长方向移动，并且其在 205nm 时在 1310nm 波长附近有最低的反射率大约 2% 左右。此外我们可以看出采用单层 Al_2O_3 膜可以实现在宽波段范围内低的反射率，这对于 DFB 的镀膜来说显得相对比较重要，可以容忍相对较大的膜厚误差。

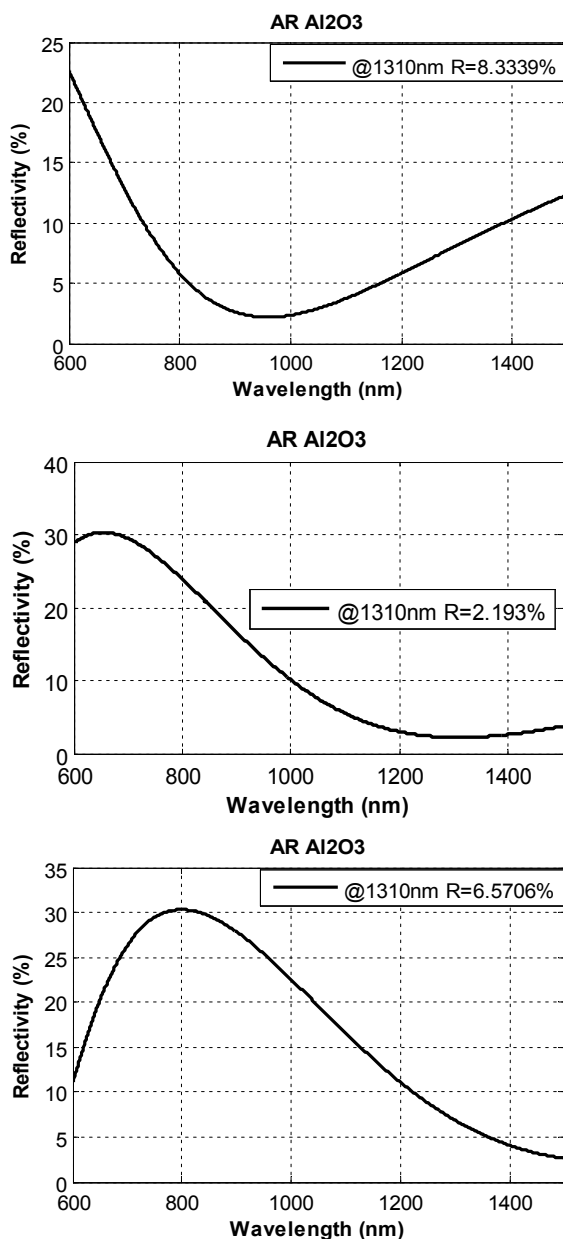


图 3.10 单层 Al_2O_3 膜厚为分别为 150nm、205nm、250nm 时的反射谱

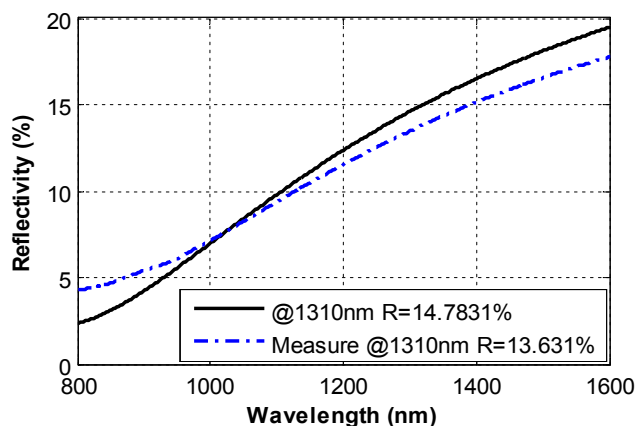


图 3.11 InP 基底上单层 Al_2O_3 膜厚为 120nm 时的实际测量和理论计算反射谱

图 3.11 为单层 Al_2O_3 膜厚为 120nm 时的实际测试和理论计算反射率曲线图，从图中可以看出，实际测量值和计算值的反射率基本相近。

由于 SiO 的折射率在 1.8-1.9 左右，其折射率平方接近基底折射率，因此从理论上可以得到更低的反射率，这对于要求严格的半导体器件如 SLD、DFB 等具有重要的应用意义。如下图所示，单层 SiO 膜为 $\lambda/(4 \cdot n_{\text{SiO}})$ 约 177nm，其中 $\lambda=1310\text{nm}$ ，则在 1310nm 波长处有最低的反射率可以实现低于 1% 的反射率。图 3.12 中可以看出单层 SiO 可以实现较低的反射率，但对其膜厚的精度要求就相对较高。

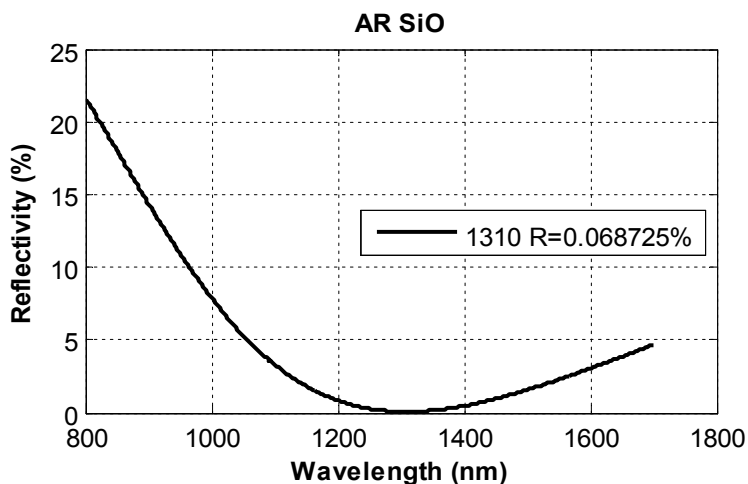


图 3.12 InP 基底上单层 SiO 反射谱

(2) 双层光学增透膜设计

双层增透膜要实现低反射率，理论上光从空气入射到衬底，其各层膜的折射率要逐层增加。如下图所示为采用一对的 Si/ Al_2O_3 膜，其反射曲线图，从图中可以

看出去反射率可以实现 1% 左右，但采用双层膜，增加了制备工艺的复杂性，同时采用膜层越多其对光的损耗和吸收可能越多。在实际的应用中，半导体激光器增透膜系的选择应该根据具体的应用情况和实际的工艺能力合理地选择。

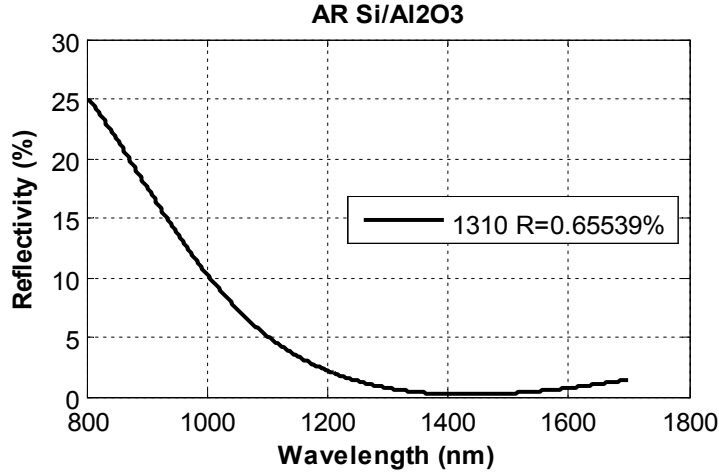


图 3.13 采用一对 Si/Al₂O₃ 膜的反射曲线图

3.5.3 高反膜设计

一般半导体激光器腔面高反膜采用高低折射率组合的薄膜结构，常用的光学薄膜材料有：Si、Ta₂O₅、Al₂O₃、SiO 膜等。当光线正入射到一个 n 层 λ/4 介质膜对的组合时，具有如下关系：

$$Y = \frac{n_1^2 n_3^2 n_5^2 \dots n_k^2}{n_2^2 n_4^2 n_6^2 \dots n_{k-1}^2 n_s} \quad (n \text{ 为奇数}) \quad (3.37)$$

$$Y = \frac{n_1^2 n_3^2 n_5^2 \dots n_{k-1}^2 n_s}{n_2^2 n_4^2 n_6^2 \dots n_k^2} \quad (n \text{ 为偶数}) \quad (3.38)$$

典型的高反膜就是由这种高-低折射率 λ/4 膜厚交替组合。假设高低折射率薄膜的折射率值分别为：n_H、n_L。则膜层的组合导纳分别为，其中 m 为整数，2m、2m+1 分别对偶奇数层膜和奇数层膜。

$$Y_{2m} = \left(\frac{n_H}{n_L} \right)^{2m} n_s \quad (3.39)$$

$$Y_{2m+1} = \left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2m} \frac{n_H^2}{n_s} \quad (3.40)$$

其在中心波长 λ_0 处对应的反射率分别为：

$$R_{2m} = \left| \frac{1 - \frac{n_s}{n_0} \left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2m}}{1 + \frac{n_s}{n_0} \left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2m}} \right|^2 \quad (3.41)$$

$$R_{2m+1} = \left| \frac{1 - \frac{n_H}{n_0 n_s} \left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2m}}{1 + \frac{n_H}{n_0 n_s} \left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2m}} \right|^2 \quad (3.42)$$

因此从理论上来看，两种薄膜的折射率差越大，薄膜对数越多，其反射率越大；但对于实际的情况，由于生长的材料质量、界面条件等因素，膜对数越多并不一定能再提高反射率，可能会由于薄膜损耗、散射等因素导致其反射率降低或者反射率停留在某一水平；同时，另外一方面来说，为了节约工艺设备的时间和成本，在实际工艺制备过程中只选择相对较为适合的工艺。

如图 3.14 为光线入射到 $\lambda/4$ 厚度组成的高低折射率交替膜系，这种膜系可以用符号表示如下，其中 S 、 A 分别为基底和空气， H 、 L 分别为高低折射率膜：

$$S | LHLH \dots LH | A$$

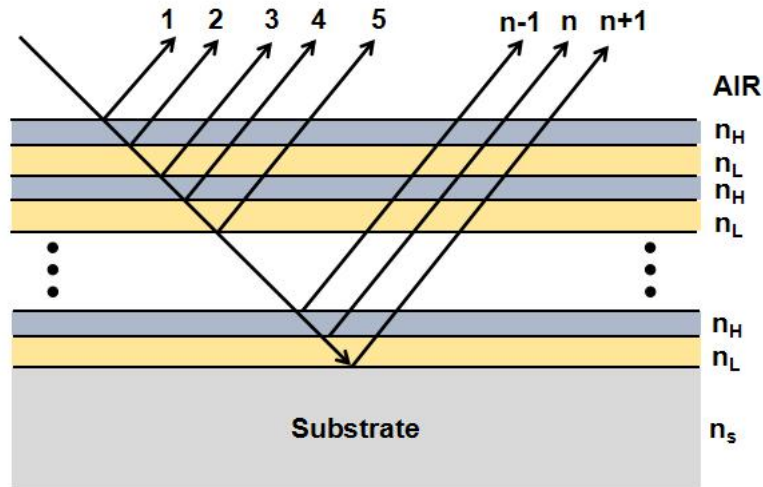


图 3.14 四分之一波长高反膜膜系示意图

如图 3.14，光入射到光学膜系中并在薄膜的界面发生反射，当反射光再回到原表面时，其与原入射光产生了一定的相位差。当光线从光疏至光密其发生 π 的相位跳变；如上图所示，反射光 1 由于从空气入射到薄膜上，会发生 π 的相位跳变，因此反射光 1 和反射光 2 之间的相位差为 0，两束光相位相同，相互干涉使得光强增强；另外图中反射光 3 和 2 之间相位差为 2π ，反射光相互干涉增强；同样地不同反射光束其相位差为 2π 的整数倍，因此整体反射光束相互干涉增强，这就是高低折射率四分之一波长膜系的高反膜原理。

图 3.15 为采用 2 对和 5 对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}$ 四分之一波长（波长 1310nm）高反膜的反射率曲线；从图中可以看出采用膜对数越多其反射率越高，当然实际情况可能由于介质膜的散射、吸收等会使得发射率数值有所差异，同时膜层数增加也提高了工艺的难度。

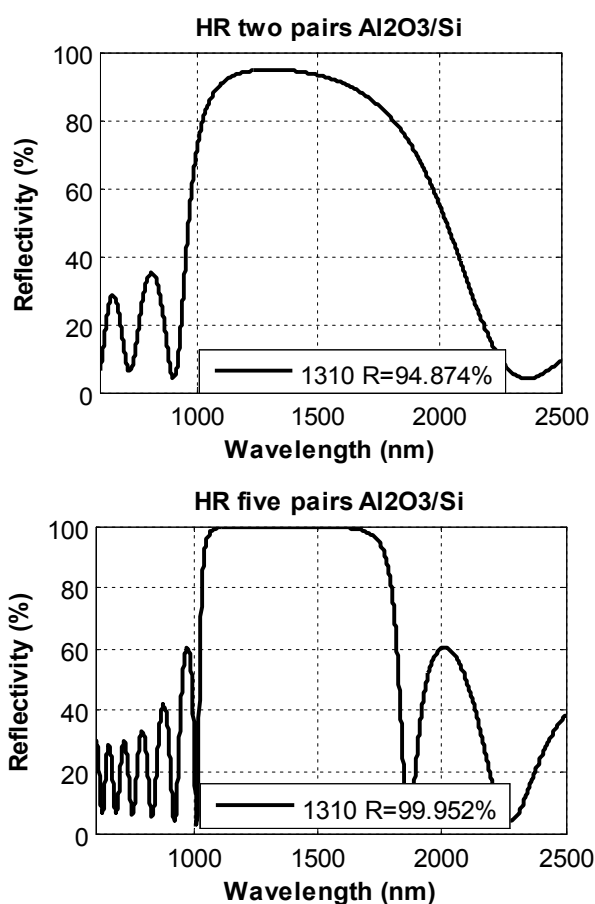


图 3.15 上：采用两对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}$ 膜和下：采用五对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}$ 膜反射曲线

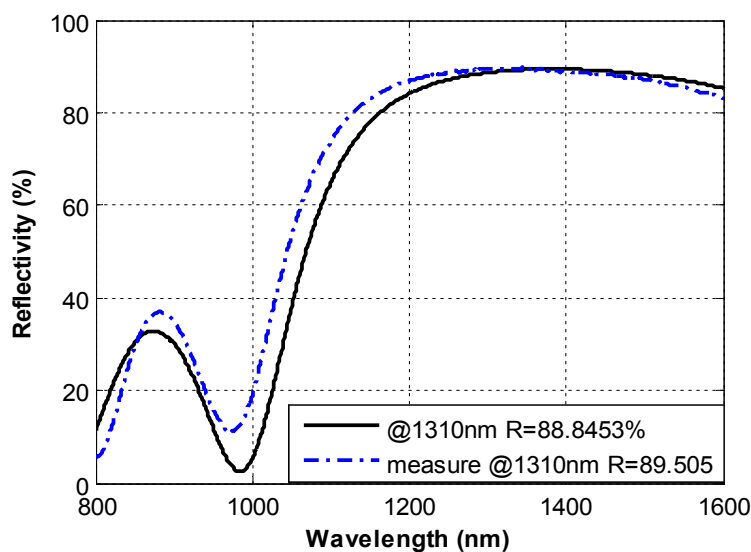


图 3.16 采用两对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}$ 膜 (220nm/117nm) 的理论和实际测试反射率曲线图

图 3.16 为采用两对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}$ 膜 (220nm/117nm) 的理论计算反射曲线和实际测量反射曲线的差异, 从图中可以看出理论和实际试验结果相近, 其在 1310nm 波长处的反射率分别为 88.8% 和 89.5%。当然理论计算和实际测量或多或少会存在差异的, 但为了进一步减小差异, 使得理论计算更加实用地用于指导实际的设计, 我们要对镀膜过程进行校准, 这里面包括: 基底折射率的测试确认; 光学膜系在不同生长条件下的折射率测量确认; 提高镀膜厚度精度等。

3.6 常规激光器工艺过程

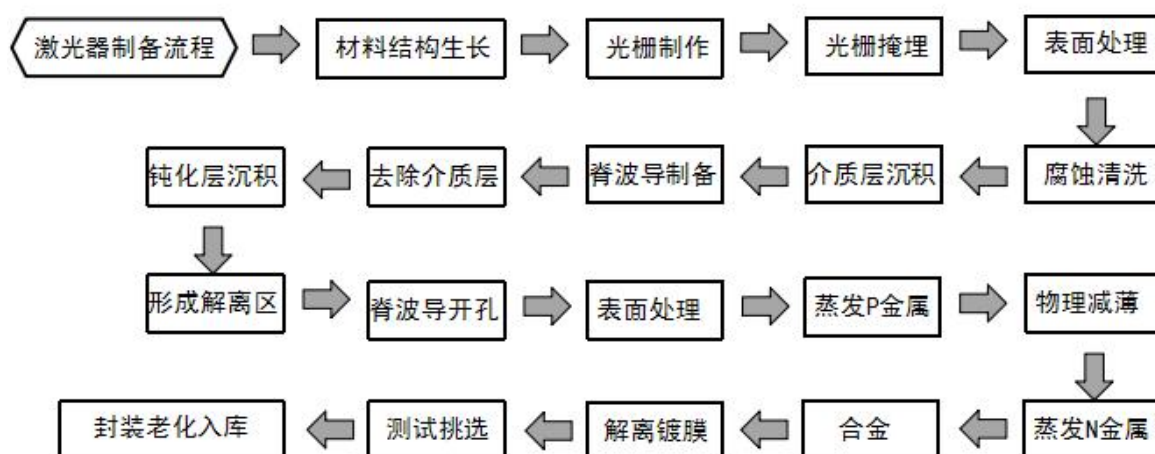


图 3.17 常规激光器流程

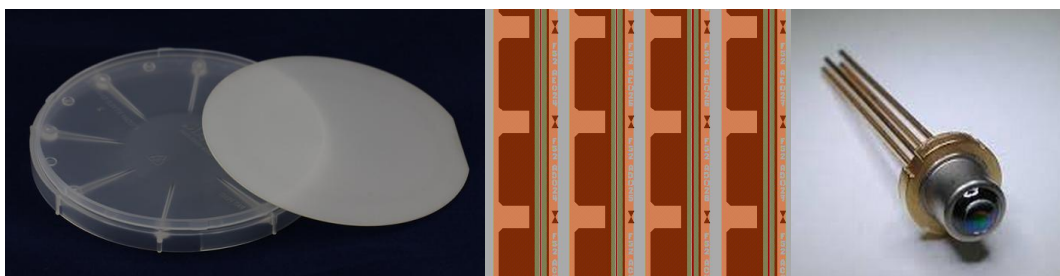


图 3.18 半导体激光器的外延片、芯片和 TO 器件

半导体激光器的工艺制作是一个精细而复杂的过程；如上图所示，常规脊型结构半导体激光器工艺流程大致如下：首先是在金属有机化学气相沉积设备中外延生长具有光学和电学结构的一次外延材料，并对片子进行光栅制备和光栅掩埋生长。接着对基片材料表面进行腐蚀清洗，并对片子表面进行镜检查看其是否有缺陷、脏污等。PECVD 沉积 SiO_2 、 SiN_x 介质膜，对样品进行光刻，接着进行脊型波导腐蚀工艺，并去除样品表面介质层。沉积钝化层，对样品进行光刻，制备解离区域，并对脊型波导进行开孔，介质制备 P 面和 N 面金属，并在 RTA 中进行合金，对制备完的样品，进行 bar 条解离，对 bar 进行端面光学镀膜，后续对样品进行测试解离和挑选完成管芯的初步制备，接着对管芯进行常规 TO 封装，并进行老化和测试，合格样品最后入库。

3.7 小结

本章主要介绍了 InP 基半导体激光器芯片制备的主要工艺过程。汽相沉积 InP 材料的情况；激光器制备光刻工艺的注意点；激光器材料系常用湿法腐蚀和干法刻蚀工艺特点；激光器制备用到的薄膜工艺和腔面光学膜系设计；最后介绍常规激光器工艺流程；便于后续开展激光器芯片制备的工艺。

第四章 高速半导体激光器的研制和分析

在前面的几个章节我们着重对半导体激光器的基本原理和半导体工艺进行了介绍和分析，这为后续本项目的开展起到了一个很好的铺垫和基础作用。本章我们着重从高速半导体激光器的研究、设计、制作上进行分析和研究，并进行高速半导体激光器芯片的制备，对不同的材料、结构芯片结果进行测试、对比和分析，具体内容着重从如下几个方面开展：

4.1 量子阱材料的选择和制备

光通信中用于外延的半导体材料主要有两种 InP/InGaAsP 和 InP/AlGaInAs。与 AlGaInAs 材料相比，在相同的载流子注入密度下 InGaAsP 量子阱具有更高的增益，并且具有更低的内部光损耗和非线性增益抑制因子和光子寿命。这对于提高器件的直调具有有利的一方面因素。另一方面 InGaAsP 材料由于其非辐射复合的特性，使得其出光特性受温度影响大，其特征温度较低。

相比于 InGaAsP 材料，AlGaInAs 材料具有更低的非辐射复合，其材料温度稳定性相对较好，适合制备无制冷工作芯片。另一方面 AlGaInAs 材料其导带量子阱深度 ΔE_c 可以达到 $0.7\Delta E_g$ ，而对于 InGaAsP 材料来说其 ΔE_c 约有 $0.4\Delta E_g$ ，因此含 Al 的材料体系可以实现更高的载流子注入效率从而降低阈值提高出光效率。然而含 Al 材料其具有较高的非线性增益抑制系数，这从另外一方面限制了器件的高速调制特性；另外，含 Al 材料在生长过程中也会面临到氧化的问题。

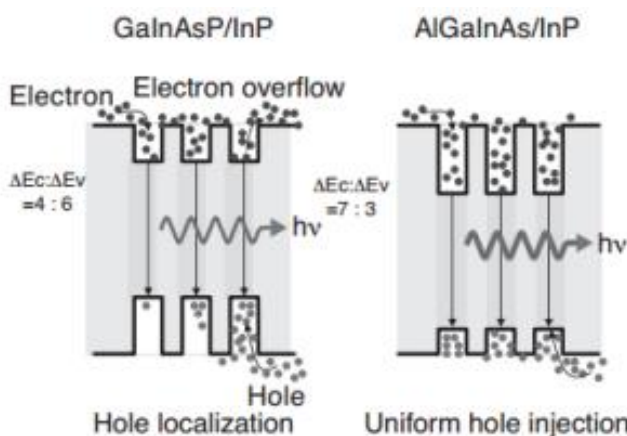


图 4.1 含 Al 和不含 Al 量子阱的区别

另一方面，选择应力补偿的 InGaAlAs-InGaAsP 多量子阱材料为有源区，这个材料的特点是通过设计量子阱及其势垒的能带、应力和宽度，使得轻空穴被量子

阱束缚变浅。这直接解决了其他多层量子阱结构中空穴处于束缚态不能在多层量子阱中均匀分布的问题，消除一些量子阱处于很低增益或甚至吸收的状态。激光器采用多层的 InGaAsP 为量子势阱和 AlGaInAs 为量子势垒的复合材料体系为有源区，对其中的轻空穴、重空穴能级进行设计，使得空穴能够在多层量子阱中均匀分布，以提高激光器在阈值、微分效率和输出功率方面的特性。在不影响材料质量的前提下，采用高晶格不匹配常数来提高调制带宽。

对于 InP/InGaAsP(量子阱)/InGaAsP(量子垒)来说较大的价带差 $\Delta E_v = 0.6\Delta E_g$ 提高了空穴在量子阱中的限制效应并限制了空穴在不同量子阱之间的传输。这将导致在载流子持续注入下，空穴在量子阱 P 型区域的累积，由于库伦力的作用以及电子的高迁移率使得电子在 P 型区域也大量累积，这严重影响到材料的增益特性。由于半导体材料的增益 g 与载流子浓度存在非线性的关系 ($g \propto \ln(n)$)，使得在特定的载流子浓度下，载流子均匀分布的量子阱所产生的总体增益要大于非均匀分布的情况。另一方面，在量子阱中当载流子浓度增加时将大幅提升材料的俄歇符合和自发辐射复合（俄歇符合 $\propto n^3$ ，自发辐射复合 $\propto n^2$ ）；同时，处于 N 型区域的量子阱由于载流子的非均匀分布使得其处于较低的粒子数分布反转状态或者无粒子数分布反转（无增益或者产生损耗）。因此载流子的非均匀分布限制了材料的最大量子阱数目，此外，当空穴在量子阱中的束缚能力偏大时，增加量子阱数，并不能提高有源区的光场限制因子。相关的研究报告表明俄歇复合和载流子泄露是大电流下载流子损耗的主要原因。因此优化量子阱使得载流子分布均匀来最大程度提高材料增益降低损耗，并降低阈值是优化量子阱的关键。

通过采用 InGaAsP(量子阱)/AlGaInAs(量子垒)材料，实现较大的导带能带差 $\Delta E_c = 0.72\Delta E_g$ （对于 InGaAsP(阱)/InGaAsP(垒)材料 $\Delta E_c = 0.4\Delta E_g$ ）有效提高了电子的限制能力，对于电子来说由于其有效质量较小、迁移率高使得在大载流子注入和高温下能更好地实现对电子的限制；并且该材料实现了价带的能带差的减小，从而降低了量子阱对空穴的束缚，使得空穴通过热发射越过势垒的几率增加。

此外采用压应变的量子阱和张应变垒由于轻、重空穴的带边反向分裂使得束缚轻空穴的阱深变浅；另外，由于轻、重空穴的波函数分离使得阱对轻空穴的束缚能力降低、同时降低了价带的混合效应。此外，采用这种材料结构能有效改善重空穴能带的（E-K）色散，降低价带的态密度，从而降低阈值电流、提高微分增

益。

对于高速调制半导体激光器而言,限制器件调制速率很重要的一个因素就是量子阱增益材料的微分增益 dg/dn ; 另外一个限制器件调制的因素为材料的增益压缩因子 ϵ , 而 InGaAsP/InGaAsP 量子阱的增益压缩因子是 InGaAsP/AlGaInAs 的 4 倍; 因此采用混合结构量子阱材料是提高器件增益和调制速率研究的一个重要方向。

4.2 有源区和波导的优化

在高速半导体激光器中,量子阱是载流子限制、跃迁、复合的主要区域,因此合理优化有源区对于改善激光器的性能具有重要作用;在优化应变的基础上,对量子阱的数量进行优化,虽然对于高速激光器来说,增加量子阱个数使得量子阱与光场重叠区域增加从而增加光子密度并降低寿命对于提高器件弛豫频率具有一定的作用,然而当量子阱数量增加到一定程度使得载流子的注入在不同的阱内产生注入不均匀现象,从而导致注入效率降低、阈值增大,以及载流子分布不均而引起的空间烧孔等效应。很显然,量子阱数量过少容易使得有源区体积小,其对载流子的限制效率降低,发光效率低等问题。因此在量子阱数量、厚度上应综合平衡和优化,实现合理的光增益、降低阈值。

另外,在量子阱以外的区域,我们通常为了进一步提高载流子的限制能力和效率,通常引入能带上的分别限制结构,分别限制结构在能带上从有源区外向有源区靠近时,其禁带宽度呈现阶梯状的变小,并逐步向量子势垒靠近。这种限制结构对于提高载流子的利用率、降低器件阈值具有重要的作用。

在早期的半导体激光器中主要采用增益导引实现对载流子和光的限制。其中氧化物限制条形激光器,如下图所示,在金属注入区域有 SiO₂ 层隔离开来,形成载流子注入区域的限制,然而在半导体材料内部缺少载流子的横向限制,因此阈值电流较高;然后该工艺简单、可靠性高,通过对材料结构以及芯片结构进行综合优化可以实现良好的性能,该工艺目前仍被采用。后续开发采用扩散或注入工艺实现了对载流子的横向泄露,这种工艺方法有效降低了激光器的阈值,提高了其注入效率。增益导引激光器由于总体上在横向缺少对载流子的有效限制,同时却缺乏对光场的限制使得激光器容易产生横向的高阶模式,但具备工艺过程简便、可靠性高的优点。

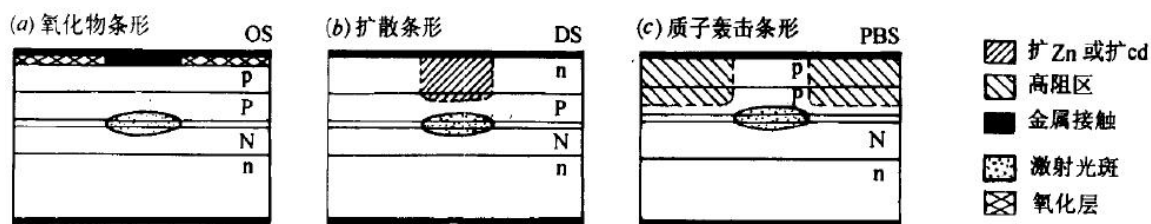


图 4.2 增益导引半导体激光器

对于增益导引激光器其横向模式与横向的增益分布有关，而横向增益与载流子的横向有关，而载流子的分布又引起了折射率分布的差异。因此为了进一步改善该类激光器的特性，需要在激光器内引入一个光波导结构，这类结构与器件自身工作时的注入水平无关。光在介质中传播，当介质中存在折射率差时，便形成光的导引作用；常规条形半导体激光器，利用有源区、包层等材料的折射率不同特性形成了光的波导导引作用。条形激光器的折射率导引，按折射率变化大小产生导引的强弱可以分为弱折射率导引和强折射率导引。

如下图为集中常见的弱折射率导引激光器，其中脊型波导结构由于制备工艺简便、器件性能良好，是目前最为常见的一种半导体激光器芯片结构，其中脊型结构对载流子的注入形成限制，同时脊型区域的等效折射率要比周边要高，因此形成了弱的折射率导引，光场被限制在脊型波导的下部区域。其余结构通过有源区厚度、结构等实现折射率差和波导导引作用。

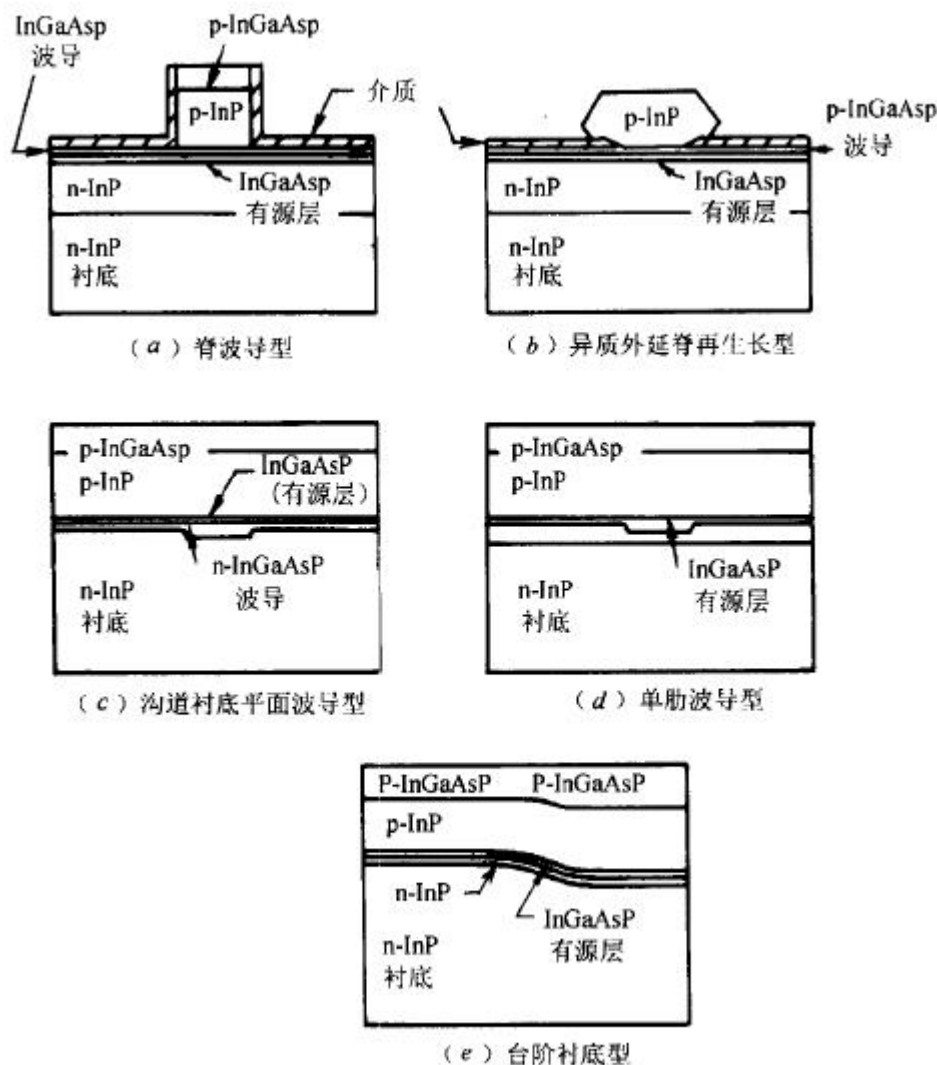


图 4.3 弱折射率导引波导结构图

对于弱折射率导引结构激光器由于载流子在横向上缺乏限制结构使得载流子的横向泄露大。为了进一步提高载流子的横向限制效果，并且进一步对光场提高其横向限制能力，提高光场和有源区的重叠比例、提高微分增益，通常采用掩埋式结构。常规双沟掩埋异质结（Buried heterostructure, BH）半导体激光器结构图，常规的脊型波导结构激光器，由于对载流子和光子的横向限制相对较弱，因此容易出现：大电流下无法对载流子实现很好的限制容易出现饱和，饱和输出功率偏低；此外，缺少横向的光场限制，这导致常规脊型波导结构激光器横向损耗偏大同时容易出现高阶的横向模式，这导致了光纤耦合输出效率的降低。掩埋异质结激光器采用 PNP 的结构对载流子在横向进行限制，提高载流子的注入效率，同时对光场的横向限制降低了器件的发散角，该结构工艺通常需要进行多次的二次

掩埋生长，增加了芯片制备过程的复杂程度，但这种结构能有效解决 RWG 结构碰到的如上问题，提高载流子限制，提高耦合效率；该结构激光器对工艺的控制过程要求严格。然而在实际过程中采用掩埋的工艺容易使得含 Al 材料氧化，导致器件的可靠性问题；因此在实际应用中更多采用不含 Al 的材料做量子阱，来制备 BH 结构激光器。

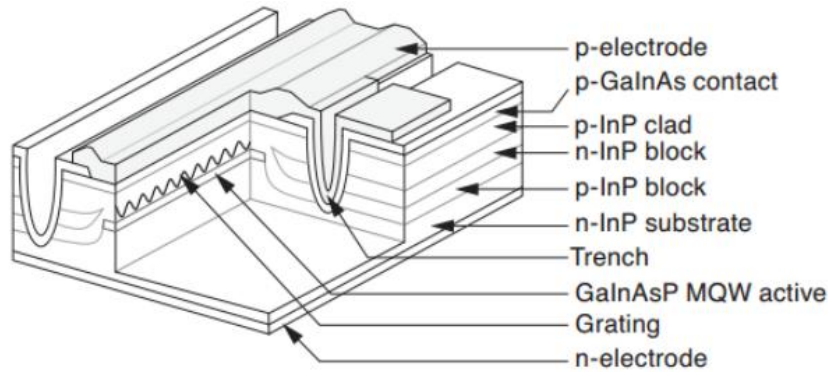


图 4.4 常见 InP 基掩埋异质结半导体激光器结构示意图

在实际的半导体激光器波导结构中制备过程中，一方面我们要考虑到波导结构和载流子能带上的匹配，实现载流子在光场限制区域的有限俘获；另一方面要考虑到光波导的限制条件，避免出现高阶的横向模式降低耦合效率，同时避免有源区体积过小使得增益容易饱和；此外在高速激光器设计上还要综合平衡各方面的光电参数性能。

4.3 高速半导体激光器的研制

4.3.1 材料外延生长

在 2 英寸的 N-InP 衬底上，以三甲基金属有机物作为三族源，并以砷烷和磷烷作为五族气体源，以 SiH_4 和 DEZn 分别作为施主和受主掺杂源，在约 630°C 下以氢气作为载气进行金属有机化学汽相沉积外延生长。

首先生长 N-InP 缓冲层，接着生长 InAlAs 过渡层，并生长未掺杂的 AlGaInAs 作为下波导层，接着生长有源层，这里有源层量子阱我们采用两种生长方案：一种为常规的 AlGaInAs (阱)/AlGaInAs (垒)，另一种采用 InGaAsP (阱)/AlGaInAs (垒) 进行对比，同时我们采用不同的量子阱层数进行对比。接着生长 AlGaInAs 上波导层，生长 P-InAlAs 过渡层，生长 P-InP 空间层，生长 P-InGaAsP 腐蚀停止

层。最后生长 P-InP 覆盖层, P-InGaAsP 过渡层, 以及重掺杂的 P⁺-InGaAs 欧姆接触层, 完成外延材料的生长。

表 4.1 材料外延结构图

Layer	Item	Thickness (nm)	Doping (cm ⁻³)
1	N-InP substrate		2-8×10 ¹⁸
2	N-InP buffer	500	1×10 ¹⁸
3	N-InP	100	3×10 ¹⁸
4	N-InAlAs	50	1×10 ¹⁸
5	U-AlGaInAs SCH	50	/
6	MQWs (AlGaInAs/AlGaInAs) (InGaAsP/AlGaInAs)	10-15	/
7	U-AlGaInAs SCH	50	/
8	P-InAlAs	50	5-7×10 ¹⁷
9	P-InP space layer	50	7×10 ¹⁷
10	P-InGaAsP etch stop	20	5×10 ¹⁷
11	P-InP clad layer	1800	1×10 ¹⁸
12	P-1.2 μ m InGaAsP	50	3×10 ¹⁸
13	P-1.5 μ m InGaAsP	50	3×10 ¹⁸
14	P-InGaAs contact layer	200	2×10 ¹⁹

在实际的试验过程中, 我们对制备的管芯进行测试可以反馈外延材料的内部损耗、内量子效率等参数, 这对有源区的进一步优化提供了参考。对于半导体激光器来说, 有如下的关系:

$$P_0 = \frac{h\nu\eta_i}{q} \left(\frac{\alpha_m}{<\alpha_i> + \alpha_m} \right) (I - I_{th}) \quad (4.1)$$

$$P_0 = SE(I - I_{th}) \quad (4.2)$$

$$\alpha_m = \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) \quad (4.3)$$

$$\frac{1}{SE} = \frac{q}{hv} \left(\frac{1}{\eta_i} + \frac{2 \langle \alpha_i \rangle L}{\eta_i \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right)} \right) \quad (4.4)$$

其中 P_0 为激光器的输出功率, η_i 为器件内量子效率, α_m 为腔面损耗, $\langle \alpha_i \rangle$ 为内损耗, $h\nu$ 为光子能量, I 为注入电流, I_{th} 为阈值电流, SE 为斜率效率, L 器件腔长, R_1 、 R_2 为激光器端面反射率 (对于未镀膜芯片来说其端面的反射率约为 0.3)。根据上述的公式我们对不同腔长的管芯进行测试, 并对测试数据进行分析, 可以得出材料的内损耗和注入效率。

4.3.2 芯片制备

(1) 倒台脊型波导结构制备

对生长完的外延片进行 HCl 清洗, 去除片子表面的 InP 保护层。再片子表面沉积一层 SiO_2 介质层, 进行常规光刻和显影工艺形成脊型波导图案。在制备倒台波导时, 采用干法加湿法的脊型制备工艺提高脊型均匀的一致性。对光刻显影后的图形进行介质层的刻蚀, 并对材料表面的 InGaAs 进行 $\text{CH}_4 + \text{H}_2$ 的 RIE 干法刻蚀, 待覆盖层刻蚀完, 采用 H_3PO_4 : HBr =1:1 的腐蚀液系对 InP 材料进行腐蚀, 腐蚀至腐蚀停止层时, 并形成特定的腐蚀停止晶向。如下图为形成倒台面脊型结构的 SEM 图。

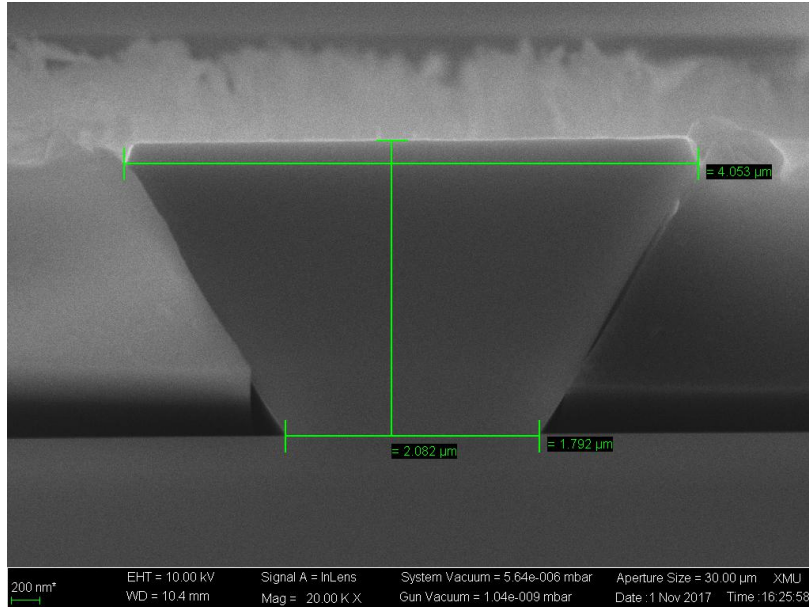


图 4.5 倒台结构脊型波导

(2) 脊型开孔

制备完倒台，对片子表面进行 PECVD SiO_2 钝化层的沉积，并进行光刻，将脊型波导顶部的 SiO_2 层去除，形成欧姆接触区域；倒台的作用是：在脊型顶部形成宽条的欧姆接触增加欧姆接触面积降低欧姆接触电阻，同时脊型底部的宽度可以调整满足常规的使用需求。

(3) BCB 工艺

接着对片子进行 BCB 工艺。早告诉半导体激光器制备过程中，采用 BCB 作为填充主要是为了降低芯片的结电容、以及金属覆盖区域所产生的电容，BCB 的工艺步骤如下：

表 4.2 BCB 工艺步骤

步骤	工艺名称	内容
1	BCB 涂布准备前	RIE 打胶 5min→烘盘烘 115°3min
2	BCB 涂布	HMDs+涂布 BCB（7000 转），膜厚 3.2um
3	BCB 曝光	350W 5s
4	BCB 显影	温度 40℃ 1 分 30 秒 恒温 1 分共 2 分 30 秒
5	BCB 固化	用 IPHH201 烘箱 2 号程序烘 4.5 小时
6	BCB 刻蚀去底膜	刻蚀 1 分 15 秒

对片子进行 BCB 旋涂，接着进行 BCB 的光刻，显影出去部分脊型波导上 BCB，接着对 BCB 进行固化，其固化采用如下程序，对固化后的片子再次进行 BCB 的刻蚀，去除脊上的 BCB 底膜，保证脊型的欧姆接触：

表 4.3 BCB 固化步骤

步骤	烘烤温度	烘烤时间
1	50℃→100℃	30min
2	100℃→100℃	60min
3	100℃→150℃	30min
4	150℃→150℃	30min
5	150℃→210℃	60min
6	210℃	60min



图 4.6 旋涂 BCB 后脊型的端面图



图 4.7 BCB 工艺后脊型端面图

经过 BCB 显影和刻蚀后形成如上图所示的 BCB 覆盖形貌。

(4) 芯片后续工艺

对于制备完 BCB 工艺后的片子进行 P 面金属的光刻和 P 面金属的沉积 (Ti/Pt/Au)，接着对芯片进行物理研磨减薄，并进行背面金属的蒸镀，并对样品进行合金，最后将制备的样品解离成 bar 条，对 bar 条进行出光和背光端面光学薄膜的蒸镀实现高透和高反的作用。对芯片进行测试，并进行解离，将解离的单颗芯片固晶至 AlN 热沉上，并进行频率相应的测试。

4.3.3 芯片的测试

如下图所示为芯片频率响应测试设备图，激光器小信号测试的原理为：HP8720ES 网络分析的 port1 端口输出射频信号，输出至 bias-T；另一方面激光器的直流偏置电流通过 Keithley 2400 加至 bias-T，最后 bias-T 输出射频和直流的合成信号并通过高速射频探针 (S-G) 加至激光器芯片正负极，将激光器芯片出光耦合至单模光纤，并将光纤的出光耦合至高速探测器；高速探测器将接收到光信号转换成电信号进入至网络分析仪的 port2 端口，网络分析仪测量出不同频率下的功率

情况，测量的传输参数 S21 为激光器的频率响应曲线；曲线上当激光器的响应功率降低至初始频率的-3dB 时，其所对应的频率值为器件的直接调制带宽。

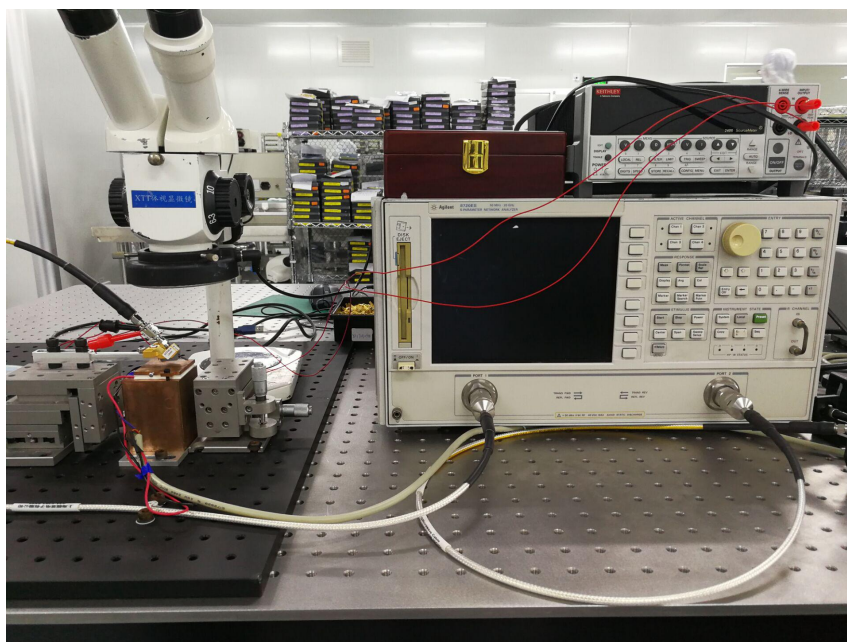
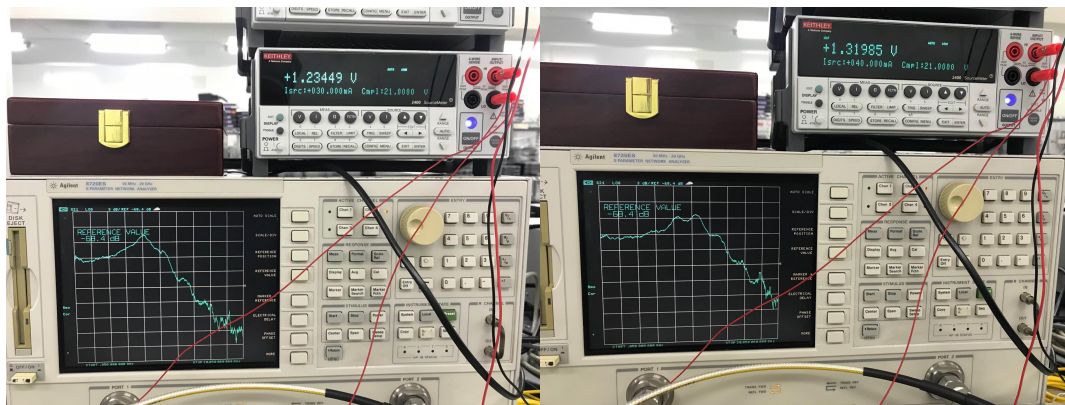


图 4.8 频率响应测试设备示意图

如下为采用常规 AlGaInAs 量子阱制备的芯片测试结果，其中量子阱层数分为 10 层和 12 层，腔长分为 $200\ \mu\text{m}$ 和 $250\ \mu\text{m}$ ，对不同量子阱数和不同腔长的激光器进行测试对比其出光的差异。

(1) 10 层量子阱

通过 ILX-3744C 对激光器芯片进行加热，并通过 keithley 2400 进行不同输出电流的调整我们对激光器在室温和 85°C 温度下，以及不同电流下的频率响应进行测试，如下为 10 层量子阱的测试结果：



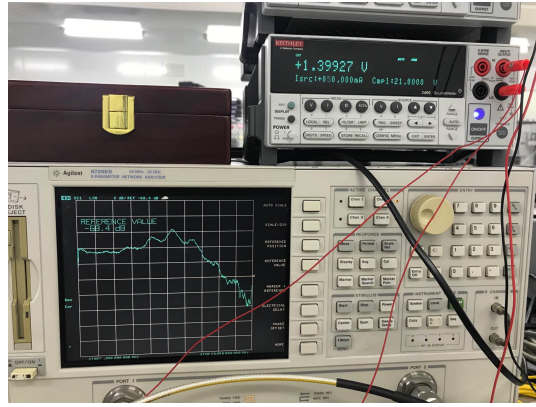


图 4.9 250um 腔长，室温，IOP=30、40mA、50mA，带宽：11.7GHz、11.74GHz、14.8GHz

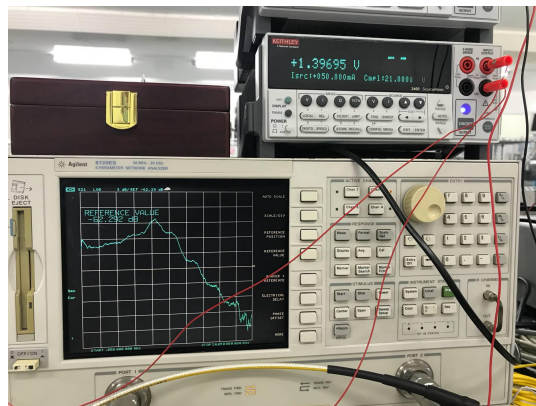
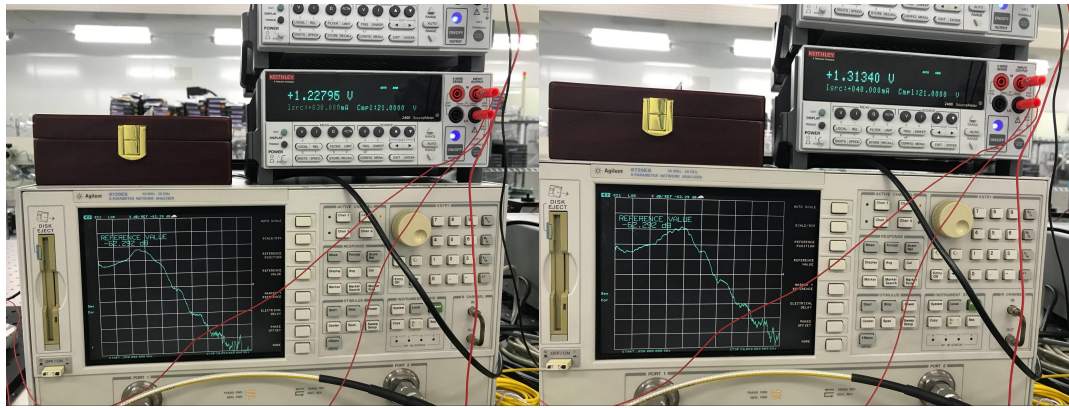
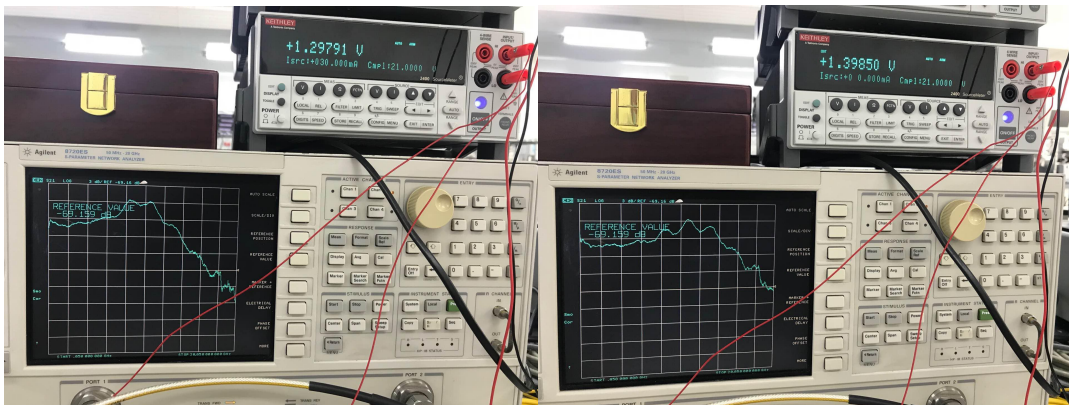


图 4.10 250um 腔长，高温，IOP=30、40mA、50mA，带宽：8.9GHz、11GHz、11.4GHz



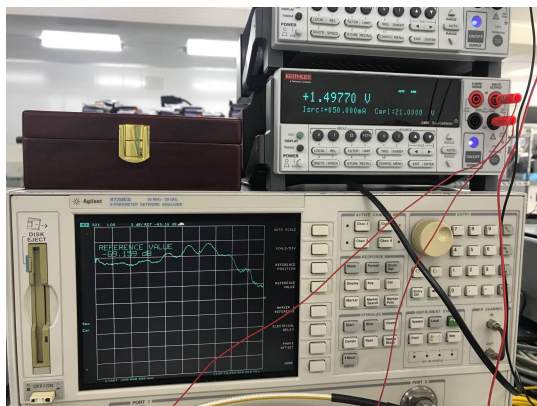


图 4.11 200um 腔长，室温，IOP=30、40mA、50mA，带宽：14GHz、16GHz、17GHz

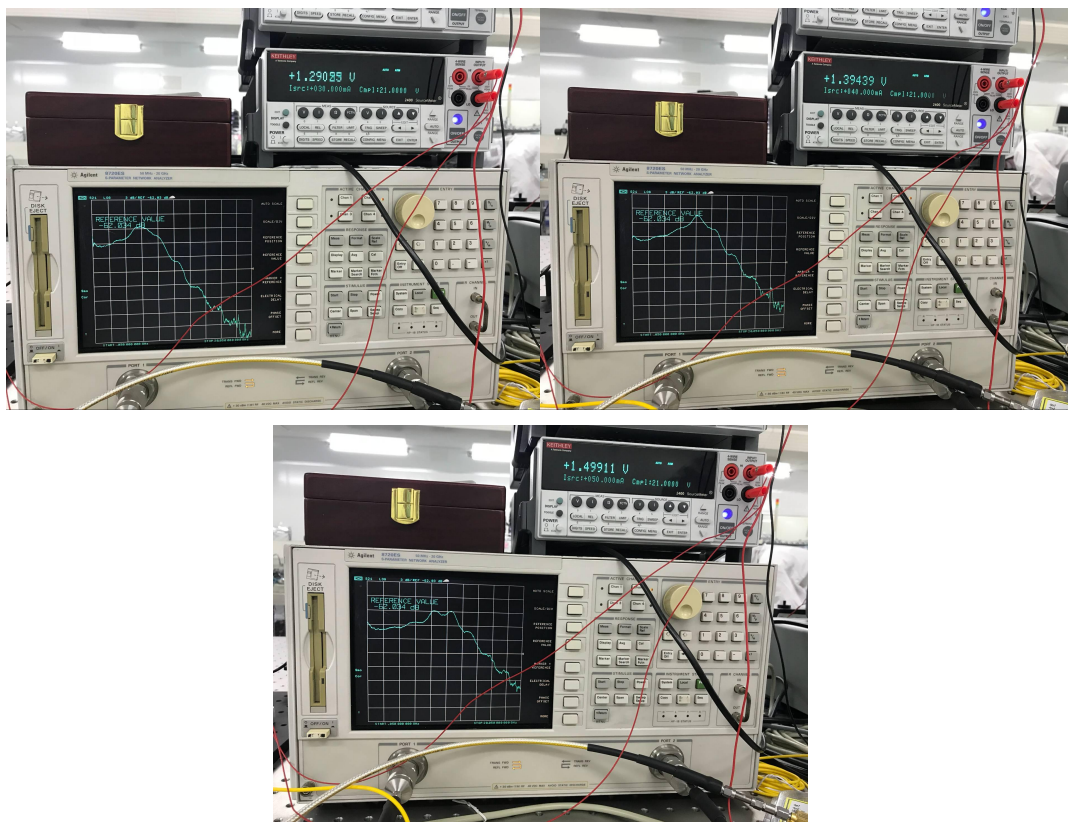


图 4.12 200um 腔长，高温，IOP=30、40mA、50mA，带宽：9.5GHz、11GHz、11.9GHz

(2) 12 层量子阱

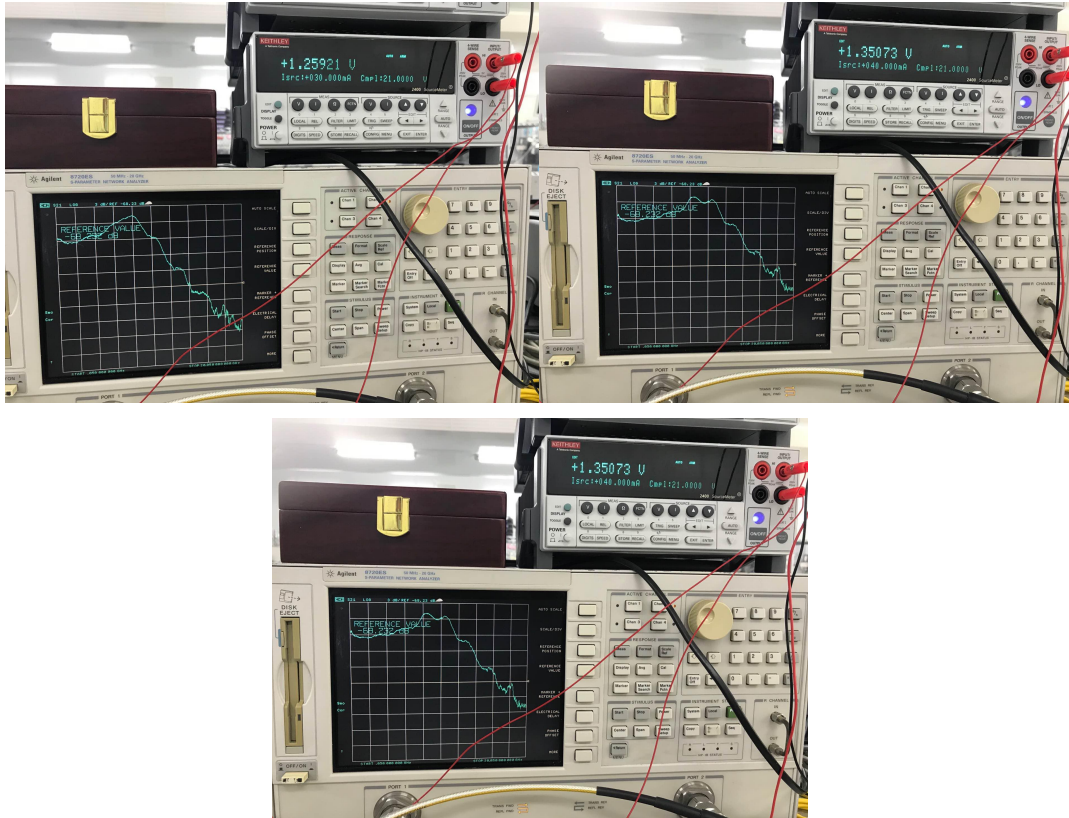


图 4.13 250um 腔长，室温，IOP=30、40mA、50mA，带宽：11.5GHz、14GHz、14.4GHz

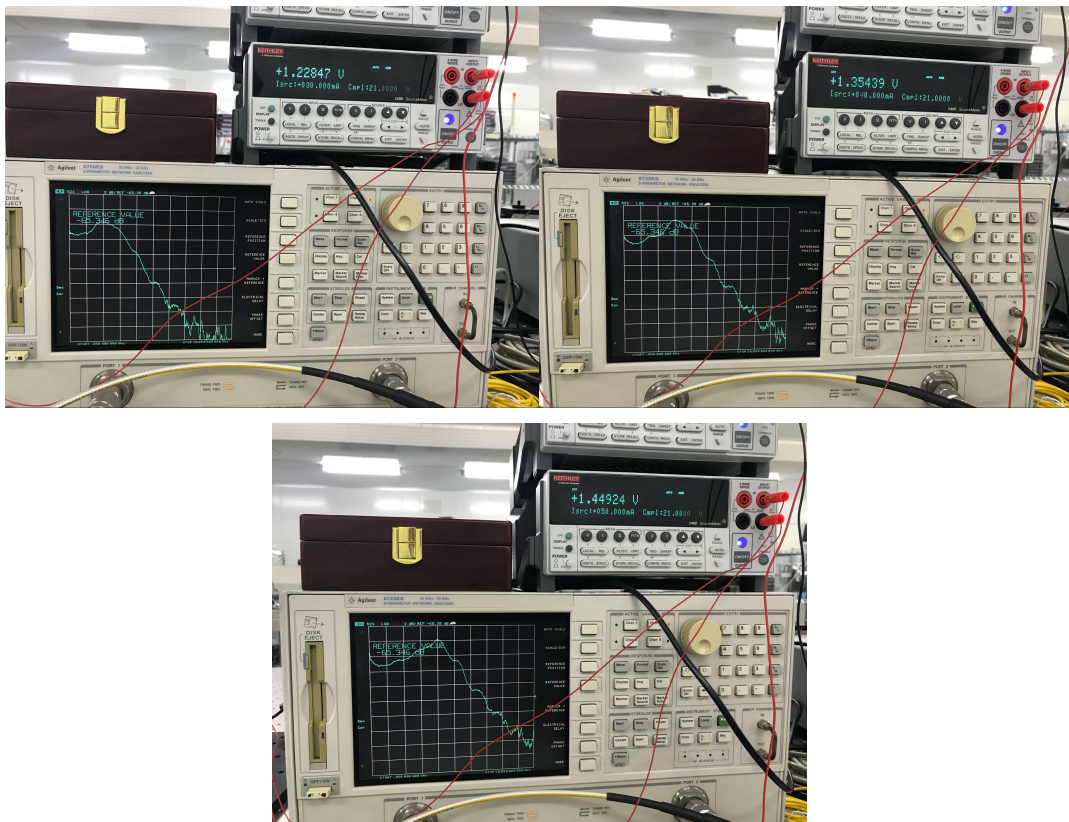


图 4.14 250um 腔长，高温，IOP=30、40mA、50mA，带宽：7.8GHz、9GHz、11GHz

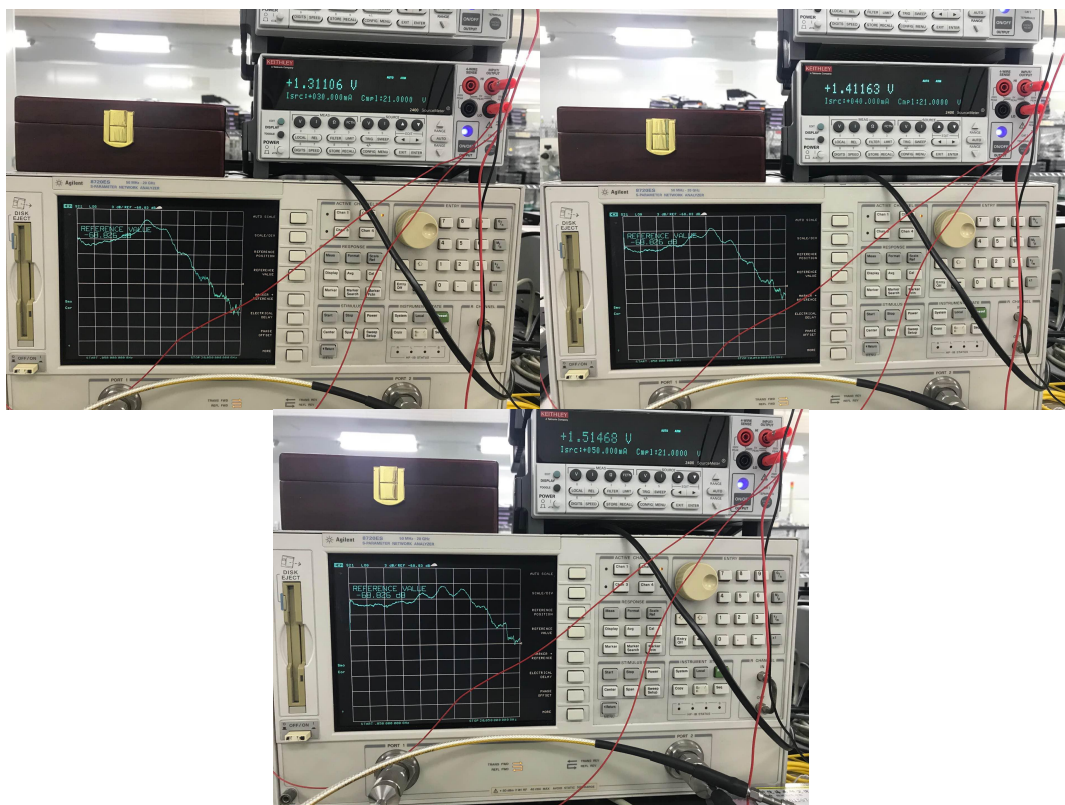


图 4.15 200um 腔长，室温，IOP=30、40mA、50mA，带宽：12GHz、14GHz、16GHz

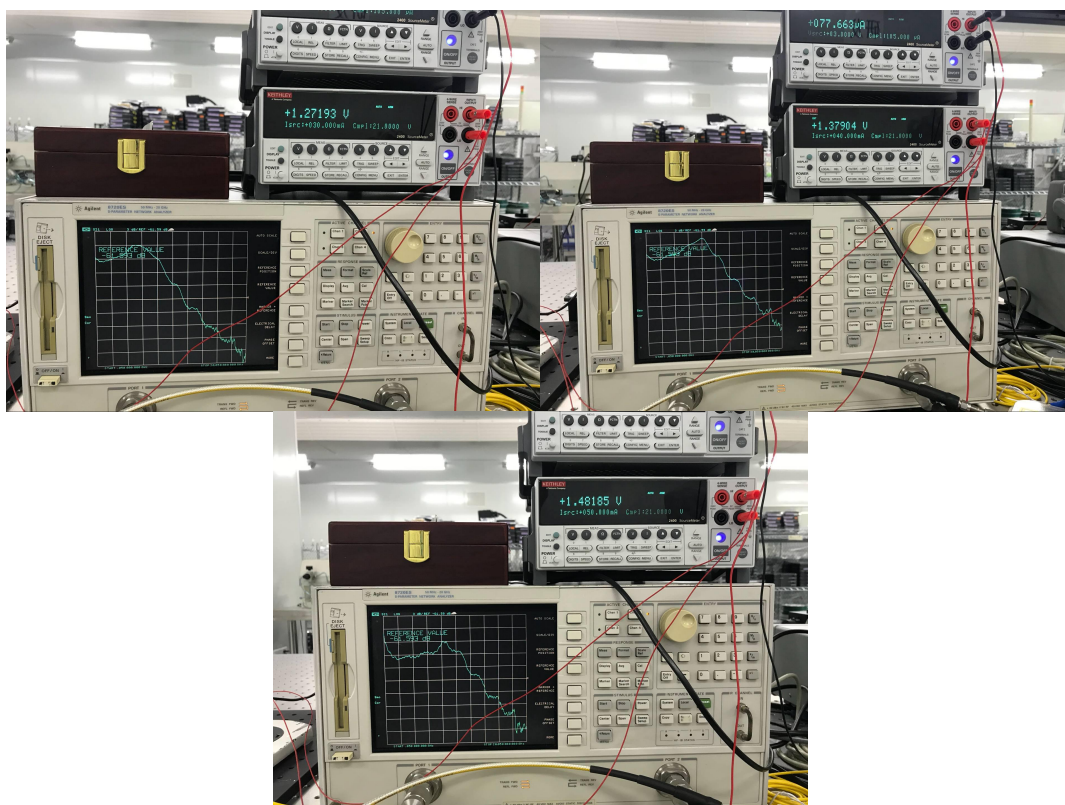


图 4.16 200um 腔长，高温，IOP=30、40mA、50mA，带宽：9GHz、11.4GHz、11.8GHz

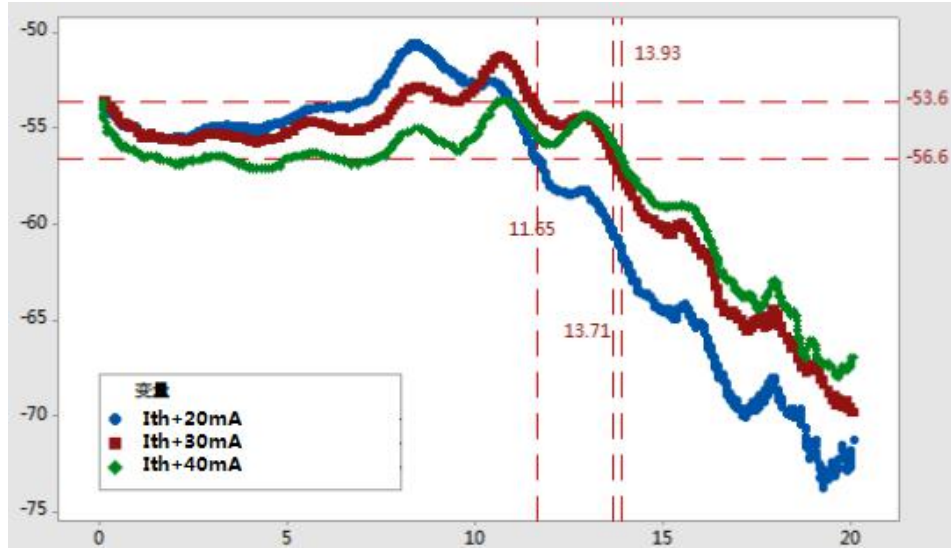


图 4.17(a) 室温下, 10MQWs 200μm 腔长芯片不同电流下频率响应曲线

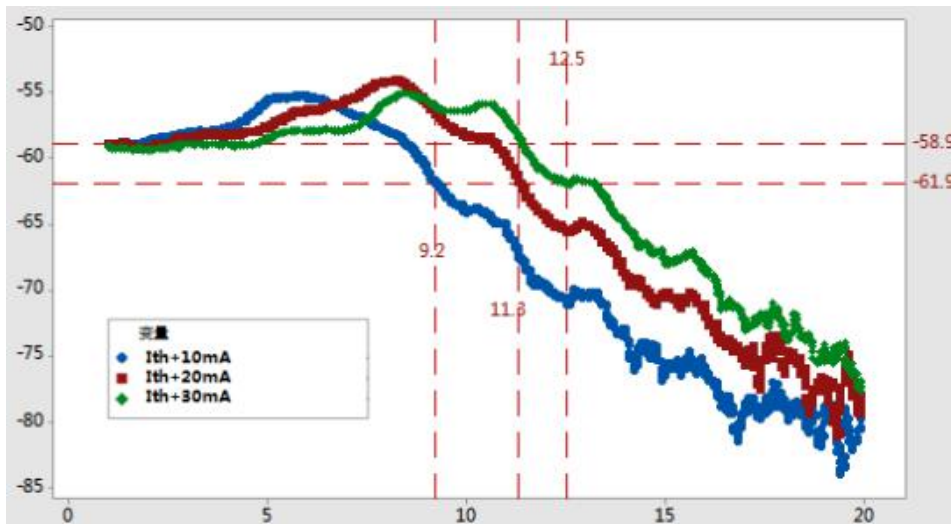


图 4.17(b) 85°C 下, 10MQWs 200μm 腔长芯片不同电流下频率响应曲线

上述图中网络分析仪的测试频率从 50MHz 到 20.05GHz, 从测试结果可以看出: 相同结构量子阱层数为 10 层的激光器芯片其-3dB 频率响应带宽要好于 12 层量子阱结构; 同时随着温度的增加其在相同电流下调制带宽减小, 其主要由于激光器的温度特征, 温度增加阈值电流增大使得激光器的弛豫振荡频率降低; 另外腔长 200 μm 芯片其调制带宽要好于腔长 250 μm 芯片, 其主要是由于芯片内部有源区体积减小使得整体工作阈值降低, 光子寿命降低, 进而提高了芯片工作的弛豫振荡频率。对于 10 层量子阱激光器其室温和高温下不同电流的直调带宽满足 10G 激光器的使用要求。

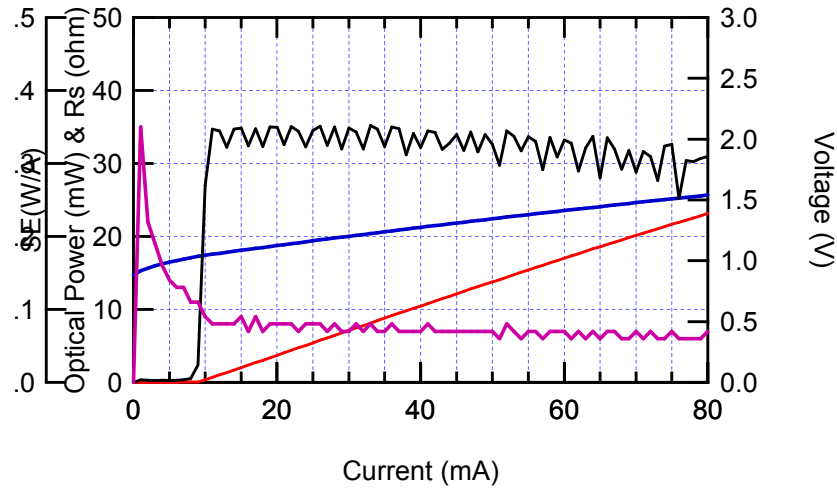


图 4.18 室温下器件 LIV 曲线

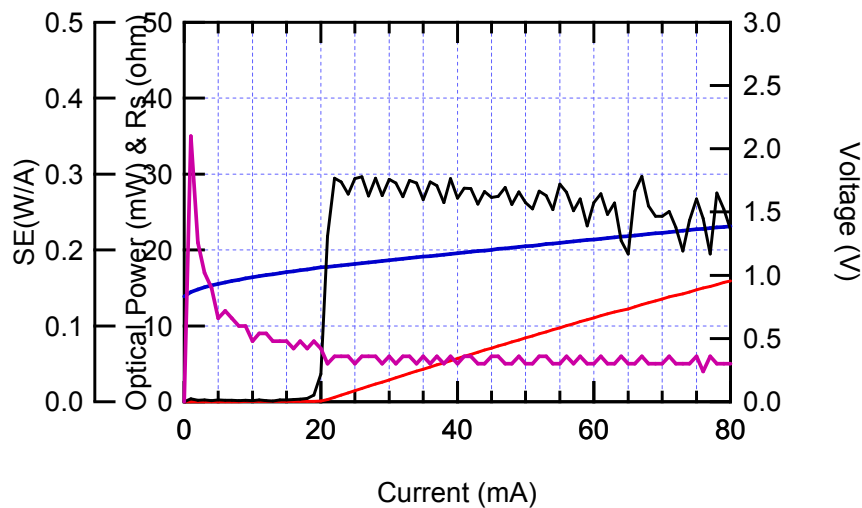
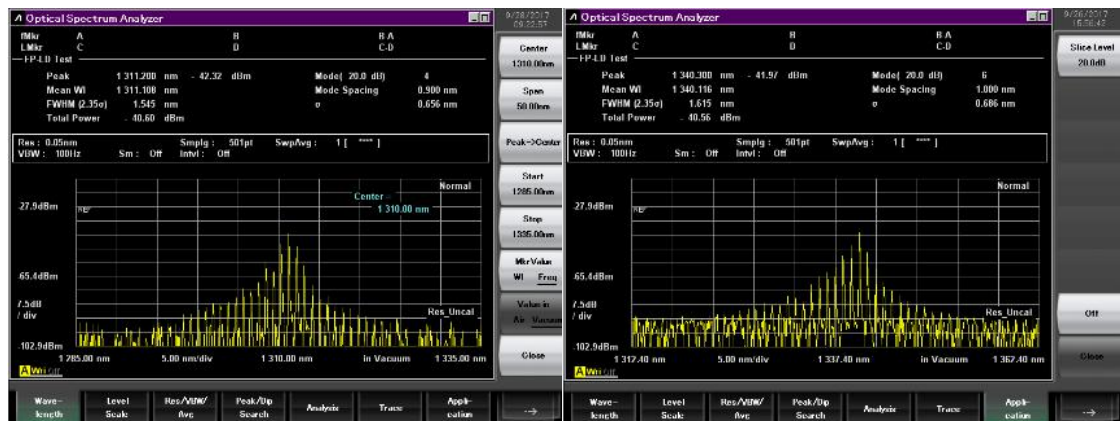


图 4.19 85℃下器件 LIV 曲线

图 4.20 器件室温和 85℃下, $I_{th}+20mA$ 光谱图

如上图封装成 TO-56 后的 10G 器件在室温和 85℃下的光谱和 LIV 曲线,从图中可以看出器件的出光线性良好,出光功率相对正常。

4.3.4 混合式结构量子阱

表 4.4 混合式结构量子阱镀膜前光电参数

Lot	L(um)	Ith(mA)	Iop(mA)	Rs(ohm)	SE(W/A)	Pf(mW)	Vf(V)
5 层 MQW	250	22.76	46.25	7.97	0.22	4.37	1.29
	500	27.82	53.28	5.37	0.20	4.04	1.16
	750	34.78	63.76	4.51	0.17	3.54	1.11
	1000	41.82	74.82	4.10	0.15	3.10	1.09
	1250	50.59	88.50	4.06	0.13	2.70	1.09
10 层 MQW	250	23.60	50.22	10.21	0.19	3.90	1.40
	500	33.67	0.00	6.25	0.16	3.31	1.21
	750	43.55	81.28	5.09	0.13	2.72	1.15
	1000	53.83	96.18	4.80	0.12	2.42	1.14
	1250	64.06	0.00	4.22	0.10	2.07	1.11

参考表 4.1 的外延结构，我们将量子阱更改为混合式结构压应变的 InGaAsP 量子阱和张应变的 AlGaInAs 量子垒。我们生长了 5 层和 10 层量子阱结构进行对比，其芯片镀膜前的测试结果如表 4.4 所示。依照上述公式我们对材料的内损耗和内注入效率进行计算。

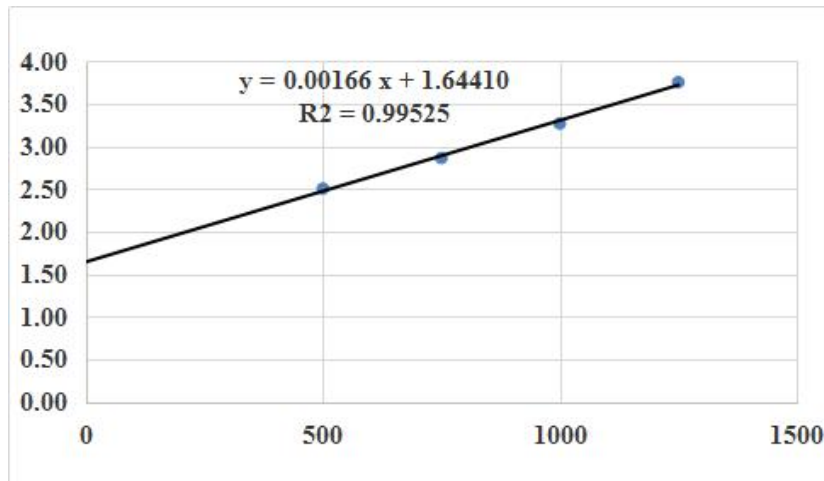


图 4.21 5 层量子阱镀膜前腔长和斜率效率的关系

表 4.5 5 层量子阱注入效率和损耗

$\ln(1/R1 \cdot R2)$	2.41	
η_i	0.48	
internal loss $\langle \alpha_i \rangle$	12.16	cm-1

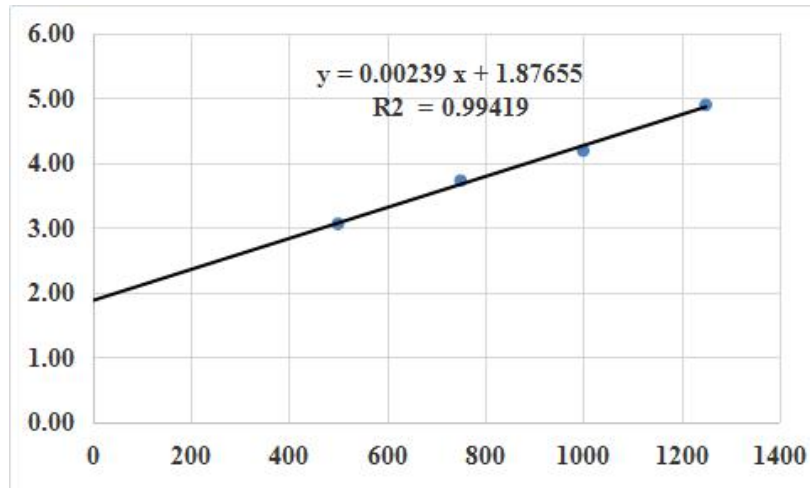


图 4.22 10 层量子阱镀膜前腔长和斜率效率的关系

表 4.6 10 层量子阱注入效率和损耗

$\ln(1/R1 \cdot R2)$	2.41	
η_i	0.42	
internal loss $\langle \alpha_i \rangle$	15.33	cm-1

从测试结果来看 5 层和 10 层量子阱结构激光器的注入效率都偏低在 50% 以下，同时生长材料的内部损耗偏大。这可能是由于材料生长的质量偏差的缘故，导致产生载流子损耗和光损耗增加。后续计划进一步优化外延材料的生长质量。

4.4 小结

本章首先从外延材料、波导结构等方面进行分析，并开展不同的量子阱结构和层数等方面的对比。在芯片制备工艺方面，我们采用倒台的脊型波导结构并结合 BCB 工艺、金属覆盖方案，来改善芯片整体的 RC 参数。另一方面对波导结构参数、腔长等方面进行调整来提高芯片工作的弛豫振荡频率，试验结果显示对于 AlGaInAs 多量子阱结构，在量子阱层数为 10 层时其室温和高温的 3dB 直调带宽超过了 10GHz，通过对器件的室温和高温 LIV 和光谱等参数进行测试，结果表明器件性能参数满足实际的使用要求。另一方面，AlGaInAs/InGaAsP 混合式量子阱结构在由于材料的载流子注入效率和内量子效率还偏低，因此下一步着重在材料生长上对材料生长质量进行优化提高混合式结构量子阱的效率。

第五章 半导体激光器可靠性和加速寿命试验

随着光子技术的发展, InP 基本半导体激光器作为信号发射的光源, 已经成为光通信里重要的核心部件, 然而对于其在任何领域的应用都要求其具有良好的可靠性和长时间的稳定性; 对于已经制成模块级的光通信器件来说, 其长期的可靠性成为了衡量该器件质量的典型指标; 为了在实际应用中保证器件和设备的长期可靠工作以及避免由于器件失效而产生的损失, 很有必要对光通信器件的寿命和可靠性进行研究、分析和改善。对于实际工作的器件而言, 在正常的工作范围内给器件通电来分析可靠性是最接近真实的情况, 然而光通信器件其典型寿命常规要求连续工作 10 万小时, 因此这种长时间的分析无疑增加了可靠性分析的成本, 同时增加了器件研究和性能改善的周期, 这种方法可行性相对不高。为了提高和加快可靠性研究的时间和效率, 美国军用标准 MIL-STD-883 和 GR-468-CORE 都相应地规定了光通信器件可靠性研究的试验方法, 半导体激光器可靠性评价的内容涉及其多方面的因素, 一般有机械性的振动冲击等、也有温度湿度等、静电防护等。

对于实际应用激光器来说, 采用加速应力试验方法对半导体激光器可靠性和寿命进行评价是较为常用的一种方法。所谓应力加速就是在合理范围内, 加大某些方面的工作条件, 加快器件的衰退情况, 但应力大小的选择要合理, 否则会引入新的失效机理使得器件的失效难于判断; 目前加速应力试验方法上主要有: 温度应力加速试验方法、电流应力加速试验方法、以及温度和电流同时加速试验方法^[59-70]。

此外, 虽然光通信用半导体激光器技术经过了多年的累积和发展, 然而不同生产厂家器件制备工艺有所不同, 即便同一厂家不同批次可靠性也有所差异; 此外, 在使用过程中的静电因素、环境温湿度等也是引起器件容易失效的一个重要原因。相关的研究报道表明: 半导体激光器在使用过程中发生的电流或电压过载、电浪涌、热过载等因素是导致激光器失效的重要因素; 其中电过载、电浪涌使得激光器内部累积大量的热量引起器件内部有源区发生不可逆的退化并导致器件失效, 这两种因素作用在器件上总体表现的结果为器件温度过载。因此, 分析激光器在高温应力下性能参数的变化对于进一步分析激光器的失效机理以及改善激光器的高温性能具有重要作用。

本章着重分析影响半导体激光器可靠性的因素和改善方法，并对不同应力的寿命模型进行分析。接着对激光器的热特性进行研究，分析高温下激光器性能参数的变化；并采用倒装封装的方案来优化器件的热特性及输出特性，最后对器件进行加速寿命试验对比。

5.1 半导体激光器可靠性表征

可靠性主要是指，产品在指定工作条件和时间下，完成其功能的比例。工作条件这里主要是指激光器工作的环境条件：环境温度、振动和碰撞、摇摆、气流等。也指器件的工作条件，如电流电压等。在相同的条件下，器件有效工作时间越长其寿命越长，可靠性越高。

可靠性是相对的，即便成熟的产品和器件也会出现随机的失效事件，因此在可靠性了可靠的产品只是占有一定的比例；我们将达成指定要求寿命的器件比例成为可靠度。

总数量为 N 的半导体激光器，进行通电工作在某一时刻 t ，其失效产品数量为 $m(t)$ ，则在该时刻激光器的可靠度有如下关系式：

$$R(t) = \frac{N - m(t)}{N} = 1 - \frac{m(t)}{N} \quad (5.1)$$

从上式中我们可以看出器件的可靠度与失效产品数量成反比。则相应产品的失效率 $F(t)$ 为在某一时刻 T 失效产品数量 $m(t)$ 与总产品数量的比值：

$$F(t) = \frac{m(t)}{N} \quad (5.2)$$

可靠度与失效率的关系为： $F=1-R$ 。

失效率为激光器单位时间内发生失效的比例，也能从另外一个方面反应激光器的可靠性情况；激光器在工作时，在 t 时刻后 Δt 时间内所产生的失效产品比例，可以表示为：

$$F(t + \Delta t) - F(t) = R(t + \Delta t) - R(t) \quad (5.3)$$

$$\lambda(t) = \frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} \quad (5.4)$$

失效密度为失效比例随时间的分布情况，其可以表示为：

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (5.5)$$

对失效密度在 0 至无穷大的时间内进行积分有如下关系式：

$$\int_0^{\infty} f(t)dt = \int_0^t f(t)dt + \int_t^{\infty} f(t)dt = F(t) + R(t) = 1 \quad (5.6)$$

其代表器件工作时间趋向无穷大时其失效密度为 1。

半导体激光器的可靠性研究主要是为了：（1）研究和分析半导体激光器的失效机理，并通过设计和工艺等多方面方法来改善器件自身失效比例提高可靠性；

（2）对器件的加工环境、制作环境提出要求，如：ESD、环境温度、环境湿度、洁净度等；（3）分析器件自身寿命，优化工艺，提高其寿命使得其满足商业化长时间工作的寿命需求。

因此在实际应用中，提高可靠性或者是提高器件的可靠度，降低失效比例对于器件的大量推广应用具有重要的意义。

另一方面，半导体激光器虽然发展了很多年，然而不同厂家的芯片制备和封装工艺水平也有所差异，因此半导体激光器并非每个批次可靠性都能达到其应用要求，因此如何提高器件可靠性降低失效比例，是可靠性研究的重点也是其最终目的。

5.2 半导体激光器失效规律分布

研究人员通过长期和大量的可靠性研究和试验，发现电子元器件的失效比例有如下规律：在产品早期和产品使用末期阶段其失效比例较高，在中间这段区域其失效比例相对较低，这种失效比例随工作时间变化的曲线形状与“盆”相似，我们成为浴盆曲线。如图 5.1 所示对于大多数电子器件包括半导体激光器，其失效符合浴盆曲线规律^[71,72,73]。如下图：

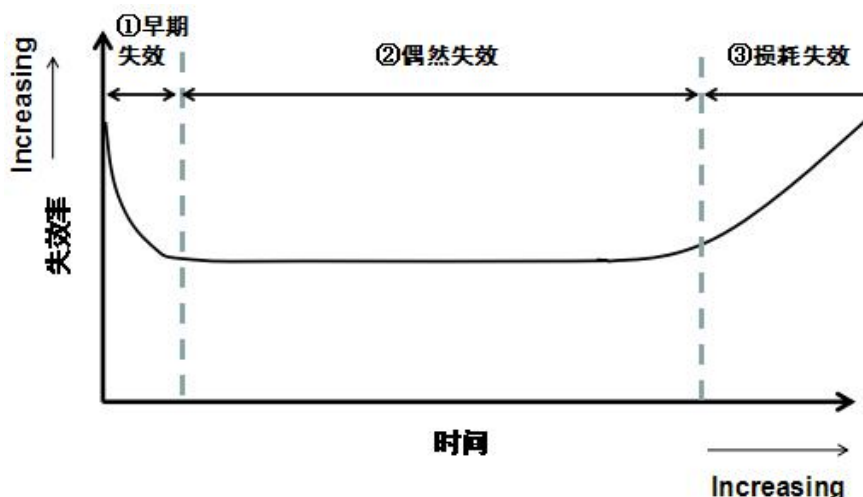


图 5.1 器件失效浴盆曲线示意图

根据浴盆曲线，器件失效概率分布可以分为三个阶段：（1）最早的阶段称为早期失效区，这种失效主要发生在产品使用的初期，其失效的原因很多，即便对于再成熟的工艺水平，也总存在一些不良的产品；另外产品设计的可靠性水平也会影响该阶段的失效比例，该阶段失效率在较短的时间内回到一个较低的水平。通常对于产品可靠性稳定的批次，采用短时间的加速老化能明显筛选出该阶段的不良品。（2）中间阶段偶然失效区，该阶段器件失效率低，时间长，是器件使用寿命的主要时间。（3）最后阶段损耗失效，由于器件长期使用产生的损耗、老化和疲劳等因素，出现了比例较大的失效情况，这个阶段一般出现在产品使用的后期，这时已经到达寿命周期的末期。

5.3 半导体激光器失效分析

5.3.1 半导体激光器主要失效原因

从总体来看，导致半导体激光器失效大致主要有如下几个方面的因素。

（1）有源区退化^[74-79]：在半导体制备过程中，在材料生长、芯片工艺等环节或多或少都会引入缺陷，形成非辐射复合中心。非辐射复合使得材料内部发热更加严重进一步的有增加了缺陷的密度，特别是在有源区中引入缺陷是导致半导体器件退化的重要因素。半导体芯片材料缺陷主要来自如下几个方面：①在外延材料生长过程中衬底上缺陷密度较多，导致在其上面外延的材料产生缺陷；②生长过程中由于污染（腔体污染、芯片表面污染等）而引入的缺陷；③成长不同外延层之

间应力和晶格适配而造成的缺陷；④芯片制备和封装过程中由于机械损伤引入的缺陷。

(2) 腔面退化^[80-82]：典型半导体激光器其腔面主要是通过机械的解离形成，而腔面的退化其大体主要来自如下几个方面的因素：①不当解离过程中造成的机械损伤；②腔面局部光强偏大导致的局部发热量大、腔面氧化等。

(3) 欧姆接触电极金属迁移^[83,84]：高温会使 p 型和 n 型电极金属沿着材料的缺陷和位错往材料内部迁移和扩散，增加了漏电流通道，当金属迁移至有源区时则其破坏了有源区的量子阱，降低量子阱的发光效率，甚至导致器件完全失效；特别是金属金在 InP 系材料中的迁移速率快，因此要避免金与 InP 的直接接触。金属的迁移也使得欧姆接触发生退化。

(4) 过载失效：对于光电子器件其最主要的因素有三方面：电、光、热。而这三方面因素的过载往往都会引起器件的失效。如过高的电压往往会在器件最为薄弱的地方产生击穿形成电流缺陷通道；过大的电流其往往会产生热量累积，其热量累积超过器件的热平衡往往就对器件产生了不可逆的破坏作用；此外电流的过载往往会在局部产生较强的光场，这对腔面也会起到一定的破坏作用。我们这里讲的过载主要是激光器的电、光、热行为超过了器件所能承受的平衡点，最终对器件产生了损坏，导致器件失效。

(5) 静电失效^[85-90]：ESD 静电失效是半导体激光器在使用过程中发生突然失效的一个重要方面。在半导体激光器制备过程中的每个与激光器有接触的环节都可能存在静电失效的风险，在实际的操作环境中，因静电产生的原因和对电路放电方式的不同，目前 ESD 模型大概有如下四类：

①人体模型（Human-Body Model, HBM）：这种模型主要是指在生产车间，人体由于操作设备及其他各种摩擦因素导致静电在人体的累积；这时人与器件相接触，则人体静电通过器件释放；由于人与器件相互接触最频繁，因此人体静电是造成器件失效最常见的因素。根据 ESD STM 5.1 HBM 的耐压能力等级分类为如下表：

表 5.1 HBM ESD 半导体器件敏感等级

Class	Voltage Range
Class 0	<250V
Class 1A	250V to <500V
Class 1B	500V to <1000V
Class 1C	1000V to <2000V
Class 2	2000V to <4000V
Class 3A	4000V to <8000V
Class 3B	$\geq 8000V$

对于光通信用半导体激光器来说器件要求的 HBM ESD $\geq 500V$ 才符合合格要求。

②机器放电模型 (Machine Model, MM)：机器放电模型 ESD 是指，在使用过程中设备本身累积了静电，当设备接触半导体器件或管芯时便产生放电。与人体模型相比，该模型比其放电时间更短、电流更大。

③器件充电模型 (Charge-Device Model, CDM)：在实际产品制备过程中由于各种因素导致器件内部累积了静电，当带有静电的器件，与其他器件或有电势差的地方相接触时便产生放电。CDM 的放电模型其时间更短，在 ns 量级，同时放电的电流更大。

④电场感应模型 (Field Induced Model, FIM)：当器件处在静电场中，其两端出现了感应电势差并产生感应电荷，此时产品与其具有电势差的物体等相接触产生放电；此放电模型与 CDM 类似，对于激光器来说上述的过程导致器件失效的主要原因在于人体静电或机器放电。

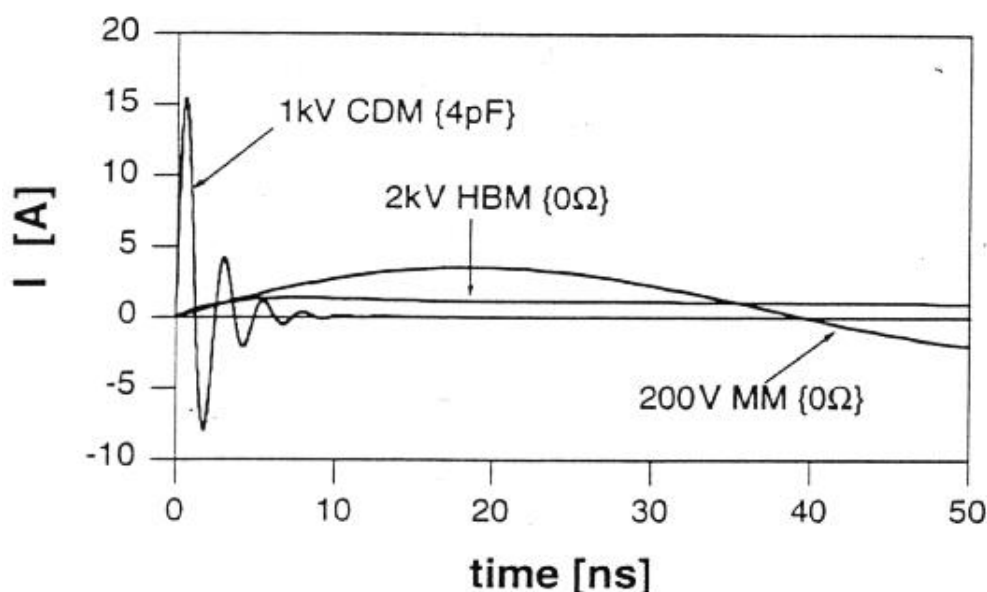


图 5.2 HBM、CMD、MM 模型静电放电过程对比

图 5.2 为 HBM、CMD、MM 三种模型的静电放电对比，从图中静电放电时间很短，在 ns 量级，放电电流在 A 量级；其中 CDM 的放电电流最大、时间最短；从上面来看三种模型都可能对器件造成损坏和失效；但在实际情况下 HBM 是导致器件失效的一个重要因素，主要是由于：人体静电累积在各个环节都可能产生、同时在生产过程中人体直接与器件相接触的概率最多。

ESD 对激光器造成突然失效和缓慢失效。半导体激光器在通常应用下其完全失效多为大电流或电压下的硬击穿（Hard-Breakdown），此种情况器件完全失去功能，可以通过测试可以筛选掉；但最麻烦的是缓慢失效，这种失效通常半导体器件发生软击穿（Soft-Breakdown）或者局部退化发生缓慢失效过程，发生软击穿器件有时在测试上无明显表现不良，但实际器件内部发生性能退化（degradation），因此在后续使用过程中某一个诱导因素就可能导致器件失效，这种失效情况不好完全排除，会面临在实际使用中的失效，而导致一定的损失。

为了进一步降低由于 ESD 而造成的损失，提高器件的抗 ESD 性能和改善器件生产使用环境的静电是重要的两方面因素。在实际生产和操作过程中要做到：（1）机器设备静电放电防护（接地、等离子风扇等），减少静电累积；（2）操作人员要佩戴防静电腕带，口罩、防静电手套、鞋子等；（3）通过优化设计和工艺提高器件的抗大电流和电压能力。

以上是半导体激光器失效的几个主要机理；对于具体的激光器，其失效的原因还要通过具体实验的分析才能确定。

5.3.2 可靠性分析技术

目前半导体器件可靠性分析的主要技术有^[91]：

(1) 光学显微镜分析：常规显微镜分析失效激光器是最简单和直接的手段之一，显微镜可对实现器件表观进行最直接的人眼观察。通过显微镜可以对失效激光器芯片表面进行观察，查看其是否有脏污、划痕、电极脱落、ESD 或过载引起的芯片烧黑。对激光器的端面进行观察查看其是否有缺陷、破损等，特别是指向脊波导区域。

(2) 微分析技术^[92,93]：这种方法主要是结束电子、离子等对失效芯片进行微观、失效区域切除、成分检测分析等。扫描电镜（SEM）和透射电镜（TEM）对失效品的表面和内部结构进行微观的观察、X 射线能量色谱（EDX）分析芯片失效区材料的组分成分、聚焦离子刻蚀（FIB）对失效区域进行微观切割、俄歇电子能谱（AES）等分析手段。

(3) 光电性能测量。目的是分析芯片间的电性能是否正常。如：伏安特性（I-V）分析技术。通过对器件不同时间段的 I-V 特性曲线进行分析，可以得到器件的漏电流、串联电阻等参数的变化，进而分析器件芯片的衰退情况。出光特性分析，分析器件出光的变化；光谱分析，分析光谱的退化情况。

(4) 化学腐蚀、离子腐蚀等分析：着了方法主要是从化学手段上对失效的管芯进行介质层剥离、金属剥离等，而后对剥离后的表面进行分析和查看。

此外，还有深能级瞬态（DLTS）^[94,95]、荧光微热成像（FMI）、扫面光学显微镜（SOM）^[96]等分析技术。

5.3.3 改善器件可靠性方法

对于在实际生产和试验过程中我们无法做到器件百分之百的绝对可靠，我们只能通过研究、试验、分析等查找器件引起失效的主要原因或关键因素，来避免这些因素的产生，并逐步降低造成器件不可靠的因素，提高器件长期工作性能的稳定性，使得器件在使用环境下保持一个低比率的不良率，这在生产和应用上是允许的。根据对器件失效的主要原因进行分析，并结合半导体激光器在实际生产和应用过程中出现不良的统计和分析，我们对改善激光器可靠性提高器件稳定性

的方法做了个如下大致的分析：

(1) 在实际生产和试验环节，对于设备或人体与芯片和器件有直接物理接触的过程，都应增加防静电措施，比较常见的有：设备接地、人体接地、去离子风等措施。

(2) 材料内部的缺陷是导致偶然性失效的一个重要原因：因此在外延材料投入使用时，应观察材料表面的晶格缺陷、污点等，对于有异常缺陷比例的材料应该停止投入使用；另一方面完善和优化材料生长质量。

(3) 在芯片投入封装过程中对于管芯端面和表面异常，如：脏污、缺陷、划痕、破损等，特别是靠近脊型波导或有源区的这类缺陷管芯，应停止投入生产。

(4) 在实际过程中应该平衡器件的发热和散热情况避免电过载引起的失效。

5.4 加速应力寿命实验

浴盆曲线对于常规电子元器件的失效规律进行了大概的描述。在实际的使用过程中，在不同时间段采用相同工艺制备的激光器以及激光器制备工艺不同时期的稳定性的稳定性，其失效比率和分布或多或少会有些差异，因此在使用上我们对激光器的可靠性给出了更加量化的指标：器件寿命，寿命表示激光器能实际有效的工作时间，是激光器性能的一个重要参数指标。

是给半导体激光器一个应力，而这个应力比器件常规使用时要大，才能达到加速器件工作的效果；半导体激光器加速寿命试验一般主要包括：可靠性试验和快速寿命评价试验。激光器可靠性研究试验一般是在产品研发阶段和批量生产阶段都有进行。对于半导体激光器所谓加速就激光器来说我们在研发阶段对其不同批次可靠性进行分析主要是为了分析产品失效的原因从而反馈进行设计和工艺的优化。当激光器进入批量生产阶段，可靠性的目的主要是为了分析芯片各个工艺在不同时期的稳定性情况，通过结果反馈相关工艺进行优化，达到稳定生产的目的。

总体来说可靠性试验的目的为：

(1) 对失效机理进行深入的研究，从而不断地提高产品的可靠性和稳定性。满足不同客户和环境的要求，降低风险和成本。

(2) 对合格产品进行长时间老化并分析其寿命情况。

由于半导体激光器一般寿命较长，失效模式一般都是输出光通量的逐渐衰减或者是阈值的逐渐增加，而常规半导体激光器的工作寿命在 10 万小时或以上，因

此为了减少实验时间一般都会采用加速试验 (Accelerated Life Testing, ALT) 方案。加速寿命试验, 是指激光器工作在比正常工作更大的应力条件下, 相当于加快其工作速度, 提高其衰退速度, 从而达到缩短时间的目的。

通常对半导体激光器可靠性的研究采用温度、电流加速寿命实验; 在加速寿命试验过程中应避免一味地追求缩短时间而不断地增加应力, 这样往往可能会引入新的器件失效机理, 导致其失效分析更加复杂; 因此对于不同的器件其加速应力应选择在合适的水平, 加速寿命测试实验通常有如下几种方法: 电流应力加速、温度应力加速、二者同时加速。

(1) 外推寿命测试:

半导体激光器的输出功率随时间 t 的变化满足如下关系式^[97]:

$$P = P_0 \exp(-t / \gamma) \quad (5.7)$$

P 为 t 时刻后的输出光功率, P_0 为初始光功率, γ 是与器件电流有关的常数。在实际的测量过程中通常给器件通 $I_{th}+20\text{mA}$ 的电流, 通电 t_1 时间后, 测量光功率为 P_1 , 则可以求出常数 γ 。则当 P 降为指定光功率值时, 便可以通过关系式求出器件寿命 t 。但采用这种方法计算半导体激光器的寿命, 试验时间长, 成本高, 不利于实际试验的开展。

(2) 电流应力加速寿命测试:

增加激光器的电流工作应力, 其输出光功率与工作时间 t 有关系式^[98]:

$$P = P_0 \exp(-tj / \tau) \quad (5.8)$$

其中 P 为器件工作 t 时间后的输出光功率, P_0 为激光器初始光功率, j 为通电电流密度, τ (单位: $\text{h}\cdot\text{A}/\text{cm}^2$) 为常数。测量的方法为: 在大电流密度 j_2 下工作的激光器寿命为 t_2 , 则由公式 (5.2) 可推出在常规电流密度 j_1 下工作的器件寿命为:

$$t_1 = t_2 \times \frac{j_2}{j_1} \quad (5.9)$$

(3) 温度应力加速寿命测试:

当半导体激光器在高温环境温度应力下, 其输出光功率 P 随工作时间 t 的变化用指数衰减函数表示为^[99-102]:

$$P = P_0 \exp(-\beta t) \quad (5.10)$$

$$\beta = \beta_0 \exp(-E_a / kT) \quad (5.11)$$

其中 P_0 和 β 分别为器件初始输出光功率和在该温度点下的衰退系数, β_0 为常数, T 为开尔文温标, E_a 为器件激活能, k 为玻耳兹曼常数, 对于器件在不同环境温度下, 其加速应力各不相同, 衰退系数也不一样。

假设激光器在 T 的环境温度下, 工作 t' 后输出光功率为 P' , 根据上述公式可以计算出器件在 T 环境温度下的衰退系数为:

$$\beta = \frac{\ln(P_0 / P')}{t'} \quad (5.12)$$

假设器件在 T 环境温度下的寿命为 t'' , 如公式 (5.10) 所示, 则可以计算出器件在该环境温度下工作的预测寿命为, 这里设定光功率将为 P'' (一般定义 P'' 为初始光功率下降 20% 或 30% 时为器件的寿命, 这里取 20% 来计算):

$$t'' = \ln(1.25) / \beta \quad (5.13)$$

以同样的方法求出器件在另一个环境温度 T_1 下工作, 其衰退系数为 β_1 , 寿命为 t_1'' , 则有如下关系式:

$$\frac{\beta}{\beta_1} = \exp\left[\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (5.14)$$

$$\frac{t''}{t_1''} = \frac{\beta_1}{\beta} = \exp\left[\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1}\right)\right] \quad (5.15)$$

通过关系式 (5.14) 和 (5.15) 我们可以得到器件的激活能和室温下的寿命。当然室温下的寿命也可以通过关系式 (5.10) 和 (5.11) 来推算: 在室温下给器件通电, 计算衰退系数, 从而反推寿命, 但器件在室温下工作其衰退很慢, 因此要获得相对准确的结果, 该方法时间较长。

(4) 温度电流加速寿命测试:

采用温度和电流同时加速的寿命试验为目前较为常见和使用比较多的方法 [61-66, 103], 如光通信半导体激光器厂商 Emcore、Binoptics、NTT 等均采用这种方法。此时一般用平均寿命来表示半导体激光器的工作寿命 MTTF (Mean Time to Failure), 平均寿命为半导体器件可靠度降为 50% 时的时间, MTTF 一般通过对老

化器件的可靠性进行统计，当器件的失效比例达到 50% 时，这个时间即为 MTTF。通常地器件工作寿命的对数与失效比例近似成线性关系，因此通过对不同时间下失效比例的统计可以预测器件在 50% 失效比例下的寿命，但采用这种方法一般试验的时间要相对比较久结果才会比较准确些。

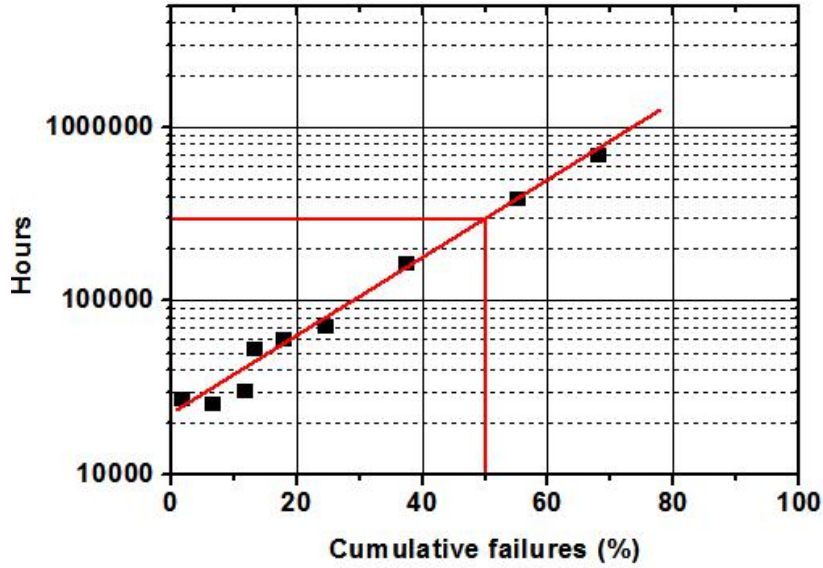


图 5.3 半导体激光器的对数寿命与失效率的线性关系

半导体激光器的平均寿命与其加速应力有如下关系：

$$MTTF = AJ^{-n} \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \quad (5.16)$$

其中 MTTF 表示累积失效率达到 50% 时的时间，A 为常量，J 为电流密度，n 为电流指数。假设在相同的电流密度下，在温度 T_1 时的平均寿命为 $MTTF_1$ ，则温度为 T_2 时的平均寿命 $MTTF_2$ 为：

$$\frac{MTTF_1}{MTTF_2} = \exp\left(\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right) \quad (5.17)$$

则有在不同的注入电流和不同的环境温度下，其寿命见的关系式为：

$$\frac{MTTF_1}{MTTF_2} = \left(\frac{J_2}{J_1}\right)^n \exp\left(\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right) \quad (5.18)$$

对比关系式 (5.11) 和 (5.9)、以及对比关系式 (5.12) 和 (5.3) 可以相互验证寿命计算的原理。对于 MTTF 来说，其要得到累积 50% 的器件失效率需要的老化

时间相对较长，综合如上关系式我们可以参考关系式（5.12）和（5.3），对器件在电流和温度应力下进行寿命的快速计算和验证；对于常规半导体激光器通常电流指数试验值为 1.0-1.5 左右^[61]。

5.5 热特性对半导体激光器性能的影响

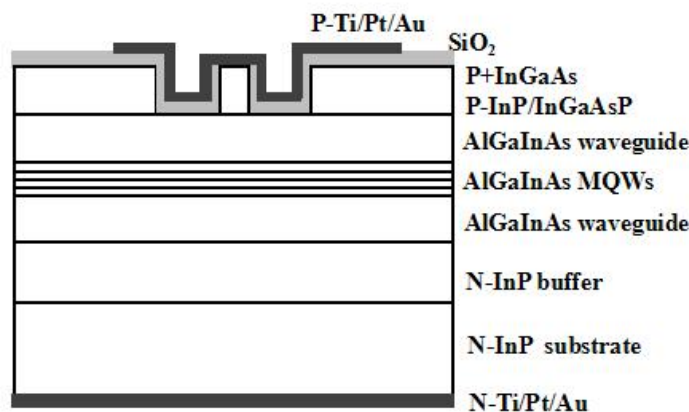


图 5.4 试验芯片结构示意图

在 InP 衬底上，通过 MOCVD 沿生长方向依次生长 N-InP 缓冲层、AlGaInAs 下波导层、AlGaInAs 多量子阱有源层、AlGaInAs 上波导层、InGaAsP 腐蚀停止层、InP 空间层、InGaAsP 过渡层、P+-InGaAs 欧姆接触层，形成激光外延结构。对外延结构片进行脊型腐蚀、脊型开孔、P 面金属、N 型减薄、N 面金属、合金、解离、腔面镀膜等工艺形成 RWG-FP 激光器芯片，其芯片结构如图 5.4 所示；器件腔长为 250 μm ，室温和 $I_{th}+20\text{mA}$ 电流下器件波长约为 1295nm。对同一批次芯片进行 TO 器件封装，对器件进行 48 小时快速老化，剔除早期失效样品；对合格样品进行热阻测试和高温试验。

5.5.1 半导体激光器热阻测试

热阻为激光器热流路径上产生单位热量而引起的温度差，这里温度差为激光器的结区到参考点之间的温度差值，热阻反应了激光器的导热能力；通常对激光器的热阻测量采用 T3Ster 瞬态热阻测试仪进行器件热阻的测量，在实际过程中采用如下相对简便和有效的方法进行器件的热阻测量。半导体激光器的热阻 R_{th} 可以表示为^[104-106]：

$$R_{th} = (T_J - T_X) / P_{them} \quad (5.19)$$

其中 T_J 为激光器结区温度， T_X 为指定参考点温度，这里为环境温度。假设在室温

下，激光器在两个不同的发热功率 P_{them1} 和 P_{them2} 下，芯片结温分别为 T_{J1} 和 T_{J2} ，器件发光峰值波长为 λ_1 和 λ_2 ，则有：

$$R_{th} \cdot P_{them1} = T_{J1} - T_X \quad (5.20)$$

$$R_{th} \cdot P_{them2} = T_{J2} - T_X \quad (5.21)$$

则上述两式相减得到

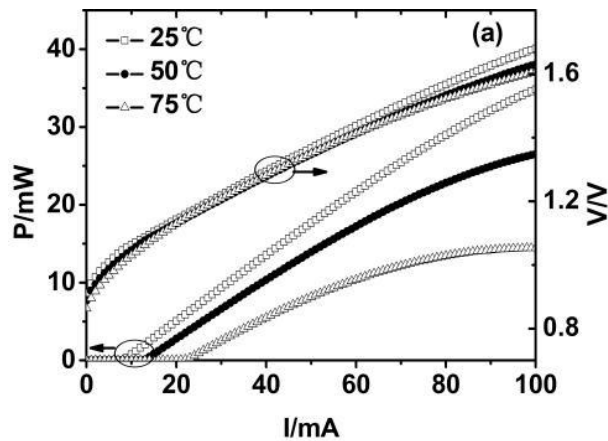
$$R_{th} = \frac{T_{J1} - T_{J2}}{P_{them1} - P_{them2}} = \frac{(\lambda_1 - \lambda_2) / \alpha}{P_{them1} - P_{them2}} \quad (5.22)$$

式中 α 为激光器的温度波长系数。因此，要计算器件的热阻则要测量得到器件的温度波长变化系数，以及波长对器件发热功率变化系数。

(1) 激光器的发热功率 P_{them} 可以表示为：

$$P_{them} = I_f V_f - P_0 \quad (5.23)$$

其中 I_f 和 V_f 分别为激光器的正向工作电流和工作电压， $I_f \times V_f$ 代表了激光器工作时注入的电功率， P_0 为激光器的输出光功率。对激光器在 25℃、50℃、75℃ 环境温度下进行 LIV 测量，如图 2(a) 所示；并分析在不同环境温度下器件发热的变化，选取在相同发热功率点下，进行激光器输出光谱的测量。在相同的发热功率下，器件结区与环境的温度差一致；则在不同环境温度以及相同发热功率下测量器件光谱，可以计算器件的波长温度变化系数。图 2(b) 和 (c) 为三个不同环境温度、50mW 发热功率下器件光谱的变化，从测量结果可得器件的温度波长变化系数为 0.577nm/℃。



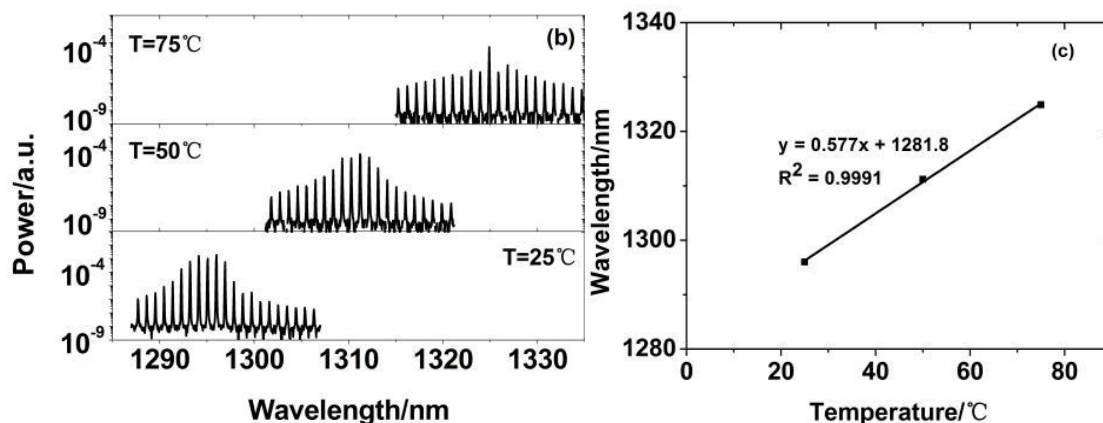


图 5.5 25、50、75 $^{\circ}\text{C}$ 环境温度下器件(a)LIV、(b)光谱和(c)50mW 发热下器件出光波长变化

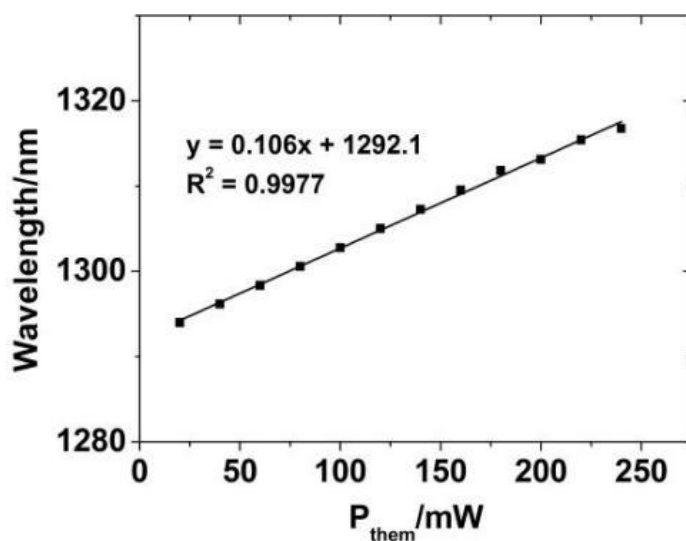


图 5.6 室温下，不同发热功率下激光器的发光峰值波长

(2) 对器件在室温环境温度下，对器件在不同发热功率下进行输出光谱的测量，如图 5.6 所示，从测量结果可得，器件的波长随发热功率的变化系数为 106nm/W 。则根据公式 (5.22) 可得器件的热阻为 183K/W 。

5.5.2 器件高温下的波长蓝移及其分析

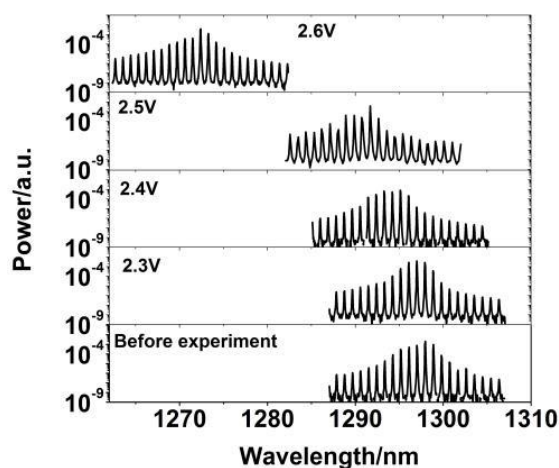


图 5.7 室温下不同通电电压下激光器波长蓝移情况

表 5.2 试验前、后器件光谱的对比

Temperature	Peak wavelength (nm)	Mode-spacing (nm)	n_{eff}
Before experiment	1297.4	0.92	3.66
After experiment	1258.12	0.84	3.77

图 5.7 为室温下, 器件在不同通电电压下其波长蓝移的情况, 从测试结果可知: 电压在 2.3V 以上时器件波长发生缓慢蓝移; 当通电电压至 2.6V 时, 器件波长发生较为明显蓝移, 波长从试验前的 1297nm 蓝移至 1272nm 左右; 电压继续增加器件失效。目前还没有关于 AlGaInAs FP 激光器在高温下衰退并发生不可逆蓝移的相关研究报道; 通常激光器的在阈值以下随电流的增加, 由于能带填充效应而发生蓝移^[107], 此属于激光器正常的现象; 另外有研究集中在量子阱生长采用不同温度进行退火, 发生量子阱混在, 引起波长的蓝移^[108-110]。

说明有源区高温的累积是引起器件波长蓝移的关键因素。半导体四元材料 $Al_xGa_yIn_{1-x-y}As$ 禁带宽度近似满足 Vegard 定律^[111,112], 可表示为:

$$Eg(Al_xGa_yIn_{1-x-y}As) = xEg(AlAs) + yEg(GaAs) + (1-x-y)Eg(InAs) \quad (5.24)$$

通常 AlAs、GaAs、InAs 三种材料其禁带宽度有关系式: $Eg(AlAs) > Eg(GaAs) > Eg(InAs)$, 从式 (5.24) 可知, 激光器输出波长蓝移, 其量子阱材料的禁带宽度增大。高温应力导致的波长蓝移很可能与高温下, Al、Ga 等元素原子从含量高的波导层、量子垒迁移至含量相对低的量子阱区域, 导致量子阱的有效禁带宽度增大。

表 5.2 为波长发生蓝移前后器件光谱变化的对比。FP 半导体激光器的模式间隔可近似表示为^[113]:

$$\Delta\lambda \approx (\lambda_m^2) / 2n_{eff}L \quad (5.25)$$

其中 λ_m 为峰值波长, n_{eff} 为有效折射率, L 为芯片腔长, 这里芯片腔长为 250 μ m。从表中可以看出高温的作用使得波长蓝移的同时, 器件的模式间隔变小, 同时其有效折射率从试验前的 3.66 增加至 3.77。四元材料系 AlGaInAs 中 AlAs、GaAs、InAs 材料的折射率有关系式: $n(AlAs) < n(GaAs) < n(InAs)$ 。说明高温应力的作用使得 In、Ga 元素原子往有源区中心方向迁移导致光场模式的有效折射率提高。

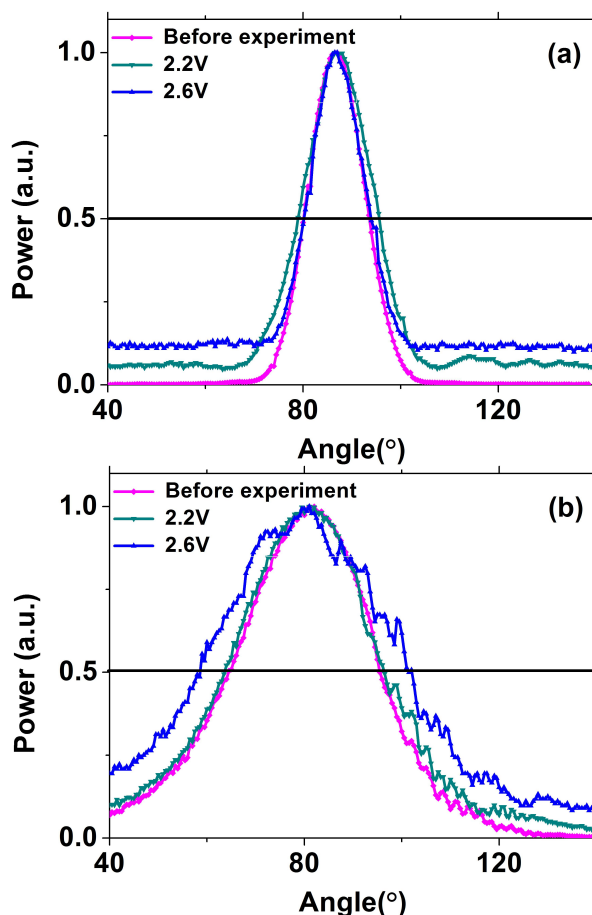


图 5.8 试验前后不同电压下器件远场的变化情况 (a) 水平 (b) 垂直

图 5.8(a)和(b)为不同温度下激光器的远场发散角变化情况，测试结果显示：波长蓝移时器件垂直发散角增大，加电压增加至 2.6V，其垂直发散角（FWHM）从试验前的 31° 增加至 43° ；而水平方向发散角无明显变化。对于半导体激光器其束腰半径（可近似为与激光器端面光斑的半径） w_0 ：

$$w_0 = (M^2) / \pi \lambda \theta \quad (5.26)$$

其中 M^2 为激光光束质量因子， λ 为发光波长， θ 为发散角。发散角的增大对应了激光器束腰半径的减小，也对应了光波导折射率的增大，这与表 5.2 的结果一致。综合来看，高温应力使有源区和靠近有源区区域 Al、Ga、In 元素原子发生迁移，使得波导、量子阱、量子垒层材料的组分发生变化。

5.6 倒装封装对半导体激光器性能改善的分析

我们对上述制备的芯片进行正装和倒装封装，倒装为 P 面朝下封装，对于半导体激光器来说，有源区里 P 型表面的距离为 $2\mu\text{m}$ ，当器件工作时，其有源区的发热离 P 型表面的距离较近，因此通过采用倒装可以降低芯片工作时的热流路劲，

从而提高芯片散热效果改善器件的可靠性。

我们对上述芯片进行 TO-56 封装，封装形式采用正装 (LD-A) 和倒装 (LD-B) 两种。对两种器件的光电参数特性进行分析和对比；在室温下，对两种器件的 LIV 特性进行对比，如图 5.9 所示：与 LD-B 相比，LD-A 的饱和电流从 135mA 提高到 155mA，饱和输出功率从 37mW 提高到 42mW。

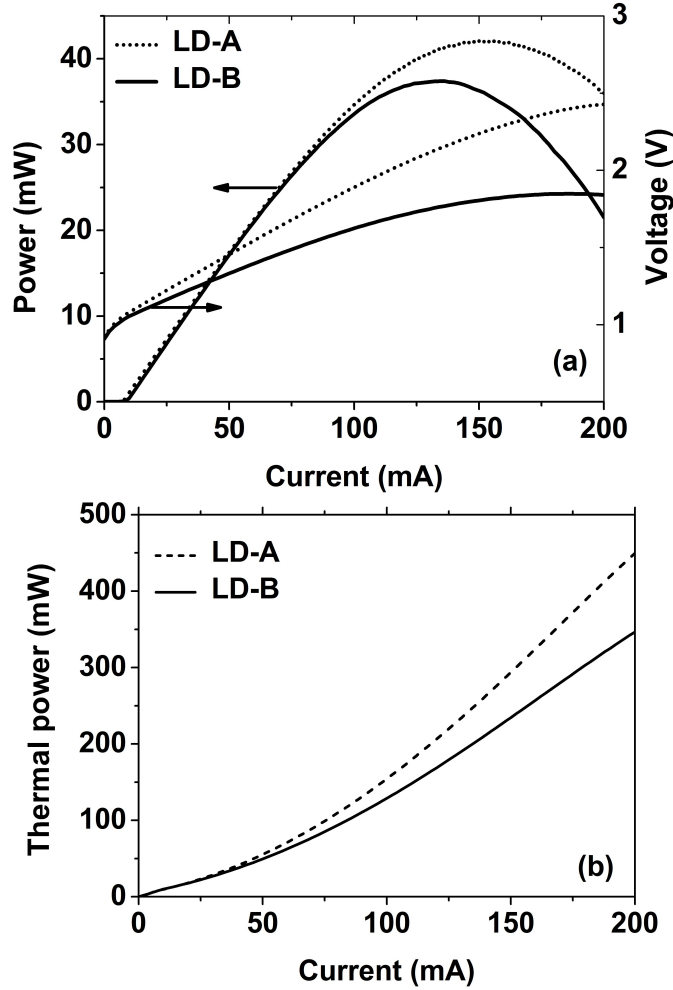


图 5.9 两种激光器参数对比。(a) 两种器件 LIV；(b) 两种器件的发热对比

对于半导体激光器，其正向电压和注入电流满足关系式^[12]：

$$V_f = V_j + I_f \times R_s \quad (5.27)$$

$$V_j \approx h\nu / q \quad (5.28)$$

$$\rho = 1/[q(n\mu_n + p\mu_p)] \quad (5.29)$$

其中 V_f 为器件正向工作电压， I_f 为正向注入电流， $R_s = R_c + R_b$ 为器件的串联电阻，它包含电极接触电阻 R_c 和外延材料的体电阻 R_b ； V_j 为结电压， $h\nu$ 为光子能量， ρ

为电阻率, q 为电子电量, n 和 p 分别为电子和空穴浓度, μ_n 和 μ_p 分别为电子和空穴迁移率。对于半导体激光器其电阻主要来源于掺杂材料区域和非掺杂材料区域 (AlGaInAs 波导和量子阱区域); 通常对于掺杂半导体材料来说, 温度的升高有利于激活杂质提高载流子浓度^[13]; 另一方面, 对于本征 AlGaInAs 材料其本征载流子浓度随温度的增加而增大; 因此, 器件温度升高、电阻降低很可能与整体材料的载流子浓度增加相关^[14]。

图 5.9 (a) 显示: 注入电流增加两种器件工作电压相差越大。其主要由于散热的差异导致两种器件电阻和出光波长的差异。在 200mA 电流下 LD-A、LD-B 的正向工作电压分别为 1.8V 和 2.4V; 在实际应用中, 提高激光器的正向工作电压, 对于改善器件在大电压下的可靠性具有一定的帮助作用。半导体器件工作时, 其发热功率可表征为:

$$P_{them} = V_f \times I_f - P_0 \quad (5.30)$$

其中 P_{them} 为器件的发热功率, P_0 为输出光功率。图 5.9 (b) 为室温下, 不同工作电流两种激光器发热功率对比不同注入电流下两种器件发热功率对比; LD-A 由于工作电压偏大, 使得器件发热功率偏大。半导体激光器的热阻 R_{th} 定义为^[15]:

$$R_{th} = (T_J - T_X) / P_{them} \quad (5.31)$$

其中 T_J 为结区温度, T_X 为指定参考点温度, 这里指环境温度; 对于不同的激光器在相同的热发散功率下, 对比 $T_J - T_X$ 的值可以分析半导体激光器的散热能力。表 5.3 为室温下, 两种激光器在相同热发散功率下器件发光峰值波长 λ_p 的变化对比, 从表中可以看出随着发热功率的增加二者波长相差越大, 当在 340mW 的发热功率下, LD-A 峰值波长比 LD-B 要短 10.6nm; 试验中我们测得激光器发光波长随温度的变化系数约为 0.57nm/°C。以 50mW 和 340mW 这两个发热功率为参考点对器件热阻做近似计算, 从测试结果可得: LD-A 和 LD-B 热阻分别为 131K/W 和 194K/W。

表 5.3 两种激光器不同发热功率下出光波长的变化

P_{them} (mW)	LD-A (nm)	LD-B (nm)
50	1297.52	1297.8
100	1299.96	1304.32
150	1306.2	1308.2
200	1311.6	1314.04
250	1313.24	1321.04

300	1317.8	1325.96
340	1319.32	1329.92

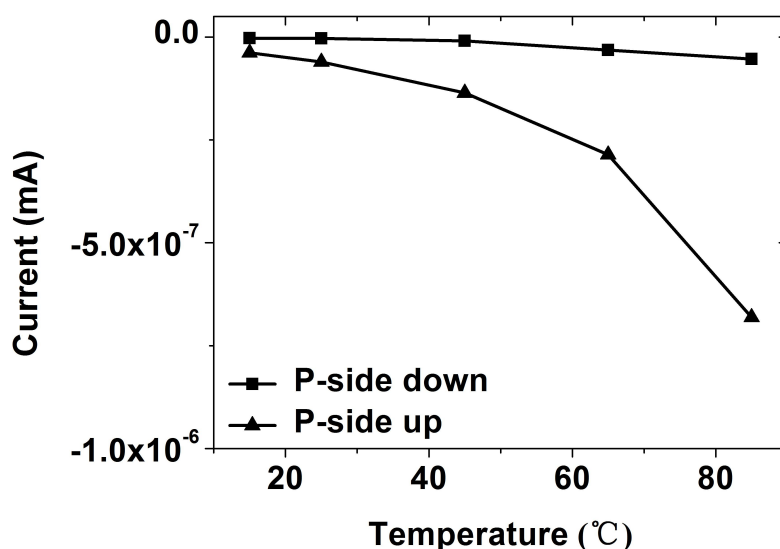


图 5.10 不同温度、-1.5V 偏压下两种激光器的漏电流对比

半导体二极管反向漏电流 I_{leak} 和工作温度近似满足如下关系^[16]:

$$I_{leak} \propto \exp(-E_g / (kT)) \quad (5.32)$$

E_g 为材料禁带宽度，器件漏电流与温度有指数的关系；随着温度的增高，漏电流增大。图 5.10 为不同环境温度、-1.5V 偏压下两种器件的反向漏电流对比；随着温度的增加，二种器件漏电流相差越大；85℃环境温度下，LD-A 和 LD-B 的漏电流分别为 40nA 和 488nA。对于 PN 结，外加的反偏电压增强了内电场阻止了多子的扩散，然而材料中少子在内电场作用下漂移形成反向电流；激光器在反偏下形成电流使得激光器存在着电功率的注入，在器件无出光的情况下，其注入电功率转化为材料内部的热功率；器件的反向电流与器件的温度相关，即与器件的散热能力相关，而温度越高其差异约明显。

5.7 加速寿命试验结果分析

半导体激光器的可靠度随时间呈指数关系^[124,125]:

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t) \quad (5.33)$$

其中 λ 为系数， t 为工作时间，当器件工作时间为 0 时，此时我们无法得知该器件是否是合格样品，此时器件的可靠度为 0，随着工作时间的增加其可靠度越来越高，

当某个激光器完成指定要求寿命时，此时器件的可靠度为 100%。根据器件失效率的浴盆曲线规律，对于常规的半导体激光器在进行寿命测试之前，需要对激光器进行一段时间相对较短的高温老化，剔除老化后不良的早期失效样品，对合格样品进行后续的寿命试验。

寿命试验前我们准备的样品为取自同一批次的芯片，并封装成正装和倒装两种 TO 形式；我们对器件先在 95℃ 环境温度、100mA 通电电流下老化 48 小时进行筛选，剔除早期失效样品，对合格样品进行高温加速老化试验，环境温度为 85℃、通电电流为 75mA，并对不同时间段的老化前后光电参数进行测量和对比分析。

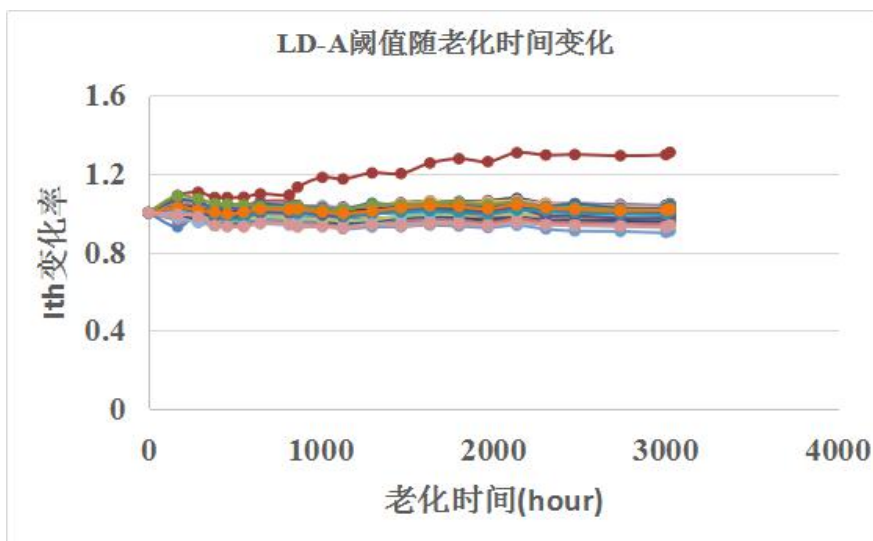


图 5.11 LD-A 归一化阈值随老化时间的变化

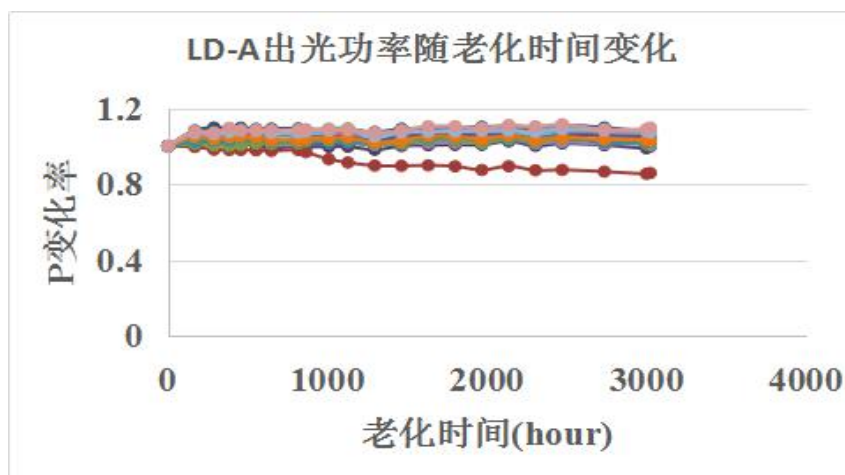


图 5.12 LD-A 归一化出光功率随老化时间的变化

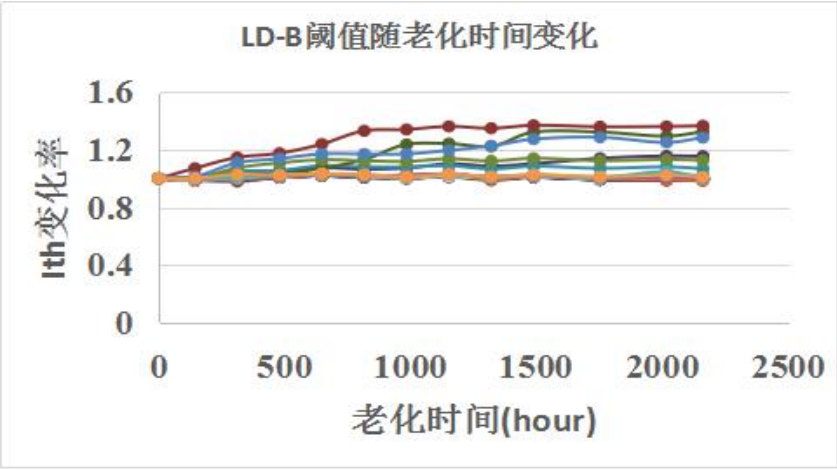


图 5.13 LD-B 归一化阈值随老化时间的变化

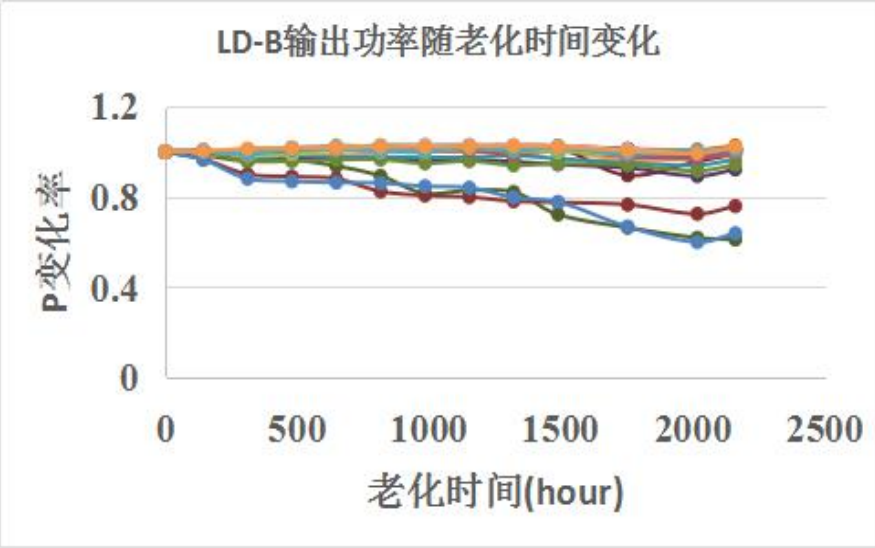


图 5.14 LD-B 归一化出光功率随老化时间的变化

表 5.4 老化前后两种激光器的出光功率变化情况

SN	LD-A 老化 前 Pf	LD-A 老化 3024h 后 Pf	LD-A Pf 变 化率	LD-B 老化 前 Pf	LD-B 老化 2160h 后 Pf	LD-B Pf 变 化率
1#	7.79	8.21	5.39%	7.61	7.66	0.66%
2#	7.82	8.04	2.81%	7.6	7.73	1.71%
3#	7.1	7.64	7.61%	7.7	7.69	-0.13%
4#	7.45	7.76	4.16%	7.55	7.66	1.46%
5#	7.76	8.05	3.74%	7.74	7.68	-0.78%
6#	7.73	8.08	4.53%	7.84	7.74	-1.28%
7#	7.07	7.69	8.77%	7.79	7.92	1.67%
8#	7.84	7.95	1.40%	7.68	7.61	-0.91%

9#	7.76	8.06	3.87%	7.68	7.72	0.52%
10#	7.96	7.94	-0.25%	7.43	6.85	-7.81%
11#	7.61	7.96	4.60%	7.73	7.79	0.78%
12#	7.45	7.84	5.23%	7.62	7.7	1.05%
13#	7.04	7.69	9.23%	7.65	7.63	-0.26%
14#	7.63	8.14	6.68%	7.71	7.79	1.04%
15#	7.6	7.85	3.29%	7.65	7.77	1.57%
16#	7.82	7.85	0.38%	7.66	7.73	0.91%
17#	7.65	8.02	4.84%	7.68	7.71	0.39%
18#	7.41	7.62	2.83%	7.68	7.76	1.04%
19#	6.18	6.32	2.27%	7.79	7.81	0.26%
20#	7.43	6.38	-14.13%	7.73	7.79	0.78%
21#	7.7	7.86	2.08%	7.66	7.75	1.17%
22#	7.78	8.12	4.37%	7.77	7.84	0.90%
23#	7.78	8.05	3.47%	7.53	7.28	-3.32%
24#	7.78	8	2.83%	7.68	7.73	0.65%
25#	7.41	7.93	7.02%	7.66	7.71	0.65%
26#	7.02	7.71	9.83%	7.62	7.69	0.92%
27#				7.65	7.73	1.05%
28#				7.64	7.63	-0.13%
29#				7.68	7.75	0.91%
30#				7.74	7.86	1.55%
31#				7.67	7.79	1.56%
32#				7.55	7.63	1.06%
33#				7.16	4.38	-38.83%
34#				7.67	7.69	0.26%
35#				7.77	7.77	0.00%
36#				7.66	7.76	1.31%
37#				7.73	7.8	0.91%
38#				7.68	7.76	1.04%
39#				7.63	7.66	0.39%
40#				7.73	7.78	0.65%
41#				7.6	7.62	0.26%
42#				7.76	7.69	-0.90%
43#				7.67	7.76	1.17%
44#				7.5	5.7	-24.00%
45#				7.52	7.09	-5.72%

46#				7.6	7.69	1.18%
47#				7.66	7.79	1.70%
48#				7.57	7.79	2.91%
49#				7.75	7.83	1.03%
50#				7.58	7.72	1.85%
51#				7.69	7.76	0.91%
52#				7.48	7.55	0.94%
53#				7.77	7.84	0.90%
54#				7.71	7.81	1.30%
55#				7.28	4.65	-36.13%
56#				7.91	7.86	-0.63%
57#				7.81	7.84	0.38%
58#				7.69	7.74	0.65%
59#				7.46	7.53	0.94%
60#				7.57	7.73	2.11%
AVG			3.72%			-1.23%

根据激光器出光功率随工作时间呈现指数衰减的规律,可知激光器 LD-B 在 2160h 的加速老化过程中器件平均输出光功率衰退了 1.23%,其衰退系数为 0.000005336;而 LD-A 在 3024h 的老化过程中其平均出光功率提升了 3.72%,主要的原因可能是由于倒装改善了 LD-A 的散热特性优化了器件的老化特性,另一方面高温老化对器件来说,在合理的温度承受范围内,其高温过程类似材料的退火过程,对材料的整体性能有所改善。

5.8 小结

本章主要对激光器可靠性进行了分析,对于半导体激光器着重分析了导致其失效的最常见因素,主要有:生长材料质量、激光器腔面、金属迁移、ESD、以及与器件相接触的各个过程可能引起的电过载现象;并得出了改善激光器可靠性的方法。对器件在不同加速应力下寿命模型进行分析,给出了进行加速老化器件寿命计算的基本模型;此外半导体激光器的可靠性与寿命呈对数正态分布,因此通过统计累积失效比例可以线性拟合并推算器件的平均寿命。

对 AlGaInAS 多量子阱 RWG-FP 半导体激光器进行热阻的测量和分析,得到试验器件的热阻为 183K/W。对激光器进行不同的通电电压试验,试验结果表明:

在高温应力作用下，激光器材料内部的波导层、量子阱、量子垒中的 Al、Ga、In 元素原子发生迁移，使得材料的组分发生变化；并使器件的波长发生不可逆的蓝移、光场模式有效折射率增加、器件工作电压增大，高温的过程伴随着器件性能的衰退。这些结果表明在实际应用过程中，当激光器的温度累积超过 200℃ 时或者存在超过 400mA 左右的电浪涌，即便在较短的时间内也会对器件造成不可逆的损坏作用。试验结果对进一步分析器件在高温下的失效机理以及改善器件的高温性能提供试验基础。

接着对芯片进行正装和倒装封装，并对两种不同封装形式的激光器进行光电参数测量和加速老化试验。结果显示：与常规封装器件相比，采用倒装结构器件的饱和电流从 135mA 提高至 155mA，饱和输出功率从 37mW 提高至 42mW，热阻从 194K/W 降低至 131K/W；-1.5V 偏压下，85℃ 环境温度下，LD-A 和 LD-B 的漏电流分别为 40nA 和 488nA。最后对两种器件在 85℃ 环境温度、75mA 电流下进行加速老化试验；老化结果显示：采用倒装工艺制备器件经过 3024 小时老化后器件出光功率有所升高，采用正装封装器件经过 2160 小时老化后其出光功率整体出现退化。试验结果表明高温累积是导致半导体激光器出现退化甚至失效的主要原因，倒装工艺有效改善了器件的散热特性，提高了器件的使用寿命。

第六章 结论与展望

随着信息技术的飞速发展，光通信越来越广泛地应用在了人们的生活中，如上网的光纤入户，数据中心的数据流量传输，日常生活中的有线电视；甚至在一些军用领域，如雷达、军事通信等；光通信给人们的生活带来了越来越多的便利。

论文首先对激光器的工作原理和芯片制备工艺进行介绍和分析；并从高速半导体激光器的外延材料、量子阱优化、芯片工艺优化等方面着手进行芯片的制备，并对激光器的热特性进行分析和改善，取得了如下的主要研究成果和创新点。

1. 通过对量子阱进行优化，实现了适合高速激光器的量子阱结构。并对芯片工艺进行优化实现了倒台的 BCB 结构，在金属分布上对芯片进行优化降低芯片电容，测试结果显示芯片室温和高温的调制带宽达到 10GHz。

2. 对激光器的热特性进行分析，结果显示随着有源区温度的升高芯片内部的量子阱发生元素的迁移使得材料的禁带宽度和有效折射率产生变化，进而导致芯片发光的远场角发生变化，试验结果为进一步研究高温的失效机理以及改善芯片的可靠性提供试验基础。

3. 采用倒装封装工艺，与常规封装器件相比，采用倒装结构器件的饱和电流从 135mA 提高至 155mA，饱和输出功率从 37mW 提高至 42mW，热阻从 194K/W 降低至 131K/W；-1.5V 偏压下，85℃环境温度下，LD-A 和 LD-B 的漏电流分别为 40nA 和 488nA。最后对两种器件在 85℃环境温度、75mA 电流下进行加速老化试验；老化结果显示：采用倒装工艺制备器件经过 3024 小时老化后器件出光功率有所升高，采用正装封装器件经过 2160 小时老化后其出光功率整体出现退化。试验结果表明高温累积是导致半导体激光器出现退化甚至失效的主要原因，倒装工艺有效改善了器件的散热特性，提高了器件的使用寿命。

下一步工作主要在进一步提高器件的性能上，首先对 InGaAsP/AlGaInAs 混合式量子阱结构材料进行优化，进一步改善材料的生长质量；并着重在提高器件输出功率；同时，对器件可靠性改善进行研究，使得器件在常规应用环境下长期可靠稳定的工作是下一步的主要重点。为此我们对接下来进一步的研究做了如下的规划和展望：

1. 研究不同应变、不同厚度、不同层数，以及不同波导结构下，激光器工作时载流子的注入效率；通过对材料生长的温度、氛围、流量、压强等进行调整改

善材料的生长质量，从而提高 InGaAsP/AlGaInAs 混合式量子阱结构的整体性能，优化空穴在阱中的均匀分布，降低阈值、提高微分增益。

2. 研究激光在腔内的损耗情况，争取进一步降低载流子和光子在材料内发生的吸收、自发辐射和非辐射复合等情况，着重从材料结构、掺杂分布和材料生长质量方面进行优化，从而提高发光效率。

3. 合理设计芯片的波导结构、芯片发光的远场和耦合透镜等的匹配，提高单模光纤耦合效率，提高出光；对半导体材料内部载流子和光子的相互作用进行进一步的研究。

4. 激光器工作在大电流下，往往会产生大热量的累积；大电流和高热量是导致半导体激光器失效的主要因素，因此降低器件发热和优化器件散热是接下来重要的一个方向，如：如何降低器件的串联电阻，包括耦合接触电阻和体材料电阻，降低器件的焦耳发热；另一方面在大的器件热量产生的同时如何及时有效提高散热；此外对器件失效的机理进行研究，特别是在电过载情况下器件失效的关键点因素进行分析，如材料内部缺陷的变化、有源区量子阱的变化、以及输出光电参数的变化，优化器件性能提高器件可靠性是器件进入应用阶段的重要环节。

参考文献

- [1] Hall RN, Fenner GE, Kingsley JD, et al. Coherent Light Emission From GaAs Junctions[J]. Phy. Rev. Lett.: 1962, 9: 366-368.
- [2] Kao K, Hockham CA. Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies[J]. IEEE proceedings: 1966, 113(7):1151-1158.
- [3] Kapron FP, Keck DB, Maurer RD. Radiation Losses in Glass Optical Waveguides[J]. Appl. Phys. Lett.: 1970, 17(10): 423-425.
- [4] Cook J, Szentesi O. North American field trials and early applications in telephony[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications: 1983, 1(3): 393-397.
- [5] Keyes R, Quist T. Recombination radiation emitted by gallium arsenide diodes[J]. PROC. IRE. (Correspondence): 1962, 50:1822-1823.
- [6] Hall RN, Fenner GE, Kingsley JD, et al. Coherent Light Emission From GaAs Junctions[J]. Phys.Rev. Lett.: 1962, 9(9) : 366-368.
- [7] Quist T, Rediker R, Keyes R, et al. Semiconductor laser of GaAs[J]. Appl. Phys. Lett.: 1962, 1: 91-92.
- [8] Rupprecht H, Woodall JM, Pettit DG. Efficient Visible Electroluminescence at 300°K from Ga_{1-x}Al_xAs p-n Junctions Grown by Liquid-Phase Epitaxy[J]. Appl. Phys. Lett.:1967, 11: 81-83.
- [9] Panish MB, Hayashi I, Sumski S. A technique for the preparation of low-threshold room-temperature GaAs laser diode structures[J]. IEEE J. Quantum Electron.:1969, 5: 210-211.
- [10] Alferov ZI, Andreev V, Portnoi E, et al. AlAs-GaAs heterojunction injection lasers with a low room-temperature threshold[J]. Soviet Physics Semiconductors: 1970, 3(9): 1107-1110.
- [11] Panish MB, Hayashi I, Sumski. DOUBLE - HETEROSTRUCTURE INJECTION LASERS WITH ROOM - TEMPERATURE THRESHOLDS AS LOW AS 2300 A/cm²[J]. Appl. Phys. Letters: 1970, 16: 326-327.
- [12] Hartman RL, Schumaker NE, Dixon RW. Continuously operated (Al,Ga)As double-heterostructure lasers with 70°C lifetimes as long as two years[J]. Applied Physics Letters, Appl. Phys. Letters: 1977, 31 (11): 756-759.
- [13] 韩威. 1.55μm 高速激光器材料结构设计及外延生长[D]. 河北工业大学, 2006.
- [14] 孟桂超. 1550nm 脊波导高速激光器芯片设计[D]. 中电科技集团第 13 研究所, 2006.
- [15] Wang D L, Zhou N, Zhang J, et al. 1.3- μ m uncooled 10 Gb/s directly modulated MQW AlGaInAs/InP laser diodes[J]. CHINESE OPTICS LETTERS: 2005, 3(8): 466-468.
- [16] 范丹枫. 高速调制半导体激光器的微波封装与测量研究[D]. 浙江大学, 2014.
- [17] 刘勇, 李锦华, 周雷等. 高速半导体激光器同轴封装工艺误差分析[J]. 中国电子科学研究院学报: 2015, 10(6): 652-661.
- [18] Lipsanen H, Coblenz D L, Logan R A, et al. High-speed InGaAsP/InP Multiple-Quantum- Well

-
- Laser[J]. IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS: 1992, 4(7): 673-675.
- [19] Gutierrez-Aitken A L, Yoon H, Bhattacharya P. High-Speed InP-Based Strained MQW Ridge Waveguide Laser[J]. Indium Phosphide and Related Materials, 1995. Conference Proceedings., Seventh International Conference, 476-479.
- [20] Furtado M T, Manganote E J T, Bordeaux-Rego A C G, et al. InGaAs/AlGaInAs/InP Laser with Compressively Strained Multiquantum Well Layers for High Speed Modulation Bandwidth[J]. Brazilian Journal of Physics: 1997, 27(4): 411-416.
- [21] Yagi H, Onishi Y, Koyama K, et al. 1.3 μ m Wavelength AlGaInAs/InP Ridge-Waveguide Lasers Utilizing Benzocyclobutene Planarization Process[J]. SEI TECHNICAL REVIEW: 2009, 69: 92-95.
- [22] Erdogan T. Fiber grating spectra. Journal of Lightwave Technology: 1997, 15(8): 1277-1294.
- [23] Kogelnik H, Shank C. Coupled-Wave Theory of Distributed Feedback Lasers[J]. J. Appl. Phys.: 1972, 43(5): 2327-35.
- [24] Crosignani B, Porto PD, Yariv A. Coupled-mode theory and slowly-varying approximation in guided-wave optics[J]. Optics Communications: 1990, 78(3-4): 237-239.
- [25] Agrawal GP, Bobeck AH. Modeling of distributed feedback semiconductor lasers with axially-varying parameters[J]. IEEE J QUANTUM ELECT: 1988, 24(12): 2407-2414.
- [26] Whiteaway JEA, Thompson G, Collar AJ, et al. The design assessment of $\lambda/4$ phase-shifted DFB laser structures[J]. IEEE J QUANTUM ELECT: 1989, 25(6): 1261-1279.
- [27] Coldren LA, Corzine SW, Masanovic ML. Diode lasers and photonic integrated circuits[M]. JOHN WILEY & SONS, INC. 1995.
- [28] Carroll J, Whiteaway J, Plumb D. Distributed feedback semiconductor lasers[J]. The Institution of Electrical Engineers SPIE Optical Engineering Press, 1998.
- [29] Makino T. Threshold condition of DFB semiconductor lasers by the local-normal-mode transfer-matrix method: Correspondence to the coupled-wave method[J]. J LIGHTWAVE TECHNOL: 1994, 12(12): 2092-2099.
- [30] Maywar DN, Agrawal GP. Transfer-matrix analysis of optical bistability in DFB semiconductor laser amplifiers with nonuniform gratings[J]. IEEE J. Quantum Electron.: 1997, 33(11): 2029-2037.
- [31] Fernandes CF. Transfer matrix modelling in DFB lasers[J]. MICROELECTRON ENG: 1998, 43-44: 553-560.
- [32] Fernandes CAF, Morgado JAP. The Static and Dynamic Transfer-Matrix Methods in the Analysis of Distributed-Feedback Lasers[J]. Numerical Simulations of Physical and Engineering Processes: 2011, 435-468.
- [33] Lauridsen VC, Sondergaard T, Varming P, et al. Design of distributed feedback fibre lasers. Integrated Optics and Optical Fibre Communications[J], 11th International Conference on, and 23rd European Conference on Optical Communications: 1997, 22-25.
- [34] Makino T. Transfer-matrix analysis of the intensity and phase noise of multisection DFB

-
- semiconductor lasers[J]. IEEE J. Quantum Electron.: 1991, 27(11): 2404-2414.
- [35] Muriel MA, Carballar A. Internal field distributions in fiber Bragg gratings[J]. IEEE PHOTONIC TECH: 1997, 9(7): 955-957.
- [36] Cartledge JC, Srinivasan RC. Extraction of DFB laser rate equation parameters for system simulation purposes[J]. IEEE Light wave Technology: 1997, 15(5): 852-860.
- [37] Zou LX, Huang YZ, Liu BW, et al. Thermal and high speed modulation characteristics for AlGaInAs/InP microdisk lasers[J]. Opt Express.: 2015, 23(3):2879-88.
- [38] Bardella P, Weng W. Chow WW, Montrosset I. Design and Analysis of Enhanced Modulation Response in Integrated Coupled Cavities DBR Lasers Using Photon-Photon Resonance[J]. Photonics: 2016, 3(1), 4.
- [39] Morthier G, Abbasi A, Shahinl M, et al. High Speed Modulation of InP Membrane DFB Laser Diodes. Transparent Optical Networks (ICTON)[J]. 2016 18th International Conference: 2016, 10-14.
- [40] Wang DL, Zhou N, Zhang J, et al. 1.3- μ m uncooled 10 Gb/s directly modulated MQW AlGaInAs/InP laser diodes[J]. CHINESE OPTICS LETTERS:2005, 3(8): 466-468.
- [41] Lipsanen H, Coblenz DL, Logan RA, et al. High-speed InGaAsP/InP Multiple-Quantum-Well Laser[J]. IEEE PHOTONIC TECH L: 1992, 4(7): 673-675.
- [42] Fukushima T, Nagarajan R, Ishikawa M, et al. High-Speed Dynamics in InP Based Multiple Quantum Well Lasers[J]. Jpn. J. Appl. Phys.: 1993, 32:70-83.
- [43] Gutierrez-Aitken AL, Yoon H, Bhattacharya P. High-Speed InP-Based Strained MQW Ridge Waveguide Laser[J]. Indium Phosphide and Related Materials, 1995. Conference Proceedings., Seventh International Conference: 1995, 476-479.
- [44] Cakmak B. Fabrication and characterization of dry and wet etched InGaAs/InGaAsP/InP long wavelength semiconductor lasers[J]. Opt Express.: 2002, 10(13): 530-535.
- [45] Yagi H, Onishi Y, Koyama K, et al. 1.3 μ m Wavelength AlGaInAs/InP Ridge-Waveguide Lasers Utilizing Benzocyclobutene Planarization Process[J]. INFORMATION & COMMUNICATIONS: 2009, 92-95.
- [46] Bouchoule S, Azouigui S, Patriarche G, et al. PROCESSING OF InP-BASED SHALLOW RIDGE LASER WAVEGUIDES USING A HBr ICP PLASMA[J]. 2007 International Conference on Indium Phosphide and Related Materials Conference Proceedings: 2007, 218-221.
- [47] Pelzel R. A Comparison of MOVPE and MBE Growth Technologies for III-V Epitaxial[J]. CS MANTECH Conference: 2013, 105-108.
- [48] Franchi S, Trevisi G, Seravalli L, et al. Quantum dot nanostructures and molecular beam epitaxy[J]. Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials:2003, 47:166-195.
- [49] Bucio TD, Khokhar AZ, Lacava C, et al. Material and optical properties of low-temperature NH₃-free PECVD SiN_x layers for photonic applications[J]. J. Phys. D: Appl. Phys.: 2016, 50(2): 1-12.
- [50] A. Bengi A, Jang SJ, Yeo CI, et al. A comparative study on ridge waveguide laser diodes with

-
- SiO₂ and SiN_x passivation layers[J]. Surface and Interface Analysis:2010, 42(6-7):963-965.
- [51] Eisenstein G, Stulz, LW. High quality antireflection coatings on laser facets by sputtered silicon nitride[J]. Applied Optics:1984, 23(1):161-164.
- [52] Grillot F. On the Effects of an Antireflection Coating Impairment on the Sensitivity to Optical Feedback of AR/HR Semiconductor DFB Lasers[J]. IEEE J QUANTUM ELECT: 2009, 45(6): 720-729.
- [53] Bhore PV, Gokhale MR, Ghosh S, et al. Effect of facet coatings on laser diode characteristics[J]. Indian journal of engineering & materials sciences: 2004, 11:438-440.
- [54] Tiemeijer LF, Thijs PJA, Binsma JJM, et al. Improved selectivity and decreased spontaneous emission from an AR-HR coated SL-MQW DFB semiconductor laser amplifier[J]. IEEE PHOTONIC TECH L: 2002, 179-181.
- [55] Garnov SV, Klimentov SM, Said AA, et al. Laser damage of HR, AR-coatings, monolayers, and bare surfaces at 1064 nm[J]. Proc. SPIE : 1992, 1848: 162-181.
- [56] Panchal CJ, Mistry SN, Patel KM, et al. Facet coating of diode laser for high-power and high-reliable operatio[J]. Proc. SPIE : 2003, 4829: 18-19.
- [57] Lee SJ, An HJ, Ji T. Optimization of High and Anti-reflective Facet Coating for Near Infrared High Power Laser Diode[J]. Advanced Science and Technology Letters: 2016, 139: 418-421.
- [58] Morton D, Stevenson I, Garcia M. Design and Development of Optical Coatings on Laser Bar Facets[J]. Photonics North: 2015, 413-423.
- [59] Trevisanello L, Meneghini M, Mura G, et al. Accelerated Life Test of High Brightness Light Emitting Diodes[J]. IEEE Trans Dev Mater Reliab: 2008, 8(2):304-311.
- [60] Uddin A, Wei AC, Andersson TG. Study of degradation mechanism of blue light emitting diodes[J]. Thin Solid Films: 2005, 483:378-381.
- [61] Huang JS. Temperature and Current Dependences of Reliability Degradation of Buried Heterostructure Semiconductor Lasers[J]. IEEE T DEVICE MAT RE: 2005, 5(1): 150-154.
- [62] Huang JS. Reliability-Extrapolation Methodology of Semiconductor Laser Diodes: Is a Quick Life Test Feasible?[J]. IEEE T DEVICE MAT RE: 2006, 6(1): 46-51.
- [63] Huang JS, Nguyen T, Hsin W, et al. Reliability of Etched-Mesa Buried-Heterostructure Semiconductor Lasers[J]. IEEE T DEVICE MAT RE: 2005, 5(4): 665-674.
- [64] Huang JS, Olson T, Isip E. Human-Body-Model Electrostatic-Discharge and Electrical-Overstress Studies of Buried-Heterostructure Semiconductor Lasers[J]. IEEE T DEVICE MAT RE: 2007, 7(3): 453-461.
- [65] Sakakibara Y, Oomura E, Higuchi H, et al. High temperature CW operation of p-substrate buried crescent laser diode emitting at 1.31.3μm[J].ELECTRON LETT: 1984, 20(19): 761-762.
- [66] Nakajima Y, Higuchi H, Kokubo Y, et al. High-Power High-Reliability Operation of 1.3 μm p-Substrate Buried Crescent Laser Diodes[J]. J LIGHTWAVE TECHNOL: 1987, LT-5(9): 1263-1268.
- [67] 苏美开, 高稚允, 左昉等. 激光二极管寿命测试方法研究[J]. 激光与红外: 2004, 34(2):

124-127.

- [68] 荣宝辉, 王晓燕, 安振峰等. 大功率半导体激光器加速寿命测试方法[J]. 封装、测试与设备: 2008, 33(4): 360-362.
- [69] 左昉, 苏美开, 武金刚. 1310nm LD 组件高低温循环寿命研究[J]. 光学技术: 2007, 33(1): 77-79.
- [70] 赵篙山, 李洵, 许桂珍. 1.3 μ m InGaAsP/InP DC-PBH 激光器的寿命研究[J]. 通信学报: 1987, 8(4): 35-39.
- [71] 金壁辉. 系统可靠性工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [72] 李能贵. 电子元器件的可靠性[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1990.
- [73] Fukuda M. Degradation modes of semiconductor laser used in optical fiber transmission system[J]. Proc. SPIE: 1992, 1634: 184-191.
- [74] 王德宏, 李雅静, 安振峰等. 大功率半导体激光器步进加速老化研究[J]. 纳米器件与技术: 2008, 45(9): 508-510.
- [75] Goddard LL, Kneissl M, Bour DP, et al. Gain characteristic of continuous-wave InGaN multiple quantum well laser diodes during life testing[J]. J. Appl. Phys.: 2000, 88(7): 3820-3823.
- [76] Sasaki T, Mori H, Tachikawa M, et al. Aging tests of InP-based laser diodes heteroepitaxially grown on Si substrates[J]. J. Appl. Phys: 1998, 84(12): 6725-6728.
- [77] Doan VV, Garey GP, Zhou H, et al. Reliability of 980-nm laser diodes based on Novalux extended cavity surface-emitting laser (NECSEL) concept[J]. Proc. SPIE: 2004, 5364: 190-200.
- [78] Jimenez J. Laser diode reliability: crystal defects and degradation modes[J]. C. R. Physique: 2003, 663-673.
- [79] Huang JS, Jan YH, Ren DW, et al. Defect Diffusion Model of InGaAs/InP Semiconductor Laser Degradation[J]. Applied Physics Research: 2016, 149-157.
- [80] Tomm JW, Hempel M, Krakowski M, et al. Mechanisms and kinetics of the Catastrophic Optical Damage (COD) of high-power semiconductor lasers[J]. Photonics Society Summer Topical Meeting Series: 2012, 51-52.
- [81] Ziegler M, Hempel M, Larsen HE, et al. Physical limits of semiconductor laser operation: A time-resolved analysis of catastrophic optical damage[J]. Appl. Phys. Lett.: 2010, 97: 021110-1-021110-3.
- [82] Souto J, Pura JL, Torres A, et al. Sequential description of the catastrophic optical damage of high power laser diodes[J]. Proc. SPIE: 2016, 9733: 973306-1-973306-6.
- [83] Salzman J, Khait YL, Beserman R. Material evolution and gradual degradation in semiconductor lasers and light emitting diodes[J]. ELECTRON LETT: 1989, 25(3): 244-246.
- [84] Laszcz A, Czerwinski A, Ratajczak J, et al. Transmission electron microscopy characterization of Au/Pt/Ti/Pt/GaAs ohmic contacts for high power GaAs/InGaAs semiconductor lasers[J]. Journal of Microscopy: 2009, 237: 347-351.
- [85] Dechairo LF, Unger BA. Degradation in InGaAsP semiconductor lasers resulting from human

-
- body model ESD[J]. J. Electrostat: 1993, 29(3): 227-250.
- [86] Huang JS, Lu H. Size Effect on ESD Threshold and Degradation Behavior of InP Buried Heterostructure Semiconductor Lasers[J]. The Open Applied Physics Journal: 2009, 2:5-10.
- [87] Kim T, Kim T, Kim S, et al. Degradation Behavior of 850 nm AlGaAs/GaAs Oxide VCSELs Suffered from Electrostatic Discharge[J]. ETRI Journal: 2008, 30(6): 833-843.
- [88] Magistrali F, Sala D, Salmini G, et al. ESD induced degradation mechanisms of InGaAsP/ InP lasers[J]. Quality and Reliability Engineering International: 1992, 8: 287-293.
- [89] Twu Y, Cheng LS, Chu SNG, et al. Semiconductor laser damage due to human-body-model electrostatic discharge[J]. J. Appl. Phys.: 1993, 74: 1510-1520.
- [90] Atkins R, Decusatis C. Latent Electro-Static Damage in Vertical Cavity Surface Emitting Semiconductor Laser Arrays[J]. Sarnoff Symposium: 2006, 1-3.
- [91] 中国科学院半导体研究所理化分析中心研究室.半导体的检测与分析[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [92] Bao L, Wang J, Devito M, et al. Reliability of high performance 9xx-nm single emitter laser diodes[J]. Proc. SPIE:2010, 7583:758302-1-758302-10.
- [93] Podpora C, Mcelhinney M, Walker R. Materials FA Investigation of a Semiconductor Laser Diode Package with SEM FIB EDS and correlation with the Feedback Oxidation Loop of FA literature[J]. Microscopy and Microanalysis: 2005, 11(s02): 1606-1607.
- [94] Sin YK, Presser N, Ives N, et al. A Study of Degradation in High Power Multi-Mode InGaAs-AlGaAs Strained Quantum Well Lasers as Pump Lasers[J]. Mater. Res. Soc. Symp. Proc.: 2010, 1195: 1195-B01-06.
- [95] Sanayeh MB, Jaeger A, Schmid W, et al. Investigation of dark line defects induced by catastrophic optical damage in broad-area AlGaInP laser diodes[J]. Appl. Phys. Lett.: 2006, 89(10): 101111-101111-3.
- [116] Cole EI, Soden JM, Rife JL, et al. Novel Failure Analysis Techniques Using photon probing With a Scanning Optical Microscope[J]. 32nd Annual International Reliability Physics Symposium: 1994, 388-398.
- [97] 邵碧琳. 硅衬底 ZnO/GaN 半导体材料生长及 LED 器件寿命研究[D]. 南昌大学, 2006.
- [98] 中国科学院吉林物理所, 中国科学技术大学《固体发光》编写组. 固体发光. 1976.
- [99] Yamakoshi S, Hasegawa O, Hamaguchi H, et al. Degradation of high-radiance Ga_{1-x}Al_xAs LED's[J]. Appl. phys. Lett: 1977,31:627-629.
- [100] 薛正群, 黄生荣, 陈朝等. 激光诱导 P-GaN 掺杂对 LED 性能改善的分析[J].物理学报: 2010,59(2):1268-1274.
- [101] 薛正群, 黄生荣, 陈朝等. GaN 基白光发光二极管失效机理分析[J]. 物理学报: 2010,59(7): 5002-5009.
- [102] Xue ZQ, Huang SR, Chen C, et al. Laser-induced Zn doping in GaN based light-emitting diode[J]. Appl.Phys.Lett.: 2010, 96: 141101-1-141101-3.
- [103] Ott M. Capabilities and Reliability of LEDs and Laser Diodes[J]. What's new in electronics:

-
- 1996, 20(6): 1-7.
- [104] 侯立峰, 钟刚, 赵英杰, 等. 径向桥电极高功率垂直腔面发射激光器[J]. 光子学报: 2010, 39(1): 1-5.
- [105] 马祥柱, 张斯钰, 赵博, 等. 基于 AlN 膜结构 VCSEL 热特性的研究[J]. 光子学报: 2010, 39(12): 2114-2117.
- [106] Faugeron M, Tran M, Parillaud O, et al. High-Power Tunable Dilute Mode DFB Laser With Low RIN and Narrow Linewidth[J]. IEEE Photonics Technology Letters: 2013, 25(1): 7-10.
- [107] Fukuda M, Mishima T, Nakayama N, et al. Temperature and current coefficients of lasing wavelength in tunable diode laser spectroscopy[J]. Applied Physics B: 2010, 100(2): 377-382.
- [108] Lee K H, Roycroft B, Callaghan J O, et al. Integration of AlInGaAs-MQW Fabry-Pérot Lasers With Emission at Two Wavelength Ranges via Quantum-Well Intermixing[J]. IEEE Photonics Technology Letters: 2011, 23(1): 27-29.
- [109] Hou L P, Haji M, Dylewicz R, et al. 10-GHz Mode-Locked Extended Cavity Laser Integrated With Surface-Etched DBR Fabricated by Quantum-Well Intermixing[J]. IEEE Photonics Technology Letters: 2011, 23(2): 82-84.
- [110] Beal R, Aimez V, Dubowski J J. Excimer laser induced quantum well intermixing: a reproducibility study of the process for fabrication of photonic integrated devices[J]. Optics Express: 2015, 23(2): 1073-1080.
- [111] Grasse C, Boehm G, Mueller M, et al. Empirical modeling of the refractive index for (AlGaIn)As lattice matched to InP[J]. Semiconductor Science and Technology: 2010, 25: 1-4.
- [112] Aissat A, Elbey M, Bestam R, et al. Modeling and simulation of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{In}_y\text{As}/\text{InP}$ quaternary structure for photovoltaic[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014: 39(27): 15287-15291.
- [113] Hunger D, Steinmetz T, Colombe Y, et al. A fiber Fabry - Perot cavity with high finesse[J]. New Journal of Physics: 2010, 12: 1-23.
- [114] Guo X, Schubert E F. Current crowding and optical saturation effects in GaInN/GaN light-emitting diodes grown on insulating substrates [J]. Appl. Phys. Lett.: 2001, 78: 3337-3339.
- [115] Pearton S J, Abernathy C R, Panish M B, et al. Implant induced high resistivity regions in InP and In GaAs[J]. Journal of Applied Physics: 1989, 66(2): 656-662.
- [116] Fan Z F, Mohammad S N, Kim W, et al.. Very low resistance multilayer Ohmic contact to n-GaN[J]. Appl. Phys. Lett.: 1996, 68(12): 1672-1674.
- [117] 张晓磊, 薄博学, 张哲铭, 等. C-mount 封装激光器热特性分析与热沉结构优化研究[J]. 发光学报: 2017, 28(7): 891-896.
- [118] 施敏, 伍国珏. 半导体器件物理[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2008.
- [119] 荣宝辉. 大功率半导体激光器加速老化试验方法研究[D]. 河北工业大学, 2007.
- [120] 徐小红. 半导体激光器寿命测试系统研制[D]. 中国地质大学, 2005.

致 谢

本论文是在苏辉研究员的指导下完成的。苏老师做事态度认真，乐于专研，工作态度精益求精，废寝忘食的工作精神是我学习的榜样。他对我们的帮助和指导使我收益良多，在科研上，苏老师经常鼓励我们自己动手做实验，自己去分析试验过程中存在的问题，并思考解决问题的办法，同时会指出思考问题的方向引导我们去思考，他经常用他在美国做事的方式鼓励我们，鼓励我们养成独立做事的能力、鼓励我们要多做事，多学习；并鼓励我们以科学的角度去分析和思考问题，问题的最后都应该有合理的科学解释，这种做事的精神使我得到了良好的受益，在此，我向苏老师致以最衷心的感谢。

另外也真诚感谢早期课题组的成员，毛懿伟、段延敏、王耀、邬可荣、李志平、李林森、童梁柱、宋国才等，这些人虽然已经毕业或工作而离所，但真诚感谢他们在课题组的这段时间，那段时间的相互学习、讨论问题，以及跑步、打羽毛球等等活动让我感到了那段时间里的温暖和快乐，感谢！

感谢课题组的王凌华、陈阳华、朱振国等在平时学习研究生活中的相互讨论和有益帮助，感谢组里陈景源、周东豪、訾慧、江璐芸等同学相互渡过在所里的那段时光。

也真诚感谢中科光芯的吴昌贵、张鹏、吴林福生、黄章挺、吴孟杰、金宁城、杨重英、罗江平等在课题实验上的帮助和相互间多次的有益讨论。感谢所里测试中心周丽花在测试上的帮助。

在此，向那些曾经关心和帮助过我的老师、同学、朋友、同事等致于我最真诚的感谢。

最后感谢家人和朋友对我多年来始终如一的关爱和支持，是你们无私的帮助和默默的支持才能让我渐渐成长。

薛正群

2017 年 4 月

作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

作者简历:

薛正群, 男, 1984 年 02 月出生于福建省莆田市。

2003 年 09 月——2007 年 07 月, 在厦门大学物理系获得学士学位。

2007 年 09 月——2010 年 07 月, 在厦门大学物理系获得硕士学位。

2014 年 09 月——2017 年 12 月, 在中国科学院福建物质结构研究所攻读博士学位。

2010 年 07 月——至今, 在福建物质结构研究所苏辉组工作, 目前为助理研究员

已发表的学术论文:

1. 薛正群, 王凌华, 苏辉. 温度对 InP 激光器波长蓝移影响的分析.《光子学报》: 2017, 47(1): 0125002-1-6.
2. 薛正群, 王凌华, 苏辉. 反射式倒装对 1300nm 激光器性能改善的分析.《发光学报》: 2017, 已录用. (EI 收录)
3. 訾慧, 薛正群, 王凌华, 林中晞, 苏辉. 1550nm 高功率宽光谱超辐射发光二极管.《红外与激光工程》: 2017, 已接收.
4. MAO YW, WANG Y, CHEN YH, XUE ZQ, LIN Q, DUAN YM, SU H*, Characteristic Optimization of 1.3 μm High-Speed MQW InGaAsP-AlGaInAs Lasers. Chinese Physics Letter: 2012, 29(6): 064204-1-064204-4.
5. Li ZP, Duan YM, Wu KR, Zhang G, Zhu HY, Wang XL, Chen YH, Xue ZQ, Lin Q, Song GC, Su H*. Continuous-wave, Widely tunable, Intra-cavity Singly Resonant Magnesium-doped Periodically Poled Lithium Niobate Optical Parametric Oscillator, laser physics: 2013, 23 055006.
6. 江璐芸, 王凌华, 林中晞, 薛正群, 苏辉. 光反馈对光纤光栅外腔半导体激光器特性的影响.《中国激光》: 2016, (7):62-67.

发明专利:

1. 薛正群, 周东豪, 王凌华等. 一种超辐射发光二极管芯片的制备方法及制得的发光二极管芯片. 中国, CN201510570366.7. (已授权)
2. 薛正群, 苏辉, 周东豪等. 一种超辐射发光二极管的制作方法及其制得的发光二极管. 中国, CN201510581147.9. (已授权)
3. 薛正群, 苏辉, 王凌华等. 一种 DFB 半导体激光器制备方法及制得的激光器: 中国, CN201710031147.0.
4. 薛正群, 苏辉, 王凌华等. 一种 DFB 半导体激光器制备方法及激光器: 中国, CN201710031282.5.
5. 訾慧, 薛正群, 苏辉等. 一种量子点超辐射发光二极管及其制备方法: 中国, CN201610274475.9.

实用新型专利:

1. 薛正群, 苏辉, 王凌华等. 一种 DFB 半导体激光器: 中国, CN201720051772.7. (已授权)
2. 薛正群, 苏辉, 王凌华等. 一种 DFB 半导体激光器: 中国, CN201720051403.8. (已授权)

参加的研究项目及获奖情况:

1. 预研 XX 项目, Y1g3d21fga.
2. 福建省重大课题专项: 光通信的高性能半导体激光器和探测器的研发与产业化, Y1e1d31fga.
3. 863 项目: 集成化 100kHz 窄线宽激光光源, Y3a2302fea.
4. 国家自然科学基金青年项目: 强电场极化氮化硅, Y4c7671fea.