

分类号

密级:公开

清华大学

硕士学位论文

题 目 InGaAs/InGaAlAs 多量子阱半导体激光放大器的研究

并列英文 Studies on InGaAs/InGaAlAs Multiple Quantum Well
题 目 Semiconductor Laser Amplifier

研究生姓名 鲁 乙 喜 系别 电子工程系

专 业 物理电子学与光电子学

导 师 姓 名 王 健 华 职 称 副研究员

论文答辩日期 一九九八年六月

摘要

本论文工作对 InGaAs/InGaAlAs 多量子阱(Multiple Quantum Well, 简称 MQW)半导体激光放大器进行了研究。论文首先结合分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, 简称 MBE)设备的具体情况, 完成了 InGaAs/InGaAlAs MQW 材料结构的设计与外延片质量的评价测试。测试结果表明外延片具有良好的材料质量, 可以用来研制脊波导激光器和半导体激光放大器。利用多层平板波导结构模型对 InGaAs/InGaAlAs MQW 波导结构进行的横模波导特性分析表明, 设计的波导结构具有基横模工作特性。

利用所生长的外延片制作了宽接触激光器, 最低阈值电流密度为 1.42kA/cm^2 。制作的脊波导激光器实现的最低阈值电流为 35mA, 输出光功率超过 10mW。与本实验室以前研制的同种材料的脊波导激光器相比, 阈值电流降低了 50%。

本文给出多层平板波导结构的半导体激光放大器 TE 模与 TM 模的端面反射率的计算方法, 为优化半导体激光放大器端面增透膜参数提供了工具。利用上述方法, 对 InGaAs/InGaAlAs MQW 半导体激光放大器端面增透膜参数进行了优化设计, 给出单层与双层增透膜参数的设计结果。

制作了 InGaAs/InGaAlAs MQW 半导体激光放大器, 并对其光功率—电流特性、放大的自发发射谱和光放大特性进行了测试。在注入 1000mA 脉冲电流的情况下, 测得 $730\mu\text{m}$ 长器件的信号增益是 3.2dB。

关键词: InGaAlAs, 半导体激光器, 增透膜, 半导体激光放大器

Studies on InGaAs/InGaAlAs Multiple-Quantum-Well Semiconductor Laser Amplifier

Abstract

InGaAs/InGaAlAs multiple quantum well (MQW) semiconductor laser amplifier (SLA) is studied in the thesis. The design of InGaAs/InGaAlAs MQW material structure is finished according to the concrete condition of molecular beam epitaxy(MBE) equipment used, firstly. The test for epitaxy wafer shows that it possesses good material quality to manufacture ridge waveguide (RW) laser and SLA. The analysis of the designed waveguide structure displays that it has the characteristic of fundamental transverse modal operation.

Broad-area (BA) and RW lasers are fabricated. Under room temperature pulsed operation condition, BA laser with threshold current density of 1.42kA/cm^2 is achieved; RW laser is demonstrated with threshold current of 35mA and output power of more than 10mW. Compared to the same material RW laser manufactured previously in the laboratory, threshold current of RW laser is reduced by 50%.

A method to computer the TE- and TM- mode facet reflectivity of SLA with multilayer slab waveguide structure is presented, which provides a tool for optimizing parameters of Antireflection (AR) coatings on SLA facets. Optimal parameters of single-and double-AR coating for InGaAs/ InGaAlAs MQW SLA are given at the same time.

InGaAs/InGaAlAs MQW SLA is manufactured by using single-layer AR coating on RW laser facets. For pulsed current of 1000mA, SLA with $730\mu\text{m}$ -long cavity and $6\mu\text{m}$ -wide ridge shows 3.2dB signal gain.

LU Yixi (Physical Electronics and Optoelectronics)
Directed by WANG Jianhua, Associate Professor

Key Words: InGaAlAs, Semiconductor lasers, Antireflection coatings,
Semiconductor laser amplifiers

目录

第一章	绪论	1
§ 1.1	前言	1
§ 1.2	半导体激光放大器的特点与发展	2
§ 1.3	半导体激光放大器端面增透技术	6
§ 1.4	论文的研究背景与研究内容	7
第二章	InGaAs/InGaAlAs MQW 材料结构的设计与评价	9
§ 2.1	InGaAs/InGaAlAs MQW 材料结构的设计	9
§ 2.2	InGaAs/InGaAlAs MQW 材料外延片的评价	12
§ 2.3	本章小结	16
第三章	InGaAs/InGaAlAs MQW 脊波导激光器的制作	18
§ 3.1	较低阈值脊波导结构激光器的实现	18
§ 3.2	本章小结	20
第四章	半导体激光放大器端面增透膜设计的理论分析 与计算	21
§ 4.1	前言	21
§ 4.2	半导体激光放大器端面反射率的计算方法	22
§ 4.3	InGaAs/InGaAlAs MQW 波导结构的横模波导特性分析	26
§ 4.4	InGaAs/InGaAlAs MQW SLA 增透膜参数的设计与讨论	29
§ 4.5	本章小结	33
第五章	InGaAs/InGaAlAs MQW 半导体激光放大器的制作 及其特性测试	34
§ 5.1	InGaAs/InGaAlAs MQW 半导体激光放大器增透膜的镀制	34
§ 5.2	InGaAs/InGaAlAs MQW 半导体激光放大器特性测试	35
§ 5.3	本章小结	42
第六章	总结	44
参考文献:		45
致谢		50

第一章 绪论

§ 1.1 前言

半导体激光放大器(Semiconductor Laser Amplifier, 简称 SLA)因能实现直接的光放大, 又具有体积小、重量轻、寿命长、价格低廉和易于与其它半导体光电子器件集成等特点, 是光纤通信系统中的重要器件之一。

半导体激光放大器可以分为两类: 谐振型的法布里-珀罗半导体激光放大器(Fabry-Perot SLA, 简称 FP-SLA)和非谐振型的行波半导体激光放大器(Travelling-Wave SLA, 简称 TW-SLA)。半导体激光放大器在结构上与半导体激光器是相似的。FP-SLA 就是注入电流低于激射阈值时的半导体激光器, 其端面反射率较大(30%左右), 因而有很强的谐振效应, 需要输入光信号与 FP 谐振模(纵模)之间有精密的频率匹配, 才能获得较大的腔内增益。而且其增益带宽很窄, 基本上为一个 FP 腔纵模的线宽(约几个 GHz), 因此需要很高的温度稳定性($\pm 0.01^\circ\text{C}$)和电流稳定性($\pm 0.01\text{mA}$)[1]。

TW-SLA 就是对自然解理端面进行增透处理的半导体激光器, 其端面反射率较低(一般要求 $< 0.1\%$)[2], 因而谐振效应很弱, 允许在高注入电流的情况下工作(通常是增透以前阈值电流的 2~3 倍), 因而可以获得很高的增益系数, 即可以得到很高的单程信号增益。而且理想的 TW-SLA 的增益谱基本类似于自发发射谱, 具有很宽的增益带宽(约几个 THz), 因此温度稳定性较好。而且, TW-SLA 与 FP-SLA 相比, 在增益起伏、饱和输出功率和噪声特性等方面都有优势[1]。因此, TW-SLA 在波分复用(Wavelength-Division Multiplexing, 简称 WDM)和光子集成回路(Photonic Integrated Circuits, 简称 PICs)等技术中, 有着广泛的应用前景。

近来, 光纤通信线路的终端机开始朝着利用集成器件的方向发展, 发送和接收两端的集成芯片, 以及波分多路的激光器阵列和检测器阵列都需要半导体激光放大器[3]。另外, 在光交换网中, SLA 可以用于光开关阵列以补偿各种损耗[4]。

§ 1.2 半导体激光放大器的特点与发展

半导体激光放大器增益对偏振敏感和端面反射问题一直是影响其性能和应用的重要因素。人们为解决双异质结(Double Heterostructure, 简称 DH)和多量子阱(Multiple Quantum Well, 简称 MQW)半导体激光放大器的偏振灵敏度问题, 设计了各种各样的、或繁或简的方案, 取得了一定的进展[5]。近年来, 随着张应变量子阱技术的引入, 偏振无关的半导体激光放大器的研究取得了很大进展[6], 使半导体激光放大器的研究又重新受到人们重视。

从电子-空穴跃迁的角度看, 电子与重空穴的复合是对 TE 偏振模作贡献, 而电子与轻空穴的复合在对 TE 偏振模作贡献的同时, 更主要的是对 TM 偏振模作贡献。普通体材料结构的半导体激光放大器, 尽管材料本身的 TE 模和 TM 模增益差不多, 但因有源区在横向(Transverse)与侧向(Lateral)不对称, 对 TE 模和 TM 模的光学限制也不一样, 造成器件净增益有很强的偏振依赖性。为减小体材料结构的半导体激光放大器增益对偏振的依赖性, 可以采用的方法是使器件有源区的横向与侧向尽量对称, 但若使侧向宽度在 $1\mu\text{m}$ 以下, 工艺上要求很高; 或者采用外加元件进行补偿的混合结构, 这些结构都不便于进行光子集成, 且体材料结构放大器的性能不是很好。如果采用匹配与压应变量子阱结构的器件更加重了电子与重空穴的复合几率, 减小了电子与轻空穴的复合几率, 使光学增益更趋向 TE 模, 而且波导结构也是对 TE 模式提供了更大的光学限制因子, 从而进一步加强了器件的偏振灵敏度, 要达到偏振无关的目的需要使用外光路和光学元件。

直到近年来, 张应变材料的采用才使得从材料本身改善了半导体激光放大器偏振灵敏度问题, 同时也提高了器件的其它性能。张应变效应能使轻空穴能带上升至带顶, 提高了器件对 TM 模的增益, 同时能带结构也得到优化, 在改善偏振灵敏度的同时, 也提高了半导体激光放大器的增益和饱和输出功率等特性[7]。

用张应变阱-晶格匹配垒、晶格匹配阱-张应变垒和张应变阱-压应变垒的量子阱结构都可以研制偏振无关或偏振灵敏度低的半导体激光放大器。目前,采用张应变阱-晶格匹配垒和晶格匹配阱-张应变垒量子阱结构研制偏振无关或偏振灵敏度低的半导体激光放大器都有文献报道[8,9]。但是,有源区采用张应变阱-晶格匹配垒结构的器件,其 TE、TM 模的增益都由张应变阱提供,必须精确组合应变量与阱宽,使轻、重空穴第一子带靠近,才能使 TE、TM 模的增益波长相近且增益值相当。但此时由于轻、重空穴的耦合效应,使能带变为间接带隙,价带态密度很大,所以器件性能不会很好[7];有源区采用晶格匹配阱-张应变垒结构的器件,其 TE 增益由量子阱提供, TM 增益由阱内电子与张应变垒中轻空穴复合提供,一般其辐射复合几率会减小,除非电子势阱较小,在高电流注入时,阱与垒中都有电子与空穴发生复合,才会有大的辐射复合几率[9]。有源区采用张应变阱-压应变垒应变补偿结构的器件,情况与晶格匹配阱-张应变垒结构相似,但电子势垒较小,且有源区可以通过增加阱的周期数加厚,得到高的内增益。

上面这些方案的共同特点是设计 TE 模与 TM 模的增益来源时不能分开考虑,它们是互相影响的,有源区的阱层与垒层参数互相依赖,使得设计难度大,且存在辐射复合几率小的可能。

为了克服上述方案的不足, Tiemeijer 等人在有源层采用了张应变阱-匹配垒-压应变阱的量子阱结构研制 $1.3\mu\text{m}$ 偏振无关半导体激光放大器[7],其 TE 模与 TM 模的增益差在整个 3dB 增益带宽范围内都相小于 1dB。这种结构的特点是可以分别设计压应变阱和张应变阱的应变量(组分)与阱宽来实现相同的增益波长。其中压应变阱只对 TE 偏振模提供增益,张应变阱在对 TE 偏振模提供增益的同时更主要是对 TM 偏振模提供增益,如图 1.1 所示。这样通过调节张应变与压应变的阱数便能使 TE 模与 TM 模的增益相当,从而能实现器件增益的偏振无关性。

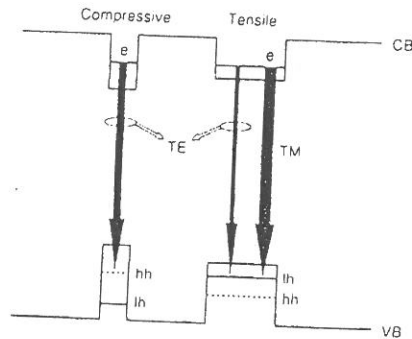


图 1.1 偏振不敏感多量子阱有源层的原理

美国 AT&T 贝尔实验室采用这种新结构，于 1993 年研制了 $1.5\mu\text{m}$ 偏振无关的多量子阱半导体光放大器，在 3dB 增益带宽内的平均偏振灵敏度小于 1dB。为降低端面反射率，放大器的输入、输出端采用了 $35\mu\text{m}$ 长的端面掩埋的光学窗口结构，并镀了一层 SiO_2 增透膜，获得的模式反射率小于 10^{-4} 。放大器结构如图 1.2 所示。

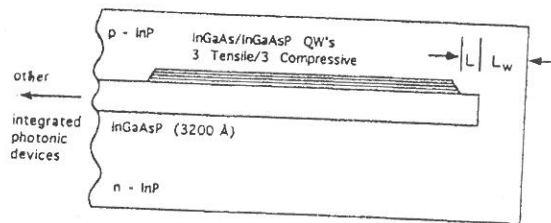


图 1.2 多量子阱半导体光放大器结构示意图

半导体光放大器的有源区位于 320nm 厚的 InGaAsP 无源波导上，由 3.5nm 宽 1%压应变的 InGaAs 阱和 16nm 宽 1%张应变的 InGaAs 阱交替组成的，垒是 10nm 宽晶格匹配的 InGaAsP 材料(可以有轻微的压应变用于应变补偿)，张应变与压应变的阱数都是 3 个。器件采用半绝缘平面掩埋异质结结构(Semi-insulating Planar Buried Heterostructure，简称 SIPBH)。625 μm 长的有源区是用选择性湿法腐蚀到波导层而成；2.5 μm 宽的台是由常规光刻和湿法腐蚀工艺做成的，随后的电流阻挡层、包层和 p-接触层是用金属有机物气相外延(Metal Organic Vapor Phase Epitaxy，简称 MOVPE)经两次二次外延而成。有源区外面的无源波导是为了用于和其它

半导体光电子器件进行集成。

半导体激光放大器因具有与其它半导体光电子器件的材料兼容性和高增益的特点，是进行光子集成(PIC)的基本器件，广泛用于光子集成回路(如与激光器，探测器，波导等集成)的研究中[12-13]。

目前，在国际上有关利用半导体激光放大器与光调制器进行单片光子集成，研制无损或近无损光调制器的文献报道开始出现[14-16]，这是因为光调制器具有低频率啁啾、宽调制带宽等优点，是实现高速、长距离光纤通信的重要器件之一，但其插入损耗通常也较大。将调制器与光放大器进行集成，利用光放大器的增益抵消插入损耗是解决这一问题的方法之一。

图 1.3 是 Fabrice Devaux 等人研制的半导体激光放大器与多量子阱电吸收调制器的集成器件[16]。图中也给出了当光放大器注入电流为 170mA 时，集成器件的光纤—光纤增益与调制器上反向偏压的关系曲线(1.55 μm 工作波长)。从图上可以看到，当调制器上有 0.5V 的正向电压时集成器件

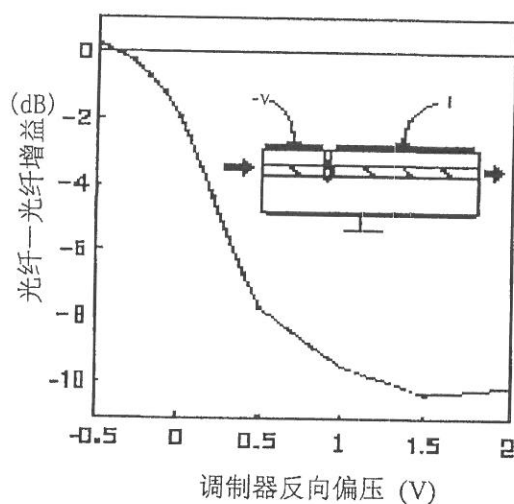


图 1.3 多量子阱光放大器与光调制器的单片集成器件

实现了无损。光放大器与光调制器的有源层采用相同的 InGaAsP MQW 结构，外延片是经一次外延而成。器件集成是利用多量子阱增益谱相对较宽而吸收谱尖锐的特点实现的。在调制器驱动电压为 2V 时，集成器件的消光比为 10.5dB，小信号增益带宽为 18GHz，且具有低的有效啁啾参数

0.16。集成器件的电极分离是用质子轰击技术,绝缘电阻大于 $1\text{M}\Omega$ 。

这种集成器件在时分光解复用和 ATM 等技术中也有着广泛的应用前景。

§ 1.3 半导体激光放大器端面增透技术

端面反射率对半导体激光放大器的增益起伏、饱和输出功率和噪声等特性都有重要影响[2]。采用增透膜(Antireflection Coatings, 简称 AR Coatings)技术是实现半导体激光放大器端面增透,降低端面反射率的基本技术。降低端面反射率通常是镀单层增透膜[17-18],然而采用单层增透膜对增透膜参数控制的要求比较苛刻,要使端面反射率 $<0.1\%$,增透膜折射率与厚度(相对于设计值)的变化需分别同时控制在 $\pm 3\%$ 与 $\pm 4\%$ 以内[5];在器件端面采用双层甚至多层增透膜,或者在使用增透膜的同时采用角度波导结构或光学窗口结构都能放宽对增透膜参数的苛刻要求。目前,利用这些技术都实现了 10^{-4} 左右的端面反射率[11,19-27]。

日本 NEC 公司于 1989 年报道了端面采用光学窗口结构和氮氧化硅单层增透膜技术制作的 $1.5\mu\text{m}$ 行波半导体激光放大器,SLA 端面平均反射率要小于 0.06% 。器件结构如图 1.4 所示[22],一个双通道平面掩埋异质结(Double Channel Planar Buried Heterostructure, 简称 DC-PBH) 结构被用来对 InGaAsP(带隙波长 $1.57\mu\text{m}$)有源层形成电流与光学限制,有源区的大小是 $0.26\mu\text{m}$ 厚, $0.4\mu\text{m}$ 宽, $600\mu\text{m}$ 长。窗口区位于 Y 形槽处,前后端

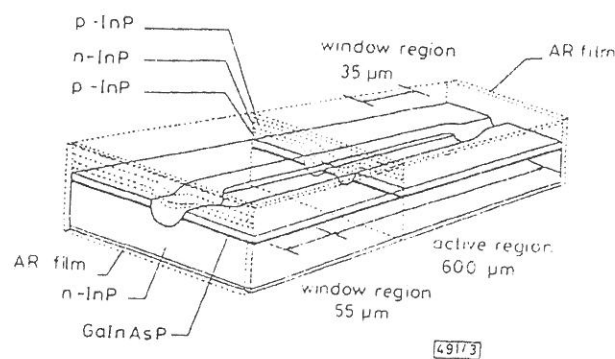


图 1.4 器件结构

面窗口区长分别是 $35\mu\text{m}$ 和 $55\mu\text{m}$ 。氮氧化硅增透膜用电子回旋共振 (Electron Cyclotron Resonance, 简称 ECR) 等离子体化学气相沉积法镀制的。

AR 膜技术也可以用来研制偏振无关半导体激光放大器。刘雪峰等人曾报道利用超低反射率镀膜技术研制了偏振灵敏度低于 2dB 的双异质结半导体激光放大器[28]。此外, C. Vassallo 利用三层对称平板波导结构模型, 设计了一种双层增透膜可以使半导体激光放大器实现偏振无关[29]。C. Vassallo 计算中采用的波导结构和计算结果如图 1.5 所示。设计的增透膜使 SLA 的 TE 模与 TM 模在工作波长为 $1.55\mu\text{m}$ 时具有相同的端面反射率, 而且低于 10^{-4} , 如图所示(实线与虚线分别表示波导结构芯区厚度是 $0.1\mu\text{m}$ 和 $0.25\mu\text{m}$ 时的情况)。三层波导结构模型芯区(core)的折射率是 3.512 , 包层(cladding)的折射率是 3.17 ; 对芯区厚度为 $0.1\mu\text{m}$ 的波导结构, 设计的双层增透膜参数是 $n_1=2.5870$, $t_1=0.13734\mu\text{m}$, $n_2=1.46$, $t_2=0.25723\mu\text{m}$; 对芯区厚度为 $0.25\mu\text{m}$ 的波导结构, 设计的双层增透膜参数是 $n_1=2.6093$, $t_1=0.1613\mu\text{m}$, $n_2=1.46$, $t_2=0.29108\mu\text{m}$ 。这里, n_1, t_1, n_2, t_2 分别表示第一、第二层膜的折射率与厚度。

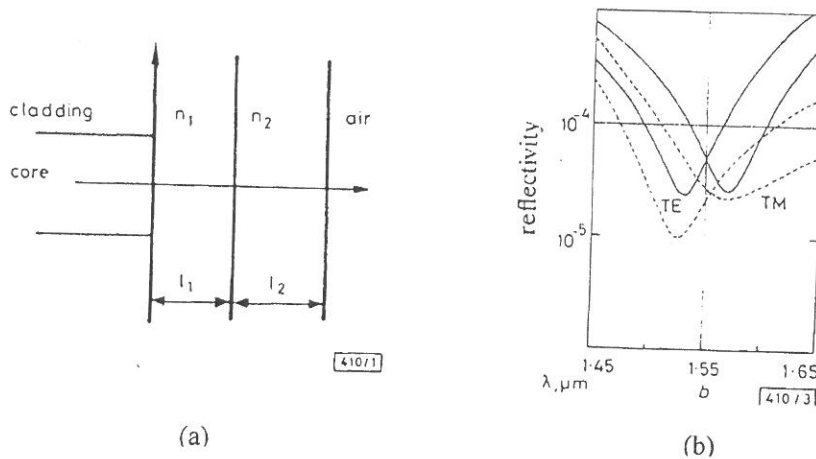


图 1.5 (a)波导结构

(b)TE、TM 模的反射率与波长的关系

§ 1.4 论文的研究背景与研究内容

本论文工作是国家自然科学基金课题“ $1.5\mu\text{m}$ 量子阱光放大器与光调制器单片光子集成器件研究”的一部分，论文工作主要集中在“InGaAs/InGaAlAs 多量子阱半导体激光放大器的研究”上。目前，国内外对 InGaAlAs 材料的研究主要集中在电吸收调制器上，对激光器的研究刚刚兴起，但对半导体激光放大器的研究，国内外还未见报道。本论文工作也将为后续研究打下基础。

论文工作主要分为以下几个部分：

- 1、设计 InGaAs/InGaAlAs 多量子阱材料结构，协助完成材料的生长，并完成外延片的评价测试。
- 2、完成脊波导结构激光器的制作与测试。
- 3、对设计的 InGaAs/InGaAlAs 多量子阱材料结构进行横模波导特性分析，为进一步设计 InGaAs/InGaAlAs 多量子阱材料结构的有源区厚度和包层厚度提供判断依据。
- 4、对半导体激光放大器端面增透膜设计进行理论分析，给出优化半导体激光放大器端面增透膜参数的计算方法。对 InGaAs/InGaAlAs 多量子阱半导体激光放大器端面增透膜参数进行优化设计。
- 5、制作半导体激光放大器，对半导体激光放大器的性能进行初步测试与分析。

第二章 InGaAs/InGaAlAs MQW 材料结构的设计与评价

材料结构的合理设计与评价是获得生长质量良好外延片和进行后步工艺的重要前提。在前人工作的基础上,本章结合分子束外延(MBE)生长设备的具体情况,给出 InGaAs/InGaAlAs 多量子阱(MQW)材料结构的设计结果,并对外延片进行评价测试。

§ 2.1 InGaAs/InGaAlAs MQW 材料结构的设计

InGaAs/InGaAlAs MQW 材料的生长有一定的技术难度,主要是因为其含有容易氧化的 Al 元素和需要严格的元素组分($\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ - $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47-x}\text{Al}_x\text{As}$ - $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$)才能与 InP 衬底实现晶格匹配。由于含有容易氧化的 Al 元素, InGaAs/InGaAlAs MQW 材料的生长最好连续进行,特别是多量子阱区(有源区)的生长是不能停顿的。而与 InP 衬底晶格匹配的 InGa(Al)As 材料,因其元素组分不同所用炉温通常也不同,因此,生长元素组分不同的 InGa(Al)As 材料需调整源炉的温度。通常用两个 In 炉来实现 InGa(Al)As 材料的连续生长。

设计的 InGaAs/InGaAlAs MQW 材料结构是利用中科院半导体所的 Riber MBE 设备进行生长的,该设备的 In 炉、Ga 炉、Al 炉都是一个。为保证多量子阱区的结晶质量,我们引入应变补偿多量子阱结构(压应变阱/张应变垒)来实现多量子阱区的连续生长。该结构是通过开关 Al 炉实现的。此法还可以生长压应变阱/晶格匹配垒和晶格匹配阱/张应变垒的多量子阱结构,但不能用来生长对偏振无关有利的张应变阱/压应变垒的多量子阱结构。虽然采用晶格匹配阱/张应变垒的多量子阱结构能实现器件的增益与偏振无关,但设计难度大,需要严格设计才能实现。而且,生长单应变多量子阱材料结构对生长设备的温度稳定性要求很高。

(1)、应变补偿量子阱结构及 InGaAs/InGaAlAs 量子阱的设计

一般, 外延材料应与衬底具有相同的晶格常数, 以保证外延材料的结晶质量。当外延材料与衬底的晶格常数不相同时, 即存在应变, 通过控制外延材料的组分和厚度, 让晶格的弹性形变来抵消晶格间的失配, 也能获得高质量的外延材料。用 ε 表示晶格失配度, 则

$$\varepsilon = (a_s - a_e) / a_e$$

a_s , a_e 分别是衬底、外延层的晶格常数。 $\varepsilon > 0$ 表示是张(Tensile)应变, $\varepsilon < 0$ 表示是压(Compressive)应变。

晶格失配产生的应变力将影响价带中重空穴、轻空穴和分裂能带之间相互作用的哈密顿量, 从而使重空穴、轻空穴和分裂能带均发生移动, 进而影响到材料的禁带宽度。价带中重空穴、轻空穴的移动量可分别用以下二式表示: [30]

$$\delta E_{HH} = -\delta E_{hy} + \zeta$$

$$\delta E_{LH} = -\delta E_{hy} - \zeta$$

其中,

$$\delta E_{hy} = -2a(1 - C_{12}/C_{11})\varepsilon$$

$$\delta E_{sh} = -2b(1 + 2C_{12}/C_{11})\varepsilon$$

$$\zeta = \delta E_{sh}/2 = -b(1 + 2C_{12}/C_{11})\varepsilon$$

其中 a 是静压形变能, b 是单轴形变能, C_{11} , C_{12} 是弹性系数。三元或四元半导体化合物材料的参数由相应的二元化合物有关参数用线性插值法获得。

对 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 、 $\text{In}_{1-x-y}\text{Ga}_x\text{Al}_y\text{As}$ 体材料而言, 存在应变时, 其禁带宽度分别变为:

$$E_{gs} = E_g(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}) + \delta E$$

$$E_{gs} = E_g(\text{In}_{1-x-y}\text{Ga}_x\text{Al}_y\text{As}) + \delta E$$

其中, 对压应变 δE 取 δE_{HH} , 对张应变 δE 取 δE_{LH} 。

应变补偿量子阱就是在量子阱中引入两种相反的应变, 以减小甚至完全消除量子阱区存在的应变力, 以克服单一应变所引起的临界厚度对阱宽及阱数的限制, 也能满足研制波长可调 DBR 激光器或高速激光器的要求 [31]。InGaAs/InGaAlAs 量子阱的组分设计为 $\text{In}_{0.58}\text{Ga}_{0.42}\text{As}/$

$\text{In}_{0.47}\text{Ga}_{0.34}\text{Al}_{0.19}\text{As}$ ，其应变度分别为 -0.33% ， $+0.4\%$ ，经计算(所用参数参见本章附录)，其相应体材料的禁带宽度分别是 0.715eV ， 1.023eV 。采用应变度较低的 $\text{In}_{0.58}\text{Ga}_{0.42}\text{As}$ 作为阱材料，是想有相对较宽的阱来提高有源区的增益系数；应变度较低的 $\text{In}_{0.47}\text{Ga}_{0.34}\text{Al}_{0.19}\text{As}$ 能提供足够势垒，对载流子形成有效的限制。阱与垒的宽度分别设计为 6nm ， 8nm 。

(2)、InGaAs/InGaAlAs 多量子阱材料结构的设计

设计的 InGaAs/InGaAlAs 多量子阱材料结构如图 2.1 所示。阱数设计为 5 个是为生长 10 个阱(兼顾考虑光放大器与光调制器的集成，10 个左右的阱数是比较合适的)取得材料的生长经验。在多量子阱区两侧对称引入的组分渐变的导波层 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.12}\text{Al}_{0.35}\text{As}$ ， $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.22}\text{Al}_{0.25}\text{As}$ ， $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.26}\text{Al}_{0.21}\text{As}$ ，三层厚度都是 40nm ，正好构成了折射率渐变分别

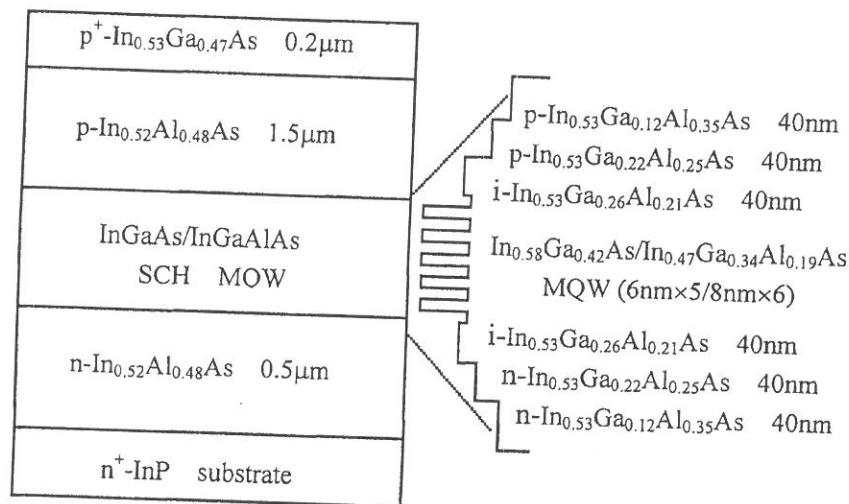


图 2.1 InGaAs/InGaAlAs 多量子阱材料结构

限制异质结(Separate Confinement Heterostructure，简称 SCH)，不仅提高了有源区的光学限制因子，而且能进一步提高材料的生长质量。因为在生长 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 包层材料与 InGaAs/InGaAlAs 多量子阱材料之间需停顿长

达 6 分钟左右以调节各源炉的温度, 这样长时间的停顿对外延材料的生长无疑是不利的。引入 SCH 后, 调温停顿分为三次, 每次约 2 分钟, 因此外延片的质量会得到进一步改善。

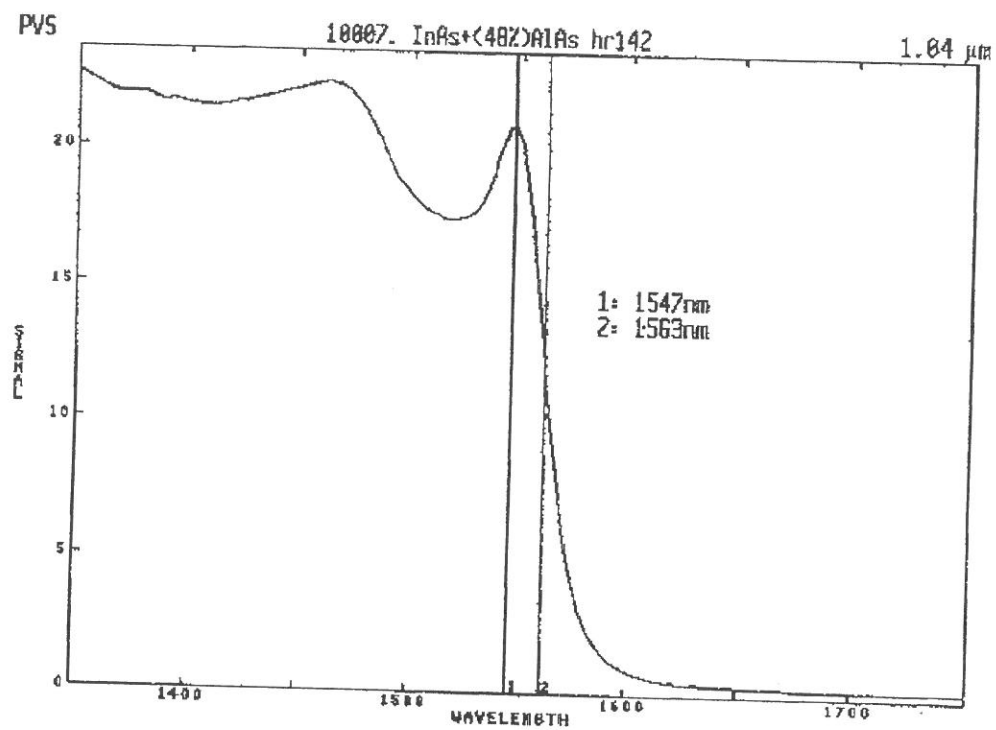
生长一定厚度的 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 材料作为下包层, 是为了防止衬底中的缺陷经热运动进入有源区, 降低有源区的晶格质量和发光效率。生长较厚的 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 材料作为上包层, 有利于提高对波导中光场的限制作用。 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 材料的生长速率大约是 $1.0\mu\text{m/h}$, $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 材料越厚, 所需生长时间越长。但是, 长时间生长后, 源炉温度会发生漂移, 使得 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 材料组分发生变化, 不能与 InP 衬底实现晶格匹配。生长时间越长, 晶格失配可能越严重, 应力越大, 会产生位错, 其应力亦会传到多量子阱区, 破坏有源区的结晶质量, 所以上下包层不能设计的太厚。上下包层 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 材料的厚度分别设计为 $1.5\mu\text{m}$ 和 $0.5\mu\text{m}$ 。各层的掺杂情况如图 2.1 所示, 多量子阱区及上下第一个导波层为不掺杂, 其余的 p 型及 n 型的掺杂浓度都为 $5\times 10^{17}/\text{cm}^3$ 。最后是 $0.2\mu\text{m}$ 的 p 型重掺杂的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 欧姆接触层, 掺杂浓度为 $5\times 10^{18}/\text{cm}^3$ 。

§ 2.2 InGaAs/InGaAlAs MQW 材料外延片的评价

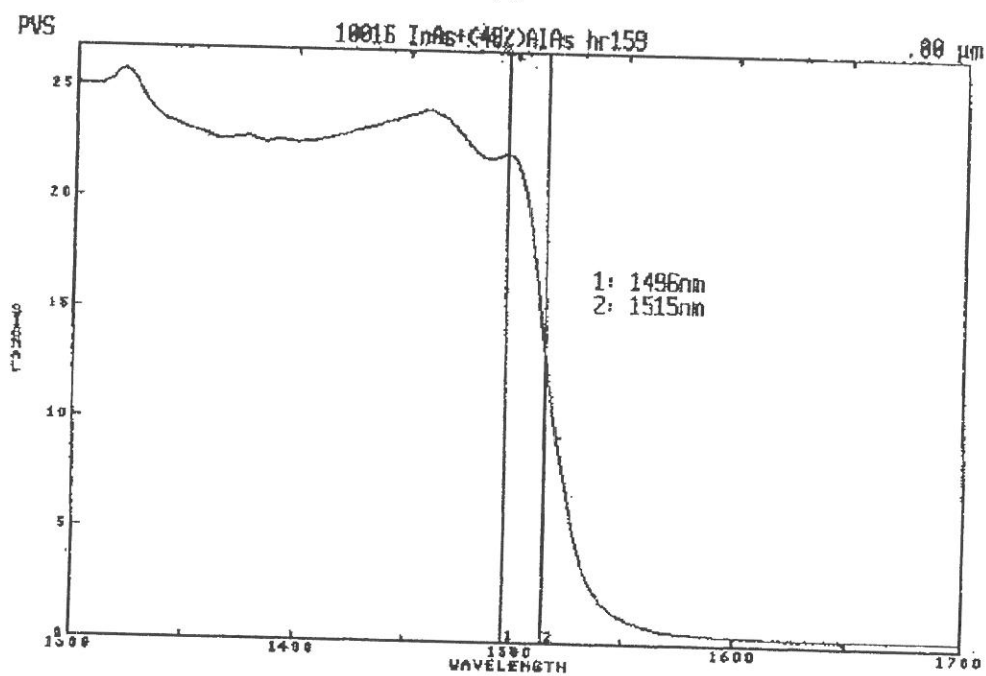
经过多次生长后, 得到质量较好的 InGaAs/InGaAlAs MQW 材料外延片 HR142。在显微镜下, 可以看到 HR142 的表面存在缺陷, 边角有明显的失配位错线形成的薄雾状区和缺陷较多形成的点状区, 这说明外延片的质量仍需进一步提高。

下面是外延片 HR142 和波长略往短调的外延片 HR159 的测试情况 (HR159 上包层的生长时间也变长了)。

图 2.2 是外延片 HR142 与 HR159 的光压谱。从图 2.2(a)、(b)可以看出, 外延片 HR142 的激子吸收峰非常强, 而且很尖锐, 吸收边也很陡峭, 说明 HR142 量子阱区的质量很好, 其吸收边的波长为 $1.563\mu\text{m}$ 。外延片 HR159 的激子吸收峰的强度和吸收边(波长为 $1.515\mu\text{m}$)的陡峭程度与 HR142 相似, 但是激子吸收峰比较平坦, 不太明显, 显然, 外延片 HR159

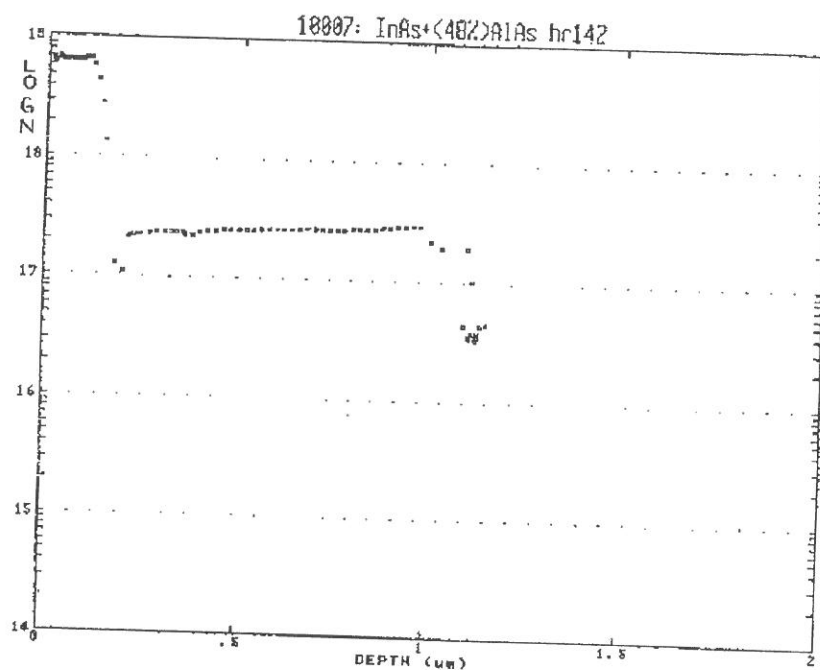


(a)

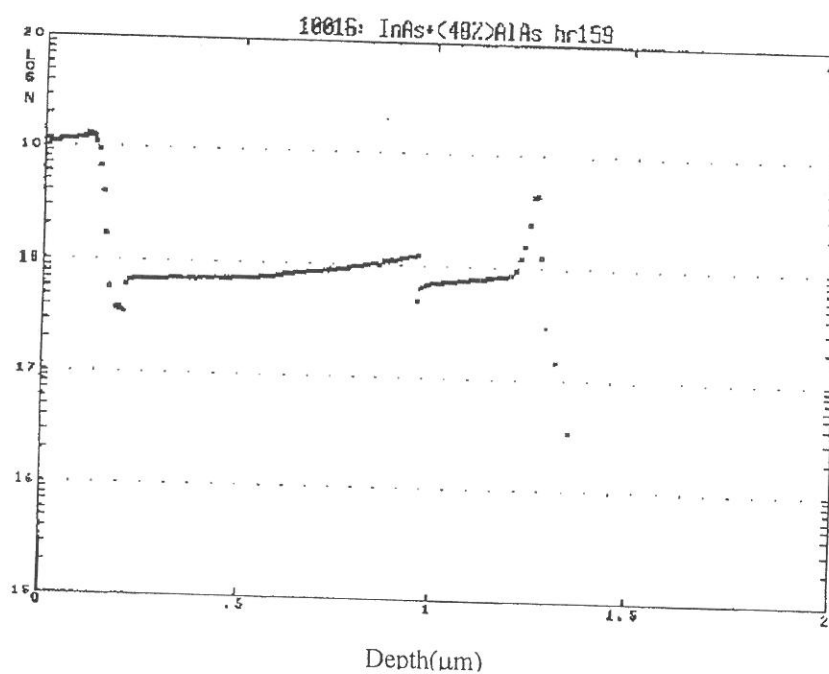


(b)

图 2.2 (a)HR142 的光压谱 (b)HR159 的光压谱



(a)



(b)

图 2.3 (a)HR142 的载流子浓度分布 (b) HR159 的载流子浓度分布

量子阱区的质量较差。

用电化学 C - V 载流子浓度剖面仪测量外延片 HR142 与 HR159 的载流子浓度分布如图 2.3 所示。从图上可以看到, HR142 欧姆接触层与上包层的掺杂浓度比较稳定, 掺杂浓度基本符合设计要求, 而 HR159 上包层的掺杂浓度的稳定性较差。图 2.3(b)中的断点是调整测量工作点引起的。

图 2.4 是外延片 HR142 横截面的扫描电镜照片。良好的平整度说明 HR142 生长质量较好。从图上能明显地分辨出欧姆接触层、上下包层和有源层(含 SCH 层), 据此定出各层的厚度分别为 $0.163\mu\text{m}$, $1.382\mu\text{m}$, $0.282\mu\text{m}$ 和 $0.318\mu\text{m}$ 。测出的上下包层 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 材料的厚度都比设计值要小, 这是由于在实际生长时为提高材料的生长质量, 降低了上下包层的生长时间。

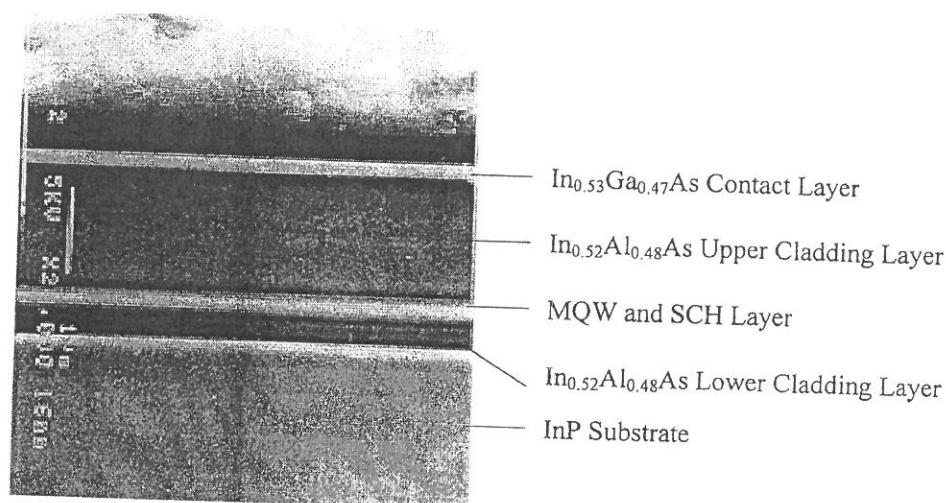


图 2.4 外延片 HR142 横截面的扫描电镜照片

为了进一步评价 InGaAs/InGaAlAs 多量子阱材料的结晶质量和上包层的厚度是否能提供足够的光场限制作用, 用外延片 HR142 与 HR159 分别制作了宽接触(Broad Area)激光器。用 HR159 制作的宽接触激光器未能实现室温脉冲激励, 而用 HR142 制作的宽接触激光器实现了室温脉冲激励, 并且获得的阈值电流密度最低为 $1.42\text{kA}/\text{cm}^2$ 。

图 2.5 是 HR142 宽接触激光器的 L - I 特性曲线。该器件是 $160\mu\text{m}$ 宽、

220 μm 长, 其阈值电流是 $I_{\text{th}}=572\text{mA}$, 阈值电流密度是 $J_{\text{th}}=1.625\text{kA}/\text{cm}^2$ 。

HR142 的宽接触激光器实现室温脉冲激射, 说明外延片 HR142 有源区的结晶质量是比较好的, 而且上包层的厚度能提供足够的光场限制。HR159 的宽接触激光器未能实现室温脉冲激射说明 HR159 的结晶质量是比较差的。

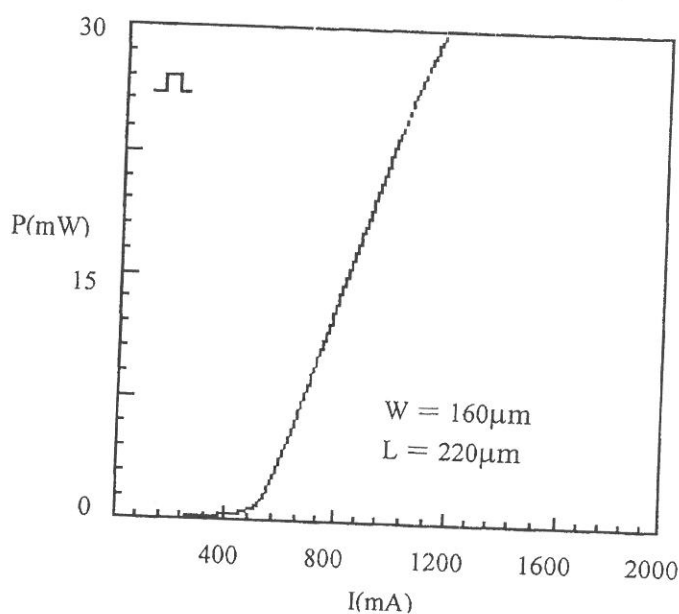


图 2.5 HR142 的宽接触激光器的 $L-I$ 特性曲线

上面的测试表明, 外延片 HR142 具有良好的材料质量, 可以用来研制脊波导(Ridge Waveguide)激光器及半导体激光放大器。

§ 2.3 本章小结

本章完成的主要工作是设计了 InGaAs/InGaAlAs 多量子阱材料结构和协助完成材料结构的生长, 并对外延片 HR142 进行评价测试; 外延片 HR142 的综合测试表明, 外延片 HR142 具有良好的材料质量, 可以用来研制脊波导激光器及半导体激光放大器。而且, 制作的宽接触激光器实现阈值电流密度最低为 $1.42\text{kA}/\text{cm}^2$ 。

附录:

InAs、GaAs、AlAs 的材料应变参数[32]

材料	InAs	GaAs	AlAs
晶格常数 $a(\text{nm})$	0.60583	0.56533	0.56611
禁带宽度 $E_g(\text{eV})$	0.36	1.424	3.018
静压形变能 $a(\text{eV})$	-5.79	-8.68	-7.96
单轴形变能 $b(\text{eV})$	-1.8	-1.7	-1.5
弹性系数 C_{11} (10^{11}dyn/cm^2)	8.329	11.88	12.02
弹性系数 C_{12} (10^{11}dyn/cm^2)	4.526	5.38	5.70

InP 晶格常数: 0.58688nm

第三章 InGaAs/InGaAlAs MQW 脊波导激光器的制作

行波半导体激光放大器(TW-SLA)实质上就是对自然解理端面进行增透处理的激光二极管。为获得较高的信号增益, TW-SLA 的工作电流通常是增透前激光二极管阈值电流的 2~3 倍, 但较高的电流注入水平所引起的热效应会降低器件性能。脊波导结构是一种工艺比较简单, 却能较好地实现对注入载流子和光场的侧向限制作用, 能有效降低激光器阈值电流的波导结构。本章制作了一种脊腐蚀深度不同的脊波导结构激光器, 并对脊波导结构激光器进行了测试与评价。

§ 3.1 较低阈值脊波导结构激光器的实现

根据 HR142 扫描电镜照片测量出欧姆接触层和上包层的总厚度是 $1.545\mu\text{m}$ 。根据测量结果, 制作了一种脊腐蚀深度不同的脊波导结构激光器: A 型激光器和 B 型激光器。A 型激光器的脊腐蚀深度为 $1.46\mu\text{m}$ 左右, B 型激光器的脊腐蚀深度为 $1.30\mu\text{m}$ 左右, 制作出来的脊波导激光器都是正梯形脊(如图 3.1 所示)。A 型激光器和 B 型激光器都实现了室温脉冲激励(测试电流的脉宽是 $10\mu\text{s}$, 频率是 1kHz , 占空比是 1%)。

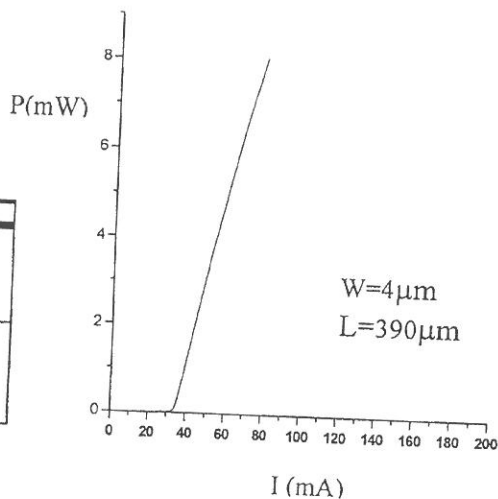
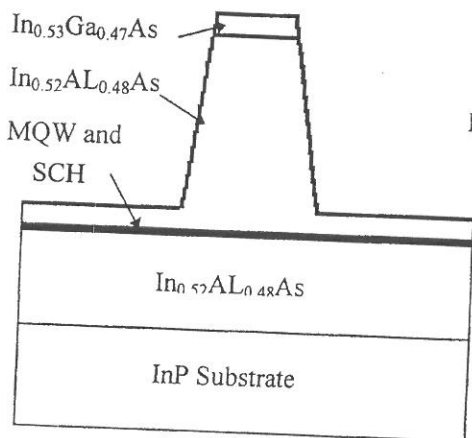


图 3.1 脊波导器件横截面示意图

图 3.2 A 型激光器的 L-I 特性曲线

对 A 型激光器而言, 由于较高的脊对注入的载流子和光场形成了更强的侧向限制作用, A 型激光器表现出有较低的激射阈值电流, 阈值电流基本在 35mA 左右, 成品率达 70% 以上。与本实验室以前制作的 InGaAlAs 材料脊波导激光器(最低阈值电流 $I_{th}=70\text{mA}$)相比, 阈值电流降低了 50%。图 3.2 是一个脊宽是 $4\mu\text{m}$, 腔长是 $390\mu\text{m}$ 的 A 型激光器的 $L-I$ 特性曲线, 阈值电流 $I_{th}=35\text{mA}$, 输出光功率超过 10mW 。

与 A 型激光器相比, B 型激光器的脊较低, 对注入载流子和光场侧向限制作用较弱, 其表现出的激射阈值电流较大, 基本在 $60\text{mA}\sim 70\text{mA}$ 范围以内。B 型激光器的成品率在 80% 以上, 阈值电流最低达 59mA 。图 3.3 是一个阈值电流为 59mA 的 B 型激光器的 $L-I$ 特性曲线, 该器件腔长是 $320\mu\text{m}$, 脊顶宽度是 $4\mu\text{m}$ 。

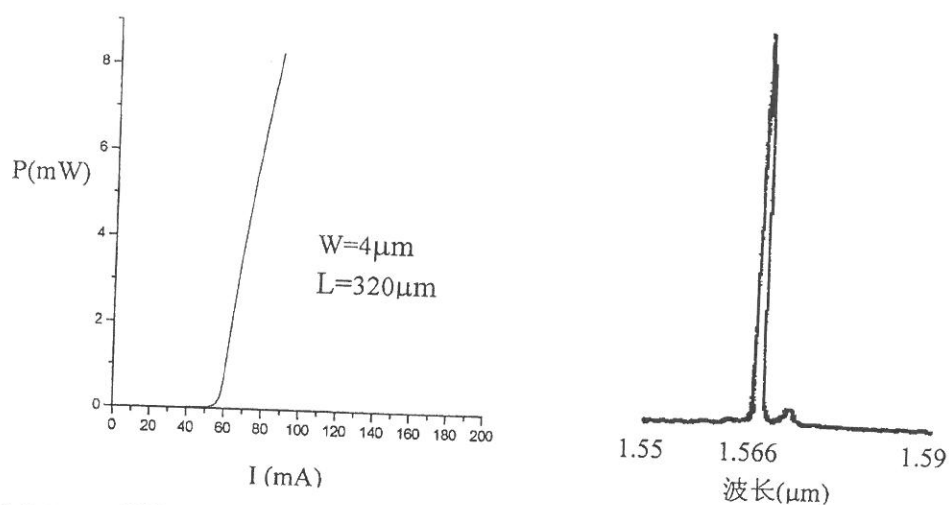


图 3.3 B 型激光器的 $L-I$ 特性曲线 图 3.4 HR142 脊波导激光器的激射谱

A 型激光器与 B 型激光器的测试结果说明, 用较高的脊可以提高对注入载流子和光场侧向扩展的限制作用, 可以较大幅度地降低激光器的阈值电流。对设计的 InGaAs/InGaAlAs MQW 激光器结构, 肩高(有源层离脊底的距离)控制在 $0.2\mu\text{m}$ 左右是比较好的, 可以避免腐蚀对有源区的破坏, 又能对注入载流子和光场提供很强的侧向限制作用。采用更窄的脊($2\mu\text{m}$)或采用倒梯形脊结构可以进一步降低脊波导激光器的阈值电流。

HR142 脊波导激光器的激射波长在 $1.566\mu\text{m}$ 处, 其激射谱如图 3.4 所

示, 在阈值附近是单纵模激射。

脊波导器件是采用常规的光刻和湿法化学腐蚀工艺制成的, SiO_2 绝缘材料大约是 250nm 厚, 脊顶宽度是 $4\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 、 $6\mu\text{m}$ 三种尺寸。

§ 3.2 本章小结

制作的脊波导 A 型激光器实现较低阈值电流激射, 阈值电流基本在 35mA 左右, 成品率达 70% 以上; B 型激光器的成品率在 80% 以上, 阈值电流最低达 59mA。与本实验室以前制作的 InGaAlAs 材料脊波导激光器相比, 阈值电流降低许多。制作的脊波导激光器还表明较高的脊可以提高对注入载流子和光场侧向扩展的限制作用, 可以较大幅度地降低激光器的阈值电流。对设计的 InGaAs/InGaAlAs MQW 激光器结构, 肩高(有源层离脊底的距离)控制在 $0.2\mu\text{m}$ 左右是比较好的, 既可以避免腐蚀对有源区的破坏, 又能对注入载流子和光场提供很强的侧向限制作用。

第四章 半导体激光放大器端面增透膜设计的理论分析与计算

本章将给出具有多层平板波导结构的半导体激光放大器 TE 模与 TM 模端面反射率的计算方法,为优化设计半导体激光放大器端面增透膜参数提供工具。为了对 InGaAs/InGaAlAs MQW 半导体激光放大器端面增透膜参数进行优化设计,本章也将对 InGaAs/InGaAlAs MQW 波导结构的横模波导特性进行分析。

§ 4.1 前言

半导体激光放大器(SLA)端面反射率一直是影响 SLA 性能的重要因素,它对 SLA 的增益起伏、饱和输出功率和噪声特性等影响都很大[1]。端面反射率低的 SLA,其谐振效应很弱,允许在高注入电流的状态下工作(通常是镀膜前激光器阈值电流的 2~3 倍),因而可以获得很高的增益系数,即可以得到很高的单程信号增益;而且具有很宽的增益带宽(约几个 THz),因而温度稳定性也较好。端面反射率低的 SLA 通常也具有饱和输出功率大、噪声指数低等优点。

SLA 的许多应用也都要求 SLA 具有很低的端面反射率,以获得平坦的增益谱[24]。一般要求 SLA 的增益起伏 ΔG 要低于 1~2dB。端面反射率 R 、单程信号增益 G_s 与增益起伏 ΔG 之间的关系如式(1)所示[2]。

$$\Delta G = \left(\frac{1 + RG_s}{1 - RG_s} \right)^2 \quad (1)$$

对 $\Delta G < 2\text{dB}$, 20dB 和 30dB 的单程信号增益 G_s , 要求端面反射率 R 分别小于 10^{-3} 和 10^{-4} 。

高性能半导体激光放大器制作的关键就是制作具有极低反射率的 SLA 端面。采用增透膜技术是实现半导体激光放大器端面增透,降低端面反射率的基本技术。极低的端面反射率需要精心设计 SLA 端面增透膜参

数才能获得。目前,关于优化 SLA 端面增透膜参数的文献有不少[25,27,29,33-37],但在计算中所采用的 SLA 波导模型基本是较为简单的三层对称平板波导结构,或假定波导中的光场呈均匀媒质中的高斯场分布[20,25]。然而,目前许多器件所采用的都是多层波导结构,仅用三层平板波导结构模型是不够的。本文将给出具有多层平板波导结构的 SLA 端面增透膜参数的优化计算方法。

本章优化增透膜参数的计算方法是基于平板波导模型和傅立叶变换(Fourier Transform)的平面波角谱法[27]。根据波导参数可以求出导波模(即入射场),而导波模是由具有不同波矢的单元平面波构成的,据 Fresnel 定律,可以求出以任一角度入射到薄膜系上平面波的振幅反射系数,这样就可以导出反射场。据 Parseval 定理,就可以导出模式反射率,即 SLA 端面反射率。使端面反射率最低的增透膜参数就是增透膜参数的优化值。通过精心设计 AR 膜的参数,即使是单层 AR 膜,也可以得到比较低的剩余反射率,当然对镀膜技术的要求也很高。采用双层 AR 膜可以放宽对镀膜技术的严格要求。

§ 4.2 半导体激光放大器端面反射率的计算方法

对于端面采用双层增透膜的具有多层平板波导结构的半导体激光放大器,其模型及坐标系如图 4.1 所示。设 z 轴沿 SLA 波导中光场的传播方向, x 轴垂直于外延层, y 轴平行于外延层; SLA 的端面与波导轴线垂

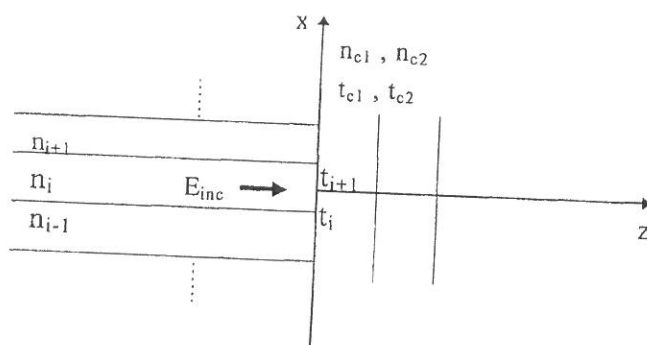


图 4.1 具有双层 AR 膜的 SLA 多层平板波导结构模型

直, n_i ($i=0, \dots, N$ ($N \geq 2$)) 表示第 i 层波导层的折射率, $t_{i+1} - t_i$ 表示第 i 层波导层的厚度; n_{c1} , t_{c1} , n_{c2} , t_{c2} 分别表示第一层、第二层 AR 膜材料的折射率和厚度。

半导体激光放大器的 TE 模式和 TM 模式由于具有不同的光场分布, 其端面 AR 膜参数的优化值也不相同。下面首先推导 TE 模的端面反射率的计算方法。由于 TM 模的端面反射率的计算与 TE 模的不尽相同, 所以也给出 TM 模的端面反射率计算方法的推导。

1、TE 模端面反射率的计算方法

设 SLA 端面处 ($z=0$) 的入射场(电场)为 $E_{inc}(x)$, 反射场为 $E_{ref}(x)$ 。根据 Parseval 定理, 波导模式(导波模式、辐射模式)构成正交、完备集, 所以 $E_{ref}(x)$ 可以用下式表示

$$E_{ref}(x) = r_{TE} E_{inc}(x) + \text{其它波导模式} \quad (2)$$

其中, r_{TE} 是 TE 模式反射系数。

对式(2)两边同 $\times E_{inc}^*(x)$ 并积分可得

$$r_{TE} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} E_{ref}(x) E_{inc}^*(x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} E_{inc}(x) E_{inc}^*(x) dx} \quad (3)$$

所以 TE 模的模式反射率 $R_{TE} = |r_{TE}|^2$ (即端面反射率)为

$$\begin{aligned} R_{TE} &= \frac{\left| \sum_i \int_{t_i}^{t_{i+1}} E_{i-ref}(x) E_{i-inc}^*(x) dx \right|^2}{\left| \int_{-\infty}^{\infty} E_{inc}(x) E_{inc}^*(x) dx \right|^2} \\ &= \frac{\left| \sum_i \int_{t_i}^{t_{i+1}} E_{i-ref}(x) \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E_{inc}^*(s) e^{jk_i s x} d(k_i s) dx \right|^2}{\left| \int_{-\infty}^{\infty} E_{inc}(x) E_{inc}^*(x) dx \right|^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\left| \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E_{inc}^*(s) \left(\sum_i k_i \int_i^{i+1} E_{i-ref}(x) e^{jk_i s x} dx \right) ds \right|^2}{\left| \int_{-\infty}^{\infty} E_{inc}(x) E_{inc}^*(x) dx \right|^2} \\
&= \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2\pi} \left(\sum_i k_i \gamma_{i-TE}(s) E_{i-inc}(s) \right) E_{inc}^*(s) ds \right|^2}{\left| \int_{-\infty}^{\infty} E_{inc}(x) E_{inc}^*(x) dx \right|^2} \quad (4)
\end{aligned}$$

上面的公式推导运用了以下(5)、(6)二式:

$$E_{i-inc}^*(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E_{inc}^*(s) e^{jk_i s x} d(k_i s) \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
E_{ref}(s) &= \sum_i \int_i^{i+1} E_{i-ref}(x) e^{jk_i s x} dx \\
&= \sum_i \gamma_{i-TE}(s) E_{i-inc}(s) \quad (6)
\end{aligned}$$

其中 $k_i = 2\pi m_i / \lambda$ (λ 是波长), $\gamma_{i-TE}(s)$ 是在 i 区 TE 模光场的多层增透膜 Fresnel 振幅反射系数(其计算方法在下面给出), $E_{i-inc}(s)$ 、 $E_{i-ref}(s)$ 是 i 区的入射场与反射场的傅立叶变换。 $\sum_i$ 是从 0 到 N 求和(下同)。

2、TM 模端面反射率的计算方法:

设 SLA 端面处($z=0$)的入射场(磁场)为 $H_{inc}(x)$, 反射场为 $H_{ref}(x)$ 。同样根据 Parseval 定理有

$$H_{ref}(x) = r_{TM} H_{inc}(x) + \text{其它波导模式} \quad (7)$$

其中, r_{TM} 是 TM 模式反射系数。

对式(7)两边同 $\times \frac{1}{n^2(x)} H_{inc}^*(x)$ 并积分可得(为方便起见, 多层平板波导的横向折射率分布 n_i 用 $n(x)$ 表示)

$$r_{TM} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{n^2(x)} H_{ref}(x) H_{inc}^*(x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{n^2(x)} H_{inc}(x) H_{inc}^*(x) dx} \quad (8)$$

所以 TM 模的模式反射率 $R_{TM} = |r_{TM}|^2$ 为

$$\begin{aligned} R_{TM} &= \left| \frac{\sum_i \int_{t_i}^{t_{i+1}} \frac{1}{n_i^2} H_{i-ref}(x) H_{i-inc}^*(x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{n^2(x)} H_{inc}(x) H_{inc}^*(x) dx} \right|^2 \\ &= \frac{\left| \sum_i \int_{t_i}^{t_{i+1}} \frac{1}{n_i^2} H_{i-ref}(x) \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H_{inc}^*(s) e^{jk_i s x} d(k_i s) dx \right|^2}{\left| \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{n^2(x)} H_{inc}(x) H_{inc}^*(x) dx \right|^2} \\ &= \frac{\left| \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H_{inc}^*(s) \left(\sum_i \frac{k_i}{n_i^2} \int_{t_i}^{t_{i+1}} H_{i-ref}(x) e^{jk_i s x} dx \right) ds \right|^2}{\left| \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{n^2(x)} H_{inc}(x) H_{inc}^*(x) dx \right|^2} \\ &= \frac{\left| \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\sum_i \frac{k_i}{n_i^2} \gamma_{i-TM}(s) H_{i-inc}(s) \right) H_{inc}^*(s) ds \right|^2}{\left| \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{n^2(x)} H_{inc}(x) H_{inc}^*(x) dx \right|^2} \quad (9) \end{aligned}$$

上面的公式推导运用了以下(10)、(11)二式:

$$H_{i-inc}^*(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H_{inc}^*(s) e^{jk_i s x} d(k_i s) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} H_{ref}(s) &= \sum_i \int_{t_i}^{t_{i+1}} H_{i-ref}(x) e^{jk_i s x} dx \\ &= \sum_i \gamma_{i-TM}(s) H_{i-inc}(s) \quad (11) \end{aligned}$$

其中 $k_i = 2\pi n_i / \lambda$, $\gamma_{i-TM}(s)$ 是在 i 区 TM 模光场的多层增透膜 Fresnel 振幅反射系数(计算方法在下面给出), $H_{i-inc}(s)$ 、 $H_{i-ref}(s)$ 是 i 区的入射场与反

射场的傅立叶变换。

3、多层薄膜的 Fresnel 振幅反射系数 $\gamma(s)$

平面波以 θ_0 角入射到 p 层薄膜系上的 Fresnel 振幅反射系数 $\gamma(s = \sin \theta_0)$ 为 [38]

$$\gamma(s) = \frac{\eta_0(s) - y(s)}{\eta_0(s) + y(s)} \quad (12)$$

其中 $y(s)$ 表示 p 层薄膜系的有效光学导纳。 $y(s) = C/B$ ，这里，

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{i=1}^p \begin{bmatrix} \cos \delta_i & -j \sin \delta_i / \eta_i \\ -j \eta_i \sin \delta_i & \cos \delta_i \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{p+1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中，对 TE 波， $\eta_i(s) = n_i \cos \theta_i$ ，对 TM 波， $\eta_i(s) = n_i / \cos \theta_i$ ($i=0, \dots, p+1$)；其中 $i=0$ 表示是入射媒质(波导材料)， $i=p+1$ 表示是出射媒质(空气)； $\delta_i = (2\pi n_i / \lambda) d_i \cos \theta_i$ ($i=1, \dots, p$)， n_i 是第 i 层膜的折射率， d_i 表示第 i 层膜的厚度， θ_i 表示在 i 层膜中的折射角，是由 Snell 定律 $n_0 \sin \theta_0 = n_i \sin \theta_i$ 确定的。

§ 4.3 InGaAs/InGaAlAs MQW 波导结构的横模波导特性分析

优化设计 InGaAs/InGaAlAs MQW 半导体激光放大器端面增透膜参数，需要首先解出 InGaAs/InGaAlAs MQW 波导结构的导波模。但是目前关于 InGaAs/InGaAlAs MQW 波导结构中阱区应变(晶格不匹配)材料折射率的确定尚无有效方法，但考虑到这里所研制的放大器阱区材料的应变度较小，由应变引起的折射率变化很小 [39]，可以忽略不计，因此采用其相应体材料的折射率来代替，其中， $\text{In}_{1-x-y}\text{Ga}_x\text{Al}_y\text{As}$ 体材料折射率的计算是用 Sellmeier 方程 (如式(14)所示)进行的。

$$n = \sqrt{A + \frac{B}{1 - C^2 / \lambda^2}} \quad (14)$$

其中， n 是折射率， λ 是波长(单位： μm)， A 、 B 和 C (单位： μm)是与材

料有关的 Sellmeier 参数。

对于三元或四元半导体化合物 Sellmeier 参数的确定, 通常是用其相应二元化合物的 Sellmeier 参数进行线性插值或二次曲线拟合获得的, 不过, 目前还缺少 AlAs 材料的 Sellmeier 参数。为了计算 $\text{In}_{1-x-y}\text{Ga}_x\text{Al}_y\text{As}$ 材料的 Sellmeier 参数 A、B 和 C, 这里用 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 、 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 、 InAs 、 GaAs 、 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.16}\text{Al}_{0.31}\text{As}$ 和 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.14}\text{Al}_{0.33}\text{As}$ 材料相应的 Sellmeier 参数(如表 4.1 所示)按照式(15)进行拟合计算。

$$P_q = (1-x-y)P(\text{InAs}) + xP(\text{GaAs}) + yP(\text{AlAs}) + k_1x(1-x-y) + k_2xy + k_3y(1-x-y) \quad (15)$$

这里, P_q 表示 $\text{In}_{1-x-y}\text{Ga}_x\text{Al}_y\text{As}$ 材料的 Sellmeier 参数 A、B 和 $1/C$, $P(\text{InAs})$ 、 $P(\text{GaAs})$ 和 $P(\text{AlAs})$ 表示 InAs 、 GaAs 和 AlAs 材料相应的 Sellmeier 参数, k_1 、 k_2 和 k_3 分别表示计算相应三元化合物 Sellmeier 参数的弯曲参数。其中, $P(\text{AlAs})$ 以及 k_1 、 k_2 和 k_3 利用表 4.1 中数据可定出。

表 4.1 有关材料的 Sellmeier 参数(A,B,C)

材料	A	B	C(μm)
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}^a$	9.689	1.59	1.1024
$\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}^a$	8.650	1.239	0.7308
InAs^b	11.10	0.71	2.5511
GaAs^b	8.05	2.054	0.6245
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.16}\text{Al}_{0.31}\text{As}^c$	9.0298	1.2667	0.8224
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.14}\text{Al}_{0.33}\text{As}^c$	8.9887	1.2618	0.8113

^a 引自文献[40];

^b 引自文献[41];

^c 用文献[42]数据按式(14)拟合得到

由式(15)和表 4.1 得到计算 $\text{In}_{1-x-y}\text{Ga}_x\text{Al}_y\text{As}$ 材料 Sellmeier 参数的公式(16)。

$$\begin{aligned}
A &= 11.10(1-x-y) + 8.05x + 5.4654y \\
&\quad + 0.09x(1-x-y) - 0.21554xy + 1.02y(1-x-y) \\
B &= 0.71(1-x-y) + 2.054x - 4.1462y \\
&\quad + x(1-x-y) - 2.4255xy + 11.4583y(1-x-y) \\
C &= 1.0 / ((1-x-y)/2.5511 + x/0.6245 + y/0.282 \\
&\quad - 0.21x(1-x-y) + 0.5xy - 2.158y(1-x-y))
\end{aligned} \tag{16}$$

InGaAs/InGaAlAs MQW 波导结构的各层材料的折射率如表 4.2 所示 (对 $\lambda=1.566\mu\text{m}$ 的激光波长而言), 其中晶格匹配材料折射率根据文献[40]得到, 应变材料的折射率由式(14)和(16)得到。

表 4.2 InGaAs/InGaAlAs MQW 波导结构各层材料的折射率 (工作波长 $1.566\mu\text{m}$)

材料	折射率
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	3.5834
$\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	3.1983
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.12}\text{Al}_{0.35}\text{As}$	3.2682
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.22}\text{Al}_{0.25}\text{As}$	3.3308
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.26}\text{Al}_{0.21}\text{As}$	3.3592
$\text{In}_{0.58}\text{Ga}_{0.42}\text{As}$	3.6523
$\text{In}_{0.47}\text{Ga}_{0.34}\text{Al}_{0.19}\text{As}$	3.2935

采用文献[43]中给出的分析多层平板波导结构中横模波导特性的方法, 对所设计的 InGaAs/InGaAlAs MQW 波导结构(如图 2.1 所示)进行分析。为方便起见, 对多量子阱区进行简化处理, 认为多量子阱区的折射率是均匀的[44], 其等效折射率为 $n_{\text{MQW}} = (n_w t_w N_w + n_b t_b N_b) / (t_w N_w + t_b N_b) = 3.4315$ (n_w, n_b : 分别是阱与垒的折射率; t_w, t_b 分别是阱与垒的宽度; N_w, N_b 分别是阱与垒的数目)。采用多层平板波导结构模型对 InGaAs/InGaAlAs MQW 波导结构(如图 2.1 所示)进行的横模波导特性分析表明, 设计的波导结构具有基横模工作特性, 无论是 TE 模式还是 TM 模式, 都不存在高阶

模。图 4.2 给出其 TE 模与 TM 模归一化场在波导中的分布情况。以衬底表面为零点，零点以下是衬底，以上分别是下包层、分别限制层与多量子阱层、上包层、欧姆接触层和空气。其中实线表示 TE 模，虚线表示 TM 模。TE 模与 TM 模的有效折射率分别是 3.2410 和 3.2362。从图上可以看出，TE、TM 模场分布相差甚微。

上面对 InGaAs/InGaAlAs MQW 波导结构进行的横模波导特性分析表明， $1.38\mu\text{m}$ 厚的上包层提供了足够的光场限制。而实际上，上包层厚度一直到 $1.00\mu\text{m}$ 都存在基模。这也为进一步设计 InGaAs/InGaAlAs MQW 波导结构的有源区厚度和包层厚度提供判断依据。

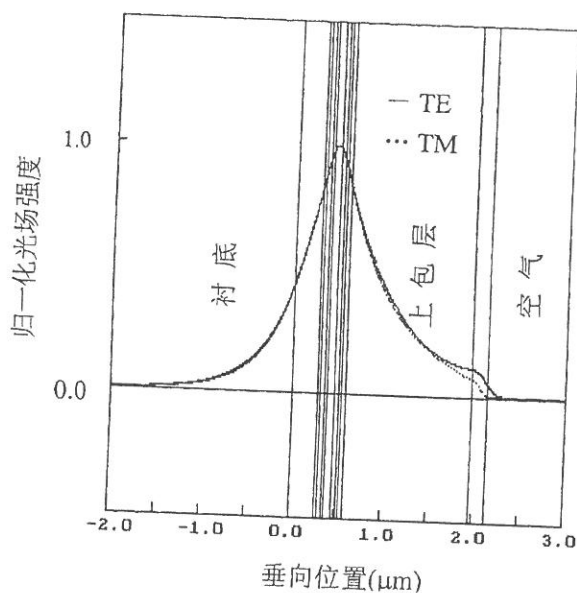


图 4.2 TE、TM 模基模横向场分布

§ 4.4 InGaAs/InGaAlAs MQW SLA 增透膜参数的设计与讨论

为制作低端面反射率的 InGaAs/InGaAlAs MQW SLA，下面将利用前面给出的多层平板波导结构 SLA 端面反射率的计算方法和 InGaAs/InGaAlAs MQW 波导结构横模场的分析方法对第三章中制作的 InGaAs/InGaAlAs MQW 脊波导器件进行端面增透膜参数的优化设计。对

InGaAs/InGaAlAs MQW 脊波导器件采用多层平板波导模型近似是因为与脊顶宽度(大于 $4\mu\text{m}$)相比,脊波导器件有源区厚度是非常薄的。

下面,首先给出在 InGaAs/InGaAlAs MQW 脊波导器件端面采用单层增透膜时的计算结果,对采用双层增透膜也进行了计算。

图 4.3 是采用单层增透膜时,SLA 中 TE 模端面反射率 R 与膜折射率 n_{c1} 及膜厚 t_{c1} 的关系曲线图。从图上可以看出,TE 模的单层增透膜折射率最优值是 $n_{c1}=1.81$,膜的优化厚度是 $t_{c1}=0.2246\mu\text{m}$,它与波长 λ 的关系并非 $\lambda/4n_{c1}$,而是 $0.25956\lambda/n_{c1}$ 。端面反射率小于 10^{-3} 所允许膜折射率与膜厚的误差分别是 $\pm 0.04(\pm 2.2\%)$ 和 $\pm 6\text{nm}(\pm 2.7\%)$ 。

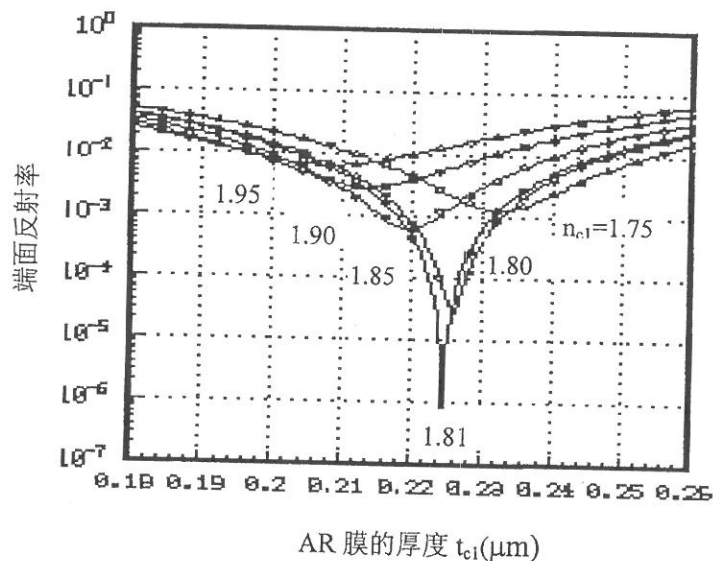


图 4.3 TE 模式端面反射率与单层 AR 膜折射率和厚度的关系曲线

采用单层增透膜的半导体激光放大器 TM 模端面反射率 R 与膜折射率 n_{c1} 及膜厚 t_{c1} 的关系曲线如图 4.4 所示。TM 模的单层增透膜折射率最优值是 1.86,相应膜的优化厚度是 $0.2129\mu\text{m}$,与波长 λ 的关系接近 $\lambda/4n_{c1}$,是 $0.2529\lambda/n_{c1}$,这时端面反射率可以降到 10^{-6} 以下。半导体激光放大器端面反射率小于 10^{-3} 所允许膜折射率与膜厚的误差分别是 $\pm 0.04(\pm 2.2\%)$ 和 $\pm 7\text{nm}(\pm 3.3\%)$ 。

由于 InGaAs/InGaAlAs MQW SLA 有源区是压应变量子阱,主要提供

TE 模增益, 具有很强的偏振灵敏度, 所以优化 InGaAs/InGaAlAs MQW SLA 增透膜参数就是优化其 TE 模的增透膜参数。根据上面计算结果, InGaAs/InGaAlAs MQW SLA 单层增透膜的折射率与膜厚设计为 1.81 和 $0.2246\mu\text{m}$, 端面反射率最低可以降到 10^{-5} 以下。

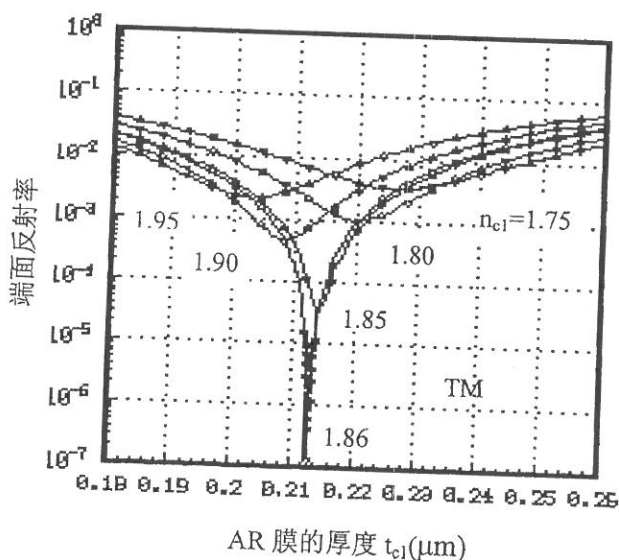
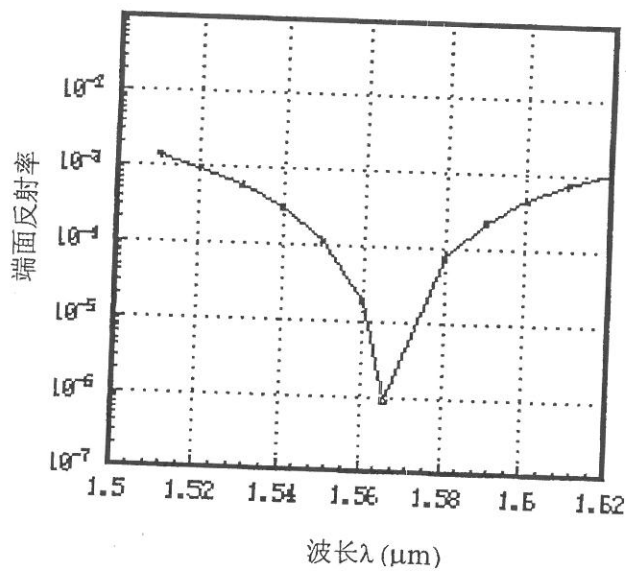


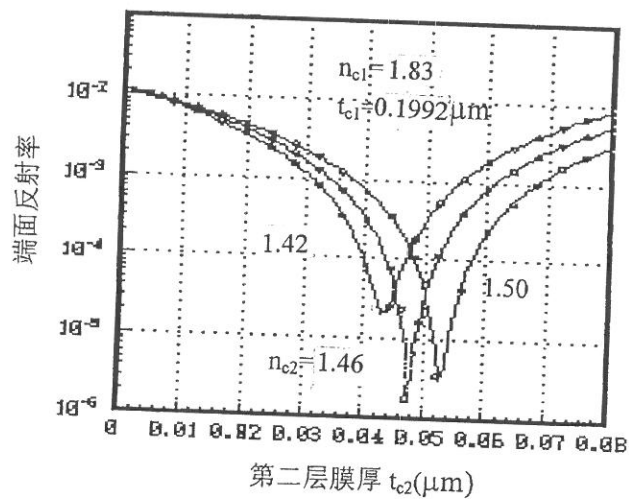
图 4.4 TM 模式端面反射率与单层 AR 膜折射率和厚度的关系曲线

图 4.5 给出了单层增透膜的折射率与膜厚处于 TE 模的最优值时, 半导体激光放大器 TE 模端面反射率与工作波长 λ 的关系。从图上可以看到, TE 模增透波长的范围较宽, 端面反射率小于 10^{-3} 的波长增透范围达 100nm 。

下面讨论在 SLA 端面采用双层增透膜时的情况。这里, 用 SiO_2 (折射率 $n_{c2}=1.46$) 作为第二层增透膜材料, 半导体激光放大器 TE 模端面双层增透膜参数的优化结果如下: 第一层膜的折射率是 1.83, 膜厚是 $0.1992\mu\text{m}$, 第二层膜膜厚是 $0.0469\mu\text{m}$, SLA 端面反射率可以降到 10^{-5} 以下, 如图 4.6 所示。图 4.6 是 SLA 端面反射率与第二层膜厚的关系曲线图, 其中第一层膜是采用优化参数。从图中可以看到, 半导体激光放大器端面反射率小于 10^{-3} 所允许膜厚的误差达 $\pm 13\text{nm}$ ($\pm 27.6\%$), 即使因成膜条件不同使 SiO_2 折

图 4.5 TE 模端面反射率 R 与工作波长 λ 的关系曲线

射率有所变化，其膜厚所允许的误差还很大，这表明采用双层 AR 膜能够放宽对镀膜技术的严格要求，同时能获得低的端面反射率。因此，采用双层增透膜来获得低的端面反射率是可取的。

图 4.6 TE 模式端面反射率 R 与膜厚 t_2 的关系曲线(n_2 分别为 1.42, 1.46 和 1.50 时)

§ 4.5 本章小结

本章推导了多层平板波导结构的半导体激光放大器 TE 模与 TM 模的端面反射率的计算方法, 为优化半导体激光放大器端面增透膜参数提供了工具。

对 InGaAs/InGaAlAs MQW 波导结构进行的横模波导特性分析表明, 设计的波导结构具有基横模工作特性。并为进一步设计 InGaAs/InGaAlAs MQW 波导结构的有源区厚度和包层厚度提供判断依据。

对 InGaAs/InGaAlAs MQW 半导体激光放大器端面采用单层、双层增透膜参数进行了优化计算, 给出了设计结果。采用单层增透膜时, 增透膜折射率最佳值是 1.81, 相应膜厚的最佳值是 $0.2246\mu\text{m}$ 。采用双层增透膜, 第二层用 SiO_2 材料, SiO_2 的折射率是 $n_{c2}=1.46$, 增透膜参数的优化结果如下: 第一层膜的折射率是 1.83, 膜厚是 $0.1992\mu\text{m}$, 第二层膜膜厚是 $0.0469\mu\text{m}$, SLA 端面反射率可以降到 10^{-5} 以下。同时表明, 采用双层 AR 膜能够放宽对镀膜技术的严格要求, 而又能获得低的端面反射率。

第五章 InGaAs/InGaAlAs MQW 半导体激光放大器的制作及其特性测试

本章首先讨论 InGaAs/InGaAlAs MQW 半导体激光放大器增透膜的镀制, 然后是对镀膜的 InGaAs/InGaAlAs MQW 半导体激光放大器特性进行测试, 并对测试结果进行分析。

§ 5.1 InGaAs/InGaAlAs MQW 半导体激光放大器增透膜的镀制

在第三章中我们描述了制作的两种不同脊高的脊波导激光器, 其中 A 型激光器具有较低的阈值电流, 但是由于在摸索其它工艺条件时消耗了较多 A 型激光器芯片, 所以下面 InGaAs/InGaAlAs MQW 半导体激光放大器的制作是利用 B 型脊波导激光器芯片。

对于半导体激光放大器, 如果采用较长腔长对获得高的信号增益是有利的, 但太长则会增强 SLA 的噪声, 恶化 SLA 的信噪比。一般 SLA 的腔长在 $400\mu\text{m}\sim 800\mu\text{m}$ 左右。

InGaAs/InGaAlAs MQW 半导体激光放大器两端面的增透膜是采用电子束蒸镀工艺镀制的。电子束蒸镀属于真空蒸发镀膜的一种, 它是利用加速热阴极发射的电子束, 偏转 270° 后打在膜材上, 对膜材进行局部加热, 使膜材产生汽化沉积在基片上的成膜手段。它的主要优点是适于高熔点的氧化物(局部加热可达 $3000\sim 6000^\circ\text{C}$), 可准确控制汽化温度, 而且高温时可避免坩埚材料对膜材的污染。增透膜的蒸镀是在中国科学院半导体研究所工艺中心进行的。所用增透膜材料是氧化锆, 根据成膜的工艺条件, 其折射率大约在 $1.9\sim 2.0$ 左右。通过在氧化锆材料中掺入一定量氧化铌, 可使增透膜的折射率降低, 约在 $1.8\sim 1.9$ 之间。

在论文的上一章中作者给出了 InGaAs/InGaAlAs MQW 半导体激光放大器端面单层与双层增透膜参数的设计值, 但是在实际制作中, 由于中科院半导体所工艺中心镀增透膜的工艺条件已基本成熟, 按一定的操作工艺, 只可保证折射率在 $1.8\sim 1.9$ 之间。所以 InGaAs/InGaAlAs MQW SLA

端面增透膜的实际制作是,工作人员根据我们所提供的量子阱区折射率和 SLA 的增透波长,将膜厚控制为四分之一波长来完成的。量子阱区折射率采用上一章给出的量子阱区等效折射率 3.43。SLA 的增透波长就是 InGaAs/InGaAlAs MQW 脊波导激光器的激光波长,为 $1.566\mu\text{m}$ 。

另外,SLA 端面的清洁度对增透膜的成膜质量影响很大。为保证器件解理面的清洁,器件解理是在准备送进蒸镀室时才进行,并在解理后立即送进蒸镀室蒸镀。器件解理在工艺中心用划片机进行,器件腔长分别是 $730\mu\text{m}$ 与 $460\mu\text{m}$ 。

§ 5.2 InGaAs/InGaAlAs MQW 半导体激光放大器特性测试

为了对 InGaAs/InGaAlAs MQW SLA 端面增透膜的增透效果和制作的 SLA 特性进行评价,下面对 SLA 的 $L-I$ 特性曲线、放大自发发射谱 (Amplified Spontaneous Emission, 简称 ASE) 以及 SLA 的光放大特性进行测试。

1、SLA 的 $L-I$ 特性曲线

图 5.1 和图 5.2 分别为较长腔长的激光器与 SLA 典型的 $L-I$ 特性曲线。图 5.3 和图 5.4 分别为较短腔长的激光器与 SLA 典型的 $L-I$ 特性曲线。这里需要指出的是,由于器件在解理后立即被送进蒸镀室进行端面镀膜,所以不能对镀膜前 SLA(即激光器)的阈值电流进行测试。为评价镀膜后脊波导器件的增透效果,采用与镀膜器件腔长相近的两种腔长激光器(腔长分别为 $690\mu\text{m}$ 和 $480\mu\text{m}$)的 $L-I$ 特性曲线进行比较。测试中,注入电流均为 $10\mu\text{s}$ 脉宽、 1kHz 频率的脉冲电流。从图 5.1 和图 5.3 中可以看到,腔长较长的激光器和腔长较短激光器的阈值电流分别是 102mA 和 87mA 。从图 5.2 和图 5.4 中可以看出,对于两种腔长的 SLA,在注入电流至少是增透前 SLA(即激光器)阈值电流三倍的情况下,均没有出现激射现象。另外,在图 5.2 及 5.4 中, $L-I$ 曲线都有两条,它们分别代表从

器件的两个不同端面输出光的光功率。可以看出，这两条曲线离得很近，几乎重合，表明 SLA 两个端面增透膜的增透效果基本一样。从图上还可以看出，在相同的电流注入水平下，较长腔长器件的自发辐射强度比较短腔长器件的自发辐射强度要大许多。

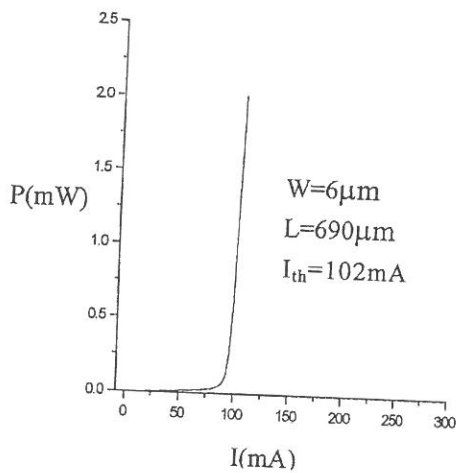


图 5.1 脊波导激光器激射曲线

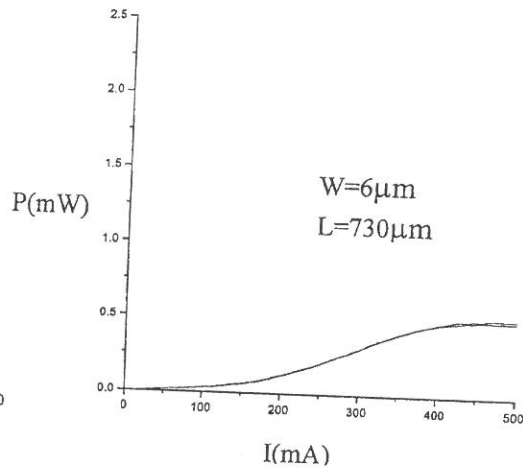
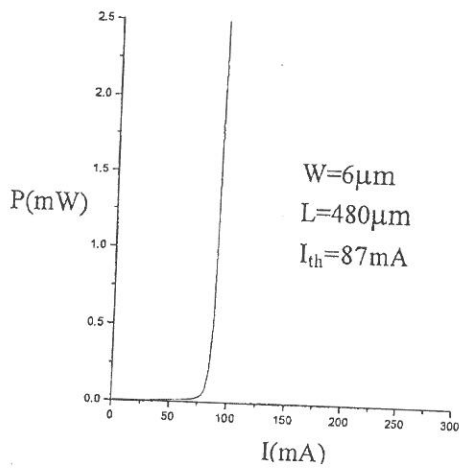
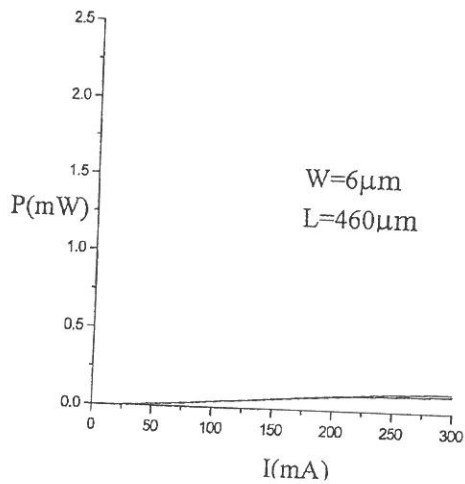
图 5.2 SLA 的 $L-I$ 特性曲线

图 5.3 脊波导激光器激射曲线

图 5.4 SLA 的 $L-I$ 特性曲线

2、SLA 的放大自发发射谱(ASE)的测试

由于具有极低端面反射率的 SLA 的增益谱基本相似于放大自发发射谱(ASE), 因此从自发发射谱也可以得到 SLA 端面反射率与增益谱的一些信息。图 5.5 是较长腔长的 SLA(6 μm 脊宽)在不同的电流注入水平下的放大自发发射谱。因载流子对带隙的填充效应, 随注入电流的增加, 谱峰值向短波长方向移动。在 300mA 电流注入下, 谱半宽是 45nm, 基本在 1.525 μm ~1.570 μm 之间, 这正是光纤通信的低损窗口。较短腔长的 SLA(6 μm 脊宽)在不同的电流注入水平下的放大自发辐射谱如图 5.6 所示, 与较长腔长 SLA 的放大自发发射谱基本相似。

SLA 端面反射率的评价是通过测量器件 F-P 效应对放大自发发射谱的调制深度获得的[27]。

首先在低于阈值电流的注入水平下测出镀膜前器件的 F-P 效应在激射波长附近对放大自发发射谱的调制参数 v (ASE 的峰/谷比), 利用式(17)就可以算出器件的单程信号增益 G_s 。这里假设镀膜前器件两端面反射率是相同的(即 $R_1 = R_2$)。由于镀膜前器件端面为自然解理面, 其反射率大约是 32%。

$$R_1 R_2 = \frac{1}{G_s^2} \left(\frac{\sqrt{v} - 1}{\sqrt{v} + 1} \right)^2 \quad (17)$$

然后在相同的电流注入水平下测出镀膜器件的 F-P 效应在激射波长附近对放大自发发射谱的调制参数 v , 且假设镀膜器件两端面增透效果是相同的(即 $R_1 = R_2$), 这样利用已计算出的 G_s 和式(17)就可以算出镀膜器件的端面剩余反射率。

但是, 现在无法对同一器件在镀膜前后进行对比测量, 也就无法对镀膜后的 SLA 端面剩余反射率进行比较准确的实验评价。在实验上, 也准备利用相似腔长的不同器件进行测量评价, 但由于器件在阈值电流以下工作时的光功率很低, 且在脉冲条件下工作时, 其光功率密度也很低, 这样, 光信号基本被噪声淹没, 无法测量。但从 SLA 的放大自发发射谱上可以

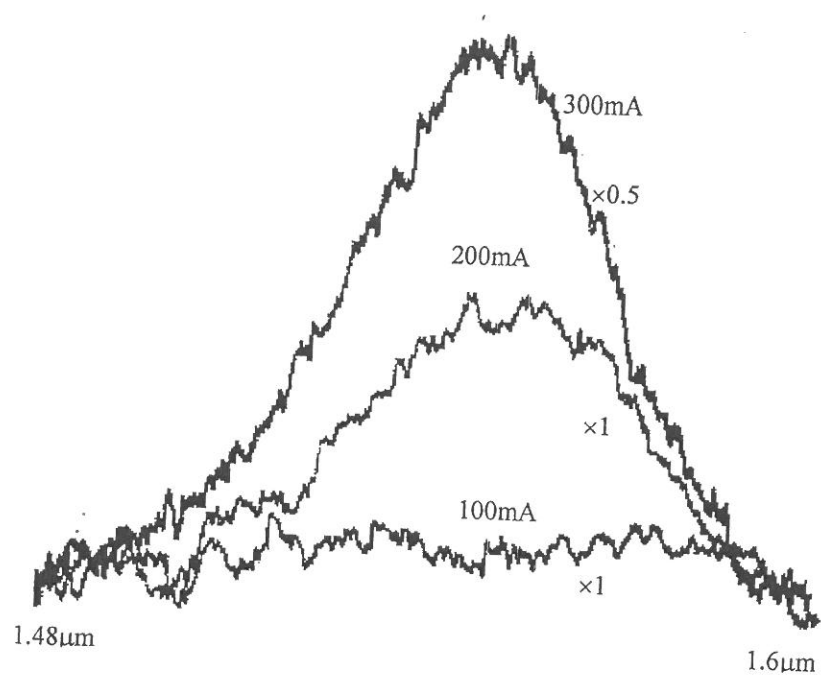


图 5.5 较长腔长 SLA(6 μm 脊宽)在不同的电流注入水平下的放大自发发射谱

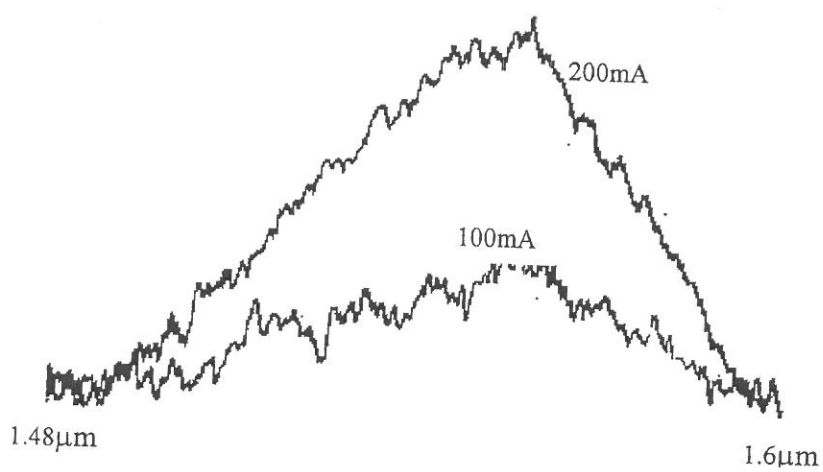


图 5.6 较短腔长 SLA(6 μm 脊宽)在不同的电流注入水平下的放大自发发射谱

看到, F-P 效应对放大自发发射谱的调制作用较弱。由于 SLA 端面增透膜的折射率是在 1.8~1.9 之间, 膜厚是按四分之一波长进行镀制的, 所以膜厚应该在 $0.2040\mu\text{m}\sim 0.2180\mu\text{m}$ 之间。这样, 根据上一章的计算结果可知, 如果上述条件满足, SLA 端面反射率应低于 10^{-2} , 如图 4.3 所示。

3、SLA 放大特性的测试

为了测量 InGaAs/InGaAlAs MQW SLA 的放大特性, 首先用如图 5.7 所示通光实验装置来观察尖锥光纤与脊波导器件的耦合情况。光源是连续工作的分布反馈式半导体激光器(DFB-LD), 激光波长是 $1.566\mu\text{m}$ 。放大器注入电流源提供 $1\mu\text{s}$ 脉宽、1kHz 频率的额定脉冲电流。脊波导输出的光经透镜成像到红外摄像机的靶面上, 用监视器观察脊波导端面处光斑的形状。

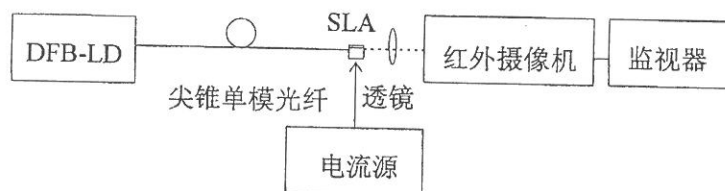
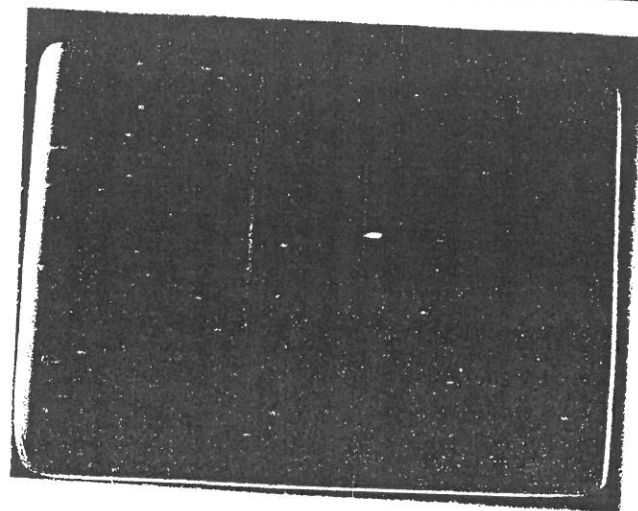
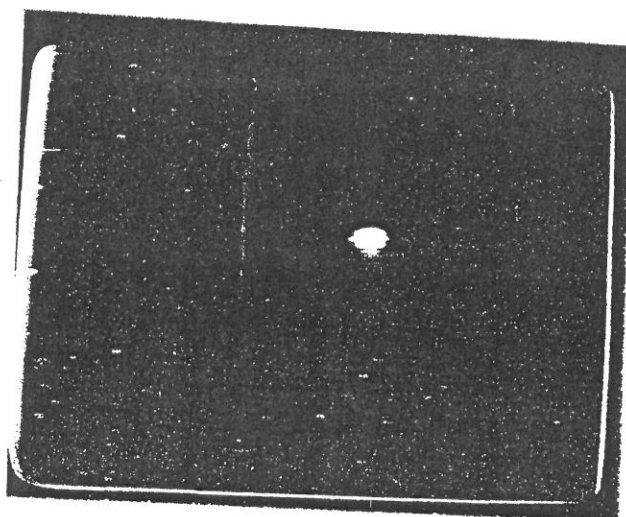


图 5.7 SLA 通光实验装置示意图

图 5.8 (a)、(b)是脊顶宽度为 $6\mu\text{m}$ 的 SLA 脊波导端面的近场光斑, 其中 5.8(a)是 SLA 无注入电流时光源输出光通过 SLA 的脊波导情况; 5.8(b)是 SLA 注入电流为 300mA 时的光源输出光通过 SLA 的脊波导情况, 可以看到光明显增强, 这里面有 SLA 的自发发射光成分, 也可能有输入光信号被放大的成分。光斑呈椭圆型是因为 SLA 的脊较低。



(a)



(b)

图 5.8 SLA 脊波导端面的近场光斑 (a)SLA 无电流注入(b)SLA 注入电流为 300mA

用来测量 SLA 光放大特性的测试系统如图 5.9 所示。光源仍为连续工作的 DFB-LD，其工作波长为 $1.566\mu\text{m}$ ，注入电流为 16mA。

要得到 SLA 的增益，首先要测量 SLA 的光纤-光纤增益。图 5.10(a)所示是当 SLA 无电流注入时，光谱仪上的光谱图，其光强峰值为 2.8 个单位(30dB 档)；图 5.10(b)是当 SLA 的注入电流为 300mA 时，光谱仪上的光

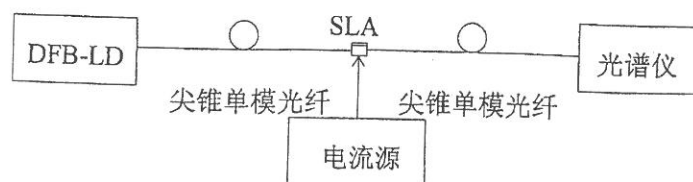
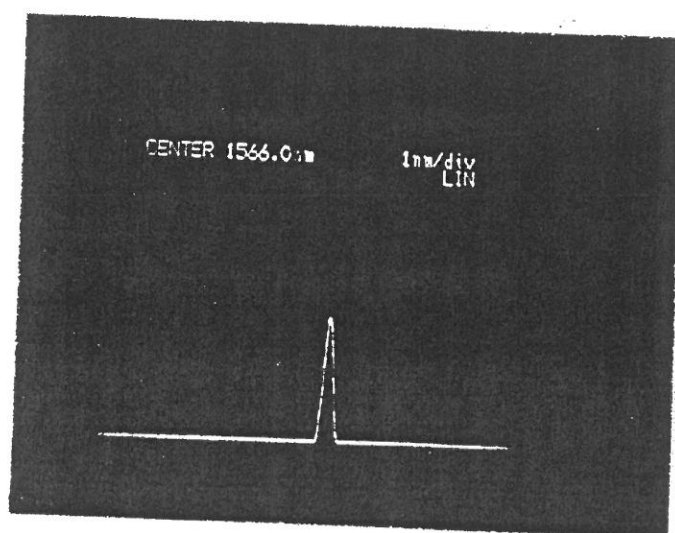
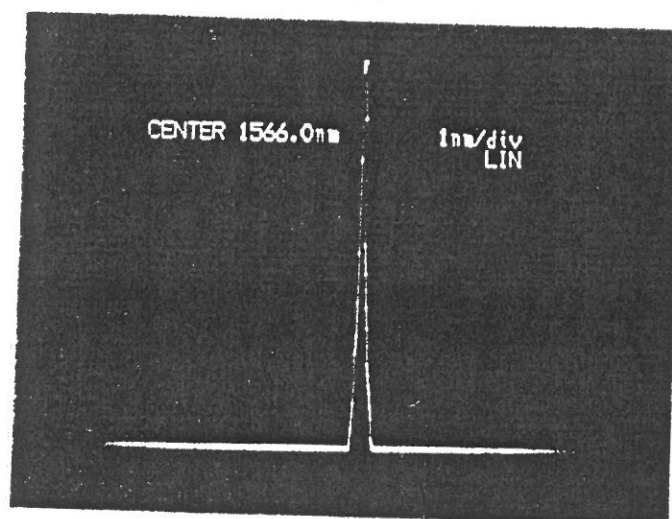


图 5.9 SLA 放大特性测试系统



(a)



(b)

图 5.10 较长腔长 SLA 在不同电流注入水平下的输出光的光谱图
(a)SLA 无注入电流 (b)SLA 注入电流为 300mA

谱图, 其光强峰值为 8.0 个单位(30dB 档)。当把 DFB-LD 的输出光直接送入光谱仪时, 其光谱峰值是 4.0 个单位(20dB 档), 即 40.0 个单位(30dB 档)。由此可知 SLA 光纤-光纤的增益是 -7.0dB。

要得到 SLA 的增益, 还必须知道 SLA 两端的插入损耗。首先采用测量同样脊宽的未镀膜器件(激光器)与光纤耦合前后的输出光功率的变化情况来测量空气-光纤界面的插入损耗。激光器与光纤耦合前后输出的光都用光探测器接收并送入示波器, 示波器的示数分别为 1.60V 和 0.94V, 即空气-光纤界面的插入损耗是 2.3dB。下面是通过假设光垂直于端面入射来估算 SLA 与空气的插入损耗。由于 SLA 芯区折射率是 3.43, 增透膜的折射率是 1.8~1.9, 则 SLA 与增透膜界面的光透过率是 0.9029~0.9176, 增透膜与空气界面的光透过率是 0.9184~0.9037, 即 SLA 与空气的插入损耗大约是 0.8dB。这里, 假设 SLA 输入端光纤-空气的插入损耗与输出端空气-光纤界面的插入损耗一样都是 2.3dB, 则 SLA 每个端面与光纤的平均插入损耗是 3.1dB, 所以此时 SLA 的增益是 -0.8dB。

当 SLA 的注入电流为 1000mA 时, 光谱仪的光谱峰值变为 2.0 个单位(20dB 档), 即 20 个单位(30dB 档), 所以 SLA 的纤-纤增益为 -3.0dB, 即 SLA 的增益是 3.2dB。

上面测试所用器件是腔长较长的 SLA, 其脊顶宽度是 6 μm 。对于腔长较短的 SLA, 由于其电极在镀膜工艺中受到破坏以及在后面测试中的消耗, 因此未能获得腔长较短 SLA 光放大特性的测试结果。

SLA 增益较小主要是因为载流子对带隙的填充效应使 SLA 增益谱峰值随注入电流的增加而向短波长方向移动。从其放大自发发射谱可以看到, 在 300mA 电流注入的情况下, SLA 的最大增益已经移到 1.55 μm 附近, 强度在 1.566 μm 处已下降许多。在 1000mA 电流的注入下, SLA 的性能受热效应影响已不能忽视

§ 5.3 本章小结

本章对 InGaAs/InGaAlAs MQW SLA 的 L-I 特性, 放大自发发射谱

和光放大特性进行了初步测试与分析。SLA 在注入电流至少是增透前阈值电流三倍的情况下,没有出现激射现象。测试表明,SLA 端面增透膜有较好的增透效果,而且 SLA 的两端面增透效果相近。

较长腔长的 SLA 在 300mA 电流注入时的放大自发辐射谱(ASE)的最大半宽为 45nm,基本在 $1.525\mu\text{m}\sim 1.57\mu\text{m}$ 之间。当注入电流为 1000mA 时较长腔长的 SLA 对 $1.566\mu\text{m}$ 的信号光的增益是 3.2dB。

通过 InGaAs/InGaAlAs MQW SLA 的特性测试,可以看出:

脊波导激光器有必要采用更窄的脊和(或)倒梯形脊结构,以进一步降低器件的阈值电流,实现器件连续工作(可使用热沉)。用连续工作的激光器制作 SLA,可以用光谱仪测出 SLA 的放大自发发射谱,对其端面剩余反射率进行评价,以便改进镀膜工艺。而且,较低的阈值电流使 SLA 可以在较低的电流注入水平下工作,这样也就改善了热效应对器件性能的影响。

第六章 总结

本论文进行了 InGaAs/InGaAlAs MQW 半导体激光放大器的研制工作,完成了材料结构的设计与评价、放大器端面镀膜参数的优化以及器件的制作与测试等工作。

主要工作如下:

1、结合 MBE 设备的具体情况,设计了 InGaAs/InGaAlAs MQW 材料结构,并协助完成材料的生长。完成对外延片的综合性能测试,表明所生长外延片可以用来研制脊波导激光器和半导体激光放大器。制作的宽接触激光器实现的阈值电流密度最低为 $1.42\text{kA}/\text{cm}^2$ 。

2、制作的脊波导激光器实现了较低阈值激射,最低阈值电流为 35mA ,输出的光功率超过 10mW 。与本实验室以前研制的同种材料的脊波导激光器相比,阈值电流降低了 50%。

3、利用多层平板波导结构模型对设计的 InGaAs/InGaAlAs MQW 波导结构进行了横模波导特性分析。分析表明,所设计的波导结构具有基横模工作特性,并为以后设计 InGaAs/InGaAlAs MQW 材料结构的有源区厚度和包层厚度提供判断依据。

4、给出多层平板波导结构的半导体激光放大器 TE 模与 TM 模的端面反射率的计算方法,为优化半导体激光放大器端面增透膜参数提供了工具。

5、对 InGaAs/InGaAlAs 多量子阱半导体激光放大器端面镀单层、双层增透膜参数进行了优化计算,给出了设计结果。

6、对 InGaAs/InGaAlAs MQW SLA 的 $L-I$ 特性、放大自发发射谱和放大特性进行了初步的测试与分析。在 1000mA 电流注入的情况下,测得 $730\mu\text{m}$ 长的 SLA 有 3.2dB 的信号增益。

7、对进一步研究提出了建议。

参考文献:

- [1] 蔡伯荣, 陈铮, 刘旭, 《半导体激光器》, 1995 年 10 月, 北京, 电子工业出版社, 219-225 页
- [2] T. Saitoh, T. Mukai, "1.5 μ m GaInAsP traveling-wave semiconductor laser amplifiers", IEEE J. Quantum Electron., Vol. 23, No.6, pp.1010-1014, 1987(6)
- [3] 张煦, "激光管与光放大器的近年趋势", 光通信研究, 1997 年, 第 2 期(总第 82 期), 1—9 页
- [4] G. Großkopf, L. Küller, R. Ludwig, R. Schnabel, H. G. Weber, "Semiconductor laser optical amplifiers in switching and distribution networks", Optical and Quantum Electron., Vol. 21, pp. S59-S74, 1989
- [5] S. Shimada, H. Ishio, 《Optical Amplifiers and their Applications》, 1994, GB, Bookcraft Ltd. pp.69-86
- [6] Bagley M. "Broadband Operation of InGaAsP/InGaAs GRIN-SC-MQW BH Amplifier with 115mW output power", Electron. Lett. Vol. 29, pp. 1302, 1992
- [7] Peter J. A. Thijs, Luuk F. Tiemeijer, J. J. M. Binsma, and Teus van Dongen, "Progress in Long-Wavelength Strained-Layer InGaAs(P) Quantum-Well Semiconductor Lasers and Amplifiers", IEEE J. Quantum Electron., Vol. 30, No. 2, pp. 477-499, 1994(2)
- [8] M. Joma, H. Horikawa, C. Q. Xu, K. Yamada, Y. Katoh, and T. Kamijoh, "Polarization-insensitive semiconductor laser amplifiers with tensile strained InGaAsP/ InGaAsP multiple quantum well structures", Appl. Phys. Lett., Vol. 62, No. 1, pp. 121-123, 1993(1)
- [9] K. Magari, M. Okamoto, and Y. Noguchi, "1.5 μ m Polarization-insensitive High-Gain Tensile-Strained -Barrier MQW Optical Amplifiers", IEEE. Photon. Technol. Lett., Vol. 3, No. 11, pp. 998-1000, 1991(11)
- [10] T. Kamijoh, H. Horikawa, Y. Matsui, Y. M. Sin, M. Nakajima, C. Q. Xu, and Ogawa, "Improved Operation Characteristics of Long-Wavelength

- Lasers Using Strained MQW Active Layers”, IEEE J. Quantum Electron., Vol. 30, No. 2, pp. 524-532, 1994(2)
- [11] M. A. Newkirk, B. I. Miller, U. Koren, M. G. Young, M. Chien, R. M. Jopson, and C. A. Burrus, “1.5 μ m Multiquantum-Well Semiconductor Optical Amplifier with Tensile and Compressively Strained Wells for Polarization-Independent Gain”, IEEE. Photon. Technol. Lett., Vol. 4, No. 4, pp. 406-408, 1993(4)
- [12] T. L. Koch, and U. Koren, “Semiconductor photonic integrated circuits”, IEEE J. Quantum Electron. ,Vol. 27, pp. 641-653, 1991
- [13] M. A. Newkirk, B. I. Miller, U. Koren, M. G. Young, M. Chien, R. M. Jopson, G. Raybon, C. A. Burrus, and H. M. Presby, “1.55 μ m multi-quantum well semiconductor optical amplifier with low gain ripple and high coupling efficiency for photonic circuit integration”, Electron. Lett., Vol. 29, No. 5, pp. 443-445, 1993(1)
- [14] F. Deaux, A. Ougazzaden, F. Huet, and M. Carré, “Lossless InAsP- InGaP Modulator at 1.3 μ m for Optical Conversion of Radio Signals UP to 40Ghz”, IEEE. Photon. Technol. Lett., Vol. 9, No. 7, pp. 931-933, 1997(7)
- [15] J. E. Zucker, K. L. Jones, B. I. Miller, M. G. Young, U. Koren, J. D. Evankow, and C. A. Burrus, “Zero-loss quantum well waveguide Mach-Zehnder modulator at 1.55 μ m”, Appl. Phys. Lett. Vol.60, No. 3, pp. 277-279, 1992(1)
- [16] Fabrice. Deaux, Sandrine Muller, Abdallah Ougazzaden, Andréi Mircéa, Abderrahim Ramdene, Philippe Krau, Jacques Semo, Frédéric Huet, Madeleine Carré and Alain Carencu, “Zero-loss multiple-quantum-well electroabsorption modulator with very low chirp”, Appl. Phys. Lett., Vol. 64, No. 8, pp. 954-956, 1994
- [17] G. Eisenstein and W. Stulz, “High quality antireflection coatings on laser facets by sputtered silicon nitride”, Appl. Optics, Vol. 23, No. 1, pp. 161- 164, 1984(1)
- [18] Y. Katagiri and H. Ukita, “Ion beam sputtered (SiO₂)_x(Si₃N₄)_{1-x} anti-

- reflection coatings on laser facets produced using O_2-N_2 discharges", Appl. Optics, Vol. 29, No. 34, pp. 5074-5079, 1990(12)
- [19] W. Rideout, R. Holmstrom, J. LaCOUSE, E. Meland, W. Powazinik, "Ultra-low-reflectivity semiconductor optical amplifiers without antireflection coatings", Electron. Lett., Vol. 26, No. 1, pp. 36-37, 1990(1)
- [20] C. E. Zah, R. Bhat, S. G. Menocal, N. Andreadakis, F. Favire, C. Caneau, M. A. Koza, and T. P. Lee, "1.5 μ m GaInAsP Angled-Facet Flared-Waveguide Traveling-Wave Laser Amplifiers", IEEE. Photon. Technol. Lett., Vol. 2, No. 1, pp. 46-47, 1990(1)
- [21] I. Cha, M. Kitamura, I. Mito, "1.5 μ m band traveling-wave semiconductor optical amplifiers with window facet structure", Electron. Lett., Vol. 25, No. 3, pp. 242-243, 1989(2)
- [22] I. Cha, M. Kitamura, H. Honmou, I. Mito, "1.5 μ m band travelling-wave semiconductor optical amplifiers with window facet structure", Electron. Lett., Vol. 25, No. 18, pp. 1241-1242, 1989(8)
- [23] K. Magari, S. Kondo, H. Yasaka, Y. Noguchi, T. Kataoka, and O. Mikami, "a high gain GRIN-SCH MQW optical semiconductor laser amplifier", IEEE. Photon. Technol. Lett. Vol., 2, No. 11, pp. 792-793, 1990(11)
- [24] M. Z. Iqbal, K. B. Ma, C. E Zah, T. P. Lee, and N. K. Cheung, "Effects of Gain Ripples in Semiconductor Optical Amplifiers on Very High Speed Lightwave Systems", IEEE. Photon. Technol. Lett., Vol. 2, No. 1, pp. 48-49, 1990(1)
- [25] 黄德修, 刘德明, 樊承钧, "两层介质减反膜机其在半导体光电器件中的应用", 光学学报, 1987 年 11 月, 第 7 卷, 第 11 期, 1036-1039 页
- [26] M. C. Farries, J. Buus, M. Kearley, "Design and fabrication of two layer anti-reflection coatings for semiconductor optical amplifiers", Electron. Lett., Vol. 26, No. 19, pp. 1626-1627, 1990(9)
- [27] T. Saitoh, T. Mukai, and O. Mikami, " Theoretical Analysis and Fabrication of Antireflection Coatings on Laser-Diode Facets " , J.

- Lightwave Technol., Vol. 3, No. 2, pp. 288-293, 1985(4)
- [28] 刘雪军, 孙军强, 黄菊仙, 黄德修, “低偏制灵敏度行波半导体光放大器的实验研究”, 光通信技术, 1994 年, Vol.18, No. 3, 184-187 页
- [29] C. Vassallo, “Polarization-independent antireflection coatings for semiconductor optical amplifiers”, Electron. Lett., Vol. 24, No. 1, pp. 61-62, 1988(1)
- [30] Shun Lien Chuang, “Efficient band-structure calculations of strained quantum wells”, Physical View B, Vol. 43, No. 12, pp. 9649-9661, 1991(4)
- [31] H. Hillmer, R. Lisch, F. Steinhagen, W. Schlapp, A. Pöcker, and H. Burkhard, “MBE grown strain-compensated AlGaInAs/ AlGaInAs/InP MQW laser structures”, Electron. Lett. Vol., 31, No. 16, pp 1346-1348, 1995(8)
- [32] L. A. Coldren, S. W. Corzine, 《Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits》, 1995, USA, John Wiley & Sons, Inc., p. 535
- [33] C. Vassallo, “Theory and practical calculation of antireflection coatings on semiconductor laser diode optical amplifiers”, IEE Proc. J. Optoelectronics, Vol. 137, No. 4, pp. 193-202, 1990(8)
- [34] C. Vassallo, “Rigorous and approximate calculations of antireflection layer parameters for travelling-wave diode laser amplifiers”, Electron. Lett., Vol. 21, No. 8, pp. 333-334, 1985(4)
- [35] M. Reed, T. M. Benson, P. C. Kendall, P. Sewell, “Antireflection-coated angled facet design”, IEE Proc. J. Optoelectronics, Vol. 143, No. 4, pp. 214-220, 1996(8)
- [36] P. C. Kendall, D. A. Roberts, P. N. Robson, M. J. Adams, M. J. Robertson, “Semiconductor laser facet reflectivities using free-space radiation modes”, IEE Proc. J. Optoelectronics, Vol. 140, No. 1, pp. 49- 55, 1993(2)
- [37] W. Hellmich, and Peter P. Deimel, “Optimal AR-Coating for Optical Waveguide Devices”, J. Lightwave Technol., Vol. 10, No. 4, 1992(4)
- [38] M. Born, and E. Wolf, “Principles of Optics”, 1975, 5th ed., New York,

- Peigamon, pp. 55-62
- [39] P. K. Bhattacharya, U. Das, F. Y. Juang, Y. Nashimoto, and S.Dhar, "Material properties and optical guiding in InGaAs-GaAs strained layer superlattices-a brief review," *Solid state electron.*, Vol. 29, No. 2, pp. 261-267, 1986
- [40] M. J. Mondry, D.I. Babic, J. E. Bowers, and L. A. Coldren, "Refractive Indexes of (Al,Ga,In)As Epilayers on InP for Optoelectronics Applications", *IEEE. Photon. Technol. Lett.*, Vol. 4, No. 6, pp. 627-630, 1992(6)
- [41] C. De Bernardi, M. Meliga, S. Morasca, C. Rigo, B. Sordo, and A. Stano, "Refractive indices of InGaAlAs grown by molecular beam epitaxy", *J. Appl. Phys.*, Vol. 68, No. 12, pp. 6513-6514, 1990(12)
- [42] 黄德修, 《半导体光电子学》, 1989, 北京, 电子科技大学出版社
- [43] 罗毅, 蒲锐, 彭吉虎, "分布反馈式半导体激光器耦合系数计算与垂直结构设计", *半导体学报*, 第 16 卷, 第 4 期, 第 241-247 页, 1995 年 4 月
- [44] W. Streifer, D.R. Scifres, and R.D. Burnham, "Optical analysis of multiple-quantum-well lasers", *Appl. Optics*, Vol. 18, No.21, pp. 3547-3548, 1979(11)

致谢

本论文工作自始至终得到了王健华副教授的悉心指导,而且,王健华副教授严格的科研作风和宽广的学识也使我获益非浅。作者为能得到王健华副教授的指导深感荣幸,在此也表示深深的谢意。

作者要特别感谢罗毅教授对本论文工作给予的指导与帮助。

作者也特别感谢王文老师和已毕业的师兄孙可,还有郝智彪同学在器件工艺和实验技术方面给予的指导和帮助。

作者非常感谢文国鹏同学和孙长征同学,在计算机方面给予的指点和与他们讨论时的获益。

作者也非常感谢周丹同学在器件测试方面给予的帮助。

作者也特别向半导体所 MBE 组曾一平老师、潘亮同学、工艺中心的毕可奎老师和激光教研组的姚敏言老师在材料生长、增透膜镀制和光纤焊接方面给予的帮助表示感谢。

作者也非常感谢李素新老师在日常事务和生活方面给予的帮助。

最后,作者也向所有关心和帮助过作者的人,表示深深的感谢。