

# InGaAs/AlGaAs 应变量子阱 激光器的可靠性\*

杨国文 徐俊英 徐遵图 张敬明 陈良惠

(中国科学院半导体研究所 北京 100083)

**摘要** 利用分子束外延方法研制的 InGaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器外延材料制备了窄条型脊型波导结构量子阱激光器件。通过对其 50 高温加速老化,检测了器件的可靠性,并对器件中存在的三种典型退化行为,即快速退化、慢退化和端面光学灾变损伤进行了分析与研究

PACC: 4255P, 6170L, 7865

## 1 引言

掺铒光纤放大器(EDFA)在实现新一代超高速、超大容量和超强功能的光通讯网络中将起非常重要的作用。波长 980nm 的量子阱激光器由于其高的泵浦效率和低的噪声特性<sup>[1,2]</sup>,使其成为 EDFA 十分理想的泵浦源。在实际应用中人们十分关心的就是寿命问题,因此研究和提高 980nm 应变量子阱激光器的可靠性是一个具有重要意义的研究课题。

InGaAs/GaAs 应变量子阱激光器在开始出现时,人们一直对其寿命问题持怀疑态度,因为有源发光区存在有很大的应力,势必会造成激光器的严重退化。但由于应用需求的促进,许多研究人员对 InGaAs/GaAs 应变激光器的退化行为进行了细致的研究。Beernink 等人<sup>[3]</sup>研究了量子阱厚度对激光器退化速率的影响,发现当其厚度接近临界厚度时,退化速率加快,因此应设法使量子阱的宽度远小于该组分时的临界厚度值。以 Waters 为代表的研究小组<sup>[4]</sup>则发现由于 In 的晶格硬化作用使应变的 InGaAs 量子阱激光器中很少观察到(100)暗线缺陷(DLD)的传播。另外的研究还表明,器件在低于 60mW 功率输出时,可具有大于 10<sup>5</sup>h 的工作寿命<sup>[5]</sup>,但在高功率 100mW 时,则发现了端面突然发生光学灾变损伤(Catastrophic Optical Damage, 简称 COD)现象的发生<sup>[6]</sup>。本文就我们所制备的 980nm 应变量子阱激光器件进行了寿命考核实验,并就 980nm 量子阱激光器的退化行为作一分析。

\* 国家“863”高技术计划项目资助

杨国文 男,1966 年出生,副研究员,博士,从事于量子阱光电器件的研究  
1997-12-03 收到,1998-03-11 定稿

## 2 器件制备与特性

我们所制备的器件结构为窄条形脊形波导结构,如图 1 所示 首先利用 MBE 方法生长出 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器外延材料,然后利用标准光刻技术和湿法化学腐蚀方法制备出脊形波导结构,其脊形宽度约为  $4\mu\text{m}$ ,在 P 和 N 面制作电极后解理成腔长为  $800\mu\text{m}$  的激光条,然后在端面处分别镀以高反射膜( $\text{HR} \sim 90\%$ )和增透膜( $\text{AR} \sim 10\%$ ),最后解理成单个激光器管芯,并 P 面朝下装在镀 In 铜热沉上,得到  $980\text{nm}$  量子阱激光器 其典型阈值电流和斜率效率分别为  $15\text{mA}$  和  $0.8\text{mW}/\text{mA}$ ,典型的光功率电流特性曲线如图 2 所示,其最大光输出功率受到端面光学灾变损伤的限制

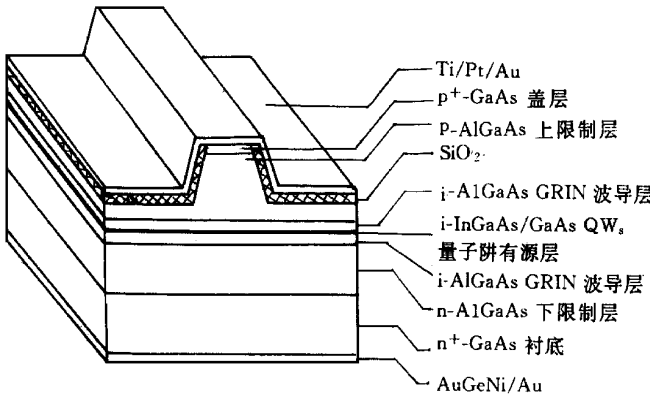


图 1 脊形波导结构示意图

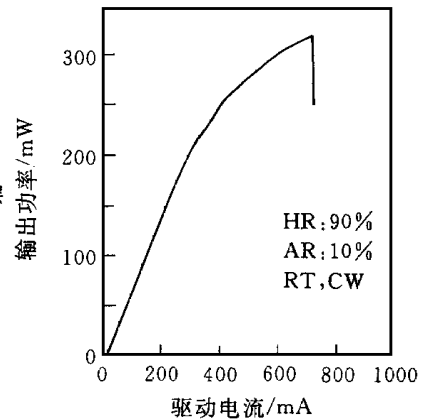


图 2 980nm 脊形波导结构应变量子阱激光器的典型光功率电流特性曲线

## 3 寿命考核实验与结果分析

### 3.1 寿命考核条件与实验结果

对于所制备的脊形波导结构器件,我们进行了高温老化寿命实验,条件为  $50\text{mA}$ 、 $80\text{mW}$  恒定功率输出 在 一批器件中,我们任选了其中的十只器件,在开始老化的  $100\text{h}$  小时内,有 3 只器件发生了快速退化,被筛选出 其余 7 只器件在  $50\text{mA}$ 、 $80\text{mW}$  下老化了  $1093\text{h}$  小时,在此过程中对工作电流进行了定期取样记录,得到如图 3 所示的寿命实验曲线及表 1 所示的实验数据

表 1 寿命考核实验数据

管号	初始工作电流 $I_s/\text{mA}$	结束工作电流 $I_e/\text{mA}$	工作时间/h	电流增加量/ $\text{mA}$	增加百分数/%	备注
1	121.5	130.4	995	8.9	7.3	COD
2	106.8	111.4	826	4.6	4.3	COD
3	110.0	121.1	1093	11.1	10.1	
4	113.5	123.5	1093	10.0	8.8	
5	107.3	115.0	1093	7.7	7.1	
6	120.4	137.9	1093	17.5	14.5	
7	116.7	129.6	1093	12.9	11.0	
平均值					10.3	1, 2 除外

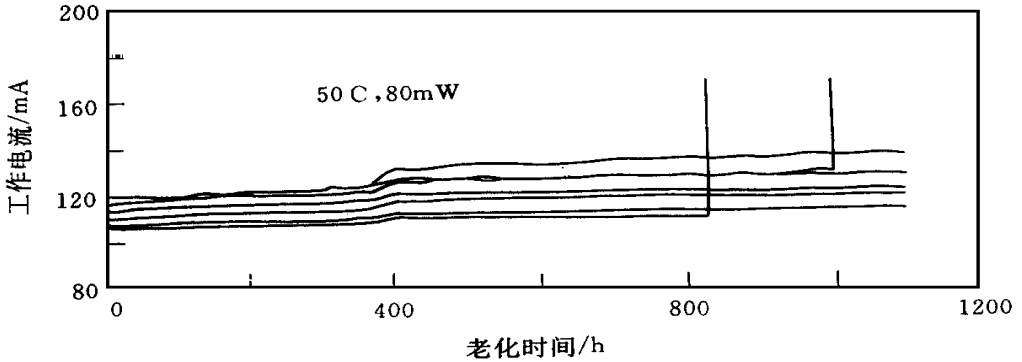


图 3 制备的脊形波导器件的高温老化寿命实验曲线  
条件为 50、80mW 恒定功率输出

根据工作寿命与温度的关系:

$$\tau(T) = \tau_0 \exp(E_a/k_B T) \tag{1}$$

其中  $k_B = 8.625 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$  为玻尔兹曼常数;  $E_a$  为激活能, 一般取 0.4~ 0.7eV, 这里我们取一中间值 0.5eV, 由此可以推出器件在室温 20 时的工作寿命  $\tau_{20}$  与 50 的寿命  $\tau_{50}$  的关系:

$$\tau_{20} = \tau_{50} \exp(3.68E_a) = 6.3\tau_{50} \tag{2}$$

从表 1 中的实验数据可知, 其平均工作电流的增加率为 10.3%, 若以电流增加一半即 50% 为寿命终止, 则可得到 50 的寿命可达 5306 小时, 外推室温寿命约为 3.3 万小时。

由图 3 中我们还可知道, 两只器件分别在 826h 和 995h 时突然损坏, 即没有光功率输出或光功率突然变得很小, 这是 980nm 器件中特有的光学灾变损伤(COD)现象, 主要是由于端面处的光功率密度比较高, 在高功率密度下, 端面的非辐射复合中心的光吸收导致发热, 而发热又使带隙收缩, 更加剧了光的吸收, 这样一来便形成了恶性循环, 使端面的温度在短时间内急剧增高, 使腔面发生烧毁或融化, 我们利用显微镜通过对其端面进行观察, 发现其发光条形区域变成黑点, 即高温烧毁所致, 如图 4 所示

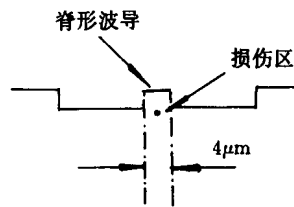


图 4 出现 COD 退化的脊形波导器件的端面显微观察照片

温度在短时间内急剧增高, 使腔面发生烧毁或融化, 我们利用显微镜通过对其端面进行观察, 发现其发光条形区域变成黑点, 即高温烧毁所致, 如图 4 所示

### 3.2 980nm 激光器的退化行为

由上面结果可知, 980nm 应变量子阱激光器的退化可分为三种行为, 即快速退化、慢退化和由端面烧毁引起的光学灾变损坏。在任意选取的十只器件中, 三只器件在开始的 100 小时内出现了工作电流的迅速增加(为保持恒定功率输出), 属于快速退化行为, 一般主要是由于存在有暗线缺陷(DLD's)所致<sup>[7,8]</sup>。DLD's 是由非辐射复合所驱动形成的位错网络, 起因于材料内的各种缺陷或激光器的某些损伤区, 当传播到有源区时, 器件即开始快速退化。我们在实验上用电子束诱导感生电流(EBIC)方法确实观察到了暗线缺陷穿过有源层的证据。

在图 3 所示的 7 只器件中, 有两只分别在稳定工作一段时间后突然失效。这种损坏并不

是暗点或暗线缺陷所致,而是由于端面处突然烧毁即发生了光学灾变损伤 在显微镜下可观察到端面发光区形成黑点,即高温烧毁所致 其它 5 只器件在 50 工作了 1093 小时后仍然可正常工作,但在发生慢退化,该慢退化的速率(这里平均值为 10.3%)是与材料质量相关的,通过高质量的材料生长和仔细的器件工艺,可使慢退化速率进一步降低

### 3.3 COD 的产生机理分析

激光器端面的退化是 980nm 应变量子阱激光器十分突出的问题,下面我们来简单分析一下其形成的原因 当在端面发生光的吸收时,便会产生电子空穴对,并在端面产生非辐射复合,从而使端面的温度提高 温度升高又使带隙收缩,从而使光吸收又进一步增大,温度升高,当温度最终达到材料的熔点时,就产生了端面处的突然烧毁即发生光学灾变损伤 另一方面由于端面处悬键的存在使端面的氧化会加剧,这也将引起缺陷的产生与传播 当激光器端面未镀膜时,这些循环的触发均是由于端面表面态的存在导致的非辐射复合使腔面的温度提高,吸收系数增大而形成的 当端面镀膜后,虽然会使产生 COD 的功率比不镀膜的水平要高一些,但由于膜层与激光材料间界面态的存在也会产生非辐射复合,因而同样也会出现 COD. 虽使激光器端面的氧化受到抑制,但在高功率密度下,界面处很高能量的释放会加速界面处缺陷的扩散

总之,端面或界面处的非辐射复合引起的端面发热是退化的重要原因,Brugger 等人也在实验上观察到了在老化过程中端面温度逐渐升高的现象<sup>[9]</sup>. Moser 等人研究发现随着时间的增加其 COD 水平逐渐降低<sup>[10]</sup>. 并推导出如下经验公式:

$$1/t_{COD} = \nu \exp(-E_a/kcP_D) \tag{3}$$

其中  $t_{COD}$  是产生 COD 的时间;  $\nu$  为频率因子;  $E_a$  为激活能;  $k$  和  $c$  分别为波尔兹曼常数和温度比例因子;  $P_D$  为光功率密度(即每微米的出光功率). 可以看出,光功率密度越高,温度越高,则会使产生 COD 的时间越短

对于 980nm 应变量子阱激光器,由于在其端面处应变的一部分弛豫(由内部的双轴压应变而变为单轴压应变),使带隙减小,光吸收系数增大,其变化量大约有 40meV,见图 5 所示 这 40meV 的变化在匹配材料的激光器中相当于温度升高了 80K,这将导致端面处的光吸收系数增大一个量级 这样在应变的激光器中,就很容易通过光生载流子的非辐射复合过程而使端面温度升高

据 Fukuda 等人的研究分析进一步表明<sup>[11]</sup>, 980nm InGaAs s/GaAs s 应变量子阱激光器在高功率下的退化表现为几个特点,即由于 In 的晶格硬化作用使得激光器在内部很少观察到暗线缺陷的产生与传播,但在端面处则往往首先出现暗线缺陷并逐渐扩大,该缺陷的退化速率决定着激光器的退化率 同时该缺陷的不断扩大和传播导致温度的提高,并最终导致了 COD 的产生 因此抑制端面处缺陷的产生与传播是提高 980nm 应变量子阱激光器

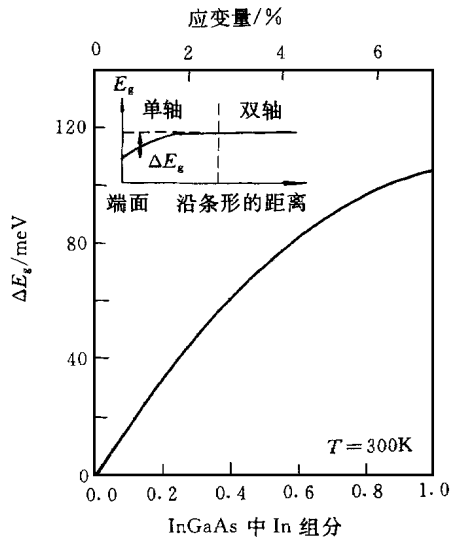


图 5 端面应变的部分弛豫(由内部的双轴压应变而变为端面处的单轴压应变)引起的带隙收缩量随 In 组分的关系

可靠性的关键

### 3.4 抑制 COD 的工艺改进方法

从上面的分析可知,端面退化是高功率下很重要的问题,是限制 980nm 激光器长期使用的难题。为防止端面退化,最重要的就是设法使端面处的温度不升高或升高很小。这一方面需要抑制端面处由于应变弛豫导致的带隙收缩,减少光的吸收;另一方面应设法减少端面处表面或界面态形成的非辐射复合中心的密度,减小热的产生。国外一些公司采用了多种技术方案进行了研究,如:(1)端面处利用二次外延生长无吸收窗口技术(NAM)<sup>[12]</sup>;(2)端面处采用杂质诱导无序方法(ILD)提高带隙以减小光吸收和发热技术<sup>[13]</sup>;(3)采用一些特殊材料进行端面钝化处理技术<sup>[14]</sup>;(4)真空解理镀膜技术,采用 Si, ZnSe 和 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等作为腔面的钝化膜<sup>[15,16]</sup>,但均需在真空下解理镀膜方可达到理想效果。真空解理在技术上十分复杂,且目前该专利技术价格非常高。外延生长窗口技术,需要十分复杂的多次外延技术。杂质诱导无序技术需要离子注入和长时间退火等,不易控制或易造成对激光器的复杂影响。我们根据 980nm 应变激光器中 COD 产生的特点及我们目前的实验条件,采用一种新的无杂质空位诱导无序技术来实现端面处的带隙改变,使  $E_g$  增大,抵消由于应力释放和表面界面态的存在导致的带隙减小,使端面处的光吸收系数得到降低,目前已取得初步成果,我们将另作报道。

## 4 结论

通过对我们所制备的窄条形脊形波导结构器件的高温老化寿命实验表明,980nm In-GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器件存在有三种退化行为,即快速退化,慢退化和端面光学灾变损伤。分析了三种退化的原因,并详细讨论了光学灾变损伤的退化机理及其抑制方法。通过进一步提高材料外延质量和器件工艺水平,并通过对接激光器端面的适当处理技术,预计可使 980nm 应变量子阱激光器的可靠性得到更大程度上的提高。

## 参 考 文 献

- [1] B. Pedersen, B. A. Thompson, S. Zemon *et al.*, IEEE Photon Technol Lett, 1992, 4: 46
- [2] E. Desurvire, IEEE Photon Technol Lett, 1990, 2: 208
- [3] K. J. Beernink, P. K. York, J. J. Coleman *et al.*, Appl Phys Lett, 1989, 55: 2167
- [4] R. G. Waters, D. P. Bour, S. L. Yellen *et al.*, IEEE Photon Technol Lett, 1990, 2: 531
- [5] M. O. Kayasu and M. Fukuda, J. Appl Phys, 1992, 72: 2119
- [6] A. Moser, A. Oosenbrug, E-E. Latta *et al.*, Appl Phys Lett, 1991, 59: 2642
- [7] H. C. Casey, Jr. and M. B. Panish, Heterostructure Lasers Part B, Academic, Orlando, 1978
- [8] R. G. Waters and R. K. Bertaska, Appl Phys Lett, 1988, 52: 1347
- [9] H. Brugger and P. W. Epperlein, Appl Phys Lett, 1990, 56: 1049
- [10] A. Moser, Appl Phys Lett, 1991, 59: 522
- [11] M. Fukuda, M. Okayasu, J. Tenmyo *et al.*, IEEE J. Quantum Electron, 1994, 30: 471
- [12] H. Naito, H. Nakanishi, H. Nagai *et al.*, J. Appl Phys, 1990, 68: 4420
- [13] W. X. Zou, J. L. Merz, R. L. Fu *et al.*, IEEE Photonics Technol Lett, 1991, 3: 400
- [14] S. Kamiyawa, Y. Mori, Y. Takahashi *et al.*, Appl Phys Lett, 1991, 58: 2595

- [15] N. Chand, W. S. Hobsou, J. F. de Jong *et al* , Electron Lett , 1996, **30**: 1595  
[16] N. K. Dutta, W. S. Hobson, G. J. Zydzik *et al* , Electron Lett , 1997, **33**: 213

## Reliability of InGaAs/AlGaAs Strained Quantum Well Lasers

Yang Guowen, Xu Junying, Xu Zuntu, Zhang Jingming, Chen Lianghai

(*Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083*)

Received 3 December 1997, revised manuscript received 11 March 1998

**Abstract** Narrow stripe ridge-waveguide structure InGaAs/AlGaAs strained quantum well lasers are fabricated by using the epilayer grown by molecular beam epitaxy. Through the accelerated aging test at high temperature of 50 °C, the reliability of the laser devices is studied. Three typical degradation mechanisms, rapid, slow and catastrophic optical damage, are observed and analyzed.

**PACC:** 4255P, 6170L, 7865