

长波长大应变 InGaAs/InGaAsP 分布反馈激光器的材料生长与器件制备*

潘教青[†] 赵 谦 朱洪亮 赵玲娟 丁 颖 王宝军 周 帆 王鲁峰 王 圩

(中国科学院半导体研究所 光电子研究发展中心 北京 100083)

(2005 年 9 月 12 日收到 2005 年 10 月 31 日收到修改稿)

采用低压金属有机化合物气相沉积法(LP-MOCVD)生长并制作了 1.6—1.7 μm 大应变 InGaAs/InGaAsP 分布反馈激光器. 采用应变缓冲层技术, 得到质量良好的大应变 InGaAs/InP 体材料. 器件采用了 4 个大应变的量子阱, 加入了载流子阻挡层改善器件的温度特性. 1.66 μm 和 1.74 μm 未镀膜的 3 μm 脊型波导器件阈值电流低(小于 15mA), 输出功率高(100mA 时大于 14mW). 从 10—40 $^{\circ}\text{C}$, 1.74 μm 激光器的特征温度 $T_0 = 57\text{K}$ 和 1.55 μm InGaAsP 分布反馈激光器的特征温度相当.

关键词: MOCVD, InGaAs/InGaAsP, 应变量子阱, 分布反馈激光器

PACC: 4255P, 7280E

1. 引 言

气体分子光吸收谱就像人类的指纹, 它是气体种类识别和气体分子浓度测定的有效手段^[1], 例如 1.3 μm 用于探测水汽^[1,2], 1.66 μm 用于探测甲烷, 1.74 μm 探测氯化氢^[3], 2.0 μm 探测水汽、溴化氢、二氧化碳和 NO_x . 光谱气体传感是利用波长范围在 1—20 μm 的不同气体的分子振动/转动吸收特征谱来检测气体种类和浓度的方法. 激光光源早期一般采用固定频率的气体激光器或可调谐铅盐激光器, 采用和气体吸收谱线刚好重合的激光波长, 但是重合的位置不一定是气体吸收最强的谱线. 有关可调谐铅盐激光器用于微量气体传感的研究开展的较早, 可获得良好的气体选择性和很高的检测灵敏度. 然而这种激光器价格昂贵, 发射谱线多模, 输出功率相对较低, 结构笨重, 而且需要工作于低温环境. 这些因素严重制约了其在气体传感中的广泛应用.

另一方面, 光纤通信的迅猛发展使相对低价、工作于常温、波长可调谐的高质量近红外发光二极管(例如 0.8, 1.3, 1.55 μm 的激光二极管)获得广泛的应用. 特别是 InGaAsP/InP 材料体系的器件, 无论在

器件的制作工艺上还是器件的可靠性方面都有较成熟的研究和实用成果. 研究发现, 这些近红外发光二极管的发射波长与很多环境及工业气体的复合吸收谱线相一致. 鉴于此, 可以用近红外发光二极管作为气体传感系统的光源, 而且近红外半导体激光二极管可以做到单模输出, 功率也可达数毫瓦, 室温工作, 并且可以借助于随光纤通信发展而已较成熟的光纤光学技术及廉价的辅助设备, 如低噪声的电流驱动器、聚光镜、探测器及光学隔离器等. 随着光通讯的发展而不断成熟的近红外激光二极管技术用于气体传感, 将在工农业生产、有毒气体监测、医药分析、健康、安全等诸多领域具有非常广泛的应用前景.

气体的吸收谱线线宽一般在几百至几千兆赫兹. 红外灯和发光二极管的线宽远大于气体分子的吸收线宽, 应用于气体传感难度很大. 半导体分布反馈激光器由于在有源区制备有光栅, 能够输出稳定的单模激光, 线宽在百兆赫兹以下, 很适合气体传感应用. 通过调节激光器的工作电流和温度可以调谐激光器的波长, 使它精确地稳定在气体的吸收谱线上. 近年来气体传感的研究工作取得了很多进展^[4-7]. 相关应用也有很多商用产品问世. 激光器的工作温度的稳定是通过半导体制冷器实现的, 在移

* 国家自然科学基金(批准号 60176023)资助的课题.

[†] E-mail: jqpan@red.semi.ac.cn

动式气体探测器中要求激光器和制冷器的功耗尽量小,这样可以缩小电源的体积和重量,或者在电源的体积和重量不变的情况下,延长探测器的工作时间.因此制备低阈值电流密度和高效率的分布反馈激光器很有意义.

然而随着波长的增加,要求 InGaAs/InGaAsP 量子阱中阱的带隙不断减小、In 组分不断增加,应变也在不断地增加.对于带隙较小的材料,低生长温度是有利的,因此很多 $1.7\text{--}2.0\mu\text{m}$ InGaAs/InGaAsP 激光器是用 MOCVD 或 MBE 生长的^[8-10].而使用 MOCVD 制备 $1.7\mu\text{m}$ InGaAs/InGaAsP 激光器报道较少^[12].

本文主要针对甲烷、氯化氢等气体探测的需要使用 MOCVD 制备了波长为 $1.66, 1.74\mu\text{m}$ 的分布反馈激光器,下面从材料生长、器件制备、性能测试分别进行描述.

2. 大应变 InGaAs 材料的 MOCVD 生长

对于 InGaAsP/InP 材料体系来说,与 InP 晶格匹配的材料其发光波长为 $1.1\text{--}1.65\mu\text{m}$,加入应变超晶格结构,该材料体系的发射波长可达 $2.0\mu\text{m}$;在发光器件中引入适当的应力,有望进一步降低阈值电流密度,通过一定的外延层设计,减少非辐射复合,从而提高长波段的发光效率.但应变超晶格结构的生长具有一定的难度.有时含有应变超晶格的激光二极管易于退化.这增加了制作 $1.6\text{--}2.0\mu\text{m}$ DFB 半导体激光器的难度.大应变的 InGaAs 在生长时容易发生晶格弛豫,产生钢凝析的现象,形成富钢的“小岛”.钢凝析主要和以下两点有关,一是生长条件,二是生长表面的质量.生长条件已经研究的比较充分了,例如低生长温度,高生长速度,高 V/III 经常应用在大应变材料生长中.应力层可以消除线缺陷^[11],因此在生长大应变材料之前生长一应力较小、厚度远小于临界厚度的应力缓冲层来消除大部分的线缺陷,在这个基础上生长大应变的材料比较有利.

材料生长用的设备是 AIXTRON 200 型低压金属有机化合物气相沉积设备(LP-MOCVD),卧式反应炉,载有衬底片的托盘旋转速度为 60r/min ,生长温度是 655°C ,生长压力为 $2.2 \times 10^3\text{ Pa}$. III 族源分别是:三甲基镓(TMGa),三甲基镓(TEGa),三甲基铟(TMIn). V 族源分别是:砷烷(AsH_3),磷烷(PH_3).

n 型掺杂源和 p 型掺杂源分别是:硅烷(SiH_4),二甲基锌(DEZn).生长 InGaAs 时 V/III 为 70,生长 InGaAsP 时 V/III 为 250.

首先采用应变缓冲层技术生长大应变的 InGaAs 体材料.如图 1 所示,在 InP 缓冲层上生长一个 6nm 的应变量为 0.9% 的 $\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.34}\text{As}$ 应变缓冲层,然后是 40nm 的 InP 层, 40nm 的大应变 $\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{As}$ 层,最后是 10nm 的 InP 盖层.该结构生长完成以后用双晶 X 射线衍射仪进行测试,得到的结果如图 2 所示.图中显示 InGaAs 体材料的应变为 1.9% ,衍射峰清楚,而且出现了规则的 Pendellosung 调制条纹.说明 InGaAs 体材料没有晶格弛豫,是共格生长的.没有采用应变缓冲层技术生长的大应变的 InGaAs 体材料没有规则的 Pendellosung 调制条纹,而且大应变 InGaAs 衍射峰的半峰宽明显变宽(在图 2 中没有显示).这说明 6nm 的应变量为 0.9% 的 $\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.34}\text{As}$ 应变缓冲层能够改善 InP 表面的质量,在这个表面上生长大应变材料是可行的.

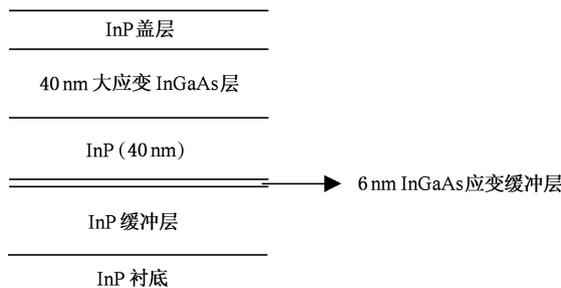


图 1 应用应变缓冲层生长大应变材料时的结构示意图

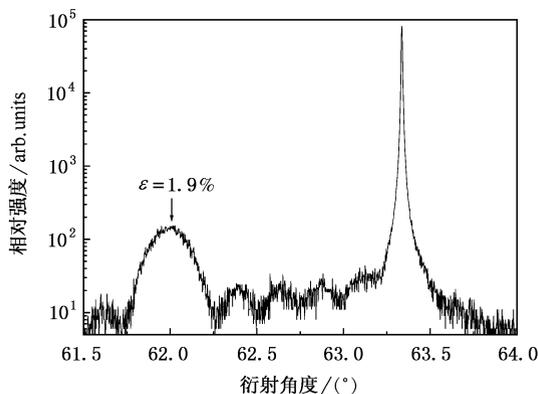


图 2 应变量为 1.9% 样品的 X 射线摇摆曲线

3. 器件结构与制备

较小阱宽的量子阱微分效率高,阈值电流低,大

的压应变能够降低俄歇复合、带间吸收,提高输出功率.和 InP 衬底晶格匹配的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 的发光波长在 $1.65\mu\text{m}$,为了提高 $1.66\mu\text{m}$ 激光器的性能,我们采用了应变量为 1.2% 的 $\text{In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}$ 作为阱材料,阱宽为 6nm,垒的宽度为 12nm.发光波长为 $1.74\mu\text{m}$ 的激光器采用了应变量为 1.6% 的 $\text{In}_{0.76}\text{Ga}_{0.24}\text{As}$,阱宽为 6.5nm,垒的宽度为 12nm.器件结构如图 3 所示.首先在 n 型 InP 衬底上生长 $1\mu\text{m}$ 的 Si 掺杂的 InP 缓冲层,然后是夹在上下分别限制层(SCH)中的 4 对量子阱,在下限制层中有 6nm 的应变量为 0.9% 的 $\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.34}\text{As}$ 应变缓冲层.该缓冲层和量子阱之间的距离为 40nm,起到的作用和图 1 中的类似.通常激光器的载流子和光子是被分别限制异质结(Separate Confinement Heterostructure SCH)分别限制的,光限制层带隙较小,对光场的限制较好,但是对载流子的限制较弱.这样载流子容易从量子阱中泄露出来,这是特征温度低的一个主要原因.通常 SCH 包含两个能带台阶,InP 包层和波导层(如 1.1Q,1.2Q)之间的台阶形成光波导,波导层和有源层之间的台阶形成对载流子的限制.但是这个台阶对载流子的限制比较弱,为了减少载流子从量子阱中的泄露,一种有效的办法是加入一个带隙较大的载流子阻挡层(Carrier Blocking Layer),能够提高器件的特征温度^[12,13].图 3 的器件结构中也有载流子阻挡层,起到增强限制载流子的作用.根据不同波长的要求应用激光全息的方法制备周期不同的光栅图形,先干法刻蚀后湿法腐蚀得到光栅结构,然后二次外延生长 InP 层和 p 型的 InGaAs 接触层.制备条宽为 $3\mu\text{m}$ 的脊波导结构激光器,制备 p 型电极 TiPrAu,背减薄后制备 n 型电极 AuGeNi.未镀膜的激光器 p 面向上放在铜热沉上进行测试.

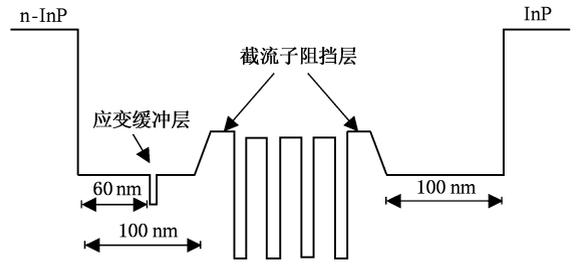


图 3 激光器的能带结构示意图

4. 器件测试与分析

图 4 是波长为 $1.669\mu\text{m}$ 的激光器的波谱和光功率-电流曲线,该激光器的波长对应甲烷吸收谱线.边模抑制比(SMSR)为 36dB,阈值电流为 15mA(室温 25°C),最大输出功率大于 14mW(100mA),且没有饱和迹象.图 5 是波长为 $1.74\mu\text{m}$ 的激光器的波谱和光功率-电流曲线,该激光器的波长对应 HCl 气体吸收谱线.边模抑制比(SMSR)为 33.5dB;阈值电流为 11mA(20°C),最大输出功率大于 14mW(100mA),且没有饱和迹象.

激光器的特征温度高,则激光器的温度稳定性好.如前所述,激光器在气体探测应用中采用固定工作电流,通过调节工作温度使激射波长精确地稳定在气体的吸收谱线上.对于长波长激光器俄歇复合速率随温度及带隙 E_g 的变化是指数关系,因此对于本文中的 InGaAs 这种窄带隙材料,俄歇复合速率显著提高,这是造成长波长激光器特征温度低的另一个主要原因.如第 3 部分所述,我们采用了大压应变的量子阱,加入载流子阻挡层,并测试了 $1.74\mu\text{m}$ 激光器的温度特性,即通过激光器管芯一侧的半导体制冷器和热敏电阻分别设定激光器的工作温度分

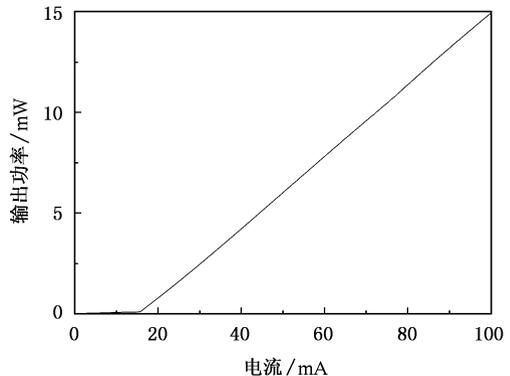
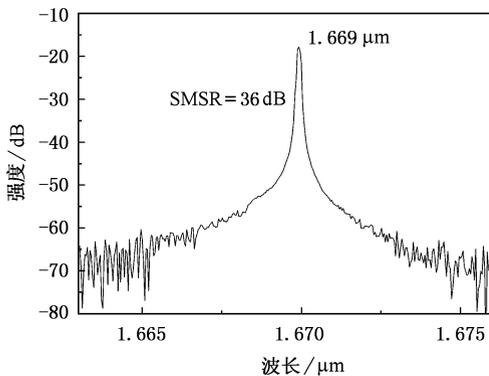
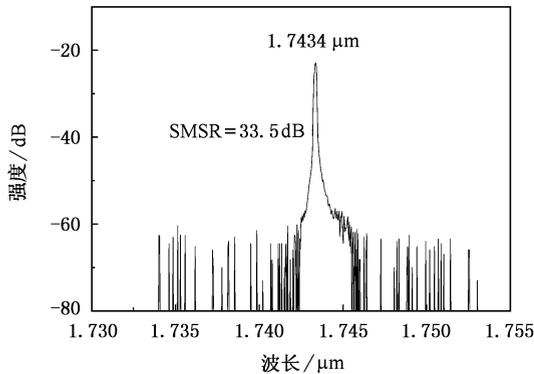


图 4 $1.66\mu\text{m}$ 波长的 DFB 激光器的波谱图和光功率-电流曲线

别为 10, 20, 30 和 40℃, 分别测试了激光器的光输出功率-电流曲线. 图 5 显示了随温度的升高, 光输出功率不断下降. 其中插入图给出了阈值电流随温度的变化关系, 由 $I_{th} = I_0 \exp(T/T_0)$ 得到该激光器



的特征温度 $T_0 = 57\text{K}$ 和我们实验室制备的 $1.55\mu\text{m}$ InGaAsP 分布反馈激光器的特征温度相当. 说明该激光器的结构设计改善了长波长 InGaAs 激光器的温度特性.

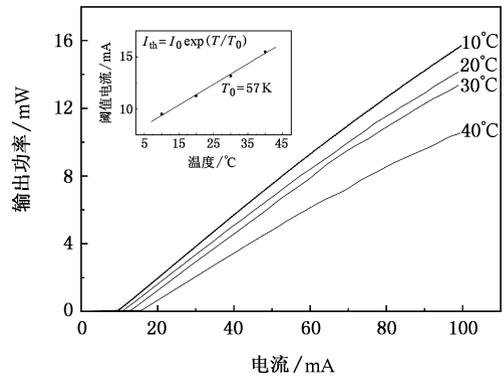


图 5 1.74 μm 波长的 DFB 激光器的波谱图和光功率-电流曲线

5. 结 论

MOCVD 生长并制备了 1.6—1.7 μm 大应变 InGaAs/InGaAsP 分布反馈激光器, 采用应变缓冲层技术可以明显改变晶体生长质量. 制备了 3 μm 脊型波

导结构半导体激光器, 阈值电流低(小于 15mA), 效率高(100mA 时大于 14mW, 且没有饱和迹象), 满足气体探测的需求. 通过一定的器件结构设计, 1.74 μm 分布反馈激光器的特征温度为 57K, 和 1.55 μm 通讯用 InGaAsP/InP 激光器的相当.

- [1] Proceedings of the 4th summer school on quantum electronics, " Laser and Their Application ", Sept 29 to Oct 4 1986 Sunny Beach, Bulgaria.
- [2] Cassidy D T 1988 *Appl. Opt.* **27** 610
- [3] Ubukata A, Dong J, Masusaki H, Satoh T, Matsumoto K 1998 *Jpn. J. Appl. Phys.* **37** 2521
- [4] Edwards C S, Barwood G P, Gill P, Schirmer B, Venzke H, Melting A 1999 *Appl. Opt.* **38** 4699
- [5] Teichert H, Fernholz T, Ebert V 2003 *Appl. Opt.* **42** 2043
- [6] Gurlit W, Zimmermann R, Giesemann C, Fernholz T, Ebert V, Wolfrum J, Platt U, Burrows P 2005 *Appl. Opt.* **44** 91
- [7] Kan R F, Liu W Q, Zhang Y J, Liu J G, Dong F Z, Gao S H, Wang M, Chen J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1927 (in Chinese) [阚瑞峰、刘文清、张玉钧、刘建国、董凤忠、高山虎、王 敏、陈军 2005 物理学报 **54** 1927]
- [8] Bai J S, Fang Z J, Zhang Y M, Chen G T, Li A Z, Chen J X 2001 *Chinese Journal of Semiconductors* **22** 126
- [9] Mitsuhashi M, Ogasawara M, Oishi M, Sugiura H, Kasaya K 1999 *IEEE Photon Technol. Lett.* **11** 33
- [10] Kuang G K, Böhm G, Grau M, Rösel G, Amann M C 2000 *Electron Lett.* **36** 634
- [11] Schlenker D, Miyamoto T, Chen Z, Koyama F, Iga K 2000 *J. Cryst. Growth* **209** 27
- [12] Ubukata A, Dong J, Matsumoto K 1999 *Jpn. J. Appl. Phys.* **38** 1243
- [13] Hausser S, Meier H P, Germann R, Harder C S 1993 *IEEE J. Quantum Electron* **29** 1596

Material growth and device fabrication of highly strained InGaAs/InGaAsP long wavelength distributed feedback lasers

Pan Jiao-Qing[†] Zhao Qian Zhu Hong-Liang Zhao Ling-Juan Ding Ying

Wang Bao-Jun Zhou Fan Wang Lu-Feng Wang Wei

(*Optoelectronic Research and Development Center, Institute of Semiconductor, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

(Received 12 September 2005; revised manuscript received 31 October 2005)

Abstract

1.6—1.7 μm highly strained InGaAs/InGaAsP distributed feedback lasers was grown and fabricated by low pressure metalorganic chemical vapor deposition. High quality highly strained InGaAs/InP materials were obtained by using strain buffer layer. Four pairs of highly strained quantum wells were used in the devices and carrier blocking layer was used to improve the temperature characteristics of the devices. The uncoated 1.66 μm and 1.74 μm lasers with ridge wave guide 3 μm wide have low threshold current ($< 15\text{mA}$) and high output power ($> 14\text{mW}$ at 100mA). In the temperature range from 10 $^{\circ}\text{C}$ to 40 $^{\circ}\text{C}$, the characteristic temperature T_0 of the 1.74 μm laser is 57K, which is comparable to that of the 1.55 μm -wavelength InGaAsP/InP-DFB laser.

Keywords : MOCVD, InGaAs/InGaAsP, strained quantum well, distributed feedback laser

PACC : 4255P, 7280E

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60176023)

[†] E-mail : jqpan@red.semi.ac.cn