

## 应变补偿 InGaAs/InAlAs 量子级联激光器\*

刘峰奇 张永照 张权生 王占国

(中国科学院半导体研究所半导体材料科学实验室, 北京 100083)

**摘要:** 利用应变补偿的方法研制出激励波长  $\lambda \approx 3.5-3.7 \mu\text{m}$  的量子级联激光器. 条宽  $20 \mu\text{m}$ , 腔长  $1.6 \text{mm}$  的  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$  量子级联激光器已实现室温准连续激励. 在最大输出功率处的准连续激励可持续 30min 以上.

**关键词:** 量子级联激光器; 分子束外延

**PACC:** 4255; 7865; 7361 **EEACC:** 4320J; 2520D

**中图分类号:** TN 248.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2000)10-1038-03

## Strain-Compensated InGaAs/InAlAs Quantum Cascade Laser\*

LIU Feng-qi, ZHANG Yong-zhao, ZHANG Quan-sheng and WANG Zhan-guo

(Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors,  
The Chinese Academy of Science, Beijing 100083, China)

Received 3 July 2000

**Abstract:** Growth of quantum cascade lasers based on strain-compensated  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$  and operating at a wavelength  $\lambda \approx 3.5-3.7$  micron is reported. Quasi-continuous wave operation at room-temperature (RT) has been achieved. For a  $1.6 \text{mm}$  cavity length and  $20$  micron ridge-waveguide width, quasi-continuous wave lasing operation at RT persists more than  $30$  min.

**Key words:** quantum cascade laser; molecular beam epitaxy

**PACC:** 4255; 7865; 7360 **EEACC:** 4320J; 2520D

**Article ID:** 0253-4177(2000)10-1038-03

量子级联激光器是一种基于子带间电子跃迁的中红外波段单极光源. 激励是利用纳米级厚度半导体异质结薄层内由量子限制效应引起的分离电子态, 在这些激发态之间产生粒子数反转而产生的. 它的有源区由多级串接组成, 实现电子注入的倍增光子输出. 每一级由注入区、耦合阱激光跃迁区和弛豫区三部分

\* 国家自然科学基金(批准号: 69786002)和国家高技术新材料领域资助项目(批准号: 715-001-0111)[Project Supported by National Natural Science Foundation of China Under Grant No. 69786002 and by National Advanced Materials Committee of China Under Grant No. 715-001-0111].

刘峰奇 1963 年出生, 博士, 副研究员, 主要从事半导体材料及物理研究.  
2000-07-03 收到

构成,而每一级的弛豫区又是下一级的注入区.图 1 是正向偏压下一个周期的导带示意图,注入/弛豫区的梯度带隙超晶格设计成  $n=2$  态电子波的 Bragg 反射器而具有抑制电子从耦合阱的  $n=2$  激发态的逃逸和促使电子从耦合阱的低能态( $n=0$ )隧穿抽运的双重作用,也就是说梯度带隙超晶格既是  $n=2$  态电子波的增反膜,又具有对  $n=0$  态电子波的增透作用;同时两个低能态之间产生光学声子共振发射( $n=0$  和  $n=1$  间距等于光学声子能量)以便降低  $n=1$  态寿命,从而实现  $n=2$  态和  $n=1$  态之间的粒子数反转.

量子级联激光器的特点是工作波长与所用材料的带隙无直接关系,仅由耦合量子阱子带间距决定,从而可实现对波长的剪裁.它在军用(如中远红外夜视、中远红外光学雷达、红外通信等)和民用方面(如大气污染监测、工业烟尘分析、化学过程监测等)具有很强的应用背景.美国、瑞士、法国、英国、奥地利等发达国家对该类激光器的研制予以极大关注.要使级联激光器工作在军事敏感的  $3\text{--}5\mu\text{m}$  的第一个大气窗口,必须由 InP 基 InGaAs/InAlAs 量子级联激光器实现.然而,量子级联激光器对光子能量的剪裁也是有一定限度的.在高端端,主要是受两种半导体材料的导带不连续量决定.因此要使该类激光器的工作波长在  $4.3\mu\text{m}$  以下,必须采用应变补偿的方法来提高 InGaAs/InAlAs 材料体系的导带不连续.这种方法是具有较大晶格常数的赝晶薄层(即  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  中  $x > 53\%$ )所引入的压应变被等量的具有较小晶格常数薄层(即  $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$  中  $y < 52\%$ )所引入的张应变所补偿.

只要每层的厚度小于临界厚度,生长这种应变补偿的多层叠层是可行的.由于量子级联激光器有源区仅由非常薄的大致等量的阱垒材料组成,因此,应变补偿方法特别适用于量子级联激光器的设计,这为量子级联激光器的设计提供了更大的灵活性.由于材料制备困难,目前国际上仅有 AT&T Bell 实验室实现了  $4\mu\text{m}$  以下的级联激光器激射.

实验样品均是在 Riber 32p MBE 设备上制备的.通过优化生长条件(衬底温度、 $V/III$ 束流比、生长速率、掺杂浓度等),制备出 InGaAs/InAlAs 优质量子级联激光材料.材料生长过程中,利用反射高能电子衍射图形可以对生长层面的平整度进行原位观察.量子级联激光器结构生长在掺 Si 的 InP(001)衬底上.具体生长层次如图 2 所示.由于上限制层的厚度在  $2\mu\text{m}$  以上,波导芯部的晶格质量信息难以突出.为了抽取有源区晶格质量的信息,我们单独生长波导芯部为主的外延材料,图 3(a)为相应的双晶 X 射线结果.由图可以看到 26 级以上的卫星峰,表明样品的质量较高.根据所测卫星峰的角间距,可计算出多量子阱的周期.

N <sup>+</sup> 型	InGaAs 帽层
N型	InAlAs/InGaAs 梯度带隙超晶格
N型	InAlAs 限制层 $2\mu\text{m}$
N型	InGaAs/InAlAs 梯度带隙超晶格
N型	InGaAs $n=1 \times 10^{17}$ 300nm
25级有源区	(每级 18—22层 InGaAs/InAlAs)
N型	InGaAs $n=1 \times 10^{17}$ 300nm
N型	InAlAs/InGaAs 梯度带隙超晶格
N型	InP 衬底 $n=1\text{--}4 \times 10^{18}$

图 2 由分子束外延生长的 InGaAs/InAlAs 量子级联激光器结构简图.

FIG. 2 Schematic Cross-Section of Complete InGaAs/InAlAs Laser Structure Grown by MBE.

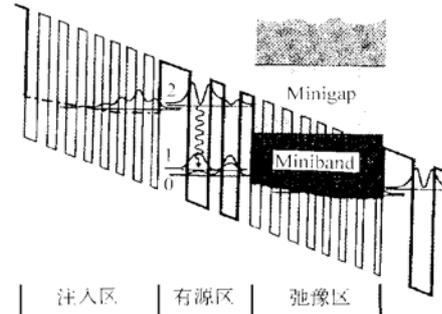


图 1 正向偏压下 InGaAs/InAlAs 量子级联激光器一个周期的导带示意图,弛豫/注入区为部分掺杂

FIG. 1 Schematic Conduction Band of One Stage Structure Under Positive Bias Condition

Injection/relaxation region is partially n-type doped.

结果表明多量子阱的实际周期与设计的周期相符.在保证波导芯部晶格质量的基础上,再生长应变补偿的量子级联激光器的全结构,对应的双晶 X 射线结果如图 3(b)所示.

采用光刻和化学腐蚀技术,激光器样管具有脊型波导条形结构(条宽为  $10\text{--}20\text{--}30\mu\text{m}$ ).用 CVD 方法沉积 SiNO 绝缘层后,在脊区的顶部开出窗口,再蒸发 NiAuGe/Au 作为欧姆电极.样片减薄至  $\sim 100\mu\text{m}$ ,再淀积 NiAuGe/Au 作为背面欧姆接触电极.器件被解理成  $1\text{--}1.6\text{mm}$  长,解理面为激光器的腔面,腔面不镀膜.考虑到级联激光器的阈值电流密度较高,采用了上电极引线的多重压焊和外延面朝

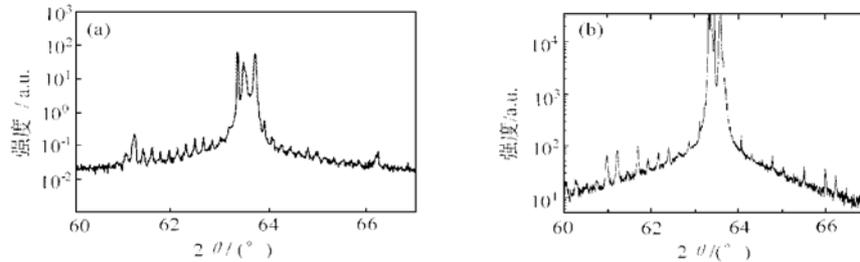


图 3 InGaAs/InAlAs 量子级联激光器波导芯部

(a) 及应变补偿量子级联激光器全结构 (b) 对应的双晶 X 射线结果.

FIG. 3 Double X-Ray Diffraction Spectra for a 25 period InGaAs/InAlAs Quantum Cascade Laser Waveguide Core (a) and a Complete Quantum Cascade Laser Structure Based on Strain-Compensated (b) for In<sub>0.55</sub>Ga<sub>0.45</sub>As/In<sub>0.5</sub>Al<sub>0.5</sub>As Grown on InP Substrate

下芯片焊接技术. 2000 年 1 月初, 实现了 77K 下波长为 5.1 $\mu$ m 量子级联激光器的脉冲激射. 2000 年 5 月 24 日, 实现应变补偿量子级联激光器 32 $^{\circ}$ C 准连续激射(占空比为 7.2 $\mu$ s/165 $\mu$ s), 波长 3.5—3.7 $\mu$ m, 部分指标已超过 Bell 实验室. 图 4 为应变补偿 In<sub>0.55</sub>Ga<sub>0.45</sub>As/In<sub>0.5</sub>Al<sub>0.5</sub>As 量子级联激光器室温准连续激射光谱 (a) 及对应电流-光功率曲线(b). 器件的条宽为 20 $\mu$ m, 腔长 1.6mm; 脉冲电流占空比为 7.2 $\mu$ s/165 $\mu$ s, 电流密度  $J = 6 \times 10^3$  A/cm<sup>2</sup>; 激射波长  $\lambda = 3.7\mu$ m. 材料的重复性和器件的成品率都比较好. 这里所测的光功率值只是相对的, 目前的光功率计在中红外波段很难定标, 我们正在作这方面的工作.

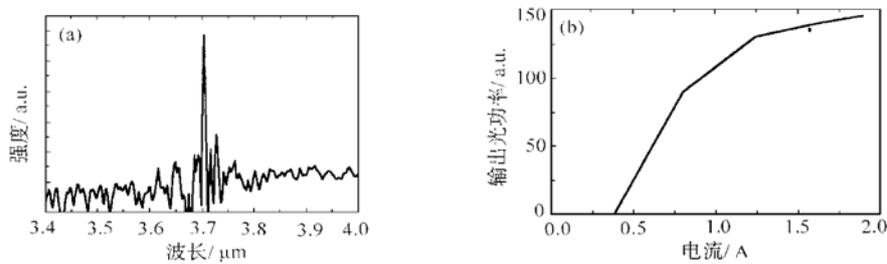


图 4 应变补偿 In<sub>0.55</sub>Ga<sub>0.45</sub>As/In<sub>0.5</sub>Al<sub>0.5</sub>As 量子级联激光器室温准连续激射光谱(a), 光功率-电流曲线(b), 光功率为相对值.

FIG. 3 Room Temperature Quasi-Continuous Wave Lasing Spectrum of Strain-Compensated In<sub>0.55</sub>Ga<sub>0.45</sub>As/In<sub>0.5</sub>Al<sub>0.5</sub>As Quantum Cascade Laser Grown on InP Substrate (a) and Corresponding Current-Optical Output Power (Relative Value) Curve (b). The device size is  $W = 20\mu$ m,  $L = 1.6$ mm, duty cycle is 7.2 $\mu$ s/165 $\mu$ s, current density  $J = 6$ kA/cm<sup>2</sup>, and the lasing wavelength  $\lambda = 3.7\mu$ m.

**致谢** 材料生长得到同组的徐波和丁鼎的协助; 在器件测试和研制过程中得到半导体超晶格国家重点实验室及集成光电子国家联合实验室的江德生、孙宝权、高俊华、白云霞、王红杰、罗丽萍等老师的帮助. 在此表示感谢!

## 参 考 文 献

- [1] Faist, J., Capasso, F., Sivco, D. L., Sirtori, C., Hutchinson, A. L. and Cho, A. Y., Science, 1994, **264**: 553—556.
- [2] Faist, J., Tredicucci, A., Capasso, F., Sirtori, C., Sivco, D. L., Baillargeon, J. N., Hutchinson, A. L. and Cho, A. Y., IEEE J. Quantum Electron, 1998, **34**(2): 336—342.
- [3] Faist, J., Capasso, F., Sivco, D. L., Hutchinson, A. L., Chu, S.-L. G and Cho, A. Y., Appl. Phys. Lett., 1998, **72**(6): 680—682.