

AlInGaAs/AlGaAs 垂直腔面发射激光器温度特性的 对比研究^{*}

陈 敏[†] 郭 霞 关宝璐 邓 军 董立闯 沈光地

(北京工业大学电子信息与控制工程学院和北京光电子技术实验室 北京 100022)

(2006 年 2 月 21 日收到 2006 年 4 月 3 日收到修改稿)

通过测量、对比材料生长和器件制备条件基本相似,但是谐振腔腔模波长与增益峰值波长相对位置明显不同的两类氧化物限制型应变 AlInGaAs/AlGaAs 量子阱垂直腔面发射激光器(VCSEL)在 261—369K 温度范围内输出光功率-电流的变温曲线,同时结合测试得到的两类样品的白光反射谱、光荧光谱以及模拟计算得到的不同温度下 VCSEL 反射谱和增益谱,分析了输出光功率、阈值电流、斜率效率和激射波长随温度变化的关系,掌握了新材料 AlInGaAs 的温度特性,得到了谐振腔腔模波长和增益峰值波长的相对位置对 VCSEL 输出特性,尤其是对阈值的影响规律,指出获得室温工作阈值最低且稳定的 VCSEL 的一个方法是调整谐振腔腔模波长和增益峰值波长的相对位置,并利用这种方法获得了特征温度 $T_0 = 333\text{K}$ 的 AlInGaAs/AlGaAs 量子阱 VCSEL 器件。

关键词: AlInGaAs, 垂直腔面发射激光器, 特征温度

PACC: 4255, 7820, 4260

1. 引 言

垂直腔面发射激光器(VCSEL)具有阈值电流低、动态单纵模工作、易于高密度集成、圆形出射光束、光纤耦合效率高等优点,是中短距离光通讯的理想光源,在光通讯、光互联、光计算等领域中具有广泛的应用前景,且应用的需求越来越要求 VCSEL 具有低的阈值和低的温度敏感性^[1-3]。

VCSEL 与边发射激光器相比,由于有源区长度很短(只有几个纳米),因此实现激射的一个必要条件是谐振腔的腔模波长、量子阱增益峰值波长与布拉格反射镜(DBR)反射谱中心波长相匹配^[4]。随着环境温度升高,或者由于工作时间长而引起结温升高,致使三者的位置都红移,而偏移的速率却不同步,这导致 VCSEL 器件输出特性,特别是阈值特性对温度变化很敏感。为使激光器在宽温度范围内有良好的光电特性,需要将激光器的阈值最小值对应的温度优化到 345K 左右^[5],因此,在 VCSEL 的设计中,对 VCSEL 器件温度特性的研究,以及三个波长

随温度变化而对阈值影响规律的研究,成为我们研制室温稳定工作、阈值最小,且阈值电流对温度敏感性小的 VCSEL 的一个重要问题。

GaAs/AlGaAs 材料系温度特性的研究已经很深入^[6],而新兴的 AlInGaAs/AlGaAs 氧化物限制型 VCSEL 温度特性的研究未见报道,为了较好地掌握这种材料的温度特性,同时深入理解谐振腔腔模波长和增益峰值波长^[7]的相对位置对 VCSEL 阈值的影响,本文对材料生长和器件制备条件基本相似,但是谐振腔腔模波长与增益峰值波长相对位置有明显不同的两只氧化物限制型应变 AlInGaAs/AlGaAs 量子阱垂直腔面发射激光器(VCSEL)进行了变温实验,通过对比两样品在 261—369K 温度范围内输出光功率-电流的变温曲线,同时结合测试得到的两个样品的白光反射谱、光荧光谱以及模拟计算得到的不同温度下 VCSEL 反射谱和增益谱,对测试结果进行了很好的分析,掌握了新材料 AlInGaAs 的温度特性,得到了温度对输出光功率、阈值电流、斜率效率和激射波长的影响规律,以及谐振腔腔模波长和增益峰值波长的相对位置对 VCSEL 输出特性,尤其是

^{*} 国家自然科学基金(批准号:60506012),北京市教委(批准号:KZ200510005003),北京市优秀人才资助项目(批准号:2005100501502),北京市科技新星计划(批准号:2005A11),北京市科委重点项目(批准号:04040003040221)资助的课题。

[†] E-mail: cmgypp@emails.bjtu.edu.cn

对阈值的影响规律,从而指出可以通过调整谐振腔腔模波长和增益峰值波长的相对位置来将 VCSEL 器件阈值最小值温度优化到 345K 温度附近,以保证器件在宽温度范围内有良好的光电特性,利用这种方法最终获得了特征温度 $T_0 = 333\text{K}$,宽温度范围内(309K—345K)阈值最小值近似不变的 AlInGaAs/AlGaAs 量子阱 VCSEL 器件。

2. 实验样品及装置

本实验所用的两片样品是采用低压金属有机化学气相淀积系统生长,生长条件和生长结构基本相同,并利用选择性腐蚀和选择湿氮氧化法相结合同时制备的内腔接触式氧化物限制型 AlInGaAs/AlGaAs 量子阱 VCSEL 器件,下文中简称为样品 A、B。样品器件结构如图 1 所示,沿生长方向依次为: GaAs 衬底;28 对 n 型 AlGaAs/AlGaAs 下 DBR;3 量子阱 AlInGaAs/AlGaAs 有源区以及两边的 AlGaAs 层构成 1 个光学波长的谐振腔;Al_{0.98}Ga_{0.02}As 氧化层;AlGaAs 欧姆接触层;24 对 p 型 AlGaAs/AlGaAs 上 DBR。器件的具体制备工艺和器件特性详见文献[8]。变温测试系统由控温精度 0.1℃ 的控温器、低温恒温器和激光器参数测试仪三部分组成。实验前,首先将 VCSEL 管芯装到低温恒温器中,温度恒定后,采用激光器参数仪器测量输出光功率、电压、激光波长和阈值电流等参数。为减小电流发热对器件性能的影响,采用窄脉冲电流注入(脉冲宽度 30μs,重复频率 100 Hz)。低温恒温器出光窗口对 VCSEL 管芯发出的光存在吸收作用,由 VCSEL 测试系统测得光功率较实际值衰减 15% 左右。

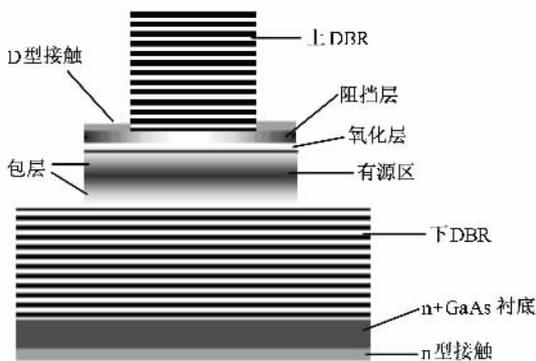


图 1 氧化限制 VCSEL 的截面图

3. 实验结果及分析

图 2(a)和(b)分别为样品 A、B 的白光反射谱和 PL 谱。从图可以看出样品 A、B 的反射谱中心波长都在 862nm 左右,而谐振腔腔模波长分别为 862nm 和 852.7nm。样品 A 的谐振腔腔模波长与 DBR 中心波长匹配较好。虽然样品 B 的 DBR 中心波长和谐振腔腔模波长没有严格对准,但由于高反带带宽为 78nm,腔模波长仍能位于反射谱的高反射率处,因此对器件能否激射影响不大,此时关键是看谐振腔腔模波长与增益峰值波长的匹配情况。实验发现,谐振腔腔模波长在增益峰值波长两侧的一定范围内时,只要满足阈值条件,VCSEL 器件仍能激射,此时也可以说谐振腔腔模波长和增益峰值波长相匹配,样品 A、B 即是这种情况。PL 谱是将样品的上 DBR 腐蚀掉后测出的,测量得出样品 A、B 的 PL 谱峰值波长分别为 832.9nm 和 837.4nm,且样品 A 谐振腔腔模波长与 PL 谱偏差为 29.1nm,比样品 B 腔模波长与 PL 谱偏差 15.3nm 大。考虑到光荧光和电荧光

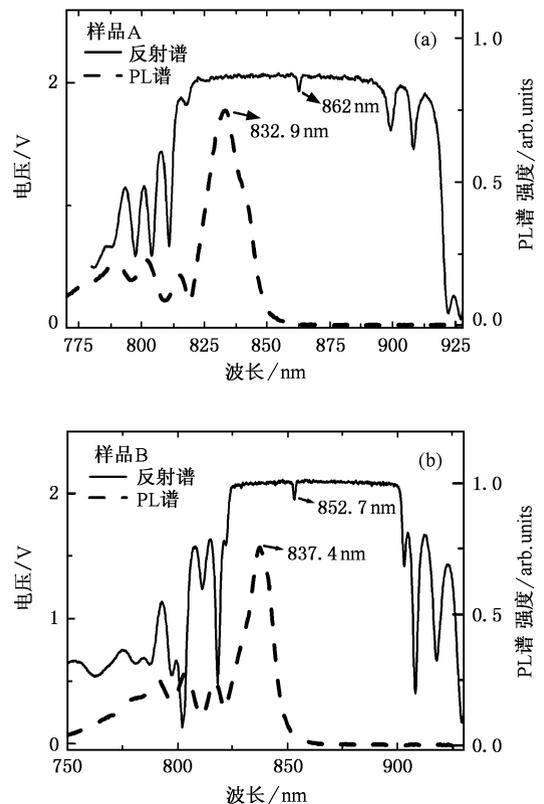


图 2 (a) 样品 A 反射谱和室温下光荧光谱 (b) 样品 B 反射谱和室温下光荧光谱

峰值波长存在一定偏差(一般为 5—10nm)^[9],可以估算得到量子阱增益峰值波长,可以看出两样品的增益峰值波长均位于谐振腔腔模波长的短波一侧,且样品 A 增益峰值波长与谐振腔腔模波长的偏离量较大.另外,测试得到的 PL 谱曲线除了最高峰以外,在对应于若干个反射谱中的凹陷处有明显的锐峰出现,这是由于下 DBR 层对发光谱的调制作用引起的^[10].

图 3 给出了氧化孔径为 14 μ m 的 VCSEL 样品 A 和 B 在 261—369K 温度变化范围内脉冲工作状态下的峰值光功率、斜率效率和温度的关系曲线.图中的点和三角分别表示峰值光功率和斜率效率随温度变化的实验数据.从图中可以看出在相同的注入水平下(10mA),随着温度的增加,样品 A、B 最大输出功率都单调减小,分别由 261K 时的 2.425mW 和 1.975mW 下降到 369K 时的 0.739mW 和 0.13mW.斜率效率也随着温度增加而逐渐减小,分别由 261K 时的 0.386mW/mA 和 0.273mW/mA 下降到 369 K 时的 0.087mW/mA 和 0.022mW/mA,而且在同一温度下,样品 A 的最大输出功率和斜率效率都大于样品 B 的最大输出功率和斜率效率.输出功率和斜率效率随温度升高而下降,可能是由于以下原因引起:一方面随着温度的升高,载流子分布变宽,材料带隙收缩,热载流子越过异质结势垒的概率和数目增加,量子阱内热电子发射增强,有源区对载流子限制能力下降,载流子泄露,量子效率减小,温度的上升同时影响了有源区材料的折射率^[11],降低有源区对光子的限制能力.另一方面随着温度升高,晶格散射增强,声子运动也更激烈,有源层非辐射复合和损耗增强.以上几种主要机理使得随着温度升高,内量子效率减小、内损耗增加、斜率效率下降,输出光功率降低.但两样品的量子效率、损耗等特性的差别,则使得在相同温度、相同工作条件下,两样品输出功率和斜率效率都不同.

由于腔长短,VCSEL 的纵模间距很大,一般可达一百多纳米,而增益谱宽一般仅有几十纳米,这样在增益谱范围内只有一个模式激射,也就是单纵模激射,只要谐振腔腔模波长位于增益谱上相对于增益峰值波长的某个位置处时达到阈值条件,VCSEL 器件激射,而下文中的模拟计算可以知道增益峰值随着温度升高而红移的速率远大于谐振腔腔模波长的红移速率,所以可以认为激射波长随温度变化而红移主要由谐振腔腔模波长随温度变化而红移决定,

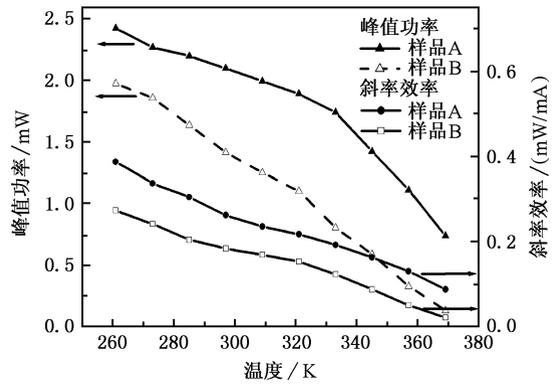


图 3 样品 A、B 峰值光功率和斜率效率与温度的关系

而且激射波长应在腔模位置附近.

随着温度升高,构成器件各层材料折射率和器件尺寸的改变,反射谱中出现的极小值点同 VCSEL 谐振条件相同,因此可从 VCSEL 的反射谱中得到谐振腔腔模波长值^[12].通过模拟不同温度下 VCSEL 反射谱,得到谐振腔腔模波长的红移速度.对于构成器件各层材料折射率随温度的变化效应,我们采用 GaAs $\Delta n = 3 \times 10^{-4} \Delta T$ 的经验公式做近似.对于构成器件各层材料的热膨胀系数我们采用了文献^[13]给出的值 $\Delta l = 5.5 \times 10^{-6} \Delta T$.进一步考虑到材料折射率的色散和吸收效应后,用传输矩阵方法模拟得到不同温度下 VCSEL 的反射谱.如图 4 所示,模拟计算得到温度从 261K 变化到 369K 时,谐振腔腔模波长红移速度为 0.0654nm/K.

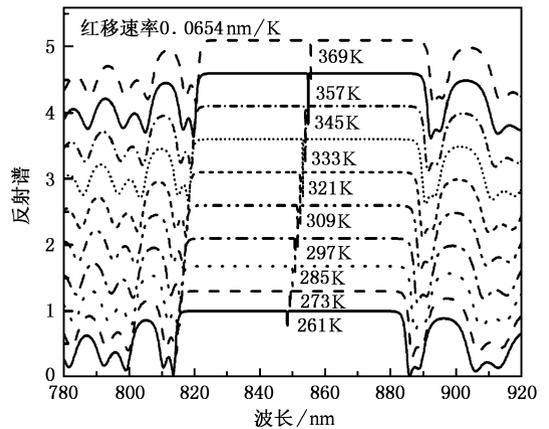


图 4 VCSEL 反射谱与温度的关系

图 5 是实际测量得到的样品 A、B 激射波长(谐振腔腔模波长)随温度变化关系,所有数据点均为 10mA 直流电流下测得的.从图中可以看出,随着温度的增加,激光器激射波长向长波方向移动.对实

验数据进行线性拟合得到样品 A、B 的激光波长红移的速率分别近似为 0.0666nm/K 和 0.0697nm/K 。这与我们理论计算得出的谐振腔模波长红移速率非常接近。

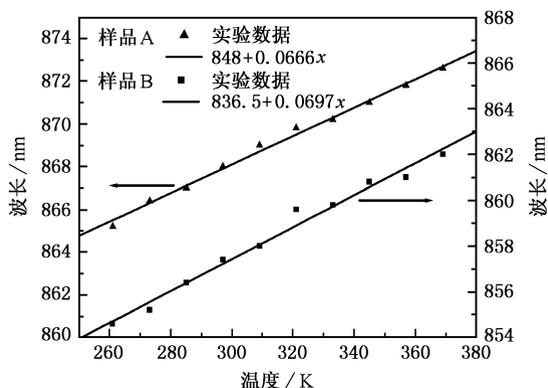


图 5 样品 A、B 激光波长与温度的关系

图 6 给出了样品 A、B 脉冲模式下 (10mA 注入电流, 脉冲宽度 $30\mu\text{s}$, 重复频率 100Hz) 典型的阈值电流随温度的变化曲线。脉冲工作模式下, VCSEL 阈值电流的变化只是受温度引起的增益峰值和腔模波长的不匹配影响, 而不必考虑由电流引起器件结温升导致的阈值增加^[14,15]。从图中可以看出, 在 $261\text{—}369\text{K}$ 温度范围内, 样品 A 和样品 B 的阈值电流随着温度呈抛物线型变化, 随温度升高阈值电流均是先减小到一个极小值而后逐渐增大, 最小阈值电流分别为 1.3mA 和 2mA 。

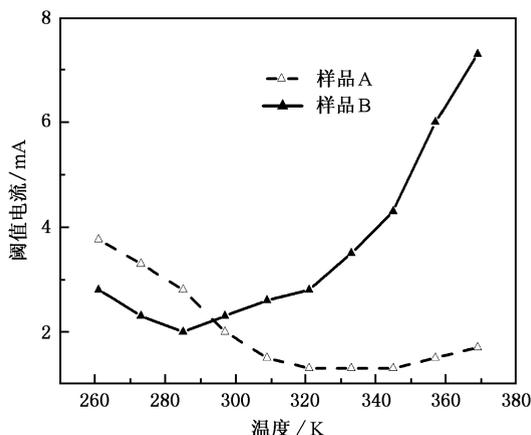


图 6 样品 A、B 阈值电流与温度的关系

为了很好地解释阈值电流与温度的关系, 我们对 AlInGaAs/AlGaAs 量子阱增益谱随温度的变化关系进行了理论研究, 考虑到载流子在带内弛豫效应,

模拟得到不同温度下 AlInGaAs/AlGaAs 量子阱增益谱, 如图 7 所示。由图中可以看出, 在相同注入水平下, 随着温度的升高, 增益谱的峰值波长向长波方向移动, 最大增益值也随之下降, 峰值波长的红移速率为 0.2396nm/K , 大约 4 倍于图 4 计算得到的谐振腔模波长的红移速率。虽然实验测试数据表明, 样品 A、B 的增益谱都位于谐振腔模波长的短波一侧, 但是由于增益峰值随着温度的升高而红移的速率大于谐振腔模波长的红移速率, 在一定温度范围内, 随着温度升高, 增益峰值波长追赶上谐振腔模波长, 器件的阈值电流达到最小, 随着温度继续升高, 增益峰值波长将超过谐振腔模波长继续红移, 二者逐渐偏离, 且增益峰值在不断下降, 器件的阈值也随着温度升高而增大, 阈值随温度的变化也就呈现出图 6 中所示的先减小后增加的抛物线型变化。

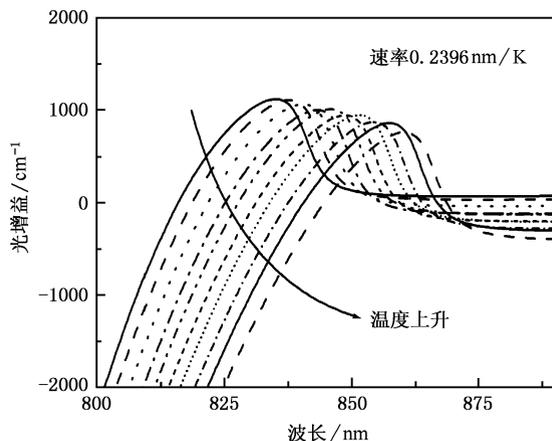


图 7 增益谱与温度的关系

样品 A、B 最小阈值电流对应的温度不同, 我们认为这是由于它们各自的谐振腔模波长和增益谱峰值的偏离程度不同所致。由于样品 A 的谐振腔模波长在长波方向偏离增益谱峰值波长较多, 增益谱峰值波长追赶上谐振腔模波长所需的温度较高, 最低阈值电流对应的温度也就较高。而样品 B 偏离增益谱中心波长较少, 其极值温度相对较低。

由于最小阈值电流处增益峰值波长和谐振腔模波长匹配最好, 即仅从阈值的本质来考虑, 在阈值电流处, 增益等于全部损耗, 所以可以认为两样品最小阈值电流的不同表示器件损耗的不同。虽然两样品生长结构、工艺制备条件都相同, 但是 VCSEL 纵向结构复杂, 材料生长十分困难, 外延生长得到的两样品很难做到完全相同, 外延生长中某些不可控因素导致的两样品外延材料的均匀性不同等因素都可

能引起器件光吸收损耗不同. 因此我们认为样品 A 的内部损耗小于样品 B 的, 这也与图 5 所示的样品 A 的斜率效率大于 B 相符合.

从图中还可以看出, 谐振腔腔模波长与 DBR 中心波长匹配较好, 与增益峰值波长偏离量较大的样品 A 在 309—345K 范围内阈值电流达到了最小值, 而且最小阈值电流和温度的关系呈现了一个相对平缓的状态, 满足文献 5 提出的阈值最小值温度优化到 345K 左右的条件. 相对样品 B 而言, 样品 A 更适于室温稳定、低阈值工作. 从以上分析可知, 在设计 VCSEL 器件结构时, 通过把量子阱增益峰值波长放于谐振腔腔模波长的较短位置处, 可以获得阈值电流随温度变化而变化很小, 即温度敏感性较小的 VCSEL 器件. 而且根据增益谱峰值波长和谐振腔模式波长随温度的红移速率的不同, 进一步调整二者的相对位置, 可以制作出阈值最小值温度优化到 345K 温度附近, 宽温度范围内有良好光电特性的 VCSEL 器件.

4. 结 论

本文通过对材料生长和器件制备条件基本相

似, 而谐振腔腔模波长与增益峰值波长相对位置不同的氧化物限制型应变 AlInGaAs/AlGaAs VCSEL 在 261—369K 温度范围内进行变温实验研究, 掌握了新材料 AlInGaAs 的温度特性, 得到相同注入水平下, 器件输出光功率、电压、斜率效率随温度增加而减小, 激射波长随温度增加而红移, 红移的速率近似为 0.0666nm/K 和 0.0697nm/K, 与理论计算结果相符合. 通过模拟计算得到了谐振腔谐振波长和增益峰值波长随温度升高的理论红移速率, 并结合模拟结果, 对阈值电流随温度呈抛物线型变化规律实验曲线进行了很好地分析和解释, 掌握了谐振腔谐振波长与增益峰值波长相对位置对 VCSEL 阈值的影响规律, 指出获得理想的阈值室温稳定工作 VCSEL 的一个方法是调整谐振腔腔模波长和增益峰值波长的相对位置, 利用这种方法, 最终制备出特征温度 $T_0 = 333\text{K}$, 室温工作阈值最低且稳定的 AlInGaAs/AlGaAs 量子阱 VCSEL 器件.

感谢北京工业大学光电子实验室韩金茹老师、刘宝玲、欧阳柳、王秀清和其他实验技术人员在实验工作中的支持和帮助.

- [1] Kevin N ,Maiko A ,Norihiko I *et al* 2005 *Proc. SPIE* **5737** 8
- [2] Li H Q ,Zhang J ,Cui D F *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2986 (in Chinese) 李惠青、张 杰、崔大复等 2004 物理学报 **53** 2986]
- [3] Tong C Z ,Niu Z C ,Han Q *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3651 (in Chinese) 佟存柱、牛智川、韩 勤等 2005 物理学报 **54** 3651]
- [4] Qu H W ,Guo X ,Dong L M *et al* 2005 *Laser and Nfrared* **35** 83 (in Chinese) 渠红伟、郭 霞、董立闽等 2005 激光与红外 **35** 83
- [5] Yue A W ,Wang R F ,Shen K *et al* 2004 *Study on Optical Communications* **2** 36 (in Chinese) 岳爱文、王任凡、沈 坤等 2004 光通信研究 **2** 36]
- [6] Hornak L A , Barr J C , Cox W D , Brown K S *et al* 1995 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **7** 1110
- [7] Xin G F , Chen G Y , Hua J Z *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1293 (in Chinese) 辛国锋、陈国鹰、花吉珍等 2004 物理学报 **53** 1293]
- [8] Chen M ,Guo X ,Deng J *et al* 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 3074
- [9] Hu S H ,Corzine S W ,Chuang Z M *et al* 1995 *Appl Phys. Lett.* **66** 2040
- [10] Niu J Z ,Li G H 2003 *Chin. J. Semiconduct.* **24** 1067 (in Chinese) 钮金真、李国华 2003 半导体学报 **24** 1067]
- [11] Zhang T 2004 *Chin. Phys. Soc.* **13** 1358
- [12] Pan Z , Wu R H ,Wang Q M 1995 *Chin. Phys. Soc.* **4** 810
- [13] Sadao A 1994 *GaAs and Related Materials* (Singapore : World Scientific publishing Co Pte Ltd) p26
- [14] Zhao H D ,Song D Y ,Zhang Z F *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3744 (in Chinese) 赵红东、宋殿友、张智峰等 2004 物理学报 **53** 3744]
- [15] Gong C B , Chen C S , Song Q M *et al* 2004 *Chin. Phys. Soc.* **13** 1263

Experimental study on comparing the temperature characteristics of AlInGaAs/AlGaAs vertical cavity surface emitting lasers^{*}

Chen Min[†] Guo Xia Guan Bao-Lu Deng Jun Dong Li-Min Shen Guang-Di
(*Beijing Optoelectronic Technology Laboratory , Institute of Electronic Information and Control Engineering ,
Beijing University of Technology , Beijing 100022 , China*)
(Received 21 February 2006 ; revised manuscript received 3 April 2006)

Abstract

The light power-current (L-I) characteristics of vertical cavity surface emitting lasers (VCSEL), which have the same fabrication process and structure , but different detunings of Fabry-Perot (FP) resonance from the gain peaks at room temperature , were measured in the temperature range from 261K to 369K. The relationships between the output light power , threshold current , slope efficiency and lasing wavelength and the temperature were studied using the obtained characteristics in combination with the test results of their reflectivity spectra and photoluminescence signals , as well as the simulated results of their reflectivity spectra and gain spectra at different temperatures. The temperature characteristics of the new material AlInGaAs were found. The effect which the differences between the gain spectrum and the FP resonance had on the output characteristics , especially on the threshold current had been obtained. We found that VCSEL devices with minimal threshold currents and small threshold current change with temperature at room temperature could be obtained by adjusting the detuning of Fabry-Perot (FP) resonance from the gain peak. Using this method , AlInGaAs/AlGaAs strained quantum well VCSEL devices which have the characteristic temperature of 333K , and minimal threshold current and small threshold current change with temperature in the 321K to 345K range were fabricated.

Keywords : AlInGaAs , vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) , characteristic temperature

PACC : 4255 , 7820 , 4260

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60506012) , the Beijing Education Committee Funding (Grant No. KZ200510005003) , the Foundations of Beijing for Excellent Person with Ability (Grant No. 2005100501502) , the Plan of Technology Novas of Beijing (Grant No. 2005A11) , and the Beijing Municipal Science & Technology Commission Funding (Grant No. D0404003040221) .

[†] E-mail : cmgypp@emails.bjut.edu.cn