

# 氧气传感 760 nm 垂直腔面发射半导体激光器

刘天娇<sup>1,2</sup>, 徐玥辉<sup>1,2</sup>, 张建伟<sup>1\*</sup>, 张星<sup>1,3\*</sup>, 张卓<sup>1,2</sup>, 官玉祥<sup>1,2</sup>, 周寅利<sup>1</sup>,  
慕京飞<sup>1,2</sup>, 陈超<sup>1</sup>, 吴昊<sup>1</sup>, 宁永强<sup>1</sup>, 王立军<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 长春中科长光时空光电技术有限公司, 吉林 长春 130102)

**摘要:**在国内首次报道了氧气传感专用 760 nm 单模、波长可调谐的垂直腔面发射激光器 (Vertical Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL), 详细报道了 760 nm VCSEL 设计方法与器件制备结果。通过分析 AlGaAs 量子阱的增益特性, 确定了量子阱组分及厚度参数, 并设计了室温下增益峰与腔模失配为 10 nm 的 VCSEL 激光器结构, 完成了 VCSEL 结构的器件制备。VCSEL 激光器在工作温度 25 °C 时单模功率超过 2 mW, 此时边模抑制比为 28.1 dB, 发散角全角为 18.6°。随着工作电流增加, VCSEL 激光器的发散角随之增加, 然而激光远场光斑仍然为高斯形貌的圆形对称光斑。通过调节 VCSEL 激光器的工作温度与工作电流, 实现了 VCSEL 单模激光波长从 758.740 nm 至 764.200 nm 的近线性连续调谐, VCSEL 工作在 15 ~ 35 °C 时激光波长的电流调谐系数由 1.120 nm/mA 变至 1.192 nm/mA; 温度调谐系数由 0.072 nm/°C 变至 0.077 nm/°C。在两个氧气特征吸收波长附近, VCSEL 激光的边模抑制比分别达到了 32.6 dB 与 30.4 dB。

**关键词:**垂直腔面发射激光器; 单模工作; 波长调谐; 氧气传感

**中图分类号:** TN248.4 **文献标识码:** A

## The 760 nm-vertical cavity surface emitting laser for the oxygen sensing

LIU Tian-Jiao<sup>1,2</sup>, XU Yue-Hui<sup>1,2</sup>, ZHANG Jian-Wei<sup>1\*</sup>, ZHANG Xing<sup>1,3\*</sup>, ZHANG Zhuo<sup>1,2</sup>, GONG Yu-Xiang<sup>1,2</sup>,  
ZHOU Yin-Li<sup>1</sup>, MU Jing-Fei<sup>1,2</sup>, CHEN Chao<sup>1</sup>, WU Hao<sup>1</sup>, NING Yong-Qiang<sup>1</sup>, WANG Li-Jun<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
3. Ace Photonics Co. Ltd., Changchun 130102, China)

**Abstract:** A 760 nm single-mode, wavelength-tunable Vertical Cavity Surface-Emitting Laser (VCSEL) for oxygen sensing has been reported. The design method and device fabrication results of the 760 nm VCSEL have been reported in detail. By analyzing the gain characteristics of AlGaAs quantum wells, the composition and thickness of the quantum wells were determined, and the VCSEL structure with a gain peak and cavity mode mismatch of 10 nm at room temperature was designed. The single-mode power of the VCSEL exceeds 2 mW when the operating temperature is 25 °C, the side-mode suppression ratio (SMSR) is 28.1 dB, and the full angle of the divergence angle is 18.6°. As the operating current increases, the divergence angle of the VCSEL laser increases, but the far-field is still a circular and symmetrical spot with a Gaussian shape. By tuning the operating temperature and operating current of the VCSEL laser, the single-mode wavelength of the VCSEL can be continuously tuned from 758.740 nm to 764.200 nm. The current tuning coefficient

收稿日期: 2022-11-24, 修回日期: 2023-04-12

Received date: 2022-11-24, revised date: 2023-04-12

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (62090060); 国家自然科学基金项目 (61874117, 61874119, 11774343); 吉林省重点科技攻关项目 (20220201063GX)

Foundation items: Supported by the Major Program of the National Natural Science Foundation of China (62090060); the National Natural Science Foundation of China (61874117, 61874119, 11774343); and the Science and Technology Development Project of Jilin Province (20220201063GX)

作者简介 (Biography): 刘天娇 (1998—), 女, 吉林省四平市人, 硕士研究生, 主要研究领域为电泵浦垂直腔面发射激光器, E-mail: liutianjiao20@mails.ucas.ac.cn

\*通讯作者 (Corresponding authors): E-mail: zjw1985@ciomp.ac.cn; zhangx@ciomp.ac.cn

cient of the laser wavelength changes from 1.120 nm/mA to 1.192 nm/mA, and the temperature tuning coefficient changes from 0.072 nm/°C to 0.077 nm/°C when the VCSEL operates at 15-35 °C. The SMSR of the VCSEL laser reaches 32.6 dB and 30.4 dB near the two characteristic absorption wavelengths of oxygen.

**Key words:** vertical cavity surface emitting laser, single-mode operation, wavelength detuning, oxygen sensing

## 引言

近年来,基于激光吸收谱原理的氧气传感技术发展迅速,低成本、小体积与低功耗的激光氧气传感技术在工业氧浓度监测、消费电子、医疗等领域有广阔前景:进行高温监测,提高金属冶炼效率<sup>[1]</sup>;监测肺功能,减少实时氧合异常引发的危险<sup>[2]</sup>;检测食品状态,确定密封盒中水果的变质和储存时间;进行非破坏性的药品监测,实时在线检测药用玻璃瓶中氧浓度以避免发生医疗事故<sup>[3-4]</sup>。低功耗、小体积、高光谱纯度的垂直腔面发射激光器(Vertical Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL)是实现上述应用的关键<sup>[5-6]</sup>。VCSEL发射光垂直于激光芯片表面,在氧气传感应用中有如下独特优势<sup>[7]</sup>:体积小,便于集成<sup>[8-11]</sup>;功耗低,单个发光点功耗仅为几毫瓦<sup>[12-13]</sup>;输出激光光斑圆形对称,光束处理成本低<sup>[14-15]</sup>;单纵模输出,光谱特性好等。

早在1997年,爱尔兰光电三一学院物理系的V. Weldon等人提出VCSEL用于氧气传感的可行性<sup>[16]</sup>,并论证了VCSEL激光器在降低传感系统功耗、体积等方面的优势。2006年,Ulm大学的Fernando Rinaldi等人通过表面浮雕技术,在754 nm波长处获得了2.0 mW的最大单模输出功率<sup>[17]</sup>,同年,该团队又通过光栅浮雕技术,获得了单模与单偏振的760 nm VCSEL<sup>[18]</sup>,将单模功率提高到2.5 mW左右。表面浮雕刻蚀技术可改善VCSEL的光谱质量,实现单模输出,但对腐蚀精度要求高,稍有偏差就会影响选模效果;表面光栅技术具有良好的偏振选择性,可以实现较为稳定的输出,但工艺更为复杂,不利于VCSEL成本的降低。2020年,Prionas公司的M. Grabherr等报道了宽调谐的760 nm VCSEL,温度调节范围达到-30~160 °C,实现了10 nm的波长调谐范围<sup>[19]</sup>。2021年,M. Grabherr等人使用反相表面浮雕技术,实现了760 nm VCSEL单模功率1.3 mW<sup>[10]</sup>。2022年,M. Grabherr等人进一步改进浮雕制备工艺后,实现了760 nm VCSEL最高单模输出功率2.4 mW,拥有5.5 nm宽的波长调谐范围<sup>[20]</sup>。

上述研究中通过引入浮雕及光栅等特殊结构实现了VCSEL激光器的稳定单模输出。在本研究

中,我们采用氧化限制结构实现了760 nm VCSEL毫瓦级单模功率的输出。首先介绍760 nm波段VCSEL激光器的量子阱设计与设计结果,然后介绍制备的VCSEL激光器参数测试结果,最后对本文进行总结。

## 1 理论设计

良好的量子阱增益特性是实现VCSEL激光器高性能工作的关键。量子阱结构能否为腔内激光提供高的光学增益是器件设计的首要考虑因素,我们根据CROSS LIGHT的内嵌模型完成对量子阱区域光学增益的表征。使用 $k \cdot p$ 理论<sup>[21-22]</sup>和价带混合效应来分析量子阱的能级分立情况,计算各个子能带的波函数,并对波矢量 $k_i$ 进行积分,最终发光区的增益可以表示为:

$g(E) =$

$$\frac{g_0}{2\pi t E} \sum_{ij} \int_0^\infty \frac{\left(\frac{\pi}{\Gamma}\right) f_{dip}(k_i) M_b(f_j - f_i) dk_i^2}{1 + [E_{c_j}(k_i) - E_{v_i}(k_i) - E]^2 / \Gamma^2}, \quad (1)$$

其中, $t$ 为量子阱厚度, $\Gamma$ 为展宽系数, $f_{dip}$ 是偶极子因子, $M_b$ 是体积偶极子动量, $f_j$ 和 $f_i$ 是费米函数, $E_{c_j}$ 和 $E_{v_i}$ 是计算的第 $j$ 个导带子带和第 $i$ 个价带子带, $g_0$ 是一个常数,其值定义为:

$$g_0 = \frac{\pi q^2 h}{\varepsilon_0 c m_0^2 n}, \quad (2)$$

其中, $q$ 是自由电子电荷, $h$ 为普朗克常数, $\varepsilon_0$ 为真空介电常数, $c$ 为光速, $m_0$ 是有效载流子质量, $n$ 为折射率。

本研究采用材料结构相对成熟的AlGaAs作为760 nm VCSEL激光器的量子阱材料, $Al_{0.42}Ga_{0.58}As$ 作为量子阱的势垒层材料,以实现良好的载流子限制。基于上述理论模型,使用CROSS LIGHT软件对有源区进行模拟仿真,探索不同势阱组分和厚度对发光波长和增益的影响,完成对组分和厚度的优化。

图1(a)中列出了中心发光波长位于750 nm及760 nm的AlGaAs量子阱中Al组分和量子阱厚度参

数变化趋势。对于两种不同的中心波长, AlGaAs 中 Al 组分与量子阱厚度变化曲线有着相似的变化趋势。对于同一个发光波长, 更厚的量子阱需要更高的 Al 组分才能达到目标波长, 这主要是因为量子阱厚度增加导致量子化程度下降, 能带变窄, 需增加 Al 组分以保持能带宽度不变。当量子阱厚度超过 6 nm 时, 保持相同出光波长所需要的 Al 组分随厚度变化趋势变小, 出现此趋势的原因是量子阱厚度过厚, 子能级量子化效应趋于消失, 材料发光特性趋于体材料特性。

VCSEL 激光器工作时, 其内部存在严重的热积累效应, 温度升高会导致发光增益峰值波长出现红移<sup>[23]</sup>, 因而在器件设计中常将量子阱的增益峰值偏移发光波长一定距离, 一般蓝移 10 nm 左右<sup>[24]</sup>。图 1 (b) 为理论模拟的不同厚度量子阱的增益曲线对比, 此时量子阱增益峰值波长为 750 nm。

图 1 (b) 中可以看出, 当量子阱厚度为 4 nm 与 5 nm 时, 量子阱具有最高的增益峰值。此后, 随着量子阱厚度的增加, 增益峰值不断下降, 且厚度超过 6 nm 的量子阱会出现明显的侧峰, 这是由于能级分裂不足导致的, 两个子能级距离太近, 同时发光。侧峰的波长小于主峰, 因为第二子能级所对应的禁带宽度大于第一子能级, 导致波长发生蓝移。为了实现高的增益, 应该尽可能地选择窄量子阱, 但是这会导致纵模限制因子减小, 对光场和载流子的限制作用减弱, 容易发生载流子的泄露<sup>[25]</sup>。当量子阱厚度从 4 nm 增加至 5 nm 时, 增益峰强度没有明显变化, 增益谱宽度变宽, 但是当量子阱厚度为 5 nm 时, 曲线出现了轻微的侧峰。综上所述, 为兼顾增益特性与内部限制因子, 我们采用 5 个 4 nm 厚度的  $\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}$  量子阱作为有源区的发光层。

量子阱的峰值增益与载流子浓度变化关系可以表征在实际工作中量子阱的增益输出能力。我们模拟了量子阱厚度从 3 nm 增加至 8 nm 时, 峰值增益随量子阱内部载流子浓度改变的曲线, 增益峰值波长均在 750 nm, 如图 2 (a) 所示。图中不同厚度的量子阱峰值增益随载流子浓度变化呈现明显的差异。当量子阱厚度由 3 nm 增加至 8 nm, 量子阱的透明载流子密度呈明显的下降趋势, 此时量子阱 Al 组分增加, 价带顶的能态密度减小<sup>[26]</sup>, 导致透明电流密度下降; 然而, 量子阱的微分增益会随量子阱厚度的增加而减小, 随着厚度的增加, 量子阱在高泵浦功率下会更容易发生增益饱和, 导致增益减

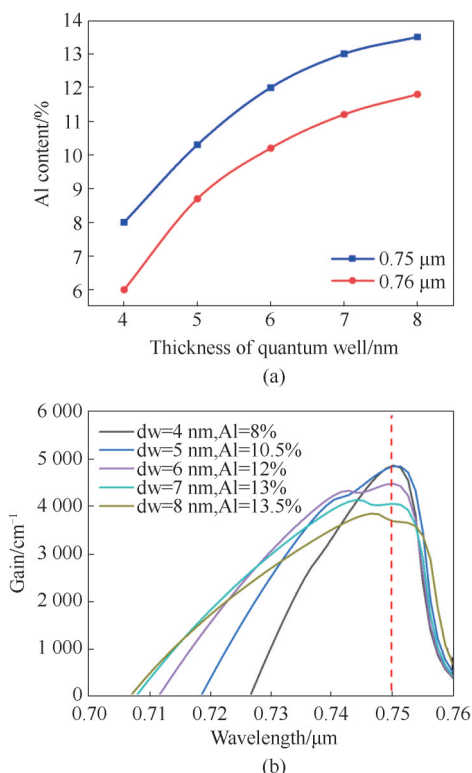


图1 理论模拟的(a)增益峰值波长在750 nm及760 nm时量子阱的厚度与组分关系,(b)增益峰值在750 nm时不同厚度 AlGaAs 量子阱的增益光谱

Fig. 1 Theoretical simulation: (a) the relationship between the thickness and composition of quantum wells when the gain peak wavelength is 750 nm and 760 nm, (b) the gain spectra of AlGaAs quantum wells with different thicknesses when the gain peak is at 750 nm

小<sup>[27]</sup>。当量子阱厚度为 3 nm 时, 小的量子阱厚度容易造成载流子的泄露, 造成饱和增益下降。在图 2 (a) 中, 4 nm 的量子阱微分增益与饱和增益数值均明显高于其他厚度的量子阱, 虽然其透明载流子密度较高, 但由于量子阱厚度较小, 高的透明载流子密度并不会带来透明电流的明显增加, 而 4 nm 厚度的量子阱在微分增益和饱和增益方面有明显优势。

图 2 (b) 为 4 nm 量子阱在不同载流子浓度下的增益谱, 由于能带填充效应, 随着载流子密度的增加, 增益谱曲线有轻微蓝移现象。为保证增益峰与目标激光波长的匹配, 量子阱的增益峰设计在 750 nm 附近, 因为激光器工作时内部的自产热效应使得增益峰向长波长方向移动。

增益峰值随工作温度变化的模拟曲线如图 3 (a) 所示, 随着工作温度的升高, 量子阱中非辐射复合和注入载流子泄露加剧, 峰值增益不断下降; 量子阱材料的禁带宽度会减小, 量子阱的增益峰位置

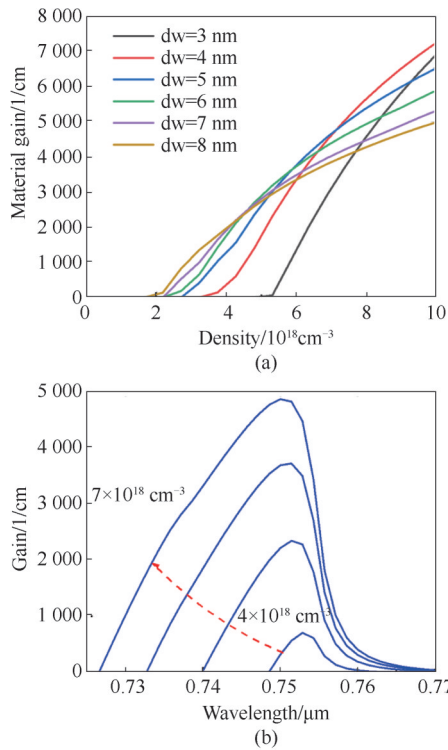


图2 (a) 不同量子阱厚度的发光区材料增益随载流子浓度变化关系, (b) 不同载流子浓度下  $4 \text{ nm}$  AlGaAs 量子阱的增益谱

Fig. 2 (a) The relationship between the gain of the light-emitting region material with different quantum well thicknesses and the carrier concentrations, (b) the gain spectra of the  $4 \text{ nm}$  AlGaAs quantum wells under different carrier concentrations

发生红移<sup>[28]</sup>。随着工作温度的增加,组成 VCSEL 的半导体材料折射率也会增大<sup>[29]</sup>,因而 VCSEL 激光器的反射谱及腔模位置也随之红移,  $25^\circ\text{C}$  及  $85^\circ\text{C}$  下的 VCSEL 反射谱模拟结果见图 3 (b) 所示。

理论模拟了增益峰值和腔模波长随工作温度变化的曲线,如图 3 (c) 所示。增益峰值波长的温漂系数为  $0.232 \text{ nm}^\circ\text{C}$ , 而腔模的温漂系数为  $0.045 \text{ nm}^\circ\text{C}$ , 二者相差很大,且在  $72^\circ\text{C}$  左右时重合并且重合波长约为  $762 \text{ nm}$ , 这说明在高温情况下二者实现了波长匹配,有利于在大电流引起的内部严重热积累下高效稳定工作。

为实现良好的单模工作特性,我们将 AlAs 氧化层的位置设置在远离有源区 3 对布拉格反射镜 (Distributed Bragg Reflector, DBR) 处,并将其严格置于波节位置<sup>[30]</sup>,我们采用的 AIXTRON 200/4 MOCVD 设备具有极佳的厚度控制精度与均匀性,可以保证我们实现精确的氧化层位置控制,在实际器件制备过

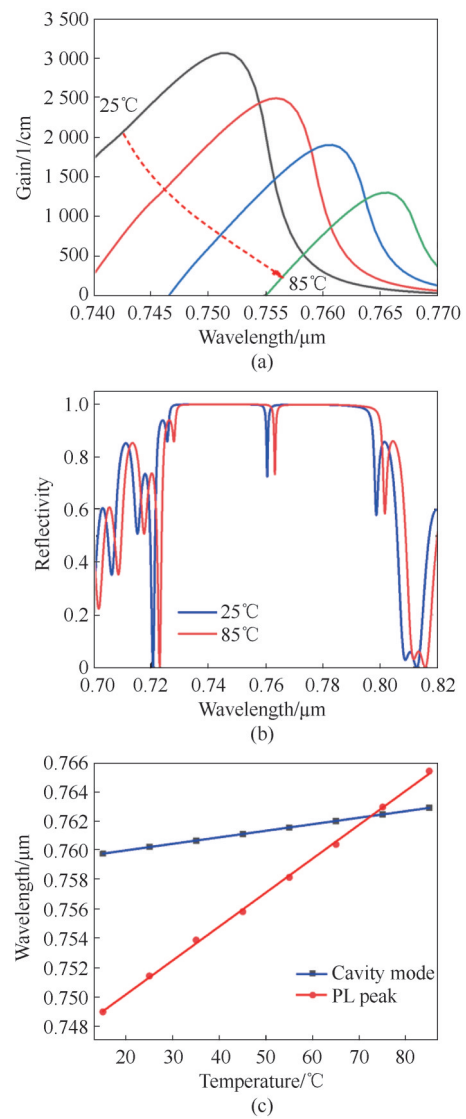


图3 (a) 理论模拟的不同温度下的发光区量子阱增益谱, (b) 不同温度下的 VCSEL 激光器反射谱, (c) VCSEL 激光器腔模波长和增益峰值波长随工作温度的变化关系曲线

Fig. 3 (a) The quantum well gain spectrum of the light-emitting region at different temperatures simulated theoretically, (b) the reflection spectra of the VCSEL laser at different temperatures, (c) the relationship between the cavity mode wavelength and the gain peak wavelength of the VCSEL laser as a function of the operating temperature

程中实现良好单模特性。

## 2 器件结构

$760 \text{ nm}$  VCSEL 激光器的结构示意图如图 4 所示,主要包括: 35.5 对 n 型 (Si) 掺杂分布 DBR、5 对非掺杂 AlGaAs 量子阱有源区、氧化层和 23 对 p 型 (C) 掺杂 DBR。

其中, DBR 结构由  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{Al}_{0.95}\text{Ga}_{0.05}\text{As}$  以

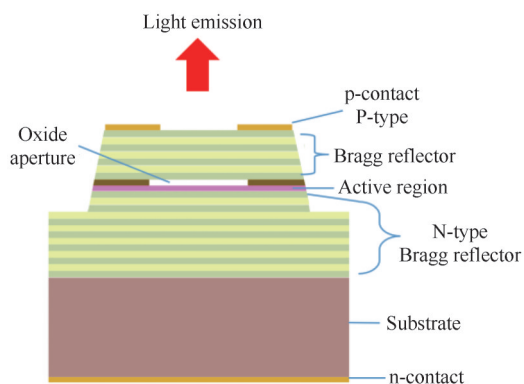


图4 VCSEL激光器结构示意图

Fig. 4 The schematic diagram of the VCSEL laser structure

及其中间的渐变层构成。渐变层采用线性渐变形式以降低界面势垒,渐变层厚度为20 nm,其中组成DBR的 $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ 或 $\text{Al}_{0.95}\text{Ga}_{0.05}\text{As}$ 单层材料与渐变层的光学厚度总计为四分之一波长以保证振荡激光在DBR内部传输过程中的相位。氧化层采用厚度为35 nm的 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 材料层,有源区采用5组厚度为4 nm的 $\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}$ 量子阱。

采用金属有机化合物化学气相沉淀(Metal-organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)制备VCSEL激光器外延片,流程如图5所示。760 nm VCSEL器件采用顶发射工艺,主要工艺步骤包括光刻、对晶圆开展台面刻蚀形成典型的圆形台面结构、侧氧化、磁控溅射金属膜、减薄、抛光、划片,最后将芯片封装至带有TEC控温的热沉基座,开展基本参数性能测试。

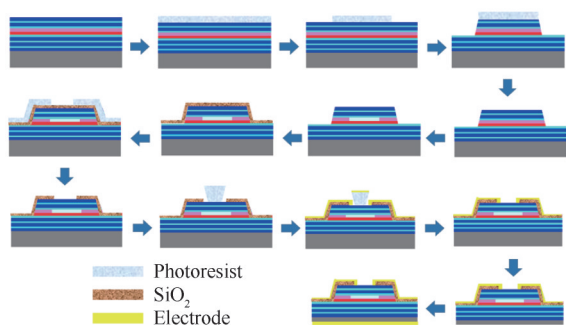


图5 VCSEL制备工艺流程

Fig. 5 The VCSEL preparation process

### 3 实验结果

变温测试VCSEL激光器的功率-电压-电流曲线结果见图6所示。图中可以看出,随着工作电流的增加,VCSEL激光器的出光功率曲线呈现明显的饱和现象。在25 °C下,VCSEL激光器的最大出光

功率达到2.523 mW。随着工作温度的增加,VCSEL激光器的最大出光功率逐步降低。85 °C时VCSEL激光器的最大出光功率仍高达1.316 mW,证明该760 nm VCSEL激光器可以在高温下连续、稳定地工作。由图可见,随着温度的升高,器件的斜率效率减小,这是由于高温下,量子阱的增益峰位置的红移速度比腔模快,导致增益峰位置偏离共振模式,使得共振模式的增益降低,并且高温加剧了量子阱中的非辐射复合和载流子的泄露,导致输出功率随温度升高而快速减小,降低了斜率效率。

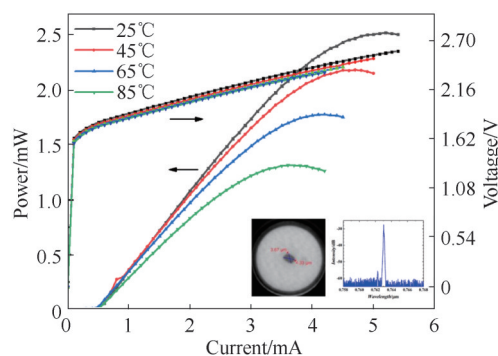


图6 不同工作温度下VCSEL激光器的P-I-V特性曲线,插图为氧化孔红外显微镜照片和25 °C,4 mA工作电流下的VCSEL激光光谱

Fig. 6 *P-I-V* characteristic curves of the VCSEL lasers at different operating temperatures, the inset shows an infrared microscope photograph of the oxidation pore and a VCSEL laser spectrum at 25 °C, 4 mA operating current

VCSEL激光器在25 °C、4 mA工作电流下的激光光谱图如图6中插图所示,激光中心波长位于763.025 nm附近,图中的激光光谱边模抑制比达到28.1 dB,由图6可以看出,此时激光功率为2.277 mW,说明我们开发的VCSEL激光器单模功率超过了2 mW。由于本研究对VCSEL氧化层位置进行了精细设计,因而在较大的氧化孔尺寸下也能保持单模工作。采用红外显微镜可直接获取氧化孔形貌,如图6中插图,本文氧化孔尺寸为 $3.67 \mu\text{m} \times 4.33 \mu\text{m}$ 。

采用CCD相机测量了VCSEL激光器在25 °C下的输出光斑随工作电流的变化情况,如图7所示。图7中的插图为测量的二维光斑形貌,光斑为圆形对称的形貌。随着工作电流由1 mA增加至4 mA,VCSEL激光器发散角( $1/e^2$ )由 $16.1^\circ$ 增加至 $18.6^\circ$ ,并且随着工作电流的增加,发散角增加速度变快。这是因为大电流下VCSEL中心区域的热效应增强,

VCSEL激光器的中心与边缘区域横向折射率差异变大,波导效应增强。

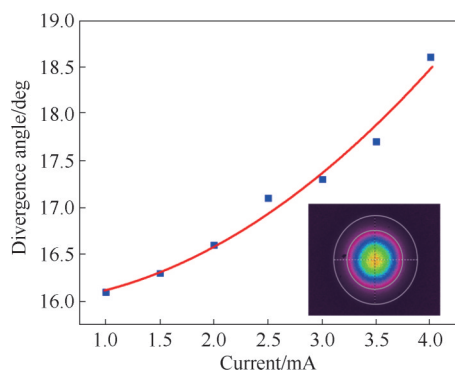


图7 VCSEL激光器在不同工作电流下的激光发散角测试结果,插图为工作电流4 mA时的远场光斑

Fig. 7 The test results of the laser divergence angle of the VCSEL laser under different working currents, the inset is the far-field spot when the working current is 4 mA

氧气传感应用要求VCSEL激光器的激光波长具有良好的可调谐特性。氧气的两个主要光谱吸收峰分别位于761 nm和763.5 nm附近,因此用于氧气传感的VCSEL必须覆盖这两个出光波长<sup>[19]</sup>。测量了15 °C、25 °C与35 °C三个工作温度下VCSEL激光器的出光波长随工作电流的变化情况,见图8(a)所示。

对于不同的工作温度,VCSEL激光器的出光波长随工作电流的变化均不是线性变化,而是电流较大时出光波长漂移速率略有增加。这是因为大电流下有着更严重的热效应,VCSEL内部温度增加更快。图8(a)中,当VCSEL工作温度在15 °C时,VCSEL激光器的出光波长可由758.740 nm调谐至762.900 nm,平均调谐系数约为1.120 nm/mA;工作温度在25 °C时,VCSEL激光器的出光波长可由759.26 nm调谐至763.540 nm,平均调谐系数约为1.150 nm/mA;工作温度在35 °C时,VCSEL激光器的出光波长可由759.840 nm调谐至764.200 nm,平均调谐系数约为1.192 nm/mA。随着电流的改变,温度的调谐系数变化不大,如图8(b),随着电流增加呈上升趋势,从1.4至3.5 mA变化时调谐系数范围约为0.072 nm/°C至0.077 nm/°C。上述调谐范围覆盖了氧气吸收特征光谱。

在上述VCSEL激光器的光谱调谐曲线中,调谐起点和调谐终点分别为758.740 nm和764.200 nm,我们测量了其中760 nm和763.5 nm处的光谱图,如

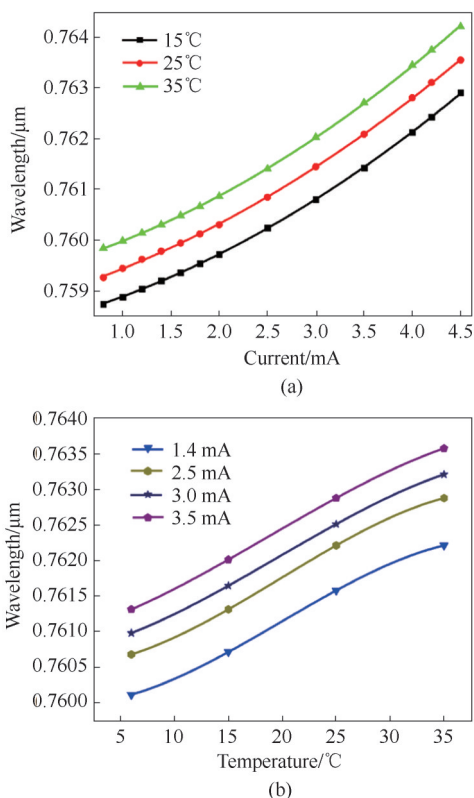


图8 (a)工作温度为15 °C、25 °C及35 °C时,VCSEL激光波长随工作电流的变化关系,(b)工作电流为1.4 mA、2.5 mA、3 mA、3.5 mA时,VCSEL激光波长随工作温度的变化关系

Fig. 8 (a) The variation of the VCSEL laser wavelength with the operating current when the operating temperature is 15 °C, 25 °C and 35 °C, (b) the variation of the VCSEL laser wavelength with the operating temperature when the operating current is 1.4 mA, 2.5 mA, 3 mA and 3.5 mA

图9所示。工作温度为25 °C,工作电流为1.8 mA时激光中心波长位于760.040 nm附近,边模抑制比为32.6 dB,如图9(a)所示;工作温度为35 °C,工作电流为4 mA时激光中心波长位于763.492 nm附近,VCSEL激光光谱出现多个代表高阶模式的次级光谱峰,激光光谱的边模抑制比仍然高达30.4 dB,如图9(b)所示,证明此时VCSEL为单模工作状态。图9中光谱图的波长在氧气的吸收峰附近并包含了吸收峰范围,且单模特性良好。

图10为35 °C时不同电流下的边模抑制比,均超过30 dB。结合图9中的氧气吸收峰附近的单模光谱,说明VCSEL激光器在整个氧气吸收线的调谐范围内均可保持单模工作。

在本文研究中,我们实现了单模输出功率超过2 mW的760 nm VCSEL激光器,但该功率水平相较

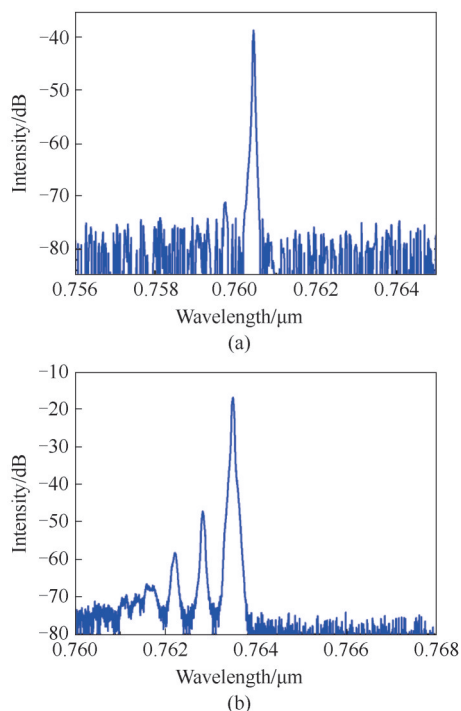


图9 (a) 工作温度 25 °C、工作电流 1.8 mA 时的激光光谱, (b) 工作温度 35 °C、工作电流 4 mA 时的激光光谱

Fig. 9 (a) The laser spectrum when working temperature is 25 °C and working current is 1.8 mA, (b) the laser spectrum when working temperature is 35 °C and working current is 4 mA

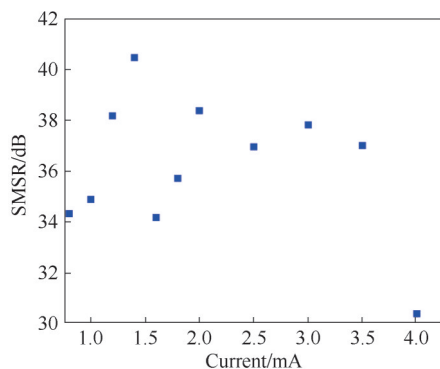


图10 工作温度 35 °C 不同电流下的边模抑制比

Fig. 10 The SMSR at different currents when working temperature is 35 °C

于DFB(Distributed Feed Back)或者DBR激光器较低,目前仍有较大的提升空间。当前限制VCSEL激光器单模输出功率的主要因素在于其单模工作面积较小,而如何提升VCSEL单模功率是当前VCSEL研究的热点领域,国际上包括我们团队已经通过表面浮雕<sup>[31]</sup>、外腔选模<sup>[32]</sup>及光子晶体<sup>[33]</sup>等多种结构证实了VCSEL的单模工作面积可以实现扩展,最终实现单模功率水平的大幅提升,并且通过外腔结构还

可以实现高的单模激光输出与窄的激光线宽。在下一步的研究中,我们将深入探索上述新型结构在760 nm波段VCSEL的应用潜力,我们相信这类结构可以将VCSEL的性能提升至可以媲美DFB或DBR激光器的水平。

#### 4 结语

本文报道了氧气传感专用的760 nm VCSEL激光器设计与制备结果。根据AlGaAs量子阱的增益特性,确定了量子阱的Al组分、量子阱厚度情况,并设计了增益峰与腔模失配的VCSEL结构。制备的VCSEL激光器在25 °C下的最高输出功率达到2.523 mW,单模功率超过2 mW。VCSEL工作在15 ~ 35 °C时激光波长的电流调谐系数由1.120 nm/mA变至1.192 nm/mA;温度调谐系数由0.072 nm/°C变至0.077 nm/°C。通过调节电流和温度,激光波长在758.740 nm至764.200 nm范围内可以实现连续调谐,并覆盖了氧气的两个主要吸收峰。我们相信未来760 nm VCSEL激光器在环保和工业领域所需的小体积、低成本环境氧含量监测系统中将有重要应用前景。

#### References

- [1] Gao Y, Zhang Y. Study on high temperature oxygen measurement method with temperature correction using laser absorption spectroscopy[C].2022 International Conference on Optoelectronic Information and Functional Materials (OIFM 2022). SPIE, 2022, **12255**: 92-100.
- [2] Lewander M, Bruzelius A, Svanberg S, *et al.* Noninvasive gas monitoring in neonatal lungs using diode laser spectroscopy: feasibility study [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2011, **16**(12): 127002.
- [3] SHEN Shuai, HE Jian-jun. Detection of oxygen residual concentration in medicine glass vials based on peak width correction [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2022, **41**(05): 879-887. (申帅,贺建军.基于峰宽修正的玻璃药瓶内氧气残留浓度的检测研究. *红外与毫米波学报*), 2022, **41**(05): 879-887.
- [4] SHEN Shuai, HE Jian-jun, LUO Qi-wu, *et al.* Inversion of oxygen residual concentration in vials based on near-infrared absorption spectroscopy [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2020, **39**(3): 311-317. (申帅,贺建军,罗旗舞,等.基于近红外吸收光谱的西林瓶内氧气残留浓度反演研究. *红外与毫米波学报*), 2020, **39**(3): 311-317.
- [5] LARSSON A. Advances in VCSELs for communication and sensing [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, **17**(6): 1552-1567.
- [6] WANG J, SANDERS S T, JEFFRIES J B, *et al.* Oxygen measurements at high pressures with vertical cavity surface-emitting lasers [J]. *Applied Physics B*, 2001, **72**(7):

- 865–872.
- [7] KOYAMA F. Recent Advances of VCSEL Photonics [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, **24** (12): 4502–4513.
- [8] WIEDENMANN D, GRABHERR M, R JÄGER, *et al.* High volume production of single-mode VCSELS [C]. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, SPIE, 2006, San Jose, California, United States: **6132**: 613202–613212.
- [9] LIU M, WANG C Y, FENG M, *et al.* 850 nm oxide-confined VCSELS with 50 Gb/s error-free transmission operating up to 85 °C [C]. CLEO: Science and Innovations. Optical Society of America, SPIE, 2016, San Jose, California, United States: SFIL. 6.
- [10] GRABHERR M. High performance large aperture NIR single-mode VCSELS [C]. Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XXV. SPIE, 2021, San Francisco, California, United States: 11704.
- [11] PAN G, XUN M, SUN Y, *et al.* Two-dimensional coherent VCSEL arrays with configurable beam emissions [J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, **149**: 107809.
- [12] LEDENTSOV N N, LOTT J A, KROPP J R, *et al.* Progress on single mode VCSELS for data-and tele-communications [C]. Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers X. SPIE, 2006, **6132**: 613202.
- [13] XIE Y, XU C, KAN Q, *et al.* High power single mode output low threshold current photonic crystal vertical cavity surface emitting lasers [C]. Optical Fiber Communication Conference. 2012: 1–3.
- [14] KANEDA Y, FAN L, HSU T C, *et al.* High brightness spectral beam combination of high-power vertical-external-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, **18** (17): 1795–1797.
- [15] WANG Qiu-Hua, LI Ming, QIU Ping-Ping, *et al.* Study of high-temperature operating oxide-confined 894 nm VCSEL with fundamental transverse mode emission [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, **51** (05): 201–207. (王秋华,李明,邱平平,等. 894 nm 高温工作氧化限制型基横模 VCSEL 研究. *红外与激光工程*), 2022, **51** (05): 201–207.
- [16] WELDON V, O' GORMAN J, PÉREZ-CAMACHO J J, *et al.* Laser diode based oxygen sensing: A comparison of VCSEL and DFB laser diodes emitting in the 762 nm region [J]. *Infrared Physics & Technology*, 1997, **38** (6): 325–329.
- [17] RINALDI F, OSTERMANN J M, KRONER A, *et al.* High-performance AlGaAs-based VCSELS emitting in the 760 nm wavelength range [J]. *Optics Communications*, 2007, **270** (2): 310–313.
- [18] RINALDI F, OSTERMANN J M, KRONER A, *et al.* 760 nm high-performance VCSEL growth and characterization [C]. Micro-Optics, VCSELS, and Photonic Interconnects II: Fabrication, Packaging, and Integration: SPIE, 2006, Strasbourg, France: **6185**: 283–289.
- [19] GRABHERR M. 76X-nm VCSELS with wide tuning range designed for TDLAS [C]. Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XXIV: SPIE, 2020, San Francisco, California, United States, **11300**: 59–67.
- [20] Grabherr M, Zorn M. Most resilient single-mode VCSEL [C]. Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XXVI. SPIE, 2022, San Francisco, California, United States: **12020**: 98–109.
- [21] CHANG C S, CHUANG S L. Modeling of strained quantum-well lasers with spin-orbit coupling [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1995, **1** (2): 218–229.
- [22] KOUZNETSOV D, BISSON J F, UEDA K. Scaling Laws of Disk Lasers [J]. *Optical Materials*, 2009, **31** (5): 754–759.
- [23] ZHANG Jian-Wei, ZHANG Xing, ZHOU Yin-Li, *et al.* 1550 nm Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser with single-mode power of milliwatts [J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, **71** (06): 346–352. (张建伟,张星,周寅利,等. 1550 nm 毫瓦级单横模垂直腔面发射半导体激光器. *物理学报*), 2022, **71** (06): 346–352.
- [24] ZHANG Li-Sen. Structure design and fabrication of high power vertical cavity surface emitting laser [D]. Changchun, Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2012. (张立森. 大功率垂直腔面发射激光器的结构设计与研制 [D]. 长春, 中国科学院研究生院 (长春光学精密机械与物理研究所), 2012.
- [25] CORZINE S W, GEELS R S, SCOTT J W, *et al.* Design of Fabry-Perot surface-emitting lasers with a periodic gain structure [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1989, **25** (6): 1513–1524.
- [26] ZHANG Ji-Ye. Study on high power output and mode control of near infrared surface [D]. Changchun, University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2021. (张继业. 近红外面发射激光器高功率输出及其模式控制的研究 [D]. 长春, 中国科学院大学 (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2021.
- [27] ZHANG Jian, NING Yong-Qiang, ZHANG Jian-Wei, *et al.* 795 nm VCSELS for Rb based miniaturized atomic clock [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22** (1): 50–57. (张建, 宁永强, 张建伟, 等. 微型铷原子钟专用 795 nm 垂直腔表面发射激光器. *光学精密工程*), 2014, **22** (1): 50–57.
- [28] ZHANG Ji-Ye, ZHANG Jian-Wei, ZENG Yu-Gang, *et al.* Design of the gain region of high-power vertical external cavity surface emitting semiconductor laser and its fabrication [J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, **69** (5): 85–93. (张继业, 张建伟, 曾玉刚, 等. 高功率垂直外腔面发射半导体激光器增益设计及制备. *物理学报*), 2020, **69** (5): 85–93.
- [29] TSAI H M, TANG S F, SUA S T, *et al.* Numerical simulation of temperature-dependence on distributed Bragg reflector (DBR) and performance analyses for proton-implant/oxide confined VCSEL: comparison with transmission matrix, matrix calculating methods, and Macleod model [C]. Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XI. SPIE, 2007, San Jose, California, United States: **6484**: 133–144.
- [30] Padullaparthi B D, Tamanuki T, Bimberg D. Field-of-view control of segmented NIR VCSEL arrays for next-generation flash LiDARs [C]. High-Power Diode Laser



- Technology XVIII. SPIE, 2020, San Francisco, California, United States: **11262**: 202–207.
- [31] Zhou Y, Zhang X, Zhang J, *et al.* Wavelength tuning robustness optimization for a high-temperature single-mode VCSEL used in chip-scale atomic sensing systems[J]. *Applied Optics*, 2022, **61**(9): 2417–2423.
- [32] ZHANG Xing, NING Yong-Qiang, ZHANG Jian-Wei, *et al.* Oscillation characteristics of electrically-pumped vertical external cavity surface emitting lasers [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2013, **32**(04): 344–350. (张星, 宁永强, 张建伟, 等。电泵浦垂直外腔面发射激光器振荡特性的理论分析及实验研究。《红外与毫米波学报》, 2013, **32**(04): 344–350.)
- [33] Chen L R, Chang C J, Hong K B, *et al.* Static Beam Steering by Applying Metasurfaces on Photonic-Crystal Surface-Emitting Lasers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, **40**(21): 7136–7141.