



795 nm高温高功率垂直腔面发射激光器及原子陀螺仪应用

周寅利 贾雨琴 张星 张建伟 刘占超 宁永强 王立军

795-nm high-temperature and high-power operating vertical-cavity surface-emitting laser and application in atomic gyroscope

Zhou Yin-Li Jia Yu-Chen Zhang Xing Zhang Jian-Wei Liu Zhan-Chao Ning Yong-Qiang Wang Li-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 134204 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20212422

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212422>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

1550 nm毫瓦级单横模垂直腔面发射半导体激光器

1550-nm vertical-cavity surface-emitting laser with single-mode power of milliwatts

物理学报. 2022, 71(6): 064204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212132>

高功率垂直外腔面发射半导体激光器增益设计及制备

Design of gain region of high-power vertical external cavity surface emitting semiconductor laser and its fabrication

物理学报. 2020, 69(5): 054204 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191787>

795 nm亚波长光栅耦合腔垂直腔面发射激光器的超窄线宽特性

Ultra-narrow linewidth characteristics of 795-nm subwavelength grating-coupled cavity vertical cavity surface emitting laser

物理学报. 2021, 70(22): 224207 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210293>

1550 nm垂直腔面发射激光器的特征参量随温度的变化

Temperature dependence of characteristic parameters of 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser

物理学报. 2018, 67(21): 214203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180572>

高功率转换效率905 nm垂直腔面发射激光器的设计与制备

Design and fabrication of 905 nm vertical cavity surface emitting laser with high power conversion efficiency

物理学报. 2021, 70(11): 114202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210043>

垂直腔面发射激光器低温光电特性

Optoelectronic properties of vertical-cavity surface-emitting laser at low temperature

物理学报. 2019, 68(19): 194203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190427>

795 nm 高温高功率垂直腔面发射激光器及原子陀螺仪应用*

周寅利¹⁾ 贾雨琴²⁾ 张星^{1)3)†} 张建伟¹⁾
刘占超^{2)‡} 宁永强¹⁾ 王立军¹⁾

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, 长春 130033)

2) (北京航空航天大学, 北京 100191)

3) (长春中科长光时空光电技术有限公司, 长春 130102)

(2021 年 12 月 30 日收到; 2022 年 2 月 18 日收到修改稿)

在传统的氧化物约束型的垂直腔面发射半导体激光器中, 横向光限制主要取决于氧化层的厚度及其相对于腔内光驻波分布的位置. 通过减少外延结构中氧化层与光场驻波分布之间的重叠, 可以降低芯层与包层之间的有效折射率差, 从而减少腔内可存在的横向模的数量, 并增加横模向氧化物孔径之外的扩展. 本文利用这一原理设计并制作了一个 795 nm 的大氧化孔径的垂直腔面发射激光器. 器件在 80 °C 下可实现 4.1 mW 的高功率单基模工作, 最高边模抑制比为 41.68 dB, 最高正交偏振抑制比为 27.46 dB. 将 VCSEL 作为抽运源应用于核磁共振陀螺仪系统样机中, 实验结果表面新设计的 VCSEL 可以满足陀螺仪系统的初步应用需求.

关键词: 垂直腔面发射半导体激光器, 大氧化孔径, 单基模, 核磁共振陀螺仪

PACS: 42.55.Px, 42.62.-b

DOI: 10.7498/aps.71.20212422

1 引言

垂直腔面发射半导体激光器 (vertical cavity surface-emitting semiconductor laser, VCSEL) 具有许多独特的特性, 如表面发射激光、具有圆形和低发散角的输出光束以及可二维阵列集成等^[1,2]. 单横模 VCSEL (SM-VCSEL) 是小型化低功耗原子传感器的首选光源, 包括芯片级原子钟、原子磁力计和原子陀螺仪^[3-5]. 在芯片级核磁共振陀螺仪 (nuclear magnetic resonance gyroscope, NMRG) 的应用中, VCSEL 需要在高温、单横模、低功耗下

工作, 其输出功率决定了原子极化率, 并最终影响陀螺的信噪比^[6]. 在传统的氧化物约束型 SM-VCSEL 中, 氧化物的孔径必须足够小 (一般 $< 3 \mu\text{m}$) 以保证器件仅支持基模工作. 然而, 小孔径使 VCSEL 的串联电阻大 (通常约为 200 Ω)、电流密度高, 限制了 VCSEL 的输出功率和可靠性. 而当氧化孔径增加时, 器件的电阻下降, 自产热也随之下降, 进而可以实现高的输出功率, 但是大氧化孔径会导致多横模激射. 通过在大孔径多模 VCSEL 中引入具有模式选择特性增益或损耗, 可以使 VCSEL 仅在基横模 (LP_{01}) 下工作. 多种基于这一原理的 SM-VCSEL 已经被报道, 包括光子晶体 VCSEL^[7,8],

* 国家重点研究发展计划 (批准号: 2018YFB2002400)、国家自然科学基金 (批准号: 61804151, 62090060, 61874117, 11774343, 61874119) 和吉林省科技发展计划项目 (批准号: 20200401006GX) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangx@ciomp.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: liuzhanchao@hotmail.com

表面刻蚀多孔 VCSEL^[9], Zn-扩散 VCSEL^[10,11], 以及表面浮雕 VCSELs^[12–14]. 与传统的氧化物约束 SM-VCSEL 相比, 这些方法需要额外的工艺步骤和非常高的工艺制备精度, 限制了它们的量产前景.

由于原子传感系统的重要国防应用, 美国国防部先进研究项目局从 2002 年开始部署了多期原子传感专用高温工作单横模 VCSEL 的研制计划, 在该计划支持下, 美国桑迪亚国家实验室、Princeton Optonics 公司等单位陆续报道了一系列原子钟专用 VCSEL 方面的器件结果^[15]. 2005 年, 德国乌尔姆大学利用表面倒光栅浮雕制作了 850 nm VCSEL, 其在 90 °C 下单模出光功率大于 1 mW^[16]. 2012 年又报道了 894.6 nm VCSEL, 在 80 °C 下最大单模出光功率 1.2 mW. 2007 年, 美国桑迪亚国家实验室通过刻蚀表面光栅, 研制出了在 1 mA 的注入电流下实现边模抑制比 (SMSR) > 35 dB 的高性能 VCSEL, 其在 85 °C 下的最大输出功率 0.75 mW^[17]. 目前国外在原子钟用小功率单模 VCSEL 方面已经发展成熟, 可提供商业化产品^[18]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 (以下简称长春光机所) 从 2011 年开始展开高温工作 VCSEL 方面的研究, 并取得了一系列进展. 2013 年, 长春光机所报道了 Rb 原子钟专用的 795 nm VCSEL, 器件在 85 °C 下实现最大输出功率为 1.8 mW^[19]. 2015 年, 报道了 Cs 原子钟专用的 895 nm VCSEL, 在 110 °C 下, 最大输出功率 1.5 mW, SMSR > 25 dB, 阈值电流仅为 0.32 mA^[20]. 2022 年, 又报道了采用浅表面浮雕的单模 894 nm VCSEL, 92 °C 时最大输出功率 2.02 mW, SMSR 29.2 dB^[21]. 北京工业大学在 2020 年报道了 Cs 原子钟专用的 895 nm VCSEL, 输出功率为 0.86 mW, SMSR > 20 dB^[22]. 中北大学和清华大学在 2009 年联合报道了设计了 780 nm 单模 VCSEL, 在 75 °C 下最大输出功率接近 0.5 mW^[23]. 从目前报道的结果中可以发现: 原子传感专用 VCSEL 在高温 (> 80 °C) 下的最大输出功率仍然低于 3 mW.

本文基于一种新的设计思路实现了大氧化孔径的 SM-VCSEL. 通过使氧化层远离有源腔, 氧化孔径内可存在的横模数量将极大地减小, 且高阶横模的光场向氧化孔径外扩展, 导致了高阶模的大量损耗, 从而使 VCSEL 能够保持稳定的基横模工作. 根据该设计思路制备了一个直径为 6 μm 的大氧化孔径 SM-VCSEL. 器件在 80 °C 下可实现

4.1 mW 的高功率单基模工作, 最高边模抑制比为 41.68 dB, 最高正交偏振抑制比为 27.46 dB. 由于仅改变了器件的外延结构设计, 器件制备工艺与标准工艺流程完全兼容, 所以新设计的 VCSEL 具备较好的量产前景. 本文的结构如下: 首先, 介绍了 VCSEL 的基本外延结构及大氧化孔径的设计过程. 然后采用标准制备工艺过程制作了该 VCSEL 器件, 并对其光电性能进行了测试. 最后, 我们将新设计的 VCSEL 芯片作为抽运光源集成到了小型化的 NMRG 原型样机中, 测量了原子极化率和陀螺的共振信号比, 测试结果证明了新设计的 VCSEL 可以满足原子陀螺的应用需求.

2 器件结构与设计

2.1 器件结构

VCSEL 的外延和器件结构的剖面图如图 1 所示. 器件的外延结构从下至上依次包括: N 型 GaAs 衬底、N 型布拉格反射镜 (distributed Bragg reflector, DBR)、量子阱 (QWs) 有源区、P-DBR 以及位于 P-DBR 结构内的氧化层, 外延结构的每部分名称在图中采用红色字体标注. 有源区部分由 3 个 6.8 nm 厚的压应变 $\text{In}_{0.125}\text{Al}_{0.14}\text{Ga}_{0.735}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 量子阱组成. N 型和 P 型 DBR 分别由 24/38 对 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 层组成, 每层厚度为四分之一光学厚度 ($\lambda_c/(4n)$), λ_c 为 VCSEL 的共振波长, n 为每层材料的折射率. 在 VCSEL 器件制备工艺过程中, 通过干法刻蚀形成如图 1 所示的台阶形状, 刻蚀深度超过量子阱层, 20 nm 厚的 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$

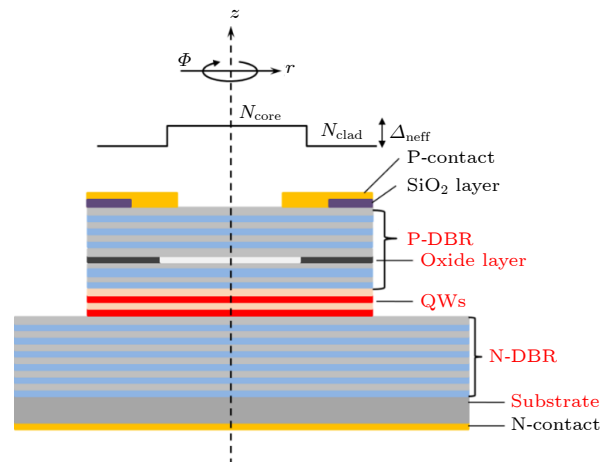


图 1 VCSEL 结构图

Fig. 1. Schematic of VCSELs.

层经湿法氧化后, 转化为低折射率的非晶态且电绝缘的 $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$, 形成氧化孔. 器件的上表面包含 SiO_2 绝缘层, 并刻蚀出电注入窗口, 生长 P 面金属电极并通过 lift-off 工艺形成如图所示的出光孔. 虽然真实的氧化孔是类似菱形的^[24], 但 VCSEL 的整体器件结构仍然可以看成是近似轴对称的, 其中, 未氧化的中心区域具有较高的有效折射率 N_{core} , 可称为芯层; 氧化区域具有较低的有效折射率 N_{clad} , 可称为包层, 类似于光纤结构. 芯层与包层的有效折射率差称为 Δn_{eff} .

2.2 结构设计

VCSEL 的激光波长由腔内共振波长 λ_c 决定. λ_c 处的有效增益称为腔模增益. VCSEL 作为 NMRG 的泵源时, 工作温度超过 80 °C. 为了使 VCSEL 在该温度下的腔模增益最大化, 我们计算了 6.8 nm $\text{In}_{0.125}\text{Al}_{0.14}\text{Ga}_{0.735}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 量子阱在不同温度下的增益谱, 如图 2(a) 所示, 用于增益谱计算的载流子密度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. 图 2(b) 所示展示了不同温度下, 腔模位置的材料增益以及峰值波长. 在温度范围为 80—90 °C 时, VCSEL 的腔模增益最大, 对应室温时的腔模-增益失谐量约为 10.8 nm. 当温度为 80 °C 时, λ_c 为 794.44 nm. 由于氧化孔的存在, 使 VCSEL 在径向方向上形成芯层和包层具有折射率差 Δn_{eff} 的圆柱形波导, 实现了氧化物约束型 VCSEL 中的横向光限制. N_{core} 和 N_{clad} 的计算公式如下^[25–27]:

$$N_{\text{clad}} = \frac{\int n_{\text{clad}} E_z dz}{\int E dz}, \quad N_{\text{core}} = \frac{\int n_{\text{core}} E_z dz}{\int E dz}, \quad (1)$$

其中, n_{core} 和 n_{clad} 分别为材料折射率, E_z 为电场沿 z 方向的驻波分布. 减小氧化物孔径与驻波分布之间的重叠可以减少 Δn_{eff} , 从而减小孔径处的衍射和对横模的约束. 在传统的 VCSEL 中, 厚度为 30 nm 的氧化层位于靠近有源腔的第一个驻波节点处, 这种结构中 Δn_{eff} 约为 0.01. 本研究采用了一种新的设计方法, 将氧化层移至远离有源腔的第三驻波节点处, 并将其厚度减小到 20 nm, 使 Δn_{eff} 降至 0.002.

利用麦克斯韦方程组和芯-包层界面的边界条件, 可以得到 VCSEL 的圆柱形波导所支持的横向

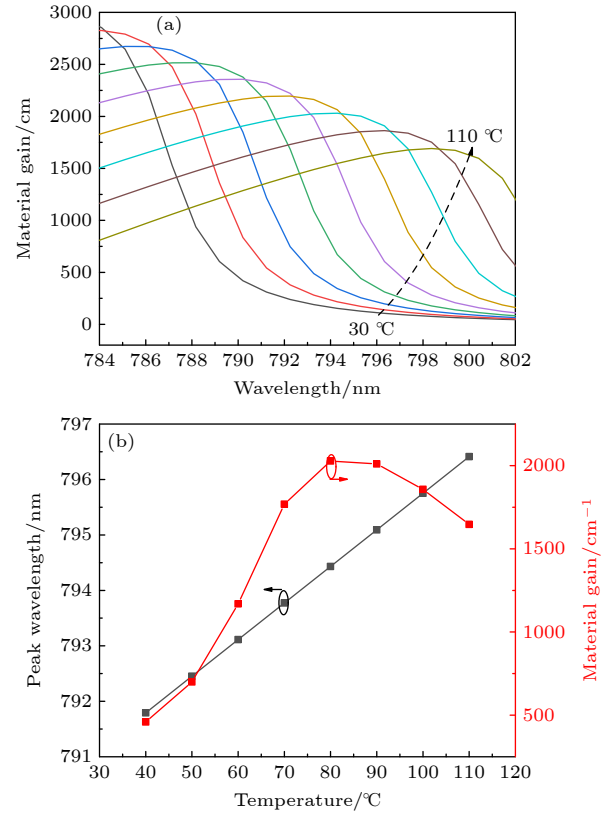


图 2 (a) $\text{In}_{0.125}\text{Al}_{0.14}\text{Ga}_{0.735}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 量子阱在不同温度下的增益谱; (b) 腔模位置增益和波长随温度变化

Fig. 2. (a) Gain spectra of $\text{In}_{0.125}\text{Al}_{0.14}\text{Ga}_{0.735}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ quantum wells at different temperatures; (b) the wavelength and gain at cavity-mode at different temperature.

电磁模, 其特性由波导的传播常数和特性场在横向上的分布来表征^[28]. 在弱引导近似 ($\Delta n_{\text{eff}} \ll n_{\text{eff}}$) 中, 横向模式可以用 LP_{mn} 模表示, 其中 m 为方位模数, n 为径向模数. 在柱坐标中, LP_{mn} 模的电场振幅表达式如下:

$$E_{mn}(r, \Phi, z) \propto e^{jm\Phi} \cdot e^{-j\beta_{mn}z} \cdot J_m(u_{mn}r), \quad r < r_0 \text{ (芯层)}, \quad (2)$$

$$E_{mn}(r, \Phi, z) \propto e^{jm\Phi} \cdot e^{-j\beta_{mn}z} \cdot K_m(v_{mn}r), \quad r > r_0 \text{ (包层)}, \quad (3)$$

其中, r, Φ, z 代表柱坐标系中的 3 个坐标轴, β_{mn} 为传播常数, J_m 代表第一类 m 阶贝塞尔函数, K_m 是第二类 m 阶修正贝塞尔函数, r_0 为氧化孔半径. u_{mn} 和 v_{mn} 的表达式如下:

$$u_{mn}^2 = k_0^2 N_{\text{core}}^2 - \beta_{mn}^2, \quad (4)$$

$$v_{mn}^2 = \beta_{mn}^2 - k_0^2 N_{\text{clad}}^2, \quad (5)$$

其中 k_0 为真空中波数, 应用边界条件, 得到波导支持的模态以及相应的 u 和 v 参数值, 从而得到传播

常数, 得到特征方程如下:

$$\frac{u_{mn} J_{m+1}(u_{mn})}{J_m(u_{mn})} = \frac{v_{mn} K_{m+1}(v_{mn})}{K_m(v_{mn})}. \quad (6)$$

通过求解上述方程, 可以得到 VCSEL 中的横向模分布^[28]. 在一个氧化孔直径固定的 VCSEL 中, Δn_{eff} 越小, 可存在的横向模式数量越少. 本研究采用了 $6 \mu\text{m}$ 的氧化孔直径, 传统结构的 $\Delta n_{\text{eff}} = 0.01$, 计算得到的横向模数量超过了 40 个; 新设计结构的 $\Delta n_{\text{eff}} = 0.002$, 计算得到的横向模数量仅为 3 个. 上述两种 VCSEL 设计的前三种横向模式 LP_{01} , LP_{11} 和 LP_{21} 沿径向 (r 方向) 的一维分布如图 3 所示, 氧化孔的边缘用黑色虚线标记. 如图 3(a) 所示, 当 Δn_{eff} 为 0.01 时, 孔径具有较强的光约束, 三种横向模式下均只有一小部分光漏出孔径. 当 $\Delta n_{\text{eff}} = 0.002$ 时, 光约束减弱, 光泄露增加, 如图 3(b) 所示. 与基模 LP_{01} 相比, 两个高阶模 LP_{11} 和 LP_{21} 有更多的光泄露出孔径外. 氧化层中被氧化的区域主要是电绝缘的材料, 载流子被限制在 VCSEL 的氧化孔径内, 孔径外载流子浓度非常低, 光学损耗大.

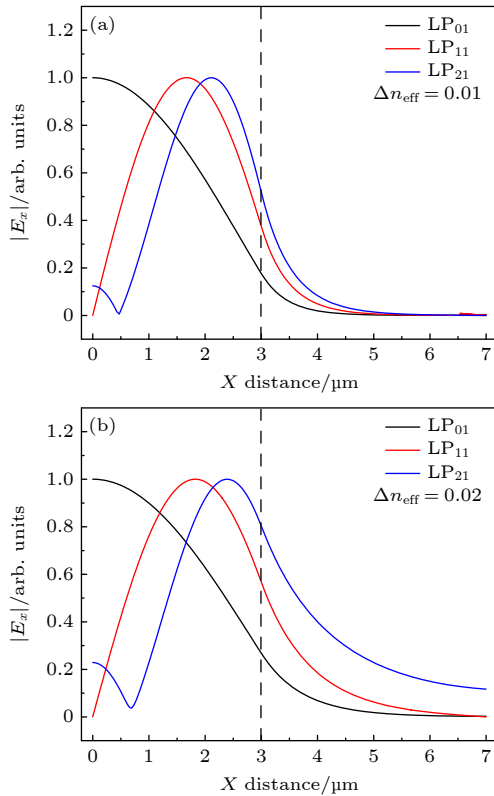


图 3 在折射率差为 (a) 0.01 和 (b) 0.002 的两个 VCSEL 中径向 3 个模式 LP_{01} , LP_{11} , 和 LP_{21} 的分布

Fig. 3. (a) Distribution of LP_{01} , LP_{11} , and LP_{21} modes along the radial direction of VCSELs with (a) $\Delta n_{\text{eff}} = 0.01$ and (b) $\Delta n_{\text{eff}} = 0.002$.

因此, 采用新设计的 VCSEL 可以引入较大的高阶模损耗, 以防止其达到激光阈值, 保证大氧化孔径 VCSEL 以基横模 LP_{01} 状态工作.

3 器件制备与性能测试

3.1 器件制备与测试

VCSEL 的器件制备采用标准工艺流程. 用感应耦合等离子体反应刻蚀形成一个直径 $20 \mu\text{m}$ 的台面. 通过湿法选择性氧化 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 层制作了直径 $6 \mu\text{m}$ 的氧化孔. 300 nm 的 SiO_2 绝缘层通过等离子体增强化学汽相沉积覆盖在整个器件的上表面. 电注入窗口是通过蚀刻位于台面中心的 SiO_2 层形成的, 窗口直径为 $16 \mu\text{m}$. 用磁控溅射设备沉积金属层, 并采用 lift-off 工艺步骤形成直径 $10 \mu\text{m}$ 的发光孔径. 图 4 为用于 VCSEL 功率特性和光谱特性测试的系统原理图, 用于测试的 VCSEL 芯片以 TO56 形式封装, 并安装在商用的激光二极管控制底座上, 用于温度和电流控制, 电流和温度控制精度分别为 0.001 mA 和 $0.01 \text{ }^\circ\text{C}$. VCSEL 发出的光经过偏振片选择偏振方向, 再通过准直透镜准直后被分束镜分成 2 路, 一路用于测试激光的光谱及偏振特性, 一路用于测试 VCSEL 的功率特性. VCSEL 的光谱和功率数据分别采用光谱仪和功率计采集. VCSEL 的近场光斑测试是采用一个 100 倍的目镜和 CCD 相机来直接对 VCSEL 的腔面进行成像.

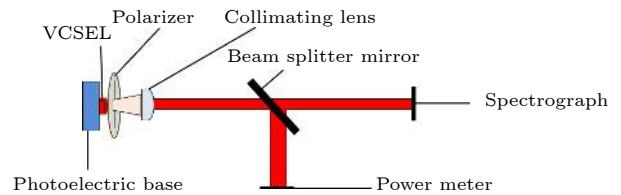


图 4 VCSEL 的功率特性的光谱特性测试系统原理图

Fig. 4. Schematic diagram of the power and spectrum characteristic test system of VCSEL.

3.2 结果及讨论

VCSEL 在不同温度及不同电流下的光谱特性如图 5 所示. 图 5(a) 展示了 VCSEL 在 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 不同电流下的光谱, 当电流 $\leq 5 \text{ mA}$ 时, 器件能保持稳定的单模工作. 图 5(b) 展示了电流固定为 5 mA , 在不同温度下的器件光谱, 温度为 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 激光波长为 794.45 nm , 与设计的 λ_c 一致, 边模抑制比

(side-mode suppression ratio, SMSR) 为 41.68 dB. 图 6 为当温度为 80 °C 时, 电流在 2—5 mA 范围内, VCSEL 的近场光斑分布. 所有近场均呈单瓣类高斯分布, 进一步证明了 VCSEL 的单横模工作状态.

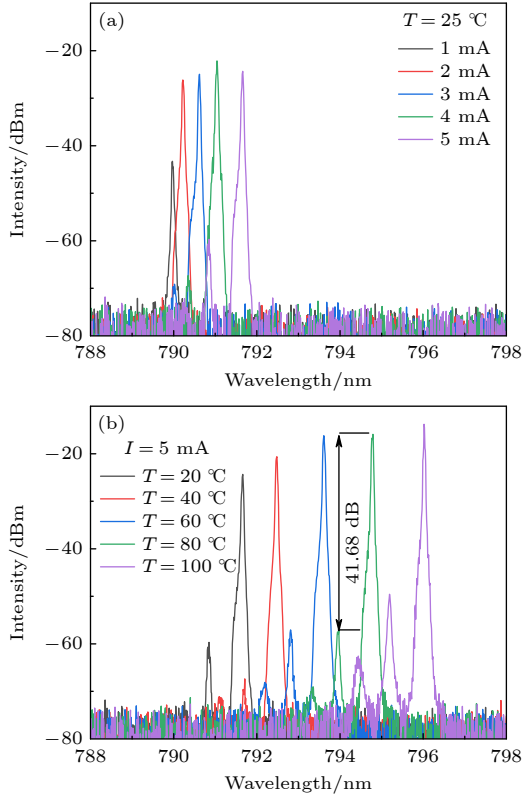


图 5 器件在不同电流 (a) 及不同温度 (b) 下的光谱特性
Fig. 5. Spectral characteristics of VCSELs with different injection current (a) and different temperature (b).

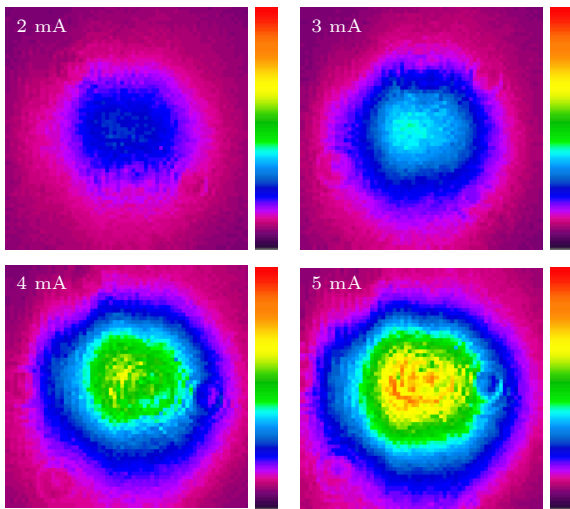


图 6 VCSEL 在 80 °C 下不同电流下的近场光斑
Fig. 6. Near field patterns of VCSEL under different current at 80 °C.

VCSEL 在不同温度下的功率-电流-电压特性如图 7(a) 所示. 随着温度从 25 °C 升高到 80 °C, 器件的斜率效率略有下降, 最大输出功率从 4.85 mW 下降到 4.1 mW. 根据电流-电压曲线拟合得到的器件的电阻值约为 50 Ω , 远小于传统结构采用小氧化孔径的 VCSEL 的电阻值, 这进一步证明了新结构中所采用的大氧化孔径可以降低器件电阻并增大光电转换效率. 新结构 VCSEL 的阈值电流高于传统小孔径 SM-VCSEL 的阈值电流, 后者的典型值小于 0.5 mA, 这是由于孔径面积的增大以及新设计引入了部分基模损耗. 与预期的设计结论不同的是, 该器件的阈值电流在 40 °C 时最小, 达到 0.89 mA, 在 80 °C 时增大到 1 mA, 如图 7(b) 所示. 按照理论设计的预测, 当温度范围为 80—90 °C 时, VCSEL 的腔模增益最大, 此时其阈值电流应该最小, 如图 2(b) 所示. 这种现象是由于高温下量子阱载流子限制的降低导致 VCSEL 的内部量子效率下降造成的.

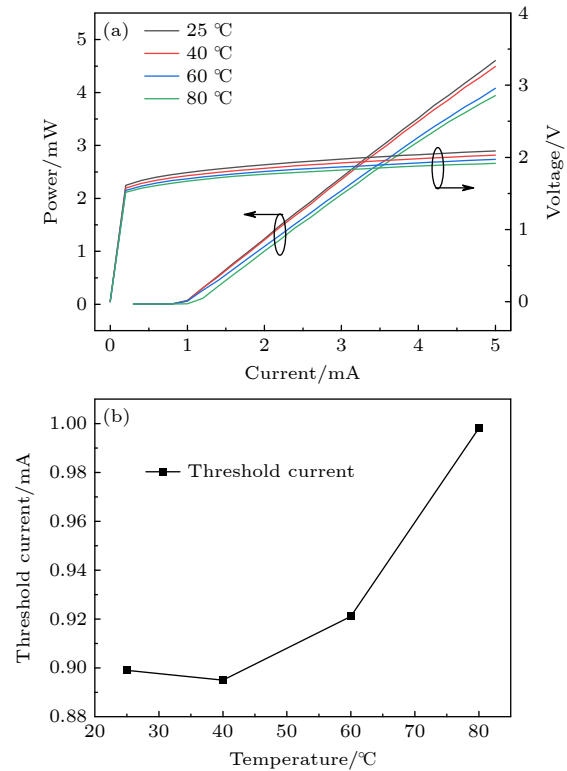


图 7 (a) VCSEL 的功率电流曲线; (b) 阈值电流随温度变化
Fig. 7. (a) Power-current characteristics of the device; (b) threshold current varying with temperature.

VCSEL 的偏振特性在原子传感应用中具有非常重要的意义 [29,30]. 一般情况下, VCSEL 的输出激光具有椭圆偏振特性, 沿着相互正交的两个偏振方向分别具有功率最大和最小值, 可称为 p-偏振

和 s-偏振. 图 8(a) 所示为器件沿两个正交偏振方向的输出功率. 计算得到的正交偏振抑制比 (orthogonal polarization rejection ratio, OPSR) 为 24.07 dB. 图 8(b) 显示了在 80 °C 和 5 mA 下的偏振分辨光谱. p-和 s-偏振模式的最大峰差为 27.46 dB. 这种高 OPSR 得益于新设计的 VCSEL 本身具有数量有限的可存在的横向模式数目以及高的输出功率.

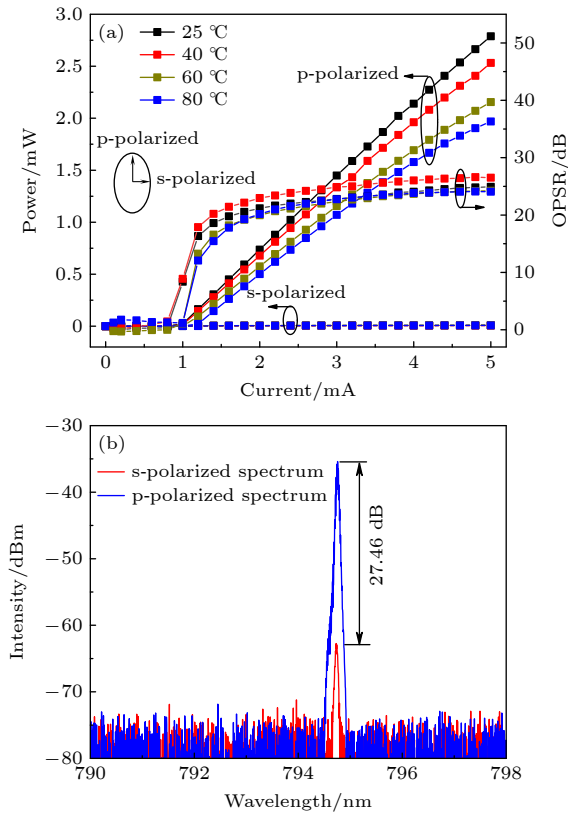


图 8 (a) VCSEL 的偏振功率曲线; (b) 80 °C, 5 mA 时的偏振光谱

Fig. 8. (a) Optical power of VCSEL in different polarization angles at 80 °C; (b) polarization-resolved spectrum of VCSEL at 80 °C and 5 mA.

3.3 应用验证

将新设计的 VCSEL 芯片集成到小型化的 NMRG 原型机中, 进一步研究 VCSEL 的性能, 并测试其原子极化率和磁强计灵敏度. 如图 9 所示, 实验装置由抽运激光器、探测激光器、光学元件、碱金属原子气室、烘箱、光电二极管探测器和线圈组成. 玻璃气室中含有碱金属原子 Rb 和 Xe 气体, N_2 为淬火气体, 4He 为缓冲气体. 采用四层圆柱形磁屏蔽减小外部磁场. NMRG 的工作原理见文献 [31].

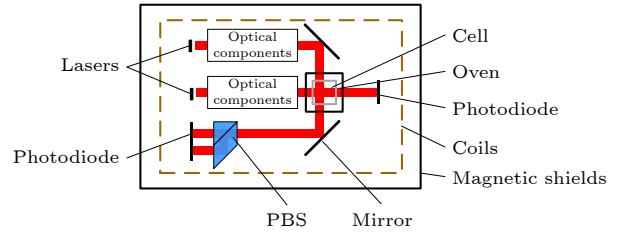


图 9 NMRG 系统原理图

Fig. 9. Diagram of the NMRG prototype.

原子自旋极化率直接影响着核磁共振陀螺的信噪比, 对陀螺的性能至关重要. 偏振度主要由抽运光源决定, 以保证其能反映光源的性能. 采用自由感应衰减法 (free induction decay signal, FID) 测定了核自旋极化. 施加 $\pi/2$ 脉冲驱动 Xe 原子后, Xe 原子的横向极化发生振荡并衰减. 根据磁强计的初始脉冲振幅和标度系数计算出核自旋极化值. 图 10 为测试的 Xe 原子的 FID 信号, 对比测试了商用 DBR 激光器和新设计的 VCSEL 激光器分别作为抽运光源时, 陀螺系统的 FID 信号, 计算得到采用商用 DBR 激光器, 系统的原子自旋极化率为 6%,

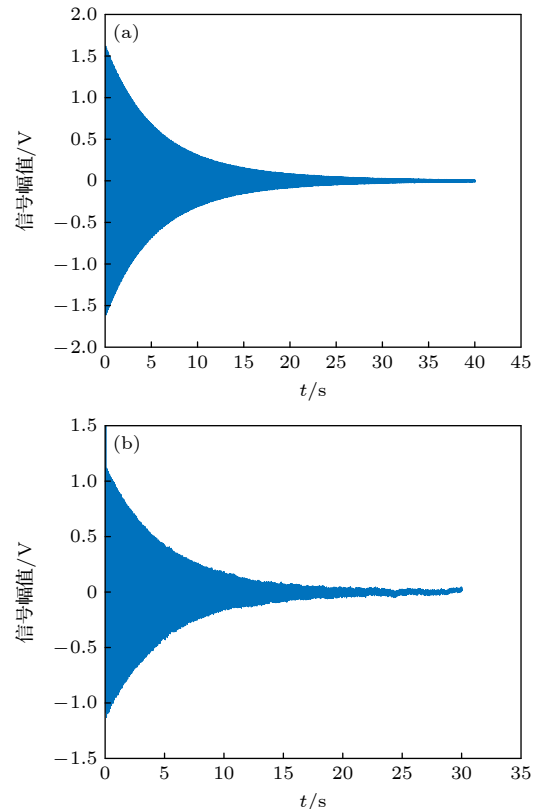


图 10 采用 (a) 商用 DBR 激光器和 (b) 新设计 VCSEL 激光器作为 NMRG 的抽运源测得的系统 FID 信号

Fig. 10. The FID signal of the NMRG system obtain by using (a) commercial DBR laser and (b) newly designed VCSEL laser as the pump source.

采用新设计 VCSEL, 系统的原子自旋极化率为 5%. 图 11 为分别采用两种激光器作为抽运光源, 测试的陀螺系统的信噪比, 采用商用 DBR 激光器, 系统的信噪比约为 60 dB, 采用新设计 VCSEL, 系统的信噪比约为 53 dB. 陀螺系统的这两组测试结果表明: 新设计的 VCSEL 已经可以满足 NMRG 的初步应用.

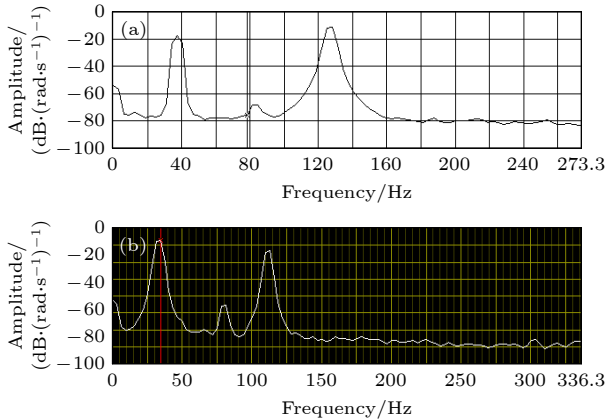


图 11 采用 (a) 商用 DBR 激光器和 (b) 新设计 VCSEL 激光器作为 NMRG 的抽运源测得的系统信噪比

Fig. 11. The signal-to-noise ratio of the NMRG system obtained by using (a) commercial DBR laser and (b) newly designed VCSEL laser as the pump source.

4 结 论

本文提出了一种具有大氧化孔径的 795 nm SM-VCSEL. 通过轻微地降低高铝氧化物层的厚度, 并将其适当地转移到远离有源腔的电场模式节点上, 可以实现大孔径 VCSEL 的单横模工作. 这种设计只需要修改少数的 p-DBR 对. 由于 VCSEL 中横模数量的显著减少和高模式损耗的引入, 使器件能保持高功率单横模工作. 在 80 °C 时, 最大输出功率为 4.1 mW, SMSR 为 41.68 dB. 良好的单色性也使 OPSR 值达到 27.46 dB. 在 NMRG 系统中的应用验证进一步证明了新设计的 VCSEL 的高性能.

参考文献

- [1] Larson A 2011 *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.* **17** 1552
- [2] Kasukawa A 2012 *IEEE Photonics J.* **4** 642
- [3] Kitching J 2018 *Appl. Phys. Rev.* **5** 031302
- [4] Knappe S, Gerginov V, Schwindt P D D, Shah V, Robinson H G, Hollberg L, Kitching J 2005 *Opt. Lett.* **30** 2351
- [5] Gruet F, Al-Samaneh A, Kroemer E, Bimboes L, Miletic D, Affolderbach C, Wahl D, Boudot R, Mileti G, Michalzik R

- 2013 *Opt. Express* **21** 5781
- [6] Maleev N A, Blokhin S A, Bobrov M A, et al. 2018 *Gyroscopy Navig.* **9** 177
- [7] Czyszanowski T, Dems M, Panajotov K 2007 *Opt. Express* **15** 5604
- [8] Baek J H, Song D S, Hwang I K, Lee K H, Lee Y H 2004 *Opt. Express* **12** 859
- [9] Furukawa A, Sasaki S, Hoshi M, Matsuzono A, Moritoh K, Baba T 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 5161
- [10] Shi J W, Wei Z R, Chi K L, Jiang J W, Wu J M, Lu I C, Chen J, Yang Y J 2013 *J. Lightwave Technol.* **31** 4037
- [11] Shi J W, Khan Z, Horng R H, Yeh H Y, Huang C K, Liu C Y, Shi J C, Chang Y H, Yen J L, Sheu J K 2020 *Opt. Lett.* **45** 4839
- [12] Haglund A, Gustavsson J S, Vukušić J, Modh P, Larsson A 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 368
- [13] Al-Samaneh A, Sanayeh M B, Miah M J, Schwarz W, Wahl D, Kern A, Michalzik R 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 171104
- [14] Gustavsson J, Haglund Å, Vukušić J, Bengtsson J, Jedrasik P, Larsson A 2005 *Opt. Express* **13** 6626
- [15] Serkland D K, Geib K M, Lutwak R, Garvey R M, Varghese M, Mescher M 2006 *Proc. SPIE* **6132** 613208
- [16] Ostermann J M, Debernardi P, Jalics C, Michalzik R 2005 *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **11** 107
- [17] Keeler G A, Geib K M, Serkland D K, Peake G M 2007 *VCSEL Polarization Control for Chip-scale Atomic Clocks*. (Sandia National Laboratories)
- [18] Wang Y, Cui B F, Fang T X 2017 *Optoelectronics* **7** 50 (in Chinese) [王阳, 崔碧峰, 房天啸 2017 光电子 **7** 50]
- [19] Zhang J, Ning Y Q, Zhang J W, Zhang X, Zeng Y G, Wang L J 2014 *Optics Precision Engineer.* **22** 50 (in Chinese) [张建, 宁永强, 张建伟, 张星, 曾玉刚, 王立军 2014 光学精密工程 **22** 50]
- [20] Zhang J W, Zhang X, Zhu H B, Zhang J, Ning Y Q, Qin L, Wang L J 2015 *Opt. Express* **23** 14763
- [21] Li X, Zhou Y L, Zhang X, Zhang J W, Zeng Y G, Ning Y Q, Wang L J 2022 *Appl. Phys. B* **128** 16
- [22] Pang W, Pan G Z, Wei Q H, Hu L C, Zhao Z Z, Xie Y Y 2020 *3rd International Conference on Electron Device and Mechanical Engineering (ICEDME)*, Suzhou, China, 2020 p573
- [23] Zhao J, Qin L, Yan S B, Ren X H 2009 *Int. Electr. Elem.* **17** 118 (in Chinese) [赵军, 秦丽, 闫树斌, 任小红 2009 电子设计工程 **17** 118]
- [24] Zhang J Y, Zhang J W, Zhang X, Zhou Y L, Huang Y W, Ning Y Q, Zhu H B, Zhang J, Zeng Y G, Wang L J 2021 *Opt. Laser Technol.* **139** 106948
- [25] Hadley G R 1995 *Opt. Lett.* **20** 1483
- [26] Chiang K S 1996 *IEEE. Trans. Microw. Theory Tech.* **44** 692
- [27] Shi Y C, Dai D X, He S L 2005 *Acta Optica Sinica* **25** 51 (in Chinese) [时尧成, 戴道铎, 何赛灵 2005 光学学报 **25** 51]
- [28] Michalzik R 2013 *Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers* (Ulm, Germany: Springer Series in Optical Sciences) p124
- [29] Al-Samaneh A, Bou Sanayeh M, Renz S, Wahl D, Michalzik R 2011 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **23** 1049
- [30] Gruet F, Al-Samaneh A, Kroemer E, Bimboes L, Miletic D, Affolderbach C, Wahl D, Boudot R, Mileti G, Michalzik R 2013 *Optics Express* **21** 5781
- [31] Chen L L, Zhou B Q, Lei G Q, Wu W F, Zhai Y Y, Wang Z, Fang J C. 2017 *AIP Adv.* **7** 115101

795-nm high-temperature and high-power operating vertical-cavity surface-emitting laser and application in atomic gyroscope*

Zhou Yin-Li¹⁾ Jia Yu-Chen²⁾ Zhang Xing^{1)3)†} Zhang Jian-Wei¹⁾
Liu Zhan-Chao^{2)‡} Ning Yong-Qiang¹⁾ Wang Li-Jun¹⁾

1) (*State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

2) (*Beihang University, Beijing 100191, China*)

3) (*Ace Photonics, Co., Ltd., Changchun 130102, China*)

(Received 30 December 2021; revised manuscript received 18 February 2022)

Abstract

Single-transverse mode vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) are preferable optical sources for small low-power atomic sensors, including chip-scale atomic clocks, magnetometers, and gyroscopes. When VCSEL is used as the pump source of nuclear magnetic resonance gyroscope, it is required to have high single-mode output power. Oxide aperture diameter must be sufficiently small ($< 4 \mu\text{m}$) in a conventional oxide-confined VCSEL to support the fundamental mode alone. However, high series resistance (typically $> 200 \Omega$ for GaAs-based VCSEL) from the small aperture limits its output power and reliability due to excessive current-induced self-heating and high current density. It is a very attractive idea to achieve high power operation of an intrinsic single mode VCSEL based on a large oxide aperture by means of epitaxial structure design without introducing additional process steps. Transverse optical confinement in oxide-confined VCSELs crucially depends on the thickness of oxide layer and its position relative to standing wave. Modifying the structure reduces the overlap between the oxide layer and the standing wave as well as the difference in effective refractive index between core and cladding of the VCSEL, thereby reducing the number of transverse modes and increasing the mode extension beyond oxide aperture. A 795-nm VCSEL is designed and fabricated based on this concept. A cavity structure of VCSEL with gain-cavity detuning of $\sim 10.8 \text{ nm}$ at room temperature is adopted in this paper. The effective refractive index and the standing wave distribution of the VCSEL are calculated, and the position of the oxide layer in the epitaxial structure of the VCSEL is optimized according to the standing wave distribution. Finally, the structure with low effective refractive index difference is obtained. The proposed device achieves high single-mode operation of 4.1 mW at 80°C , SMSR of 41.68 dB , and OPSR of 27.4 dB . The VCSEL is applied to a nuclear magnetic resonance gyroscope (NMRG) system as pump source due to its excellent device performance, and satisfactory test results are obtained. This paper presents a new method of designing single-mode high power VCSEL and its feasibility is also demonstrated through experimental results.

Keywords: vertical cavity surface-emitting semiconductor laser, large oxide aperture, single fundamental mode, nuclear magnetic resonance gyroscope

PACS: 42.55.Px, 42.62.-b

DOI: 10.7498/aps.71.20212422

* Project supported by National Key Research and Development Program (Grant No. 2018YFB2002400), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61804151, 62090060, 61874117, 11774343, 61874119), and the Science and Technology Development Project of Jilin Province (Grant No. 20200401006GX).

† Corresponding author. E-mail: zhangx@ciomp.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: liuzhanchao@hotmail.com