

894 nm 高温垂直腔面发射激光器及其芯片级铯原子钟系统的应用

张星 张奕 张建伟 张建 钟础宇 黄佑文 宁永强 顾思洪 王立军

894 nm high temperature operating vertical-cavity surface-emitting laser and its application in Cs chip-scale atomic-clock system

Zhang Xing Zhang Yi Zhang Jian-Wei Zhang Jian Zhong Chu-Yu Huang You-Wen Ning Yong-Qiang Gu Si-Hong Wang Li-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 134204 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.134204

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.134204>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I13>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

1550nm 垂直腔面发射激光器自旋反转模型中关键参量数值的实验确定

Experimental determination of key parameters in the spin-flip model of 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser

物理学报.2016, 65(12): 124203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.124203>

基于有机半导体激光材料的高灵敏度溶液检测传感器件

A highly sensitive chemosensor for solution based on organic semiconductor laser gain media

物理学报.2016, 65(6): 064202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.064202>

光反馈诱发长波长垂直腔面发射激光器低功耗偏振开关

Polarization switching with low power consumption induced by optical feedback in long-wavelength vertical-cavity surface-emitting lasers

物理学报.2016, 65(2): 024204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024204>

基于平行偏振光注入的 1550nm 波段垂直腔表面发射激光器获取窄线宽光子微波的理论和实验研究

Theoretical and experimental investigation on the narrow-linewidth photonic microwave generation based on parallel polarized optically injected 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser

物理学报.2016, 65(1): 014207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014207>

锥形太赫兹量子级联激光器输出功率与光束特性研究

Analyses of the output power and beam quality of the tapered terahertz quantum cascade lasers

物理学报.2015, 64(22): 224212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.224212>

894 nm高温垂直腔面发射激光器及其芯片级铯原子钟系统的应用*

张星¹⁾ 张奕²⁾ 张建伟^{1)†} 张建¹⁾ 钟础宇¹⁾³⁾ 黄佑文¹⁾³⁾ 宁永强¹⁾
顾思洪²⁾ 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) (中国科学院武汉物理与数学研究所, 中国科学院原子频标重点实验室, 武汉 430071)

3) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2016年3月4日收到; 2016年4月20日收到修改稿)

报道了自行研制的894 nm高温垂直腔面发射激光器(VCSEL)以及基于此类器件的芯片级铯原子钟系统的应用实验结果. 根据芯片级铯原子钟对VCSEL在特定高温环境下产生894.6 nm线偏振激光的要求, 对器件的量子阱增益及腔模位置等材料结构参数进行了优化, 确定增益-腔模失谐量为 -15 nm, 使器件的基本性能在高温环境下保持稳定. 研制的VCSEL器件指标为: 20—90 °C温度范围内阈值电流保持在0.20—0.23 mA, 0.5 mA工作电流下输出功率 > 0.1 mW; 85.6 °C温度环境下激光波长894.6 nm, 偏振选择比59.8 : 1; 采用所研制的VCSEL与铯原子作用, 获得了芯片级铯原子钟实施激光频率稳频的吸收谱线和实施微波频率稳频的相干布居囚禁谱线.

关键词: 垂直腔面发射激光器, 芯片级原子钟, 高温, 相干布居囚禁

PACS: 42.55.Px, 42.62.Fi, 42.50.Gy

DOI: 10.7498/aps.65.134204

1 引言

垂直腔面发射激光器(vertical-cavity surface-emitting lasers, VCSEL)是半导体激光器家族的重要成员^[1-5]. VCSEL能够通过芯片表面发射出易于整形的圆形对称激光光束, 并同时具有低阈值电流、单纵模以及响应频带宽等优点, 已经在通信、照明及传感等领域获得大规模应用^[6-8]. 近年来, 基于VCSEL以及微机械(micro-electromechanical system, MEMS)技术的芯片级原子钟(chip scale atomic clock, CSAC)成为原子频标技术的一个重要发展方向^[9-15]. 传统的原子钟体积大、功耗高, 最小的谱灯抽运气泡型铷钟体积也在的 10 cm³, 功

耗的 10 W水平, 偏大的体积、功耗限制了其应用领域的进一步扩展. CSAC具有明显的体积、功耗优势, 体积 1 cm³, 功耗 30 mW的CSAC实验室原理样机已经实现^[16], 体积 16 cm³, 功耗 120 mW的CSAC产品已获广泛应用^[17].

目前的CSAC均是微小型化的相干布居囚禁(coherent population trapping, CPT)原子钟. CPT原子钟用碱金属原子, 通常是铷或铯原子作为工作原子, 用双色光与碱金属原子作用获得实施微波频率稳频的CPT谱线^[15]. CSAC均采用VCSEL作为光源器件, 利用VCSEL响应的频率范围可达到 >20 GHz^[18]的优点, 通过微波调制VCSEL使它输出调频多色光, 用其中的 ± 1 边带作为所需

* 国家自然科学基金(批准号: 61434005, 61474118, 11304362)、国家科技重大专项(批准号: 2014ZX04001151)、吉林省科技发展计划项目(批准号: 20150203011GX, 20140101203JC)和长春市科技计划项目(批准号: 14KG006, 15SS02, 13KG22)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zjw1985@ciomp.ac.cn

的双色光与碱原子作用获得CPT谱线. 除了频率响应范围宽, CSAC所用VCSEL还需具备一些其他特性, 包括工作于芯片物理系统(80—90 °C)的高温环境, 产生激光的阈值电流低, 输出激光波长满足特定要求(铷约795 nm, 铯约894 nm), 且需要是较理想的线偏振光等.

美国国防部先进研究项目局从2002年开始的多期CSAC项目均明确部署了专用VCSEL的研制计划, 在该计划支持下, 美国Sandia国家实验室、Princeton Optronics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^[19]; 欧盟从2008年开始研发针对芯片级铯原子钟应用的VCSEL, 并报道了相关结果^[17,20,21]. 总的来看, 目前国外无论在芯片级原子钟还是其专用VCSEL方面均已取得较大进展.

国内方面, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所从2011年开始在中国科学院武汉物理与数学研究所CSAC项目的牵引下开展专用VCSEL器件的研制工作, 分别针对铷CSAC和铯CSAC, 研制成功了专用VCSEL原型器件, 并报道了相关研究成果^[22–24]. 本文介绍所研制的铯CSAC专用VCSEL器件方面取得的最新进展, 以及与中国科学院武汉物理与数学研究所合作将所研制VCSEL用于铯CSAC系统所获得的实验结果.

2 894 nm VCSEL 结构优化

2.1 VCSEL 器件结构示意图

本文研制的894 nm VCSEL器件结构如图1所示, 该器件的外延材料是由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的AIXTRON200/4型金属有机化合物气相沉积设备生长而成. 根据器件高温低阈值电流的要求, 有源区选用了增益特性和热稳定

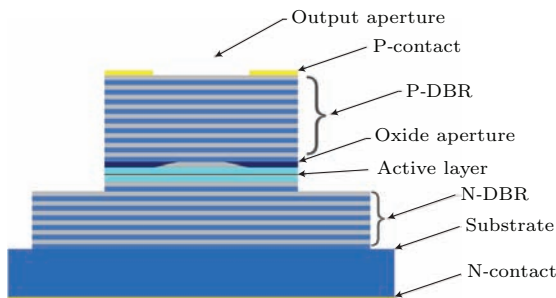


图1 (网刊彩色) 894 nm VCSEL 器件结构示意图

Fig. 1. (color online) Schematic of 894 nm VCSEL.

性较好的InGaAs/AlGaAs量子阱, N型分布布拉格反射镜(N-DBR)和P型分布布拉格反射镜(P-DBR)为多层AlGaAs/GaAs, 在P-DBR与空间层之间生长了厚度为30 nm的Al_{0.98}GaAs层用于制作氧化限制层.

2.2 VCSEL 器件结构设计理论

2.2.1 VCSEL 量子阱增益计算

量子阱的子能带结构计算采用Chuang等^[25]提出的应变量子阱 $k \cdot p$ 微扰理论并考虑价带的能级混合效应. 由于价带混合效应中能带不能够采用抛物线近似, 因而基于Chuang等^[26]发展的量子阱计算理论, 多量子阱发光区的增益光谱可以用对波矢量 k_t 的积分表示:

$$g(E) = \frac{g_0}{2\pi t E} \sum_{i,j} \int_0^\infty (\pi/\Gamma) f_{\text{dip}}(k_t) \times M_b(f_j - f_i) dk_t^2 \times \left[1 + \frac{(E_{c_j}(k_t) - E_{k_{pi}}(k_t) - E)^2}{\Gamma^2} \right]^{-1}, \quad (1)$$

其中 t 为量子阱厚度; $\Gamma = h/\tau_{\text{scat}}$ 是由于能带散射弛豫导致的能级展宽效应; E_{c_j} 及 $E_{k_{pi}}$ 分别是第 j 个导带以及第 i 个价带子能带能级; M_b 是材料的体偶极动量, f_j 及 f_i 分别是材料导带及价带的费米能级. g_0 为增益常数, 其表达式为

$$g_0 = \frac{\pi q^2 h}{\epsilon_0 c m_0^2 n}, \quad (2)$$

其中 q 为自由电子电荷, n 为有效折射率实部, m_0 为有效质量.

为实现VCSEL的低阈值工作, 需要优化其的阈值增益特性. 阈值增益是指激光器在激射临界点时所获得的材料增益, 该增益等于激射临界状态时的材料吸收、散射及衍射等光学损耗, 获得该增益所需的量子阱载流子密度称之为透明载流子密度. 阈值增益表达式如下^[27]:

$$g_{\text{th}} = \alpha_a + \frac{1}{\Gamma_r d_a} \left[\alpha_i (L - d_a) + \ln \frac{1}{\sqrt{R_t R_b}} \right], \quad (3)$$

其中 α_a , α_i 为材料吸收及内部光学损耗; R_t 及 R_b 分别为出光面及高反面DBR的反射率; L 及 d_a 分别为发光区有效长度及有源区的厚度; Γ_r 为发光区的光学限制因子, 其定义为光场强度 E 在量子阱分

布占在整个结构中分布的比例:

$$\Gamma_r = \frac{\int_{d_a} |E(z)|^2 dz}{\int_L |E(z)|^2 dz}. \quad (4)$$

2.2.2 腔模理论计算

VCSEL 输出激光的波长主要由其腔模决定, 通过传输矩阵理论计算 VCSEL 整体结构的反射谱可以得到腔模位置. 对于多层材料层结构, 光通过 k 层材料层的传输矩阵可表达为 [28]

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos(\delta_j) & \frac{i}{n_j} \sin(\delta_j) \\ in_j \sin(\delta_j) & \cos(\delta_j) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ n_{k+1} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 B, C 为传输矩阵元, n_j 和 δ_j 分别为第 j 层的折射率及通过该层后光场所产生的相位变化, n_{k+1} 为出射介质的折射率. 光场正入射通过第 j 层材料的相位变化为

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} \left(n_j + i \frac{\alpha_j \lambda}{4\pi} \right) d_j, \quad (6)$$

其中 n_j, α_j, d_j 分别为第 j 层材料的光学折射率、吸收系数及其物理厚度. 多层材料层的反射率可用传输矩阵元表示为

$$R = \frac{(n_0 B - C)(n_0 B - C)^*}{(n_0 B + C)(n_0 B + C)^*}, \quad (7)$$

式中 n_0 为入射介质的折射率. 由该公式可以计算出在各个不同波长的反射率特性并得出 VCSEL 的反射谱, 进而获得其腔模位置; 将入射光场的强度矩阵归一化后, 利用传输矩阵理论可以得出器件内部各个位置的光场分布情况, 从而推算出有源区的光场限制因子.

2.3 VCSEL 器件结构优化结果

根据 2.2 节中的耦合量子阱材料的增益理论模型计算公式, 采用加拿大 CROSSLIGHT 公司的 PICS3D 软件计算了量子阱室温下的增益峰值波长相同时不同厚度量子阱的材料增益随注入载流子密度的变化关系, 如图 2 所示. 可见当量子阱厚度在 4 nm 时, 随载流子密度的增加, 增益-载流子密度关系曲线有一个明显的弯折, 这是由于超薄量子阱第一子能级易于出现增益饱和, 载流子密度较高时会占据第二量子化能级位置. 随着量子阱厚度的增加, 获得材料增益所需的载流子密度也在不断

降低, 但是材料增益曲线斜率却在不断下降, 也更容易出现增益饱和现象. 因而, 量子阱过薄或者过厚均会影响到发光区的增益特性, 难以保证器件稳定工作.

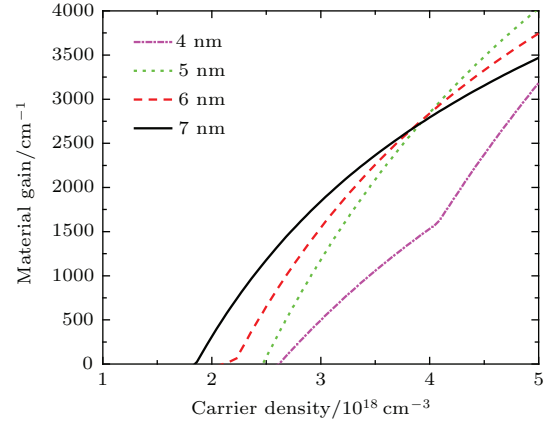


图 2 (网刊彩色) 不同厚度量子阱材料增益随发光区载流子密度变化关系. 根据器件高温工作的要求, 不同厚度的量子阱室温增益谱峰值波长均设计在 875 nm 波段

Fig. 2. (color online) The peak material gain of InGaAs QWs providing the gain peak wavelength of 875 nm as a function of carrier density at RT.

为保证 VCSEL 的低阈值电流工作, 根据发光区的阈值增益特性对量子阱进行进一步优化. 采用传输矩阵理论计算 VCSEL 器件内部光场分布特性并依据光场分布分析光场限制因子及阈值增益特性, 得到的器件阈值增益以及与阈值增益相对应的量子阱内部载流子密度随量子阱厚度的变化关系, 如图 3 所示. 由于量子阱厚度的增加引起了器件光场限制因子增加, 因此随着量子阱厚度的增加器件的阈值增益不断降低, 这与 (3) 式阈值增益反比于光场限制因子的结论相一致. 但是图 3 中不同量子阱厚度下材料阈值增益所需的载流子密度 (透明载流子密度) 随量子阱厚度呈现出非线性关系. 随量子阱厚度的增加, 透明载流子密度先降低后增加, 这是由于量子阱厚度降低至 5 nm 以下时, 由于载流子限制因子的下降, (3) 式中的阈值增益增加, 达到阈值所需的载流子密度也随之增加; 而当量子阱厚度大于 5—7 nm 时, 虽然载流子限制因子会增加, 但是由于厚量子阱的增益饱和效应 (见图 2 中不同量子阱厚度下的增益-载流子关系), 达到阈值增益所需的载流子密度也会增加. 综上所述, 当量子阱厚度在 5—7 nm 时, 器件具有最低的透明载流子密度.

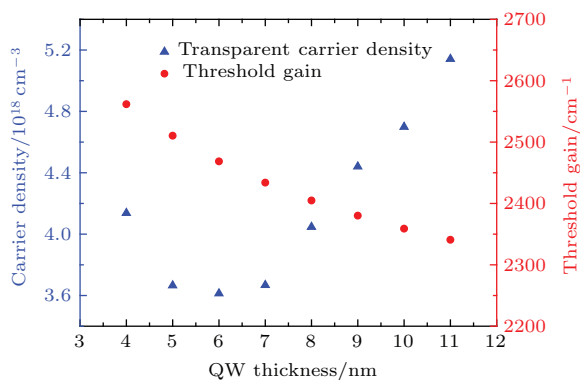


图3 (网刊彩色) 室温增益谱峰值波长在 875 nm 波段的 InGaAs/AlGaAs 发光区阈值增益及透明载流子密度随量子阱厚度的变化

Fig. 3. (color online) The changing of threshold gain and the corresponding transparent carrier density with the thickness of InGaAs/AlGaAs quantum wells (QWs). The gain peak of QWs was kept at 875 nm.

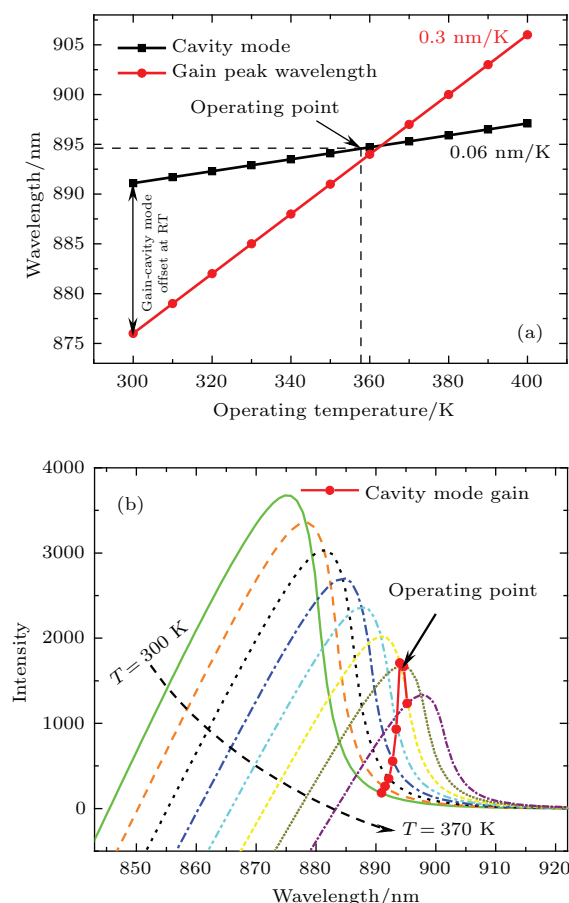


图4 (网刊彩色) (a) 室温增益-腔模失谐量在 15 nm 的 VCSEL 器件增益峰值波长与腔模随温度漂移情况; (b) 发光区增益谱及与腔模对应的光增益随工作温度的漂移情况

Fig. 4. (color online) (a) The changing of gain peak wavelength and cavity mode with the temperature and (b) the changing of gain spectra of active region with the temperature. The cavity-mode gain at different temperatures was also indicated in Fig. (b).

由于腔模的温漂速度 $0.06 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 远远小于量子阱增益峰值波长温漂速度 $0.3 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 为实现 VCSEL 在一定高温环境下的稳定工作, 采用了增益-腔模失谐设计, 即器件的量子阱增益峰值在室温下相对其腔模位置蓝移的方法来使其在高温环境下性能保持稳定. 图 4 为理论模拟的增益-腔模失谐量为 -15 nm 的 VCSEL 器件量子阱增益及腔模随工作温度的变化关系. 由图 4(a) 中可以看出, 由于增益峰值波长具有大的温漂速率, 量子阱的增益峰值波长随着温度增加先靠近腔模并与腔模相交, 当温度继续增加, 增益峰值波长与腔模的失配量也随之增加. 由于增益谱及腔模的温度漂移, 图 4(b) 考虑了量子阱增益随温度的变化, 可见腔模对应的增益出现了先增加后降低的趋势, 本设计中选择 -15 nm 失配量能够保证 VCSEL 器件的腔模增益在 $80\text{--}90 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度区间保持在较高水平, 因此能够确保器件性能的稳定.

3 器件制备与测试结果

综上所述, 我们获得了适合 CSAC 应用的高温工作 VCSEL 结构, 随后开展了具体的 VCSEL 器件的制备工艺: 采用电感耦合等离子体 (ICP) 刻蚀设备在外延片 P 面刻蚀出圆形台面结构, 随后在 $440 \text{ }^\circ\text{C}$ 水蒸气环境中通过湿法氧化形成氧化孔径, 通过精确控制工艺条件, 可将氧化精确度控制在 $\pm 1 \text{ }\mu\text{m}$ 以内. 采用等离子体增强气相沉积法生长 Si_3N_4 对台面侧壁进行绝缘钝化后, 刻蚀掉台面上的部分 Si_3N_4 , 采用 Lift-off 工艺制备器件发光窗口, 对器件 N 面进行减薄抛光及金属生长, 进行快速热处理以形成 N 面和 P 面的电极欧姆接触.

我们测试了研制的 VCSEL 器件在不同温度条件下的电流-功率特性, 以评估工作温度对器件阈值电流和输出功率等基本器件特性的影响, 测试中采用了美国 THORLABS 公司的 LDC201CU 电流控制器 (0.05 mA 分辨率) 以及 TED200C 温度控制器 ($0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 分辨率). 图 5 所示是工作温度在 $20\text{--}90 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间变化时测试获得的电流-功率曲线. 从图中可见, 得益于增益-腔模失配材料结构, 器件的阈值电流在温度上升过程中维持在 $0.20\text{--}0.23 \text{ mA}$ 之间, 在 $20\text{--}90 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内器件的输出功率在注入电流 $> 0.5 \text{ mA}$ 条件下均达到 0.1 mW 以上, 说明研制的 VCSEL 器件的高温工作

特性与室温相比未发生明显衰退,基本保持稳定.

除了输出特性的稳定以外,在80—90 °C之间达到894.6 nm是铯CSAC专用VCSEL必须具备的性能.对此,我们采用日本恒河AQ6370C光谱分析仪对器件在不同温度下的光谱特性进行了测试.图6所示是驱动电流为0.5 mA时,器件在20.0 °C以及85.6 °C温度环境下的激光光谱,从图6中可见器件在室温环境下的输出的激光中心波长为890.4 nm,在85.6 °C高温环境下激光波长达到铯原子钟应用需要的894.6 nm,波长的温度漂移系数为0.064 nm/°C.

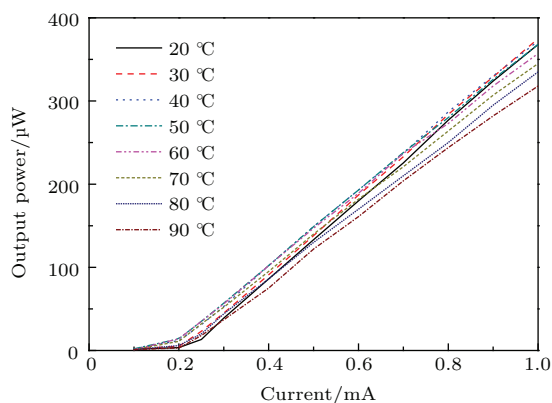


图5 (网刊彩色) 894 nm VCSEL 变温输出特性曲线
Fig. 5. (color online) Light-current characteristics of 894 nm VCSEL under different operating temperature conditions.

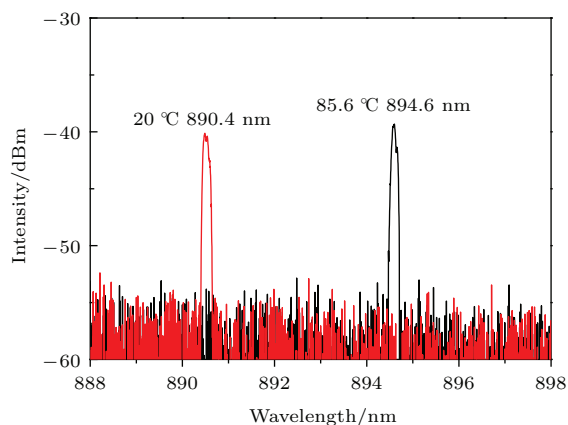


图6 (网刊彩色) 894 nm VCSEL 在20.0 °C及85.6 °C温度环境下的输出光谱
Fig. 6. (color online) The output spectrum of the VCSEL under temperature of 20 °C and 85.6 °C.

VCSEL输出激光是否为单一偏振是其能否用于原子钟的另一关键性能.我们采用激光通过选偏器后测量功率极值的方法对所研制器件在

20.0 °C以及85.6 °C条件下的偏振性能进行了测试,图7所示是在两种温度条件下测得的两个偏振方向上的电流-功率曲线.需要特别说明的是,此时测得器件的输出功率与图1中相比有所降低,这是由测试装置的损耗导致的.从图7中可见,在两种温度条件下器件输出激光基本为单一偏振态:在注入电流为1 mA时,20 °C测得的 P_{\max} 为278.2 μ W, P_{\min} 为5.9 μ W,此时的偏振比为47 : 1;85.6 °C测得的 P_{\max} 为239.2 μ W, P_{\min} 为4 μ W,此时的偏振比为59.8 : 1.偏振性能的测试结果说明研制的VCSEL输出的是较理想的线偏振激光.

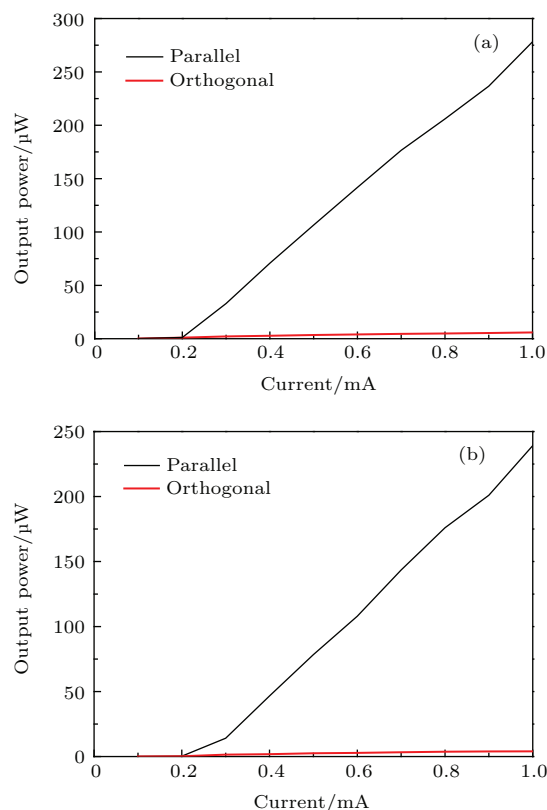


图7 (网刊彩色) VCSEL 器件在(a) 20.0 °C及(b) 85.6 °C工作温度下的偏振输出特性
Fig. 7. (color online) Polarization-resolved operation characteristics of the VCSEL device under 20 °C and 85.6 °C.

4 铯CSAC系统实验研究

CSAC用微波调制VCSEL获得调频多色激光输出,通过合适地控制VCSEL使其中两个频率成分构成所需的双色光,这两个频率成分与铯原子作用就能产生CPT谱线.对用铯作为工作原子CSAC,所用微波的频率可以是9.192 GHz(全波调制),或4.596 GHz(半波调制).采用半波调制效果

更好, 本文所提到的 CSAC 样机和产品都是采用半波调制方案.

采用微波调制 VCSEL 方案, 使用一个 VCSEL 芯片就能提供双色激光, 将它与原子气室、光电探测器、光学等芯片器件通过 MEMS 技术可以集成为芯片级物理系统. 所集成出的芯片级物理系统体积仅 10 mm^3 量级, VCSEL 与铯气室封装在一起, 因此要求 VCSEL 能够工作于铯气室的 $80\text{--}90 \text{ }^\circ\text{C}$ 环境中. 将芯片级物理系统与芯片级原子钟电路组装就成为 CSAC.

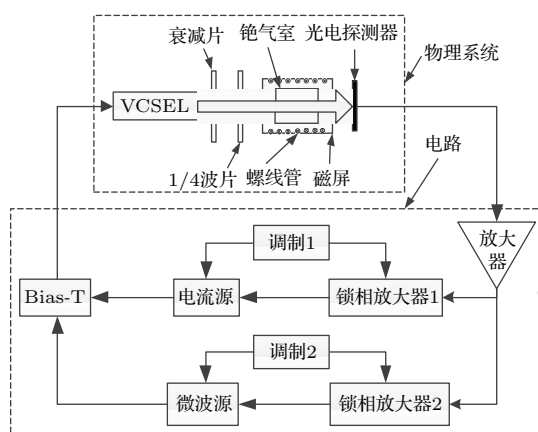


图 8 铯 CSAC 实验系统装置示意图

Fig. 8. Schematic of cesium CSAC experiment setup.

针对 CSAC 应用开展 VCSEL 性能测试研究的实验系统如图 8 所示, 直流电流与微波经 Bias-T 耦合后输入 VCSEL, 在这种电流驱动下 VCSEL 输出调频多色激光. 通过合适地控制直流电流和微波的强度使 ± 1 级边带两频率分量的光功率尽量大, 实验中两频率分量的功率约达多色光总功率的 60%. 衰减片将光束衰减至合适的强度, 线偏振光经四分之一波片转换成圆偏振光, 圆偏振双色光与铯原子 CPT 共振, 光电探测器将透射光转换为光电信号. 为了实现 CPT 原子钟不仅需要获得用于实现微波频率稳频的 CPT 谱线, 还需实现激光频率稳频. CSAC 采用铯原子多色激光的吸收谱线实现激光频率稳频. 图 9 是改变驱动电流的直流电流强度, 同步从放大器的输出信号中提取出的铯原子对多色光的吸收信号实验记录的吸收谱, 其中幅度最大的吸收谱线是铯原子对 ± 1 级边带频率成分的吸收谱线. 为了实现激光频率稳频, 实验中采用 CSAC 的工作方式对驱动电流作低频调制, 通过锁相放大器 1 做相敏解调, 将图 9 谱线转换为微分形式的谱

线, 利用微分谱线对 VCSEL 实施电流负反馈, 将激光频率稳在图 9 幅度最大吸收谱线的极小值处.

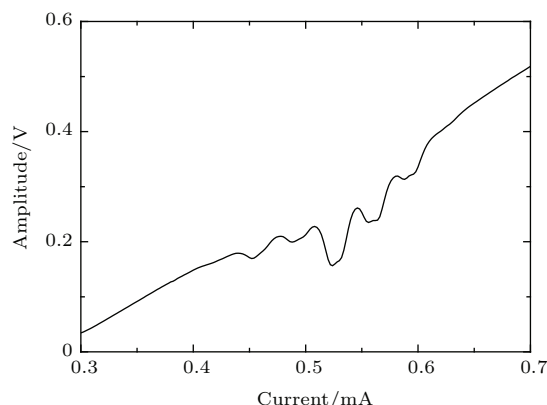


图 9 实测铯原子对多色光的吸收谱

Fig. 9. cesium atomic absorption spectrum toward the multichromatic laser.

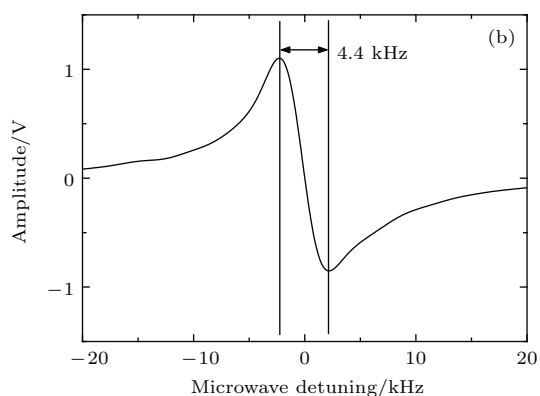
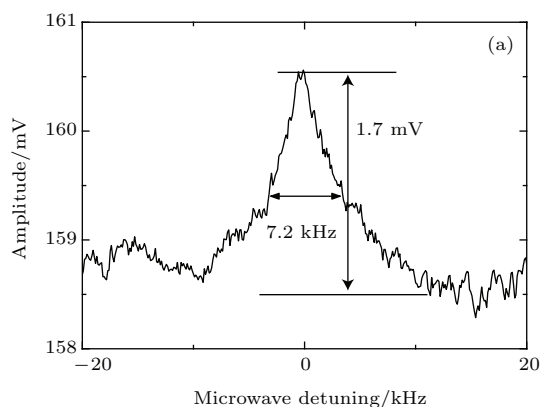


图 10 (a) CPT 谱线, CPT 谱线信号幅度为 1.7 mV, 本底信号强度 159 mV; (b) 微分形式的 CPT 谱线

Fig. 10. (a) The CPT spectral line, the amplitude spectral line is 1.7 mV with background of 159 mV; (b) the differential style CPT spectral line.

在激光频率实现稳频的条件下, 改变微波频率, 实验记录到图 10 (a) CPT 谱线. 为了实现微波频率稳频, 如图 8 所示对微波频率也施加了低频调

制, 通过锁相放大器2做相敏解调获得图 10(b) 所示的微分形式的 CPT 谱线. 用微分形式的 CPT 谱线信号作为微波频率纠偏信号, 实验中通过将负反馈电压施加至微波源而实现将微波频率稳频于 CPT 共振处, 即图 10(a) CPT 谱线信号的峰值处. 这样, 我们将所研制的 VCSEL 应用于 CSAC 实验系统, 实现了闭环锁频原子钟.

5 结 论

针对铯 CSAC 对专用 VCSEL 器件在特定高温环境下输出特定波长线偏振激光的要求, 采用增益-腔模失谐量 -15 nm 的材料结构, 使 VCSEL 在宽工作温度范围内阈值电流和输出功率保持相对稳定; 同时通过精确控制器件工艺参数获得了高性能的 VCSEL 器件. 对所研制器件的测试分析结果表明, 其阈值电流和输出功率在高温环境下的稳定性达到了结构设计的预期; 应用于铯 CSAC 实验研究实现锁频原子钟的 VCSEL 器件工作于 0.5 mA 驱动电流下, 满足 CSAC 对低功耗的要求; 研制的 894 nm VCSEL 能够在特定高温环境中提供所要求的波长激光, 频率响应特性和光的偏振特性也满足铯 CSAC 的要求. 最后, 我们基于本文研制的 VCSEL 器件开展的铯 CSAC 系统实验成功实现了闭环锁频原子钟, 从实验上证明了此类器件用于 CSAC 的可行性.

参考文献

- [1] Iga K, Koyama F, Kinoshita S 1988 *IEEE J. Quantum Electron.* **24** 1845
- [2] Choquette K D, Hou H Q 1997 *Proc. IEEE* **85** 1730
- [3] Koyama F 2008 *Proc. SPIE* **7135** 71350J
- [4] Fryslije S T M, Choquette K D 2015 *IEEE Photon. J.* **7** 1
- [5] Guan B L, Liu X, Jiang X W, Liu C, Xu C 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 164203 (in Chinese) [关宝璐, 刘欣, 江孝伟, 刘储, 徐晨 2015 物理学报 **64** 164203]
- [6] Larsson A 2011 *IEEE J. Select. Top. Quantum. Electron.* **17** 1552
- [7] Crowley M T, Kovanis V, Lester L F 2012 *IEEE Photon. J.* **4** 565
- [8] Jensen J B, Rodes R, Caballero A, Ning C, Zibar D, Monroy I T 2014 *IEEE/OSA J. Lightwave Tech.* **32** 1423
- [9] Nguyen C T 2007 *IEEE Trans. Ultrason. Ferro. Freq. Control* **54** 251
- [10] Geppert L 2005 *IEEE Spect.* **42** 20
- [11] Knappe S, Schwindt P D D, Gerginov V, Shah V, Liew L, Moreland J, Robinson H G, Hollberg L, Kitching J 2006 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **8** S318
- [12] Douahi A, Nieradko L, Beugnot J C, Dziuban J, Maillole H, Guerandel S, Moraja M, Gorecki C, Giordano V 2007 *Electron. Lett.* **43** 33
- [13] Pétremand Y, Affolderbach C, Straessle R, Pellaton M, Briand D, Mileti G, Rooij N F D 2012 *J. Micromech. Microeng.* **22** 025013
- [14] Ermak S V, Semenov V V, Piatyshev E N, Kazakin A N, Komarevtsev I M, Velichko E N, Davydov V V, Petrenko M V 2015 *St. Petersburg Polytech. Univ. J. Phys. Math.* **1** 37
- [15] Vanier J 2005 *Appl. Phys. B: Laser. Opt.* **81** 421
- [16] DeNatale J F, Borwick R L, Tsai C, Stupar P A 2008 *Proceedings of 2008 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium* Monterey, California, USA, May 5–8, 2008 p67
- [17] Lutwak R 2009 *Proceedings of 2009 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 22nd European Frequency and Time Forum* Besançon, France, April 20–24, 2009 p573
- [18] Blokhin S A, Lott J A, Ledentsov N N, Bimberg D 2011 *Proceedings of 2011 Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition* Shanghai, China, November 13–16, 2011 p1
- [19] Serkland D K, Geib K M, Lutwak R, Garvey R M, Varghese M, Mescher M 2006 *Proc. SPIE* **6132** 613208
- [20] Al-Samaneh A, Bou Sanayeh M, Renz S, Wahl D, Michalzick R 2011 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **23** 1049
- [21] Gruet F, Al-Samaneh A, Kroemer E, Bimboes L, Mileti D, Affolderbach C, Wahl D, Boudot R 2013 *Opt. Express* **21** 5781
- [22] Zhang J, Ning Y Q, Zeng Y G, Zhang J W, Zhang J L, Fu X H, Tong C Z, Wang L J 2013 *Laser Phys. Lett.* **10** 045802
- [23] Zhang J W, Ning Y Q, Zhang X, Zeng Y G, Zhang J, Liu Y, Qin L, Wang L J 2013 *Chin. Laser J.* **40** 0502001 (in Chinese) [张建伟, 宁永强, 张星, 曾玉刚, 张建, 刘云, 秦莉, 王立军 2013 中国激光 **40** 0502001]
- [24] Zhang J W, Zhang X, Zhu H B, Zhang J, Ning Y Q, Qin L, Wang L J 2015 *Opt. Express* **23** 14763
- [25] Chuang S L 1991 *Phys. Rev. B* **43** 9649
- [26] Chuang S L 1995 *Physics of Optoelectronic Devices* (1st Ed.) (New York: Wiley) pp124–192
- [27] Iga K, Koyama F, Kinoshita S 1988 *IEEE J. Quantum Electron.* **24** 1845
- [28] Wang X D, Wu X M, Wang Q, Cao Y L, He G R, Tan M Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4983 (in Chinese) [王小东, 吴旭明, 王青, 曹玉莲, 何国荣, 谭满清 2006 物理学报 **55** 4983]

894 nm high temperature operating vertical-cavity surface-emitting laser and its application in Cs chip-scale atomic-clock system*

Zhang Xing¹⁾ Zhang Yi²⁾ Zhang Jian-Wei^{1)†} Zhang Jian¹⁾ Zhong Chu-Yu¹⁾³⁾
 Huang You-Wen¹⁾³⁾ Ning Yong-Qiang¹⁾ Gu Si-Hong²⁾ 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) (Key Laboratory of Atomic Frequency Standards, Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

3) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Received 4 March 2016; revised manuscript received 20 April 2016)

Abstract

In this study, an 894 nm high temperature vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) is reported. Furthermore, a Cs chip-scale atomic clock (CSAC) system experiment based on this VCSEL is carried out.

To achieve low threshold/power consumption under high temperature condition, the VCSEL epitaxial structure is optimized. Especially, the so-called gain cavity-mode detuning technology is utilized to improve the temperature sensitivity of the device output characteristics. The relationship between the structure of quantum well and the gain is simulated by using the commercial software PICS3D. In order to achieve high gain and low threshold properties, the thickness of the quantum well is optimized. Based on the theory of transmission matrix, the VCSEL cavity mode (etalon) is calculated. Finally, a -15 nm quantum well gain-cavity mode offset is utilized to achieve relatively stable cavity mode gain, which can guarantee the temperature-insensitivity of the VCSEL output characteristics.

The output performance of the VCSEL device we fabricated is investigated experimentally. The VCSEL light-current (L-I) characteristic is tested under different temperatures. It is found that benefiting from the gain-cavity mode offset design, the threshold can be maintained at 0.20–0.23 mA when the temperature increases from 20 °C to 90 °C. Meantime, the output power of more than 100 μ W is achieved at different temperature levels. By comparing with the results at room temperature, No dramatic degradation of the VCSEL high temperature L-I characteristics is found, which means that the VCSEL output characteristic is relatively temperature-insensitive. The wavelength of the VCSEL is 890.4 nm at a temperature of 20 °C. When the temperature increases up to 85.6 °C, the VCSEL wavelength is red-shifted to 894.6 nm (Cs D1 line), corresponding to a red shift ratio of 0.064 nm/°C. According to the polarization requirement of CSAC applications, the polarization properties of the VCSEL are studied and the results are as follows: under an injected current of 1 mA and operation temperature of 20 °C, $P_{\max} = 278.2 \mu\text{W}$ and $P_{\min} = 5.9 \mu\text{W}$, corresponding to a polarization ratio of 47 : 1; at a temperature of 85.6 °C, $P_{\max} = 239.2 \mu\text{W}$ and $P_{\min} = 4 \mu\text{W}$, corresponding to a polarization ratio of 59.8 : 1.

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61434005, 61474118, 11304362), the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Industry and Information Technology of China (Grant No. 2014ZX04001151), the Jilin Scientific and Technological Development Program, China (Grant Nos. 20150203011GX, 20140101203JC), and the Changchun Science and Technology Project, China (Grant Nos. 14KG006, 15SS02, 13KG22).

† Corresponding author. E-mail: zjw1985@ciomp.ac.cn

Using the VCSEL reported in this paper as a laser source, the CSAC experiment is carried out. At 4.596 GHz of modulated frequency, the output laser of the VCSEL is collimated and interacts with Cs atoms. Finally the closed-loop frequency locking atomic clock is demonstrated. The Cs laser absorption spectrum for laser frequency stabilization, as well as the CPT signal for Cs CSAC microwave frequency stabilization is obtained.

Keywords: vertical-cavity surface-emitting laser, Cs chip-scale atomic clock, high temperature, coherent population trapping

PACS: 42.55.Px, 42.62.Fi, 42.50.Gy

DOI: [10.7498/aps.65.134204](https://doi.org/10.7498/aps.65.134204)