

文章编号 1004-924X(2014)01-0050-08

微型铷原子钟专用 795 nm 垂直腔表面发射激光器

张 建^{1,2}, 宁永强^{1*}, 张建伟^{1,2}, 张 星¹, 曾玉刚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, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对铷(⁸⁷Rb)原子钟激励光源微型化和高温工作的特殊需求,设计并制备了对应铷原子能级跃迁的 795 nm 垂直腔面发射激光器(VCSEL)。首先,根据 $k \cdot p$ 理论计算了 InAlGaAs/AlGaAs 量子阱的价带能级和材料增益,得到最优的量子阱组分和厚度;然后,采用一维传输矩阵方法设计了 795 nm 波段的布拉格反射器(DBR),根据完整结构 VCSEL 器件的驻波场分布设计了掺杂分布;最后,采用金属有机气相外延(MOVPE)技术生长了优化的 795 nm VCSEL 外延结构,并制备了氧化限制型非闭合台面结构的 795 nm 顶发射器件。实验显示:封装后的 75 μm 口径器件可在室温至 85 $^{\circ}\text{C}$ 范围内连续工作,最大功率为 17 mW,激光光束呈圆形,发散角为 15 $^{\circ}$,激光波长的温漂系数为 0.064 nm/ $^{\circ}\text{C}$;在温度为 52 $^{\circ}\text{C}$ 、注入电流为 100 mA 时,激光波长位于 794.7 nm(对应铷原子钟需要的波长),基本满足铷原子钟激励光源对波长稳定和高温工作的要求。

关键词:垂直腔面发射激光器;铷原子钟;高温;非闭合台面

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142201.0050

795 nm VCSELs for ⁸⁷Rb based miniaturized atomic clock

ZHANG Jian^{1,2}, NING Yong-qiang^{1*}, ZHANG Jian-wei^{1,2}, ZHANG Xing¹,
ZENG Yu-gang¹, 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. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn

Abstract: For the special requirements of the exciting source of a ⁸⁷Rb based atomic clock for the miniaturization and high temperature conditions, a 795 nm Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL) corresponding to the Rb atom energy level transition was designed and fabricated. Firstly, the energy levels and material gains of the InAlGaAs/AlGaAs Multiple Quantum Wells (MQWs) were calculated by the $k \cdot p$ method to optimize the compositions and thicknesses of the quantum wells. Then, a Distributed Bragg Reflectors (DBRs) at 795 nm were designed and their reflection characteristics, longitudinal optical fields and averaged doping profiles were calculated and optimized using a one-dimensional transfer matrix method. Finally, the epitaxial structure of the 795 nm VCSEL with optimized MQWs and DBRs were grown on a GaAs substrate by Metal Organic Vapor Phase Epitaxy

收稿日期:2012-09-11;修订日期:2012-12-12.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61106047, No. 51172225)

(MOVPE) and the oxide-confined 795 nm top-emitting VCSELs with unclosed-mesa structures were fabricated and characterized. Experimental results indicate that the packaged VCSELs can keep lasing under a cw current from 25 °C to 85 °C with power decreasing from 17 mW to 1.8 mW, the far field profiles are circular with a divergence angle of 15° and the temperature-shift of the lasing wavelength is 0.064 nm/°C. Moreover, the lasing wavelength moves to the wavelength required by ⁸⁷Rb atoms at an ambient temperature of 52 °C and a current of 100 mA. The 795 nm VCSELs satisfy the basic requirements of ⁸⁷Rb based miniaturized atom clocks for stable operation in a special wavelength and high-temperatures.

Key words: Vertical Cavity Surface Emitting Laser(VCSEL); ⁸⁷Rb atom clock; high-temperature; unclosed mesa

1 引 言

垂直腔表面发射激光器 (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL) 是一种谐振方向垂直于外延层平面的新型半导体激光器^[1]。由于具有光束发散角小、阈值电流低、容易单模工作和二维集成等优点^[2-7], 已经成为全固态激光器、激光显示和照明等领域的重要光源。另一方面, VCSEL 还具有体积小、功耗低、调制速率高、波长稳定等优势, 因此近年来其应用还拓展到高速光通信、光互连、光电传感等领域^[8-9], 例如基于 VCSEL 技术的芯片级原子钟 (CASC)^[10] 就是典型应用之一。传统的原子钟结构复杂, 体积和功耗较大, 故其应用很受限制^[11]。以 VCSEL 为光源的相干布居囚禁 (Coherent Population Trapping, CPT) 芯片级原子钟是一种新型原子钟, 主要利用双色相干光与原子相互作用制备出 CPT 态, 然后由此获得窄线宽的电磁感应透明 (EIT) 谱线作为微波鉴频信号^[12]。现代微纳加工、微机电系统 (MEMS) 和专用 VCSEL 光源的结合可以在几个立方毫米的密闭泡内形成 CPT 态, 大幅减少了原子钟系统的体积和功耗, 使基于 VCSEL 的微型芯片级原子钟 (Chip-scale Atomic Clock, CSAC) 成为多个交叉领域的研究热点。

2002 年, 美国国防部高级研究规划局 (DARPA) 首次明确提出研制窄线宽、高单模抑制比、高温稳定的 VCSEL 用于制作微型原子钟。2004 年, 美国 Symmetricom 公司采用 Sandia 国家实验室提供的专用 VCSEL 生产出实用的 CASC 产品, 其体积小于 16 cm³, 功耗低于 125 mW, 长期

稳定性达到 10⁻¹⁰/月^[13]。目前该原子钟已经成功应用到国际空间站的 GPS 导航系统中。2008 年, 欧盟委员会也专门立项研究用于精密计时、频率控制和通信的微型原子钟 (MAC-TFC)^[14]。此外, 德国、俄罗斯、法国等国的一些科研单位也在进行 CSAC 的相关研究。国内北京大学、中科院武汉物理所、国家授时中心和上海光机所等单位都在进行原子钟的小型化研究^[15], 但由于缺少专用 VCSEL、MEMS 和微型泡以及精密封装等技术的整合, 相比国外水平还有较大差距。

CSAC 要求专用的 VCSEL 激光波长对应碱金属原子跃迁能级, 同时具备高温工作、单模、单偏振态和高速调制等特点^[16]。目前, 国际上只有美国 Sandia 国家实验室^[16] 和德国 ULM 大学^[17] 等少数单位研制的 VCSEL 能满足需求。文献 [14]、[16] 主要报道了器件的模式特性和调制特点等, 但国内外关于专用 VCSEL 的结构设计和输出特性的报道很少。本文设计并制备了对应铷 (⁸⁷Rb) 原子 5S_{1/2} 态和 5P_{1/2} 态能级跃迁的高温工作 795 nm VCSEL。首先设计了 795 nm 波段的 InAlGaAs/AlGaAs 量子阱材料增益、分布式布拉格反射器 (Distributed Bragg Reflector, DBR) 和外延结构掺杂分布, 然后优化了外延结构并制备出 795 nm 波段的顶发射 VCSEL 器件, 最后测试和分析了原型器件的基本输出特性, 从而为微型铷原子钟光源的制备奠定了基础。

2 结构与材料选择

2.1 高温工作 795 nm 量子阱的优化

原子钟要求 VCSEL 在高温下低功耗工作,

而半导体激光器的发光效率通常随温度升高而迅速下降,因此,高温下有源区材料的发光特性是器件性能的关键。本文采用压应变 InAlGaAs/Al-GaAs 材料作为量子阱,首先在包络函数近似下采用 $k \cdot p$ 理论^[18] 来计算价带顶子能带的耦合,然后在价带混合效应^[19] 的基础上计算导带价带子能级之间的跃迁,得到量子阱材料增益及其随载流子浓度的变化。

为了进行数值计算,非应变的 InAlGaAs 体材料的带隙能量采用国际上常用的经验拟合公式:

$$E_g(\text{In}_x(\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y})_{1-x}\text{As}) = 1.519 + 1.36y + 0.22y^2 - 1.584x + 0.475x^2 + 0.55xy. \quad (1)$$

其它参数采用二元材料的参数(见表 1)线性插值来计算。

表 1 量子阱增益计算采用的基本材料参数

Tab. 1 Basic parameters for material gain calculation

参数/单位	符号	GaAs	AlAs	InAs
晶格常数/ 10^{-10}	a	5.653 25	5.661	6.058 3
静压形变势/eV	a_c	-7.17	-5.64	-5.08
	a_v	-1.16	-2.47	-1.00
切变形变势/eV	b	-2.0	-2.3	-1.8
弹性系数/GPa	8.329	C_{11}	12.21	12.5
	4.526	C_{12}	5.66	5.34
Luttinger 系数	γ_1	6.98	3.45	20.4
	γ_2	2.06	0.82	8.5
	γ_3	2.93	1.42	9.2
电子有效质量(m_0)	m_e	0.067	0.15	0.023
重空穴有效质量(m_0)	m_{hh}	0.55	0.81	0.36
轻空穴有效质量(m_0)	m_{lh}	0.083	0.16	0.026
价带平均能级/eV	$E_{v,av}$	-6.92	-7.49	-6.67
自旋轨道分裂/eV	Δ	0.341	0.28	0.39
导带底能级/eV	E_{c0}	1.53	2.522	0.81
价带顶能级/eV	E_{v0}	0.111	0.424	-0.441

为了研究压应变对量子阱能带结构的影响,图 1 给出了不同 In 组分的 InAlGaAs 量子阱的价带顶能级。量子阱厚度固定为 6 nm,势垒为 $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ 。图中自上往下依次是第一重空穴带

(HH1)、第一轻空穴带(LH1)、第二重空穴带(HH2)、第三重空穴带(HH3)。由于发射波长由导带底和价带顶能级(HH1)的跃迁决定,为了保证量子阱发射波长不变即价带顶的位置不变,In 组分从 4% 增加到 15% 的同时 Al 组分也从 8% 增加到 15%。随着 In 组分的增加,HH1 曲率的增加说明有效质量减小,这使得价带顶的能态分布与导带底更加匹配;另外,In 组分的增加也使得 HH2 向下移动远离 HH1 和 LH1,这说明价带顶能态密度的降低有利于降低透明电流密度。

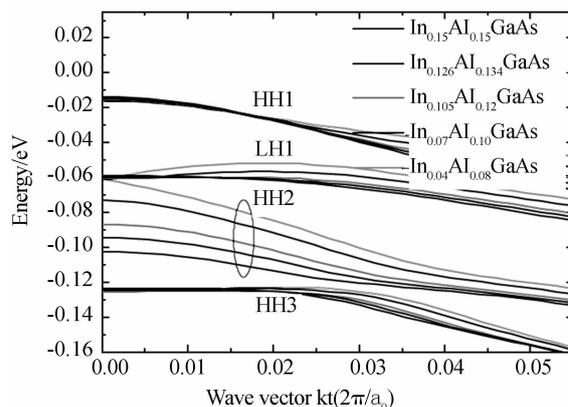


图 1 InAlGaAs 量子阱的价带顶子能级位置随 In 组分的变化(HH 和 LH 分别代表重空穴和轻空穴能级)

Fig. 1 Variation of valence subbands of InAlGaAs QW with different In fractions (HH and LH represent heavy and light holes respectively)

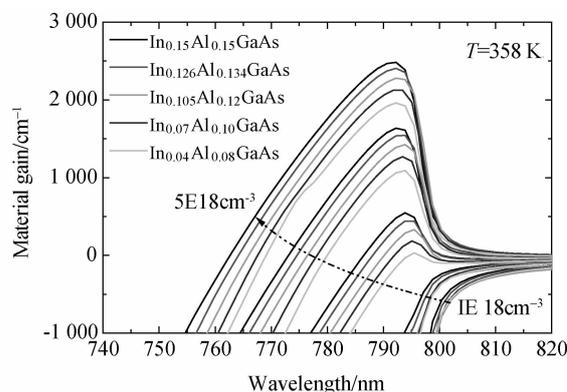


图 2 InAlGaAs 量子阱的材料增益随 In 组分和载流子浓度的变化

Fig. 2 Material gain of InAlGaAs QW as function of In fraction and carrier density

图 2 给出了 358 K 下不同 In 组分的量子阱材料增益随载流子浓度的变化。由图可见,载流

子浓度相同时,材料峰值增益随 In 组分增加而增加,这主要因为高 In 组分量子阱价带顶空穴的有效质量小和能态密度低,因此微分增益更高,这与图 1 的分析结果一致。In 组分超过 12% 以后进一步增加 In 组分时增益的增加并不明显,这是由于此时 HH2 与价带顶距离增大,逐渐接近 HH3 (见图 1),HH2 的移动对价带整体能态密度影响变小。另一方面,考虑到过高 In 组分的 InAlGaAs 量子阱在生长过程中会导致应变弛豫,将 In 组分确定为 12.5%。

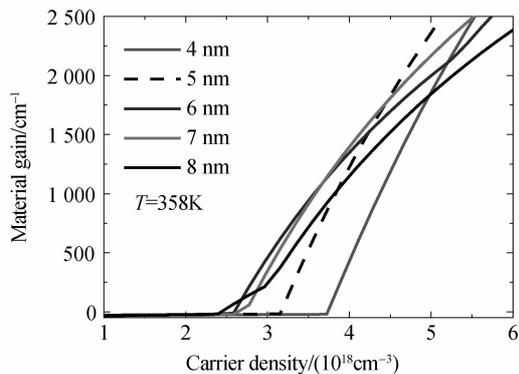


图 3 不同厚度 InAlGaAs 量子阱的材料增益
Fig. 3 Material gains of InAlGaAs QW with different thicknesses

最后为了优化量子阱厚度,图 3 给出了不同厚度的 $\text{In}_{0.125}\text{AlGaAs}$ 量子阱的峰值增益随载流子浓度的变化。由于量子阱厚度既影响导带底和价带顶的能态密度又影响量子阱内的能级数目,因此存在最佳的厚度选择。图中 4 nm 量子阱具有很高的微分增益,这是由于减小厚度使得量子效应加强,因此能态密度很低。当量子阱厚度从 4 nm 增加到 6 nm 时,只有 Al 组分也随之增加才能维持波长不变,此时量子阱材料带隙的增加导致价带顶能态密度的减小,进而导致透明电流密度减小;当厚度进一步增加至 8 nm 时,由于量子阱内能级数目的增加,量子阱微分增益反而减小,透明电流密度也开始增加。综上分析,将量子阱厚度选取为 6 nm,以得到最低的透明电流密度和较高的微分增益。

2.2 DBR 反射镜及掺杂分布的设计

在 GaAs 衬底的 VCSEL 中,DBR 通常由两种折射率差较大的 AlGaAs 材料周期性排列构成。由于 DBR 兼具激光器反射镜、电流注入层和

光波导等多重功能,其材料选择必须在反射率、异质结串联电阻和载流子吸收损耗三者之间取得平衡。795 nm 波长对应于 $\text{Al}_{0.11}\text{GaAs}$ 的带隙,因此 DBR 材料的 Al 组分必须大于 11% 才能大量减少对 795 nm 的光吸收。同时,考虑到掺杂和高温下 AlGaAs 材料的带隙收缩和吸收带边红移等因素,DBR 中高折射率材料选定为 $\text{Al}_{0.25}\text{GaAs}$ (对应的带隙波长为 717 nm)。低折射率材料采用 $\text{Al}_{0.9}\text{GaAs}$,避免使用容易氧化的 AlAs 材料,使得外延过程中源流量连续可调。通常 VCSEL 的 DBR 反射率在 99% 以上,而且 795 nm 器件要求阈值电流尽可能低,以降低功耗,因此 795 nm 器件需要的 DBR 数量较大。图 4 为通过传输矩阵方法计算的 DBR 反射率随对数的变化。图中高折射率材料 Al 的含量分别为 0.2,0.25 和 0.3,考虑到 795 nm VCSEL 的工作温度为 80 °C 左右,计算时材料的折射率选用 350 K 下的数值。图 4 中用圆点标注了选用的 33 对 n-DBR 和 40 对 p-DBR 的反射率,它们分别为 99.83% 和 99.46%。

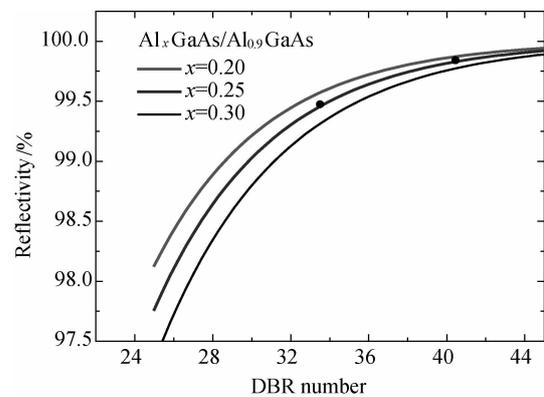


图 4 DBR 反射率随高折射率材料中 Al 组分和对数的变化
Fig. 4 DBR reflectivity as function of DBR amount and Al fraction

由于 DBR 中高低折射率材料构成了周期性的异质结,为了降低串联电阻,在高折射率和低折射率材料之间插入了厚度为 20 nm 且 Al 组分为 25%~90% 的渐变层^[20];同时适当减小了非渐变层的厚度,以保证每对 DBR 的光学厚度为半波长。在每对 DBR 中,掺杂浓度分布需要根据异质结形状和载流子注入方向来优化,而每对 DBR 的平均掺杂浓度在器件结构中的纵向分布可以用电阻和损耗的乘积(即掺杂浓度与光场分布)来优化^[21]。为了得到最大的转换效率,理想的掺杂分

布应使得不同位置的 DBR 掺杂浓度与光场分布的乘积为定值, 本文根据折射率分布决定的光场分布来反推最佳的 DBR 平均掺杂浓度。

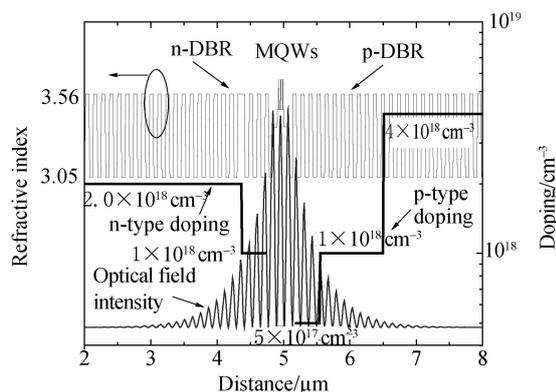


图 5 完整 795 nm 器件结构的折射率分布、光场分布和优化的每对 DBR 平均掺杂分布

Fig. 5 Profiles of refractive index, stand-wave optical field and average doping profile for each DBR period

图 5 为分段掺杂的 795 nm 器件外延层结构, 图中同时给出了由传输矩阵计算得到的完整器件的折射率分布、光场分布和对应区域的掺杂分布。光场分布显示有源区及其附近的光强最大并逐渐向两侧递减, 因此将 p-DBR 分段掺杂, 具体分布为: 靠近有源区的 3 对 p-DBR 平均掺杂浓度为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 中间的 10 对 p-DBR 平均掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 靠近表面的 20 对 p-DBR 平均掺杂浓度为 $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。这样的设计使得光场较强处掺杂浓度低, 吸收损耗小, 同时多数 DBR 平均掺杂浓度在 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上, 器件整体电阻也较小。

3 器件结构和制备工艺

3.1 材料结构

VCSEL 器件的输出波长要求为 795 nm, 考虑到 GaAs 衬底材料对 795 nm 激光的吸收, 器件设计为顶发射结构, 如图 6 所示。

器件外延层部分通过低压金属有机化合物气相外延 (Metal Organic Vapor Phase Epitaxy, MOVPE) 技术在 n 型掺杂的 GaAs 衬底上生长得到。有源区 (量子阱和势垒) 的生长温度为 650 °C, 其它部分的生长温度为 710 °C。根据前文的优化分析, 有源区采用 3 个压应变 $\text{In}_{0.12}\text{Al}_{0.2}\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ 量子阱结构, 构成激光器反射

镜的 p-DBR 为 33 对 $\text{Al}_{0.25}\text{GaAs}/\text{Al}_{0.9}\text{GaAs}$, n-DBR 为 40 对 $\text{Al}_{0.25}\text{GaAs}/\text{Al}_{0.9}\text{GaAs}$ 。用于形成氧化限制层的材料为 20 nm 的 $\text{Al}_{0.97}\text{GaAs}$, 位于空间层和第一对 p-DBR 之间。

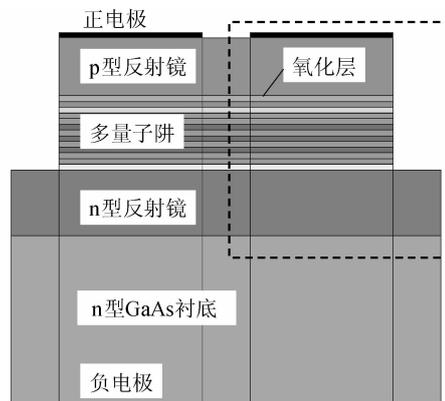
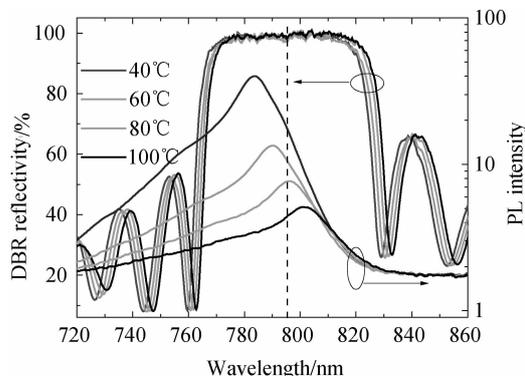


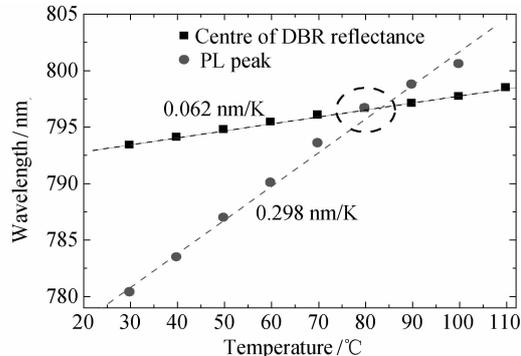
图 6 795 nm VCSEL 器件结构截面图

Fig. 6 Schematic diagram of cross section of 795 nm VCSEL



(a)测得的DBR反射谱和量子阱光致发光谱

(a)DBR reflectivity and photoluminescence of MQW



(b)提取出的DBR中心波长和量子阱峰值波长随温度变化

(b)Variations of centre of DBR reflectance and PL peak with temperature

图 7 外延结构的变温光谱特性

Fig. 7 Measured temperature dependent spectra of epitaxy structure

MOCVD 生长结束后首先对外延材料进行了变温光谱测试。图 7(a)为 DBR 反射谱和光致发光光谱随温度的变化,温度为 40~100 °C。从图中可以看出,DBR 反射谱随温度的变化较小(反射中心波长位于 795 nm 附近,反射率维持在 99%以上);而量子阱发光随温度的变化很大,发光峰位快速红移,发光强度指数衰减,这主要因为 DBR 反射谱的变化由 AlGaAs 材料折射率随温度的变化决定,而量子阱发光波长由量子阱材料带隙随温度的变化决定。图 7(b)提取了 DBR 反射谱中心和量子阱发光峰值波长随温度的变化。二者随温度的变化基本呈线性趋势,线性拟合得到 DBR 反射谱温漂为 0.062 nm/°C,量子阱光谱的温漂为 0.298 nm/°C。两条曲线在 80 °C 左右重合且重合点为 795 nm,这说明量子阱和 DBR 在需要的高温环境下实现了波长匹配,这有利于 795 nm VCSEL 在高温下高效率的工作。

3.2 制备工艺

795 nm VCSEL 的制备采用了顶发射 VCSEL 器件工艺,主要包括光刻、湿法腐蚀台面结构、侧氧化形成电流限制层、溅射介质膜和金属膜、芯片解理和引线封装等步骤。用于芯片级原子钟的 795 nm VCSEL 要求器件低功耗和单模高效率工作,通常满足要求的器件尺寸要低于 5 μm ,然而受湿法腐蚀工艺中侧向腐蚀现象的限制,本文只制作了大口径(75~95 μm)的器件,用于估计材料结构的基本性能。

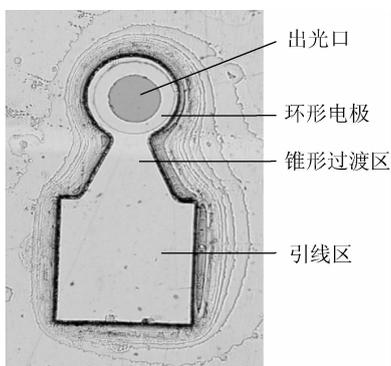


图 8 封装前的 795 nm VCSEL 器件的实物图
Fig. 8 Photo of 795 nm VCSEL before package

为了简化工艺和引线封装,795 nm VCSEL 采用非闭合性结构^[5],即在腐蚀出圆形台面时保留一部分区域的 p-DBR 并形成锥形过渡区(如图 8 所示)。由于锥形“颈部”较窄,其正下方

的高 Al 层在侧氧化过程中很容易被彻底氧化为绝缘层,不会影响氧化限制层的完整性。非闭合结构的环形电极通过“颈部”与引线区域连接,这样使得环形电极和引线区位于连续等高的平面,从而避免了聚合物填充沟槽和平面化等复杂工艺。同时,平面化电极工艺还有利于 795 nm VCSEL 的贴片式集成封装,以便缩小原子钟整体体积。

4 器件测试与分析

将顶发射 795 nm VCSEL 芯片封装在 TO3 标准管壳上,实验得到了功率-电流曲线、远场光斑和激光光谱等器件性能及它们随温度的变化。图 9 为 75 μm 口径的 795 nm 顶发射 VCSEL 器件在不同温度下的功率-电流输出特性。在 25 °C 下,器件的最大输出功率为 17 mW;在 85 °C 下,最大输出功率为 1.8 mW,由此可见,所设计的 795 nm VCSEL 器件可以在高温下连续工作。

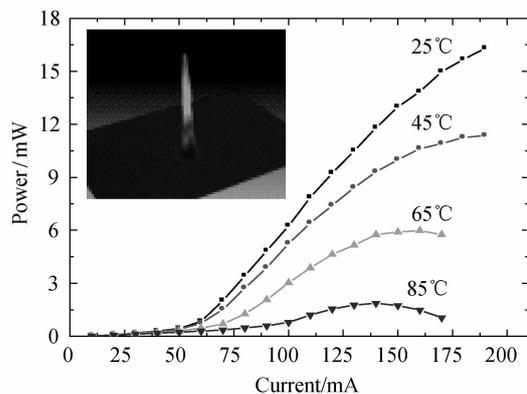


图 9 不同温度下器件功率电流输出特性
Fig. 9 Power-current curves of devices at different temperatures

由图可见,随着温度的升高,器件的阈值电流增大,斜率效率减小,这主要是由于高温下量子阱增益峰位置迅速偏离 VCSEL 的共振模式(腔模),同时量子阱中的非辐射复合和载流子泄露也在加剧,这些因素共同导致了器件的输出功率随温度升高而急剧减小。图中插图显示了 100 mA 下器件的远场分布,计算得到激光光束的发散角为 15°,光斑与普通 VCSEL 器件类似呈圆形对称分布,这有利于 795 nm 激光器对微型原子钟微腔内碱金属蒸汽的均匀照射。

图 10 为 100 mA 电流驱动下器件的激光光谱随温度的变化。经过线性拟合, 激光波长的温漂系数分别为 $0.064 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 和 $0.043 \text{ nm}/\text{mA}$, 因此可以通过调节温度和注入电流使波长基本维持在 794.7 nm 。图中插图显示了 52°C 环境下的激光光谱, 其峰值波长为 794.7 nm , 光谱半高全宽为 1.05 nm 。

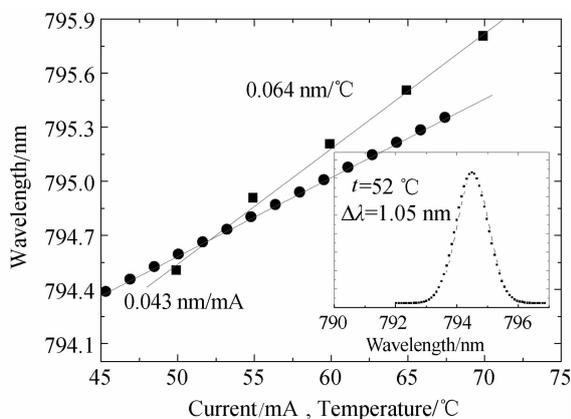


图 10 器件激光波长随温度和注入电流的变化

Fig. 10 Lasing wavelength as function of temperature and input current

本文得到的器件性能距离国外报道的实用化器件还有较大差距, 主要原因是由于器件在连续电流下工作时自身发热严重, 使得环境温度为 52°C

时激光器波长漂到了 795 nm (有源区及其附近的局部温度已经升高到 80°C 左右)。这需要仿真分析顶发射结构的热阻和有源区附近的温度场分布来优化。另一方面, 器件波长半宽较宽, 不利于稳定和有效地泵浦碱金属原子, 需要采用干法刻蚀替换湿法刻蚀工艺来制备光口径为 $5 \mu\text{m}$ 左右的小尺寸器件, 同时在出光口制备亚波长光栅等微结构来实现窄线宽和高的偏振抑制比。

5 结 论

本文根据微型铷 (^{87}Rb) 原子钟光源的特殊需求, 设计和制备了 795 nm 的 VCSEL 器件。首先对 $\text{InAlGaAs}/\text{AlGaAs}$ 量子阱、 795 nm 波段的 DBR 和完整结构 VCSEL 器件的掺杂分布进行了优化。然后采用 MOVPE 技术生长了 795 nm VCSEL 外延结构, 并制备了氧化限制型非闭合台面结构的 795 nm 顶发射器件。封装后的 $75 \mu\text{m}$ 口径器件可在室温至 85°C 连续工作, 最高功率为 17 mW ; 激光光束呈圆形, 发散角为 15° , 激光波长的温漂系数为 $0.064 \text{ nm}/^\circ\text{C}$; 在温度为 52°C 和注入电流为 100 mA 时, 激光波长位于 794.7 nm (对应铷原子钟需要的波长), 能满足铷原子钟激励光源对波长稳定和高温工作的基本要求。

参考文献:

- [1] 张星, 宁永强, 曾玉刚, 等. 980 nm 高功率垂直腔面发射激光阵列的单元结构优化[J]. 光学精密工程, 2011, 19(9): 2014-2021.
ZHANG X, NING Y Q, ZENG Y G, *et al.*. Optimization of 980 nm high-power vertical cavity surface emitting laser array element [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 2014-2021. (in Chinese)
- [2] 田振华, 胡永生, 秦莉, 等. 高功率垂直腔面发射激光器的光束准直特性[J]. 发光学报, 2011, 32(9): 939-943.
TIAN ZH H, HU Y SH, QIN L, *et al.*. Collimation of high power vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2011, 32(9): 939-943. (in Chinese)
- [3] 张岩, 宁永强, 秦莉, 等. 小发散角垂直腔面发射激光器的设计与制作[J]. 发光学报, 2011, 32(1):

47-52.

- ZHANG Y, NING Y Q, QIN L, *et al.*. Design and fabrication of vertical cavity surface-emitting laser with small divergence [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2011, 32(1): 47-52. (in Chinese)
- [4] 吕亮, 张可, 戴绩俊, 等. 基于垂直腔面发射半导体激光器的自混合测速实验[J]. 光学精密工程, 2011, 19(1): 23-28.
LÜ L, ZHANG K, DAI J J, *et al.*. Self-mixing velocimetry based on vertical cavity surface-emitting laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(1): 23-28. (in Chinese)
- [5] 史晶晶, 秦莉, 宁永强, 等. 850 nm 垂直腔面发射激光器阵列[J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 17-23.
SHI J J, QIN L, NING Y Q, *et al.*. 850 nm vertical cavity surface-emitting laser array [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 17-23. (in Chinese)
- [6] ZHANG X W, NING Y Q, QIN L, *et al.*. Stable polarization control of 980 nm high-power vertical-cav-

- ity surface-emitting lasers using sub-wavelength rectangular metal gratings [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(9): 1188-1193.
- [7] 汪丽杰, 佟存柱, 曾玉刚, 等. 高亮度布拉格反射波导激光器[J]. *发光学报*, 2013, 34(6): 787-791.
WANG L G, TONG C ZH, ZENG Y G. High brightness bragg reflection waveguide laser [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(6): 787-791. (in Chinese)
- [8] WESTBERGH P, GUSTAVSSON J, KOGEL B, *et al.*. 40 Gbit/s error-free operation of oxide-confined 850 nm VCSEL[J]. *Electron Lett.*, 2010, 46: 1014-1016.
- [9] LARSSON A. Advances in VCSELs for communication and sensing[J]. *IEEE J. Sel. Top Quantum Electron.*, 2011, 17(6): 1552-1567.
- [10] SERKAND D K, PEAKE G M, GEIBA K M, *et al.*. VCSELs for atomic clocks [J]. *SPIE*, 2006, 6132: 1-8.
- [11] 张首刚. 新型原子钟发展现状[J]. *时间频率学报*, 2009, 32(2): 81-91.
ZHANG SH G. Progress of novel atomic clocks [J]. *J. Time and Frequency*, 2009, 32(2): 81-91. (in Chinese)
- [12] ARIMONDO E. Coherent population trapping in laser spectroscopy [J]. *Progress in Optics*, 1996, 35: 257-354.
- [13] LUTWAK R, EMMONS D, ENGLISH T, *et al.*. The chip-scale atomic clock-recent development progress[R]. *Symmetricom-Technology Realization Center Beverlyma*, 2004.
- [14] GORECKI C, HASEGAWA M, PASSILLY N, *et al.*. Towards the realization of the first European MEMS atomic clock [C]. *IEEE/LEOS*, 2009: 47-48.
- [15] 陈杰华, 杜润昌, 赵劫成, 等. 激光光谱研究垂直腔面发射激光器的特性[J]. *中国激光*, 2010, 37(10): 2515-2519.
CHEN J H, DU R CH, ZHAO J CH, *et al.*. Study on characteristics of vertical-cavity surface-emitting laser by laser spectrometry [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2010, 37(10): 2515-2519. (in Chinese)
- [16] SERKLAND D K, PEAKE G M, GEIB K M, *et al.*. VCSELs for atomic clocks[J]. *SPIE*, 2006, 6132: 613208-613201.
- [17] WAHL D, SETZ D, AL-SAMANEH A. Development of VCSELs for atomic clock applications[R]. *Annual Report*, 2008: 49-54.
- [18] CHANG C S, CHUANG S L. Modeling of strained quantum-well lasers with spin-orbit coupling [J]. *Selected Topics in Quantum Electronics*, 1995, 1(2): 218-229.
- [19] PIPREK J. *Semiconductor Optoelectronic Devices: Introduction to Physics and Simulation*[M]. Academic Press, 2003.
- [20] 李特, 宁永强, 郝二娟, 等. 980 nm 底发射 VCSEL 的 DBR 设计与优化[J]. *中国科学(F 辑): 信息科学*, 2009, 39(8): 918-922.
LI T, NING Y Q, HAO E J, *et al.*. Design and optimization of bottom emitting 980 nm VCSELs [J]. *Science in China F: Information Sciences*, 2009, 39(8): 918-922. (in Chinese)
- [21] HEBLOM E R. *Engineering Oxide Apertures in Vertical Cavity Lasers* [D]. Santa Barbara: Univ. California, 1999.

作者简介:



张 健(1986—),男,四川资中人,博士研究生,2008年于东北师范大学获得学士学位,主要从事新型半导体激光器的结构设计与外延生长的研究。E-mail: zhangjian128@gmail.com

导师简介:



宁永强(1965—),男,吉林图们人,研究员,博士生导师,1999年于中国科学院长春物理所获得博士学位,主要从事半导体光电子器件等方面的研究。E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn