

文章编号: 1000-7032(2013)12-1636-05

808 nm 垂直腔面发射激光器列阵的温度特性分析

张金胜^{1,2}, 宁永强^{1*}, 张金龙¹, 张建伟¹, 张 建¹, 王立军¹

(1. 发光学及应用国家重点实验室 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了研究温度对 808 nm InGaAlAs 垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 列阵输出特性的影响, 通过变温塞耳迈耶尔方程计算了 InGaAlAs 量子阱 VCSEL 的温度漂移系数。采用非闭环结构, 制备了 2×2 的 808 nm 垂直腔面发射激光器列阵, 每个单元的出光口径为 60 μm 。通过热沉温度调节, 对不同温度下的列阵激光波长、光功率以及阈值电流进行了测量。在温度为 20 $^{\circ}\text{C}$ 、脉宽为 50 μs 、重复频率为 100 Hz 的脉冲条件下, 列阵的最大输出功率达到 56 mW, 中心光谱值为 808.38 nm, 光谱半宽为 2.5 nm, 连续输出功率达到 22 mW。通过变温测试, 发现输出功率在 50 $^{\circ}\text{C}$ 以上衰减剧烈, 列阵的温漂系数为 0.055 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 。实验测得的温漂系数与理论值保持一致。

关键词: 808 nm; 垂直腔面发射激光器; 列阵; 温漂特性

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20133412.1636

Temperature Characteristic Analysis of 808 nm Vertical Cavity Surface Emitting Laser Arrays

ZHANG Jin-sheng^{1,2}, NING Yong-qiang^{1*}, ZHANG Jin-long¹,
ZHANG Jian-wei¹, ZHANG Jian¹, 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: In order to study the output characteristics of 808 nm InGaAlAs vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) array at different temperature, the InGaAlAs VCSEL temperature shift is calculated under the temperature-dependent Sellmeier equation. 2×2 arrays of 808 nm VCSEL are fabricated with non-closed structure. Each emitter diameter is 60 μm . Lasing wavelength, optical power and the threshold current are measured by changing the temperature of heat sink. The maximum output power reaches 56 mW in the pulse width of 50 μs , and the repetition frequency of 100 Hz at 20 $^{\circ}\text{C}$. The central wavelength is 808.38 nm, and the full width at half maximum is 2.5 nm, continuous output power reaches 22 mW, the output power decreases rapidly above 50 $^{\circ}\text{C}$, the temperature shift is 0.055 nm/ $^{\circ}\text{C}$. Experimental temperature shift is consistent with the theoretical value.

Key words: 808 nm; VCSEL; arrays; temperature shift

收稿日期: 2013-07-12; 修订日期: 2013-08-16

基金项目: 国家自然科学基金(51172225, 11074247, 61204056, 61106047); 国家自然科学基金重点项目(90923037)资助

作者简介: 张金胜(1986-), 男, 河南新乡人, 主要从事半导体光电子器件方面的研究。

E-mail: zhangjs.ciomp@gmail.com, Tel: (0431)86176335

1 引言

近年来,垂直腔面发射激光器(Vertical cavity surface emitting laser, VCSELs)受到了广泛的关注^[1-2]。相对于边发射半导体激光器,垂直腔面发射激光器具有阈值电流低、调制频率高、波长稳定性好、功率损耗小、输出光斑为圆形、没有光学灾变损伤、便于集成等优点^[3-4],广泛应用于光通讯、光互连和光功率光泵浦等领域。808 nm 半导体激光器作为泵浦源泵浦 YAG 激光器,可获得 1 064 nm 的激光输出;但连续输出的半导体激光器由于受到自热效应的影响,其激光波长会发生红移,与 YAG 吸收失配,导致吸收效率下降,功率降低。长春理工大学高功率半导体实验室^[5-7]使用分布环形电极,采用 AlGaAs 的量子阱结构制备出直径为 300 μm 的大口径激光器,输出功率和中心波长分别为 0.3 W 和 803.3 nm,并且使用大口径对固体激光器进行端面泵浦,得到基模输出的光斑,但文中对于波长的稳定性并未做详细的报道。Princeton 光电子公司^[8-10]使用衬底去除法制备了大功率 808 nm VCSEL 阵列,在连续工作的情况下具有较高的散热能力,其 5 mm \times 5 mm 阵列在 125 A 的电流注入下输出功率为 120 W。他们通过阵列对 YAG 激光器进行了侧面泵浦,但对于芯片温度对波长的影响并未做详细说明。在制备过程中,他们使用了复杂的衬底去除法,增加了材料生长和工艺制备的难度,也增加了工艺成本并降低了成品率。激光器在泵浦过程中需要有稳定的激光波长才能有效地提高转换效率,文献^[11]对不同量子阱材料进行了对比优化,得出最优量子阱材料为 InGaAlAs,并对整体结构进行了设计^[11-12]。

本文采用具有较高的温度稳定性的 In-GaAlAs 作为 VCSEL 的量子阱,使用随温度变化

的塞耳迈耶尔方程计算了激光波长随温度的变化。采用 MOCVD 方法生长了芯片,使用具有较高散热能力的非闭合环结构制备了 2 \times 2 垂直腔面发射激光器阵列。对 808 nm VCSEL 随温度变化的功率特性和光谱特性进行了测量,结果表明,理论计算与实际测量值符合得很好。

2 温漂理论分析

温度对激光器结构的影响可以分为三个部分:一是温度的升高使得整个谐振腔材料膨胀,整个腔的物理长度发生变化;二是腔内的空间层和有源层的折射率随温度变化,导致整个腔的光学长度发生了变化;三是分布布拉格反射镜(DBR)随温度而变化,导致中心波长发生微小的变化,但由于 DBR 反射带宽较宽,不影响整个器件性能。以上因素共同作用,最终将导致腔模发生漂移。根据与温度相关的塞耳迈耶尔方程^[13-14],谐振腔模中心波长随温度的变化速率可以表示为:

$$\frac{\partial \lambda_0}{\partial T} = \frac{\lambda_0}{n_{\text{gspace}}} \left[\left. \frac{\partial n_{\text{spacer}}}{\partial T} \right|_{\lambda} + n_{\text{spacer}} \frac{\partial h_{\text{spacer}}}{\partial T} \right]_{\lambda}, \quad (1)$$

其中, h_{spacer} 为空间层厚度, n_{gspace} 是空间层的群折射率^[15], 表示为:

$$n_{\text{gspace}} = n_{\text{spacer}} - \lambda_0 \left. \frac{\partial n}{\partial \lambda} \right|_T, \quad (2)$$

对于本实验中的 VCSEL 器件,空间层材料为 $\text{Al}_{0.3}\text{-Ga}_{0.7}\text{As}$,其随温度和波长的折射率变化公式^[13]为:

$$n(x, \lambda, T) = \left[10.906 - 2.92x + \frac{0.97501}{\lambda^2 + C} - 0.002467(1.41x + 1)\lambda^2 \right]^{\frac{1}{2}} + [(T - 26) \times (2.04 - 0.3x) \times 10^{-4}], \quad (3)$$

其中 x 为 Al 组分含量, T 为温度, λ_0 为激光波长。本实验中的相关参数列于表 1。

表 1 激光器及材料特性参数^[15]

Table 1 The characteristic parameters of the laser and material

Material	$\partial h / \partial T / (10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$	$\partial n / \partial T / (10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$	n_{spacer}	n_{gspace}
$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$	6.04	2.298	3.468	4.264

经过计算可得 $\partial \lambda_0 / \partial t = 0.047 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。由于腔模中心波长决定了激光器的激光波长,所以腔模波长的温度特性与激光波长的温度特性一致。

3 器件结构与制备

808 nm VCSEL 面阵的制备过程主要分为外延片生长和后期的工艺处理两个部分。外延片使

用金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 技术生长;有源区采用新型的 $\text{InGaAlAs}/\text{AlGaAs}$ 应变量子阱结构,共有 3 个周期,每个周期有一对 $\text{In}_{0.14}\text{-Ga}_{0.74}\text{Al}_{0.12}\text{As}$ (6 nm)/ $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ (8 nm),有源区置于总长度为一个波长的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 之间,Al 的组分从 0.3 到 0.6 线性变化。与 GaAs 和 GaAsP 量子阱相比, $\text{In}_{0.14}\text{Ga}_{0.74}\text{Al}_{0.12}\text{As}$ 量子阱在同等条件下具有更好的温度稳定特性和更大的增益,有利于高功率输出。P 型分布布拉格反射镜 (P-DBR) 由 23 对 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 组成,反射率为 99.57%,P 面采用 Zn 掺杂 ($1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$)。N 型分布布拉格反射镜 (N-DBR) 由 39.5 对 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 组成,反射率为 99.94%,N 面采用 Si 掺杂 ($2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$)。30 nm 厚的 AlAs 置于 P-DBR 与空间层之间,使用选择性氧化技术对光学和电学特性进行限制。图 1 为所制作的垂直腔面发射激光器工艺结构示意图。图 2 为 VCSEL 列阵的剖面示意图。

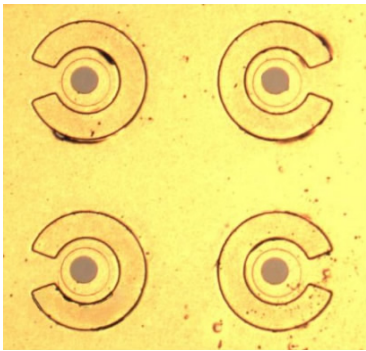


图 1 出光直径为 $60 \mu\text{m}$ 的 808 nm 顶发射垂直腔面发射激光器面阵结构图

Fig. 1 Photograph of 808 nm top-emitting VCSEL arrays with emitting area diameter of $60 \mu\text{m}$

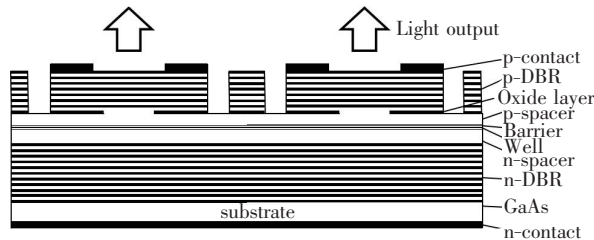


图 2 808 nm 顶发射垂直腔面发射激光器面阵结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of 808 nm top-emitting VCSEL arrays

外延片的工艺处理过程如下:首先使用湿法腐蚀,在 P 面腐蚀出如图 1 所示的非闭合环结构,

露出侧氧化层,腐蚀深度为 $3 \mu\text{m}$ 。然后,把芯片放置于侧氧化炉内,进行侧氧化,炉温为 $420 \text{ }^\circ\text{C}$,时间为 50 min。随着氧化深度的增加,非闭合环两端氧化层逐渐将非闭合开口堵死,侧氧化环闭合,形成良好的光电限制。蒸镀 SiO_2 作为钝化层,厚度为 200 nm。在 P 面生长 Ti/Au ,使用腐蚀液露出 $60 \mu\text{m}$ 出光口。在 N 面生长 $\text{Au}/\text{Ge}/\text{Ni}$ 作为电极。最后对整个芯片进行合金,形成欧姆接触电极。使用 In 焊料把芯片焊接在 Cu 热沉上,使用金丝键合将芯片电极连接于 TO-3 管壳。808 nm 非闭合环 VCSEL 列阵制备完成。

4 结果与讨论

在 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 准连续 (脉宽为 $50 \mu\text{s}$,重复频率为 100 Hz) 条件下,测得的出光窗口直径为 $60 \mu\text{m}$ 的 VCSEL 列阵的功率-电流 ($P-I$) 特性曲线如图 3 所示。由图可以看出,在注入电流为 340 mA 时,列阵的最高连续输出功率为 56 mW,阈值电流 130 mA,最大斜率效率为 0.295 W/A 。器件的光谱特性如图 3 中插图所示。在 200 mA 注入电流下,采用海洋光学的 USB 4000 型号光谱仪测得峰值波长为 808.38 nm ,半高宽为 2.5 nm 。脉冲测量下的光谱半高宽较高,主要原因是光谱仪接收到的是 4 个出光口共同发出的光。通过改进芯片的生长工艺,提升芯片整体的平整度,减小单个窗口尺寸,可以有效减小激光器列阵的光谱半高宽。

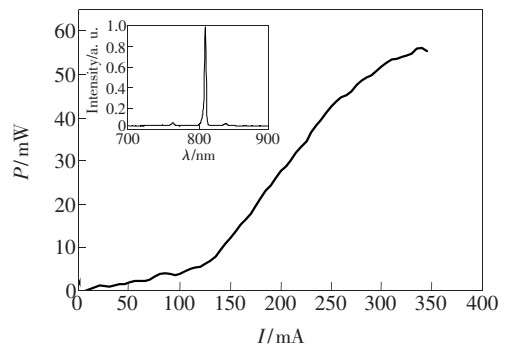


图 3 窗口直径为 $60 \mu\text{m}$ 的垂直腔面发射激光器列阵的 $P-I$ 曲线和光谱

Fig. 3 $P-I$ and spectrum characteristics of VCSEL arrays with each emitting window aperture of $60 \mu\text{m}$

图 4 是对非闭合环 VCSEL 列阵在 $20 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内测得的功率-电流-电压 ($P-I-V$) 特性曲线,温度采用热电致冷 (TEC) 模块控制。从图中可以看出,VCSEL 的器件输出功率随注入电流

的增加而增大,由于自热效应使得器件内部温度升高,导致输出功率在某一电流下达到最大值,出现功率饱和现象。随着电流的进一步增加,输出功率下降。器件的最大输出功率随温度的升高而降低,也是由于热效应引起的腔模式与增益模式失配而导致的。从图 5 可以看出,在温度超过 50 °C 后,功率衰减剧烈。除了温度对功率的影响, GaAs 材料对于 808 nm 处的强烈吸收也是需要考

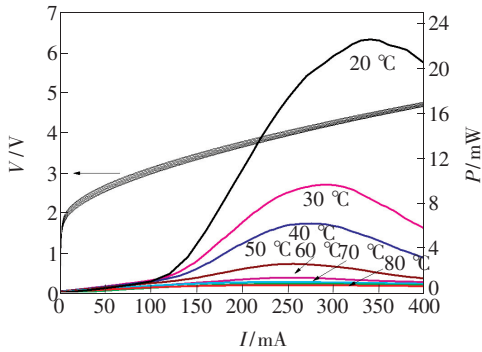


图 4 不同温度条件下的垂直腔面发射激光器的 P - I - V 曲线

Fig. 4 P - I - V characteristics of VCSEL arrays at different temperature

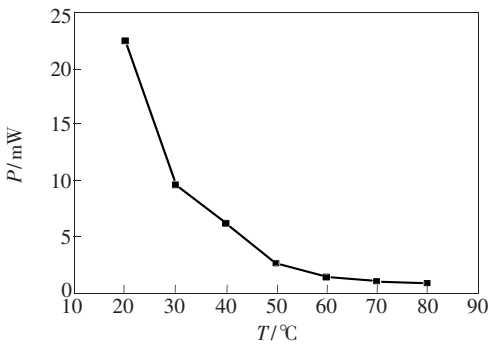


图 5 不同温度条件下的 VCSEL 阵列的峰值功率

Fig. 5 Max power of VCSEL array at different temperature

在 200 mA 恒定电流驱动下,我们采用海洋光学的 USB 4000 型号光谱仪在 20 ~ 80 °C 温度范围内对 VCSEL 阵列的激光波长进行了测量,温度采用热电致冷(TEC)模块控制。测得的变温光谱特性如图 6 所示。

从图中可以看出,激光器的波长随着温度的升高而发生明显的红移,这与理论计算的结果一致。将中心波长峰值进行线性拟合后可得其温度漂移系数为 0.055 nm/°C,比文献[15]中报道的 0.088 nm/°C 要小一些,其原因是所选择的量子阱

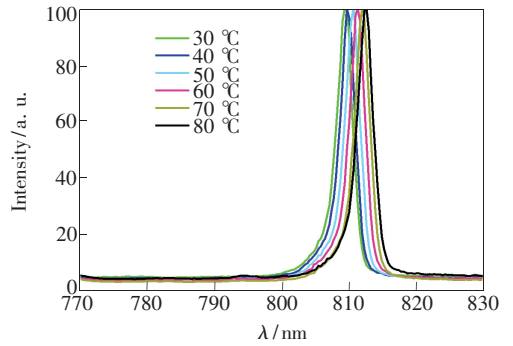


图 6 不同温度条件下的 VCSEL 阵列的光谱

Fig. 6 Spectra of VCSEL array at different temperature

材料的峰值增益随温度变化较小。理论计算的激光波长温漂系数为 0.047 nm/°C,与实验结果基本吻合。

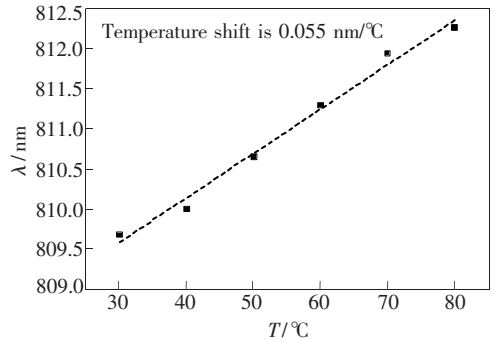


图 7 不同温度条件下的中心波长变化曲线

Fig. 7 Central wavelength characteristics at different temperature

Nd: YAG 固体激光器的吸收峰在 808.4 nm^[16-17],有效吸收宽度为 4 nm;本实验制备的 VCSEL 面阵在室温时的激光波长为 808.38 nm,实现了泵浦波长与吸收波长的完全匹配。通过实验测得的 VCSEL 的温漂系数为 0.055 nm/°C,远小于边发射激光器的 0.3 nm/°C,在高温下相对稳定的激光波长使其更适合作为固体激光器的泵浦光源。

5 结 论

制备了具有非闭环结构的 808 nm 垂直腔面发射激光器面阵,在脉冲条件下功率达到 56 mW,最大斜率效率为 0.295 W/A。对变温条件下的连续输出功率及激光波长进行了测量,结果表明器件的连续最大功率为 22 mW,在温度超过 50 °C 时,功率在内部损耗严重,温度漂移系数经过测量并拟合后为 0.055 nm/°C。使用随温度变

化的塞耳迈耶尔方程计算得到的温度漂移系数为 $0.047 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 与实验结果基本吻合。与边发射激光器相比, 温漂较小的 808 nm 面阵更适合作为 YAG 激光器的泵浦源。

参 考 文 献:

- [1] Kenichi I. Vertical-cavity surface-emitting laser: Its conception and evolution[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2008, 47(1): 1-10.
- [2] Shi J J, Qin L, Ning Y Q, *et al.* 850 nm vertical cavity surface-emitting laser arrays [J]. *Opt. Precision Eng.* (光学精密工程), 2012, 20(1):17-23 (in Chinese).
- [3] Seurin J F, Xu G, Khalfin V, *et al.* Progress in high-power high-efficiency VCSEL arrays [J]. *SPIE*, 2009, 7229: 722903-1-11.
- [4] Lyu L, Zhang K, Dai J J, *et al.* Self-mixing velocimetry based on vertical-cavity surface-emitting laser [J]. *Opt. Precision Eng.* (光学精密工程), 2011, 19(1):23-28 (in Chinese).
- [5] Hao Y Q, Ma J L, Yan C L, *et al.* A fundamental mode Nd: GdVO₄ laser pumped by a large aperture 808 nm VCSEL [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2013, 10(5):055003-1-3.
- [6] Hao Y Q, Luo Y, Feng Y, *et al.* Large aperture vertical cavity surface emitting laser with distributed-ring contact [J]. *Appl. Opt.*, 2011, 50(7):1034-1037.
- [7] Hao Y Q, Shang C Y, Feng Y, *et al.* High power 808 nm vertical cavity surface emitting laser with multi-ring-shaped-aperture structure [J]. *Laser Phys.*, 2011, 21(2):376-378.
- [8] Seurin J F, Xu G, Guo B, *et al.* Efficient vertical-cavity surface-emitting lasers for infrared illumination applications [J]. *SPIE*, 2011, 7952:79520G-1-10.
- [9] Van L R, Xiong Y, Watkins L S, *et al.* High power 808 nm VCSEL arrays for pumping of compact pulsed high energy Nd: YAG lasers operating at 946 nm and 1 064 nm for blue and UV light generation [J]. *SPIE*, 2011, 7912:79120Z-1-7.
- [10] Van Leeuwen R, Xiong Y, Seurin J F, *et al.* High-power vertical-cavity surface-emitting lasers for diode pumped solid-state lasers [J]. *SPIE*, 2012, 8381:838101-1-7.
- [11] Zhang Y, Ning Y, Zhang L, *et al.* Design and comparison of GaAs, GaAsP and InGaAlAs quantum-well active regions for 808-nm VCSELs [J]. *Opt. Exp.*, 2011, 19(13):12569-12581.
- [12] Zhang Y, Ning Y, Zhang J, *et al.* Structural design of 808 nm InGaAlAs vertical-cavity surface-emitting laser [J]. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2011, 38(9):0902007-1-6 (in Chinese).
- [13] Kim J P, Sarangan A M. Temperature-dependent Sellmeier equation for the refractive index of Al_xGa_{1-x}As [J]. *Opt. Lett.*, 2007, 32(5):536-538.
- [14] Talghader J, Smith J S. Thermal dependence of the refractive index of GaAs and AlAs measured using semiconductor multilayer optical cavities [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, 66(3):335-337.
- [15] Yu S F. *Analysis and Design of Vertical Cavity Surface Emitting Lasers* [M]. New York: Wiley, 2003:194-197.
- [16] Koechner W. *Solid-state Laser Engineering* [M]. Berlin: Springer, 2006:57-59.
- [17] Shan X N, Liu Y, Cao J S. 808 nm kW-output high-efficiency diode laser sources [J]. *Opt. Precision Eng.* (光学精密工程), 2011, 19(2):452-456 (in Chinese).
- [18] Zhu H B, Hao M M, Liu Y, *et al.* 808 nm high brightness module of fiber coupled diode laser [J]. *Opt. Precision Eng.* (光学精密工程), 2012, 20(8):1684-1690 (in Chinese).