

文章编号 1004-924X(2012)10-2147-07

高功率 InGaAs/GaAsP 应变量子阱 垂直腔面发射激光器列阵

刘 迪^{1,2}, 宁永强^{1*}, 张金龙¹, 张 星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 100039)

摘要:为提高垂直腔面发射激光器(VCSEL)的输出功率,对具有 3 个 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ 应变量子阱结构,发射波长为 977 nm 的 VCSEL 列阵进行了研究。对量子阱结构进行了优化,选择具有更宽带隙的 GaAsP 作为势垒材料,计算了 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ 量子阱的带阶。对采用 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ 和 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ 两种量子阱结构的器件的输出功率进行了理论模拟和比较分析。分别测试了上述两个列阵器件的脉冲峰值功率并利用由开启电压、阈值电流和串联电阻决定的 p 参数评估了列阵器件的输出性能。实验结果表明,当注入电流为 110 A 时,发光面积为 0.005 cm^2 的 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ 4×4 VCSEL 列阵获得了 123 W 的脉冲峰值功率,比具有相同发光面积的 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ 列阵器件的脉冲峰值功率大 13%,前者相应的功率密度和斜率效率分别为 $45.42\text{ kW}/\text{cm}^2$ 和 $1.11\text{ W}/\text{A}$ 。连续和脉冲工作下的 p 值分别为 15 和 13,表明器件在两种工作条件下都具有相对较好的输出性能。得到的结果证明,包含 3 个 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ 应变量子阱的 4×4 VCSEL 列阵器件能够获得较高的功率输出。

关键词:垂直腔面发射激光器列阵;峰值功率;功率密度;InGaAs/GaAsP 应变量子阱

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122010.2147

High-power InGaAs/GaAsP strained quantum well vertical-cavity surface-emitting laser array

LIU Di^{1,2}, NING Yong-qiang^{1*}, ZHANG Jin-long¹, ZHANG Xing¹, 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 100039, China)

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

Abstract: To improve the output powers of Vertical Cavity Surface Emitting Lasers (VCSELs), a 977 nm VCSEL array with three $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ strained Quantum Wells(QWs) was studied. The structures of the QWs were optimized and GaAsP with a larger band gap was chosen as the barrier material, and the band offsets of $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ were calculated. The output powers of the devices which used $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ and $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ QWs were simulated theoretically and analyzed compare-

收稿日期:2012-05-11;修订日期:2012-06-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60876036;No. 51172225;No. 61106068)

tively, respectively and the pulsed peak powers of two array devices were measured. Then, the performance of the array device was estimated by a functional method using a p -parameter determined by the turn-on voltage, threshold current, and the differential resistance. Experimental results show that the 4×4 VCSEL array with $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ QWs and an emitting area of 0.005 cm^2 can achieve a pulsed peak power of 123 W when the injecting current is 110 A, and its power density and slope efficiency are 45.42 kW/cm^2 and 1.11 W/A , respectively. This output power is 13 % larger than that of the array with $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ QWs and the same emitting area. Furthermore, the values of p parameter are 15 and 13 under CW operation and pulsed operation, respectively, which indicates that the device has relatively good performance. In conclusion, the 4×4 VCSEL array with three $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ strained QWs is able to achieve higher output powers.

Key words: Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL) array; peak power; power density; In-GaAs/GaAsP strained quantum well

1 引言

与高功率边发射半导体激光器相比,高功率垂直腔面发射激光器(Vertical-cavity Surface-emitting Laser, VCSEL)具有阈值电流低,输出光束发散角小,成本少等优点,因此在高速数据传输,高分辨率打印以及泵浦固体激光器和光纤激光器等应用领域得到了广泛关注^[1-2]。为了增加该类激光器总的输出功率,一种方法是增大 VCSEL 单管器件的有效面积,但随着器件有效面积的增加,功率转换效率将随之降低^[3]。另外一种方法是在单个芯片上将各个单管单元集成为一个二维列阵,较高的集成度和适当的散热能够使得这种二维列阵更容易获得高功率输出。目前,人们做了很多研究工作以期提高 VCSEL 器件的输出功率。李特等人制作的氧化孔径为 $500 \mu\text{m}$ 的单管器件在室温连续电流注入下得到了 1.95 W 的最大输出功率^[4]。Nobuyuki Otake 等人研制了包含 5 个 InGaAs 量子阱的 VCSEL 单管器件,并且在 20 A 的脉冲电流注入下获得了超过 12.5 W 的最大峰值功率^[5]。在高功率 VCSEL 列阵器件研究方面,由 Miller 等人研制的具有 19 个单元的列阵器件室温下的连续输出功率达到 1 W ,并且在脉冲宽度为 15 ns 的脉冲泵浦条件下,峰值功率达到 10 W ^[6]。李特等人研制了由 16 个单元组成的列阵器件,在室温下连续注入 6 A 电流时,其输出功率在 1.21 W 左右^[4]。在 Jean-Francois Seurin 等人的研究中^[7],尺寸约为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的列阵芯片在 320 A 的连续电流注入,热沉温度为 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,输出功率达到 231 W 。

为了提高 VCSEL 器件的输出功率,本文对有源区势垒材料进行了优化并且研究了不同势垒材料对器件输出功率的影响,报道了具有 3 个 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ 应变量子阱结构、氧化限制型高功率、高效率的 VCSEL 列阵,该器件的发射波长为 977 nm ,由 16 个单元组成,每个单元的氧化孔径为 $200 \mu\text{m}$,单元间距为 $250 \mu\text{m}$ 。文中利用 p 参数对此 4×4 VCSEL 列阵器件的输出性能进行了快速而准确的评估。

2 器件结构与制作工艺

图 1 是氧化限制型的底发射 VCSEL 单管结构示意图。为了减小串联电阻,器件底部和顶部的分布式布拉格反射镜(Distributed Bragg Reflector, DBR)都由具有渐变层的 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$ 周期性重复性结构组成。其中, n 型 DBR 掺杂硅 ($2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 周期为 28 对; P 型 DBR 掺杂碳 ($2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 周期为 30 对。在空间层与 P 型 DBR 之间是厚度为 30 nm 的 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 层,经过选择氧化后这一层形成一个由低折射率的高阻氧化物 Al_xO_y 所包围的氧化孔径,从而有效地限制电流和光场^[8]。有源区包含 3 个厚度为 8 nm 的 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 势阱,与传统的 GaAs 势垒材料不同,其选择了 4 个厚度为 10 nm 的 $\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ 材料作为势垒,分布在顶部和底部 DBR 之间。有源区与两侧的 $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ 空间层构成一个波长的谐振腔。

在 VCSEL 芯片 P 面光刻出图形后,利用化学湿法腐蚀的方法制作圆形台面,腐蚀深度刚刚到达上空间层,保证露出氧化层即可。然后,将样

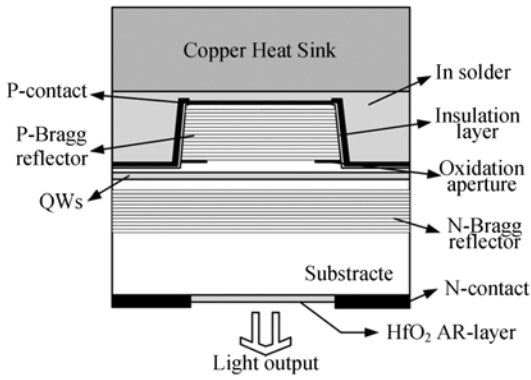


图 1 底发射 VCSEL 单管结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single bottom-emitting VCSEL device

品放入温度为 420 °C, 通有由氮气携带的 95 °C 水蒸气的石英炉内进行湿法选择氧化。为了防止焊接芯片时发生短路, 在台面上溅射厚度为 200 nm 的 SiO₂ 钝化层后利用光刻和化学方法对 SiO₂ 膜进行选择性腐蚀, 然后再蒸镀一层 TiPtAu 作为 P 面电极。为了减小吸收损耗并能够更好地散热, 将 N 型 GaAs 衬底减薄、抛光至 150 μm。对于底发射 VCSEL 器件, 需要在 N 面出光窗口上镀 HfO₂ 增透膜来进一步增大输出功率^[9]。制作 AuGeNi/Au 作为 N 面电极, 经过合金化后进行出光窗口剥离。最后对芯片进行解理, 然后利用 In 焊料将单个的管芯焊在热沉上。二维 VCSEL 阵列器件的制作工艺和上述单管器件的制作工艺相同, 图 2 是底发射 4×4 VCSEL 阵列的横截面示意图。

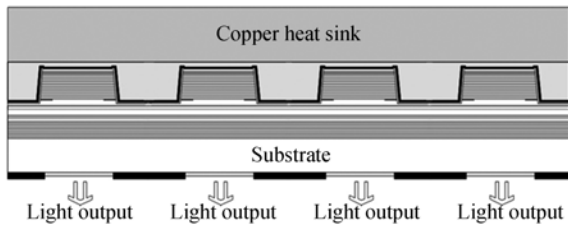


图 2 4×4 VCSEL 阵列的横截面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cross-section of 4×4 VCSEL array

3 能带带阶对输出功率的影响

为了研究不同的势垒材料对器件输出功率的影响, 首先比较了 In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs_{0.92}P_{0.08} 和 In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs 两种量子阱的能带结构。对于具有压应变的量子阱来说, 导带带阶和价带带

阶定义为:

$$\Delta E_c = E_c^b - E_c^{sw}, \quad (1)$$

$$\Delta E_v = E_{hh}^{sw} - E_{hh}^b. \quad (2)$$

公式 (1) 和 (2) 中各分量可由以下各式计算^[10]:

$$E_c = E_{av} + \frac{1}{3}\Delta + E_g + E_{hc}, \quad (3)$$

$$E_{hh} = E_{av} + E_{hv} + \frac{1}{2}E_t + \frac{1}{3}\Delta, \quad (4)$$

$$E_{hv} = 2a_v \left(1 - \frac{C_{12}}{C_{11}}\right)\epsilon, \quad (5)$$

$$E_t = -2b \left(1 + 2\frac{C_{12}}{C_{11}}\right)\epsilon, \quad (6)$$

$$E_{hc} = 2a_c \left(1 - \frac{C_{12}}{C_{11}}\right)\epsilon, \quad (7)$$

$$\epsilon = \epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \frac{a_s - a}{a}, \quad (8)$$

其中: 上标 *b* 和 *sw* 分别代表势垒和势阱材料, *E_{av}* 是平均价带子带能量, Δ 是自旋轨道分立能量, *E_g* 是材料的禁带宽度, *a_c* 和 *a_v* 分别是导带和价带的静形变势, *b* 是剪切形变势, *C₁₁* 和 *C₁₂* 是弹性劲度常量, *a_s* 和 *a* 分别是衬底和外延层的晶格常数。

根据差值公式:

$$P(AB_xC_{1-x}) = xP(AB) + (1-x)P(AC). \quad (9)$$

计算得到势阱和势垒的材料参数如表 1 所示。

表 1 300 K 时的各材料参数

Tab. 1 Material parameters at 300 K

Parameter	Symbol /(unit)	In _{0.2} Ga _{0.8} As	GaAs	GaAs _{0.92} P _{0.08}
Average valence band position	<i>E_{av}</i> /eV	-6.865	-6.92	-6.954 4
Spin-orbit split-off energy	Δ /eV	0.326	0.34	0.319 2
Bandgap energy	<i>E_g</i> /eV	1.222	1.42	1.627
Shear deformation potential	<i>b</i> /eV	-1.96	-2.0	-1.968
Hydrostatic deformation potential	<i>a_c</i> /eV	-7.6016	-7.71	-7.749 2
	<i>a_v</i> /eV	1.128	1.16	1.2032
	<i>C₁₁</i> × 10 ⁻⁵			
	(1011	11.433 8	12.21	12.357 2
Elastic stiffness constant	N · cm ⁻²)			
	<i>C₁₂</i> × 10 ⁻⁵			
	(1011	5.433 2	5.66	5.703 4
	N · cm ⁻²)			
Lattice constant	<i>a</i> × 10 ⁻¹⁰	5.734 26	5.653 25	5.637 03

利用公式(1)~(8)计算得到, $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱的导带带阶 $\Delta E_c = 254 \text{ meV}$, 价带带阶 $\Delta E_v = 44 \text{ meV}$ 。对于 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ 量子阱, 导带带阶 $\Delta E_c = 313 \text{ meV}$, 比势垒材料为 GaAs 时大了 23%, 而价带带阶 $\Delta E_v = 92 \text{ meV}$, 几乎是 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ 价带带阶的两倍。众所周知, 导带带阶和价带带阶决定了量子阱对电子和空穴的限制能力。与 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱相比, 当势垒材料是 $\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ 时, 能带带阶值的明显提高不仅能够很好地限制电子, 在激光器工作过程中更能够显著地防止空穴的泄露, 这将有利于提高器件的输出功率。图 3 是氧化孔径均为 $200 \mu\text{m}$, $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ 和 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ 两种量子阱结构器件输出功率的理论模拟结果。由图可以看出, 当势垒材料为 $\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ 时, 室温下器件的最大输出功率提高了 11%。

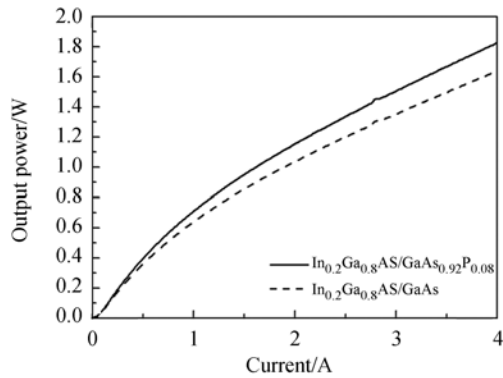


图 3 室温下 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ 和 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱结构的器件的输出功率

Fig. 3 Output power for devices with QW structures of $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ and $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ at room temperature

4 实验结果与讨论

实验研究所用器件是包含 16 个单元的二维 VCSEL 列阵, 每个单元的氧化孔径为 $200 \mu\text{m}$, 单元间距为 $250 \mu\text{m}$, 相应的有效发光面积约为 0.005 cm^2 。图 4 是室温脉冲工作条件下, 注入电流为 0.7 A (阈值以下) 时, 4×4 VCSEL 列阵的近场分布图样。在脉冲宽度为 60 ns , 占空比为 0.0006% 的工作条件下^[11], 分别测量了量子阱为 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ 和 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ 结

构的 VCSEL 列阵器件的脉冲峰值功率。由于实际测量和理论模拟中所使用的工作条件以及注入电流范围都不同, 所以两者的功率-电流曲线的斜率变化有所不同。实际测量结果如图 5 所示。可以看到在 110 A 的注入电流下, 量子阱为 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ 的列阵器件得到了 123 W 的脉冲峰值功率, 而量子阱为 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ 的器件的脉冲峰值功率为 109 W , 前者比后者大 13%。此外, 前者的功率密度达到 $24.6 \text{ kW}/\text{cm}^2$, 斜率效率达到 $1.11 \text{ W}/\text{A}$ 。

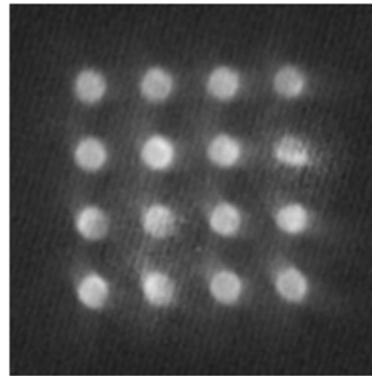


图 4 4×4 VCSEL 列阵在室温脉冲工作下低于阈值电流时的近场图样

Fig. 4 Subthreshold pattern of near field of 4×4 VCSEL array under pulsed operation at room temperature

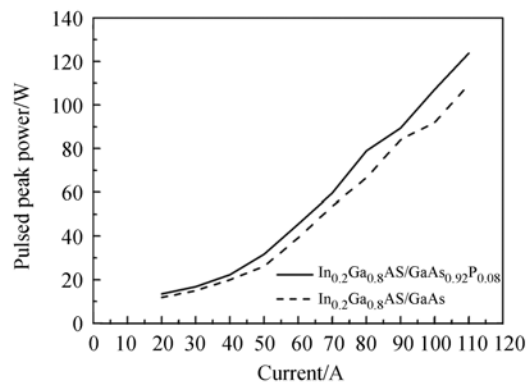


图 5 室温 60 ns 脉冲、 0.0006% 占空比的脉冲工作条件下, $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ 和 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱结构器件的峰值输出功率

Fig. 5 Peak output power for devices with QW structures of $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ and $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ under pulsed operation of 60 ns at room temperature and 0.0006% duty cycle

图 6 是在室温连续和脉冲工作条件下,高功率 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ 4×4 VCSEL 列阵器件的激光光谱和功率-电流-电压(L-I-V)曲线。由于泵浦电源在最大驱动电流上的限制,列阵器件在连续工作下的注入电流不能加的太高^[12]。在室温连续工作条件下,注入电流为 4 A 时器件的输出功率就达到 1.51 W,这个测量结果几乎是文献[4]报道结果的 2 倍。列阵器件的发光峰波长为 977.13 nm,光谱的半峰全宽为 1.0 nm,如图 6 中小图所示。

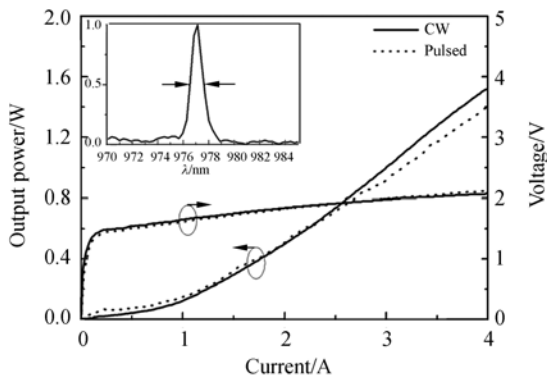


图 6 高功率 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ 4×4 VCSEL 列阵的 L-I-V 特性和光谱特性

Fig. 6 L-I-V and spectrum characteristics of high power 4×4 VCSEL array with $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$

列阵器件在室温连续工作下的阈值电流和微分串联电阻分别为 0.98 A 和 0.1 Ω ;在室温脉冲工作下的阈值电流和微分串联电阻分别为 0.82 A 和 0.14 Ω 。从图 6 可知,器件在室温连续工作下的阈值电流要比在脉冲工作下的高,这与在小孔径 VCSEL 器件中观察到的现象相反。但是器件在室温连续、阈值以上工作时的斜率效率还是比在脉冲工作下的高。连续电流的注入引起器件的温度升高,使得增益谱和腔模都向长波方向漂移。但是,由于增益谱的漂移速度比腔模的漂移速度快很多,导致它们的中心波长发生了严重的不匹配,这是使器件在连续工作下阈值电流增大的主要原因。此外,对于大孔径 VCSEL 器件,由于氧化孔径结构具有很强的光限制能力,在未达到阈值时热效应引起的增益抑制导致越来越多的高阶横模开始振荡,这使得在连续工作下,器件的阈值电流变大。但是随着连续注入电流的继续增大,热透镜效应也逐渐增强,对多横模起到了一定

的限制作用,从而使得模式边缘散射等损耗减小,因此当注入电流大于阈值但并未达到热饱和以前,器件的斜率效率高于脉冲工作下的斜率效率。

不同于以往的研究,本文应用一个有效参数 p 来快速地评估列阵器件的输出性能。这种方法的好处是可以根据 p 参数的定义式: $p = V_0 / (I_{th} R_d) = V_0 / (J_{th} \rho_l)$, 直接从器件的 L-I-V 特性中获得 p 参数的具体数值,而不需要经过进一步的光学测量^[7]。在 p 参数的定义式中, V_0 是开启电压; I_{th} , J_{th} , R_d 和 ρ_l 分别是阈值电流,阈值电流密度,微分电阻以及电阻率。对于实际器件来说,当 $p < 10$ 时,VCSEL 器件具有较差的输出性能;当 $p > 50$ 时,VCSEL 器件具有非常显著的输出性能。但是在实际中,一个 VCSEL 器件想要达到 $p > 50$ 是非常困难的。对于所测试的高功率 4×4 VCSEL 列阵,在连续工作下 $p = 15$,在脉冲工作下 $p = 13$ (器件输出波长为 980 nm, $V_0 \sim 1.5$ V),这表明此器件具有相对较好的输出性能。

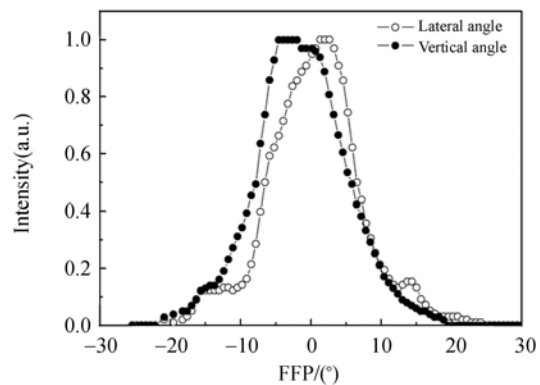


图 7 4×4 VCSEL 列阵的远场分布特性

Fig. 7 Far-field pattern of 4×4 VCSEL array

图 7 是高功率 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ 4×4 VCSEL 列阵的远场分布特性。在室温连续工作下,注入电流为 4 A 时,器件远场发散角的半角宽度 $\theta_{//}$ (横向发散角) 和 θ_{\perp} (垂直发散角) 分别为 12.9°, 12.6°, 表明此高功率列阵器件的输出光束具有较好的圆对称性和较小的发散角。

5 结 论

本文的研究发现:对于 VCSEL 来说,利用带隙较宽的 GaAsP 材料作为量子阱的势垒将有利于提高器件的输出功率。当注入电流为 110 A

时,有效出光面积约为 0.005 cm^2 的 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ 4×4 VCSEL 列阵获得了 123 W 的最大脉冲峰值输出功率,比具有相同发光面积的 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ 列阵器件大 13%,前者相应的功率密度和斜率效率分别为 24.6 kW/cm^2 和 1.11 W/A 。另外,文中利用 p 参数对高功率 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ 列阵器件的输出性能进行了初步评估,得到连续和脉冲工作

条件下的 p 值分别为 15 和 13,表明器件在两种工作条件下都具有较好的输出性能。此高功率列阵器件的输出光束具有较好的圆对称性以及较小的发散角,远场发散角的半角宽度分别为 12.9° ($\theta_{//}$) 和 12.6° (θ_{\perp})。由此证明了包含 3 个 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ 应变量子阱的 4×4 VCSEL 列阵器件在数据传输以及泵浦源选择等方面都将有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] AMANN M C, ORTSIEFER M, SHAU R, *et al.*. Vertical-cavity surface-emitting laser diodes for telecommunication wavelengths [J]. *SPIE*, 2002, 4871:123-129.
- [2] 王祥鹏,梁雪梅,李再金,等. 880 nm 半导体激光器列阵及光纤耦合模块[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(5): 1021-1027.
WANG X P, LIANG X M, LI Z J, *et al.*. 880 nm semiconductor laser diode arrays and fiber coupling module[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5): 1021-1027. (in Chinese)
- [3] CUI J J, NING Y Q, ZHANG Y, *et al.*. Design and characterization of a nonuniform linear vertical-cavity surface-emitting laser array with a Gaussian far-field distribution[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(18):3317-3321.
- [4] LI T, NING Y Q, SUN Y F, *et al.*. High-power InGaAs VCSEL's single devices and 2-D arrays[J]. *J. Lumin.*, 2007, 122-123: 571-573.
- [5] OTAKE N, ABE K, YAMADA H, *et al.*. High-power vertical-cavity surface-emitting laser under a short pulsed operation [J]. *APEX*, 2009, 2(052102): 052102-1-052102-2.
- [6] MILLER M, GRABHERR M, JÄGER R, *et al.*. High-power VCSEL arrays for emission in the Watt regime at room temperature [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, 13(5): 173-175.
- [7] SEURIN J F, GHOSH C L, KHALFIN V, *et al.*. High-power high-efficiency 2D VCSEL arrays[J]. *SPIE*, 2008, 6908: 690808-1-690808-14.
- [8] 侯立峰,钟景昌,赵英杰,等. 垂直腔面发射激光器条件下的 p 值分别为 15 和 13,表明器件在两种工作条件下都具有较好的输出性能。此高功率列阵器件的输出光束具有较好的圆对称性以及较小的发散角,远场发散角的半角宽度分别为 12.9° ($\theta_{//}$) 和 12.6° (θ_{\perp})。由此证明了包含 3 个 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ 应变量子阱的 4×4 VCSEL 列阵器件在数据传输以及泵浦源选择等方面都将有良好的应用前景。
- 的湿法氧化速率规律[J]. *中国激光*, 2009, 36(4): 790-793.
- [9] 李再金,胡黎明,王焯,等. 808 nm 含铝半导体激光器的腔面镀膜[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(6): 1258-1262.
LI Z J, HU L M, WANG Y, *et al.*. Facet coating for 808 nm Al-containing semiconductor laser diodes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6): 1258-1262. (in Chinese)
- [10] ZHANG P, SONG Y R, TIAN J R, *et al.*. Gain characteristics of the InGaAs strained quantum wells with GaAs, AlGaAs, and GaAsP barriers in vertical-external-cavity surface-emitting lasers[J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, 105:053103-1-053103-8.
- [11] 陈彦超,赵柏泰,李伟. 用于纳秒级窄脉冲工作的大功率半导体激光器模块[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(4):695-700.
CHEN Y CH, ZHAO B T, LI W. High peak power semiconductor laser module for producing nanosecond pulse[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4): 695-700. (in Chinese)
- [12] 丛梦龙,李黎,崔艳松,等. 控制半导体激光器的高稳定度数字化驱动电源的设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(7):1629-1636.
CONG M L, LI L, CUI Y S, *et al.*. Design of high stability digital control driving system for semiconductor laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7):1629-1636. (in Chinese)

作者简介:



刘 迪(1984—),女,吉林市人,博士研究生,主要从事半导体光电子器件等方面的研究。E-mail: liudi_0424@163.com



王立军(1946—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事大功率半导体激光器及其应用方面的研究。E-mail: wanglj@ciomp.ac.cn



张金龙(1975—),男,吉林舒兰人,工程师,主要从事无铝量子阱边发射大功率半导体激光器的研究及其散热、封装、镀膜工艺的开发工作。E-mail: pled3588@yahoo.com.cn

导师简介:



宁永强(1965—),男,吉林市人,研究员,主要从事半导体光电子器件等方面的研究。E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn



张 星(1982—),男,吉林长春人,助理研究员,主要从事半导体光电子器件等方面的研究。E-mail: zhangx@ciomp.ac.cn

● 下期预告

基于高斯光学齐次坐标变换的光机装调方法

胡春晖^{1,2}, 颜昌翔¹

(1. 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 100039)

高性能光学系统装调是实现设计目标的重要环节。由于装调调整量依赖于光机结构设计,装调所用参考坐标系往往异于光学设计所用。文中为了精确描述调整量对高斯像位置的影响,建立基准坐标系下引入装调误差量的高斯光学齐次坐标变换模型。针对具体的光机结构,建立高斯像像旋和离焦对调整变量的函数,据此计算小的结构变化导致离轴三反望远物镜高斯像面的移动,结果与光学设计软件对最佳像面位置优化结果的相对差别小于 4%。利用方差合成方法,建立线性规划模型,对 17 个装调变量做了最宽松的误差分配方案。通过 Monte Carlo 方法,验证分配方案在 $\pm 300 \mu\text{m}$ 调焦能力下满足各视场 $\pm 10 \mu\text{m}$ 的焦深要求。本文的方法忽略了像差复杂、微小影响,适合于包含像差校正较好的光学组件或众多平面光学元件的成像光学系统的装调。