

大功率垂直腔底发射半导体激光器的光束质量

崔锦江¹ 宁永强² 姜琛昱¹ 王帆¹ 高静¹ 张星² 王贞福² 武晓东¹ 檀慧明¹

¹ 苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215163
² 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

摘要 从 M^2 因子、远场发散角、近场及远场光强分布等方面对大功率底发射半导体激光器光束质量进行研究, 分析了不同器件参数对光束质量的影响, 为寻找有效改善光束质量的方法提供了依据。设计了一种具有新型排列方式的垂直腔面发射半导体激光 (VCSEL) 阵列。通过调制阵列中各单元直径以及单元间距, 在 4 A 的工作电流下得到 1 kW/cm^2 的高功率密度和高斯远场分布。与具有相同出光面积的单管器件和 4×4 二维阵列比较, 新型阵列的光谱特性及光束质量均具有优越性。

关键词 激光器; 垂直腔面发射; 阵列; 光束质量

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201138.0102002

Beam Quality of High Power Vertical-Cavity Bottom-Emitting Semiconductor Lasers

Cui Jinjiang¹ Ning Yongqiang² Jiang Chenyu¹ Wang Fan¹ Gao Jing¹

Zhang Xing² Wang Zhenfu² Wu Xiaodong¹ Tan Huiming¹

¹Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Suzhou, Jiangsu 215163, China
²Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract Research on the beam quality of high-power bottom-emitting laser-diode from the M^2 factor, the far field divergence angle, near field and far-field intensity distribution is done. Analysis of different device parameters on the beam quality is also made. Vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) array with a novel arrangement is designed. By the modulation of the aperture size and the centre spacing of the units, high power density up to 1 kW/cm^2 and good beam property of Gaussian far-field distribution at 4 A injecting current are obtained. Compared with the single device and the 4×4 two-dimensional array with the same total lasing area, the novel array is better in the property of lasing spectra and far-field distribution, etc.

Key words lasers; vertical cavity surface-emitting; array; beam quality

OCIS codes 140.5960; 140.3290; 140.3295

1 引言

由于垂直腔面发射半导体激光器 (VCSEL) 具有光束圆形对称、阈值低、易形成二维集成、可以动态单模工作等优点, 这种新型半导体激光器作为一种理想光源, 无论在国防军事还是在民用等方面都

有广泛的应用^[1~3]。随着工业、军事、医疗和空间通信等领域对大功率激光器的需求越来越广, 除要求激光器具有高功率输出外, 对激光器的光束质量也提出更高要求, 要求激光器光束具有近衍射极限的单模高斯远场分布。这样的光束既提高了激光功率

收稿日期: 2010-03-18; 收到修改稿日期: 2010-07-07

基金项目: 国家自然科学基金 (60636020, 60706007, 10974012, 60876036 和 90923037)、中国科学院知识创新工程重要方向项目 (094305L099)、中国科学院知识创新工程领域前沿项目、吉林省科技发展项目 (20080335 和 200805168)、苏州医工所青年引导基金 (093101L090) 和苏州医工所筹建期科技创新项目 (I05301L101, I05401L102) 资助课题。

作者简介: 崔锦江 (1981), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事半导体光电子器件方面的研究。

E-mail: cuijjciomp@yahoo.com.cn

密度,也满足与光纤的高效耦合和高效固体激光抽运的要求^[4-6]。

为了提高器件的输出功率,一个途径是增大器件出光孔径,但这种方法在提高了输出功率的同时也造成了光束质量的变差,并且由于器件效率随出光孔径增大而减小,绝大部分的电功率转换成热,给继续提高输出功率带来极大的困难^[7]。提高功率的另一种方法就是制成二维阵列,这种结构具有结构简单、阵列密度高、功率大、散热方便等优点,但阵列器件各单元光束叠加后的光束特性也比较复杂。

本文从 M^2 因子、远场发散角、近场及远场的光强分布等方面对大功率底发射半导体激光器的光束质量进行研究,分析了不同器件参数对光束质量的影响。并设计了一种具有新型排列方式的 VCSEL 阵列。通过数学模型对阵列各单元叠加后的近场远场光强分布进行了模拟,得到的新型阵列的远场分布与实验结果吻合较好。

2 器件结构及制备

VCSEL 外延片采用金属氧化物化学气相沉积法(MOCVD)生长。外延片结构如图 1 所示,外延层依次为: 30 对 C($1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$) 掺杂的 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ / GaAs p 型分布布拉格反射镜(DBR),反射谱中心波长为 980 nm,反射率达 99.9%;p 型 DBR 与光学谐振腔之间生长一层 30 nm 厚的 AlAs 层,这一层经选择氧化后变成低折射率的隔离氧化物 Al_2O_3 ,以减少横向电流扩展效应,产生对有源层的高效电流限制;谐振腔由 3 个 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ / GaAs 量子阱(QW)的有源区和两边的 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 空间层构成,有源区阱厚和垒厚分别为 8 nm 和 10 nm,激光波长为 980 nm;n 型 DBR 包括 20 对 Si($2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$) 掺杂的 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ / GaAs ,提供 99.3% 反射率。

器件的制备过程首先从 p 面工艺开始。首先,用光刻法在外延片 p 表面刻出阵列图形,然后用湿

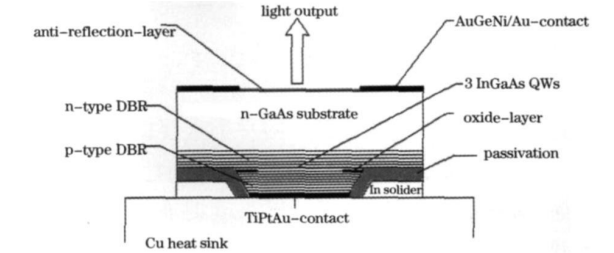


图 1 底发射 VCSEL 器件结构

Fig. 1 Structure of bottom-emitting VCSEL

法腐蚀方法腐蚀出台面,腐蚀深度要超过 AlAs 层并达到有源区。在 420 °C 石英炉内由氮气携带 90% 水蒸气对 AlAs 层进行选择氧化形成 Al_2O_3 绝缘层。大面积生长 SiO_2 绝缘层防止电流从台面侧向注入导致器件短路,再将台面中央电极区的 SiO_2 腐蚀掉,大面积溅射 TiPtAu 作为 p 型电极。为了减少衬底损耗,将 n 面 GaAs 衬底化学减薄至 150 μm 左右,采用双面对准工艺刻出出光窗口,蒸镀 AuGeNi/Au 形成 n 面欧姆接触,并在 420 °C 氮气保护下合金 1 min。解理管芯并将 p 面装配在金刚石热沉上。

3 器件光束质量测试分析

3.1 电流对光束质量的影响

按 2 节方法制作了直径为 300 μm 的单管,并利用透镜变换法^[8]测量了器件在不同工作电流下的光束质量参数。图 2 描述了在不同的注入电流下,光束半径与光束传播距离的关系,将光束半径 $W(Z)$ 和传播距离 Z 代入描写实际激光光束传播的高斯公式^[9]

$$W(Z) = W_0 \sqrt{1 + \left[\frac{(Z - Z_0) M^2}{W_0^2} \right]^2}, \quad (1)$$

通过高斯拟合确定了当注入电流分别为 900, 1500, 3000 和 6000 mA 时, M^2 因子的值分别为 66, 58, 44 和 53。图 3 为不同电流下直径 300 μm 器件的远场图分布。当注入电流较小时,由于有源区面积比较大,只有边缘部分激励,此时光束质量较差,光斑呈环形;随着电流的增大,有源区电流密度趋于平均并达到全部激励,此时光斑为圆形对称,且光束质量因此随着光束质量的改善而变小;继续增大电流时,有源区很容易造成电流拥挤,从而破坏了有源区电流分布,光束质量开始变差^[10]。

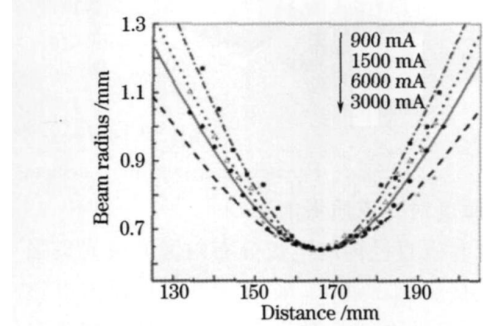


图 2 不同电流下光束半径与传播距离的关系

Fig. 2 Relationship between beam radius and propagation distance at different currents

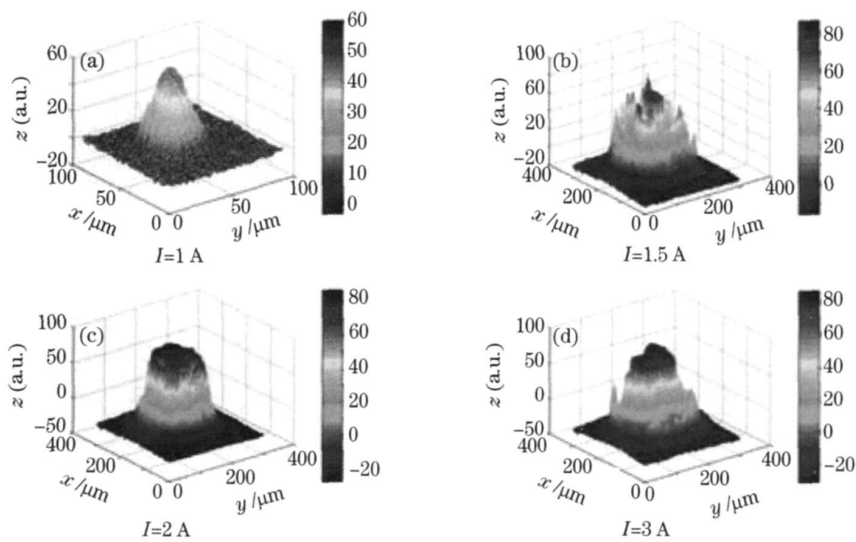


图3 不同注入电流下器件的远场分布

Fig. 3 Far-field distributions at different currents

3.2 出光孔径对光束质量的影响

图4为200, 300, 400和600 μm不同直径的器件在相同注入电流(3 A)下的远场光斑强度, 经Matlab处理后得到器件的远场分布。如图4所示, 小直径底发射器件电流分布比较均匀。有源区边缘电流密度与中心电流密度相差不大, 整个窗口全部

激射。阈值条件下光束分布近似高斯模型。远场光束以中心轴为对称中心均匀分布, 中心光强较强, 光束发散角小于15°。但随着有源区直径的增加, 激射强度分布越来越不均匀, 部分注入载流子浓度较高的区域有较高激射, 此时的光束分布不均匀, 光束质量随着出光孔径的增大而变差。

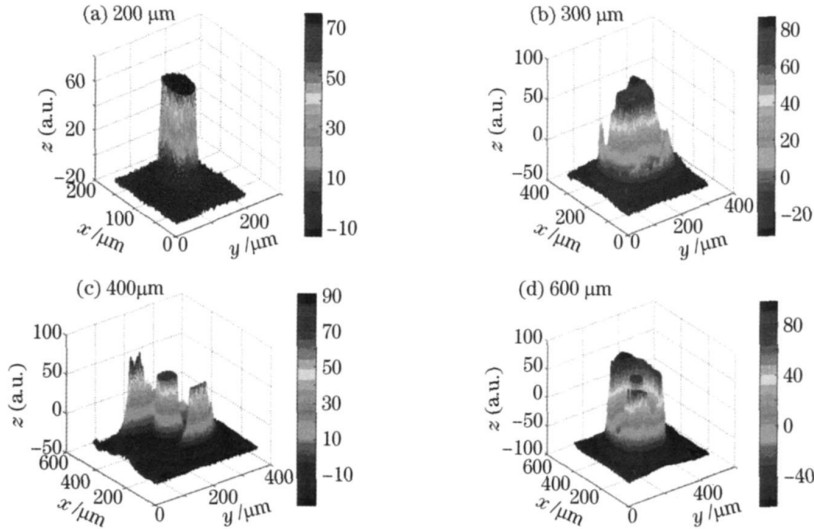


图4 不同直径器件在3 A电流下的远场图

Fig. 4 Far-field distribution of devices with different parameters at current of 3 A

3.3 衬底厚度对光束质量的影响

有源区有效直径内的电流分布对激光束光斑强度分布有直接影响。通常, 采用有源区直径内电流均匀分布模型, 从而认为激光束光斑也是均匀分布的。实际上, 对于大面积底发射VCSEL, 由于n型下电极是围绕着圆形激光输出窗口的环形电极, 这就可能会使得有源区内电流分布具有不均匀性。因

此, 采用适当的技术, 使激光束光斑能够均匀分布, 则是大面积底发射VCSEL的一个重要研究课题。

用ANSYS有限元分析软件, 分别计算了GaAs衬底厚度为10, 50, 100和200 μm时有源区电流密度沿有源区半径的分布。图5给出了有源区半径取为150 μm, 串联电阻取为0.8 Ω时, 有源区的电流密度分布随衬底厚度(D_{sub})的变化关系。从图中可

以看出,中央区域电流密度随着衬底厚度的增加而增加,当衬底厚度大于 100 μm 以后,有源区的电流密度分布就比较均匀了。考虑到衬底损耗的因素,衬底厚度也不宜太厚。综合各种因素以后,衬底最佳厚度取 100 μm 左右。

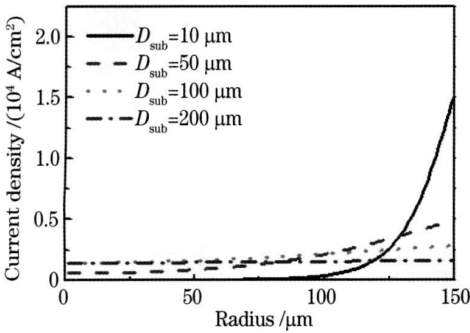


图 5 有源区的电流密度分布与衬底厚度的关系
Fig. 5 Relationship between current density of active region and thickness of substrate

3.4 温度对光束质量的影响

图 6 是单元直径为 90 μm 的 4 × 4 阵列器件在不同热沉温度下的远场发散角。由于阵列器件高密度集成单元间距小,单元间相互影响显著,因此热效应对阵列器件的影响尤为突出。随着温度的升高,出光窗口积聚的热量以及对部分激光能量的吸收,使窗口处的热透镜效应加剧,影响激光的传播方向和远场的能量集中度,对于高功率激光此效应会显著影响光束质量。因此,温度越高,光束质量越差。而阵列器件的单元间距小加剧了热效应的影响,如果单元间距较大又会影响单元光束间耦合,影响阵列输出的光束质量。因此,调整阵列单元的排列方式,从而最大程度降低热效应并达到单元光束耦合后的较高光束质量也是一个重要的研究课题。

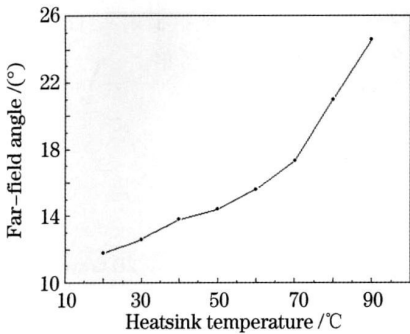


图 6 不同热沉温度下的远场发散角

Fig. 6 Far-field angles at different temperatures of heatsink

4 新型阵列的设计和测试

4.1 结构设计及模拟

考虑单元出光孔径、单元间距、热效应影响等因素,设计了一种具有新型排列方式的垂直腔面发射激光器阵列,不同于国内外报道的单元直径与间距均相等的二维阵列,新阵列由直径分别为 200, 150 和 100 μm 成中心对称分布的 5 个单元组成,单元圆心间距分别为 250 μm 和 200 μm。组成新型阵列的大直径单元输出光束均为圆形对称的多横模厄米-高斯光束传输^[11],多模高斯光束和基模高斯光束的关系如图 7 所示, $w_{0m} = w_0 M^2$ 为实际光束的束腰, w_0 为基模光束的束腰, M^2 为光束质量因子。

多模高斯光束的光束能量传输可通过每个模式的能量 $I_i(x, z)$ 加权平均来计算,即

$$I_m(x, z) = \sum_{i=0}^{\infty} C_i I_i(x, z), \tag{2}$$

其中加权因子

$$C_i = \frac{2w_0^2}{w_{0m}^2 + w_0^2} \left(\frac{w_{0m}^2 - w_0^2}{w_{0m}^2 + w_0^2} \right)^i, \tag{3}$$

每个模式的厄米高斯分布

$$I_i(x, z) = A_i H_i^2 \left[\frac{\sqrt{2}}{w_0(z)} x \right] \exp \left[-2 \frac{x^2}{w_0^2(z)} \right], \tag{4}$$

式中 $A_i = 2n_{eff} \sqrt{\frac{w_0}{\pi}} P$ 是归一化系数, n_{eff} 为有效折射率, $H_i(x) = (-1)^i \exp(x^2) \frac{d^i}{dx^i} \exp(-x^2)$ 为埃尔米特多项式^[12],将(3),(4)式代入(2)式得到

$$I_m(x, z) = P \sum_{i=0}^{\infty} \frac{2w_0^2}{w_{0m}^2 + w_0^2} \left(\frac{w_{0m}^2 - w_0^2}{w_{0m}^2 + w_0^2} \right)^i H_i^2 \left[\frac{\sqrt{2}}{w_0(z)} x \right] \exp \left[-2 \frac{x^2}{w_0^2(z)} \right], \tag{5}$$

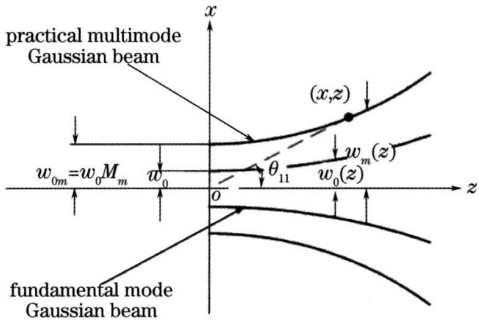


图 7 多模高斯光束与基模高斯光束的关系

Fig. 7 Relationship between multi-mode Gaussian beam and fundamental mode Gaussian beam

通过理论计算得到直径为 100, 150 和 200 μm 单元的功率 P 理论值分别为 0.364, 0.856, 1.52 W, 用隔离器(ISO)认可的透镜变换法得到 M^2 分别为 35, 47, 61。将理想基模高斯光束束腰 $1.296 \text{ m}^{[13]}$ 代入 $w_{0m} = w_0 M^2$ 得到单元近场束腰分别为 7.66, 8.88, 10.12 μm 。将各单元的参数 P 和 w_{0m} 代入(5)式并按间距排列进行叠加, 模拟得到近场光强分布如图 8 所示。将近场分布(5)式进行傅里叶变换得到各单元的远场图形表达式为

$$I_m(\theta, z) = P \frac{2w_0^2}{w_{0m}^2 + w_0^2} \left(\frac{w_{0m}^2 - w_0^2}{w_{0m}^2 + w_0^2} \right)^i H_i^2 \left[\frac{\sqrt{2}}{w_0(z)} \tan(\theta) z \right] \exp \left[-2 \frac{\tan^2(\theta) z^2}{w_0^2(z)} \right], \quad (6)$$

各单元叠加后得到距离出光平面 5 cm 处远场光强分布如图 9 所示, 得出结论新型阵列的各单元光束叠加后在远场呈现高斯分布。

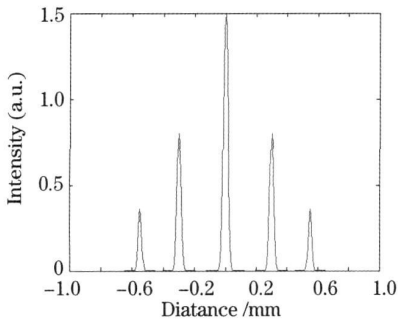


图 8 各单元光束叠加后的新型阵列近场分布
Fig. 8 Near-field distribution of novel array superimposed of five units

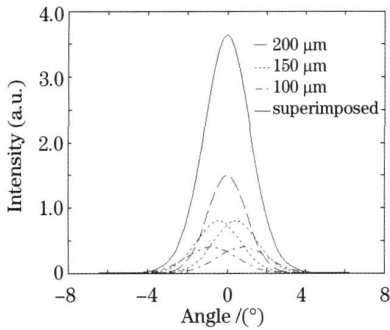


图 9 各单元叠加后的新型阵列远场分布
Fig. 9 Far-field distribution of novel array superimposed of five units

4.2 器件测试结果及分析

图 10 为新型阵列芯片图及 $P-I-V$ 特性曲线, 在室温条件下, 注入电流为 4 A 时器件获得最大连续输出功率为 880 mW, 相应的光功率密度达到 1 kW/cm^2 , 此时的斜率效率为 0.3 W/A , 器件的阈

值电流为 0.56 A, 微分电阻 0.09Ω 。内插图 CCD 抓拍的光斑经 Matlab 处理后得到的器件远场强度分布, 可见这种新型阵列各单元光束叠加后在远场呈现高斯分布。

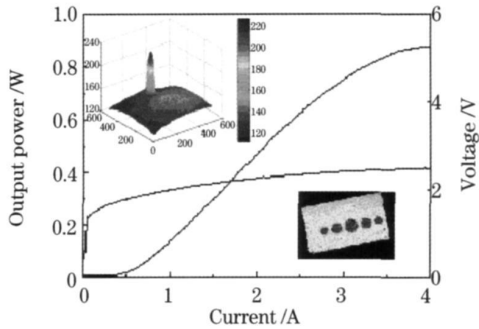


图 10 新型阵列的 $P-I-V$ 特性、远场及芯片
Fig. 10 $P-I-V$ curves, far-field and device photos of novel array

为了直观说明这种新型阵列的器件特性, 与本实验室曾经报道过的与新型阵列具有相同出光面积的单管和 4×4 二维阵列进行了比较。其中单管的窗口直径为 $300 \mu\text{m}$, 二维阵列由 16 个窗口直径为 $50 \mu\text{m}$, 单元间距为 $250 \mu\text{m}$ 的单元组成。图 11 比较了 3 种器件的 $I-L$ 特性, 可见新型阵列的最大输出功率要高于 4×4 阵列的 0.70 W , 但是要略低于单管的 0.94 W 。这是由于, 跟单管器件相比阵列器件的热干扰现象比较严重, 有很大一部分光能转化为热能而导致器件的转换效率降低, 所以相同注入电流时单管输出功率较大^[14]。另外, 由于 4×4 阵列的单元密度比一维阵列大使得热干扰现象更严重, 而一维阵列每个单元的直径都比二维阵列较大, 有利于散热, 所以新型一维阵列的功率输出特性优于 4×4 二维阵列。一维阵列在阈值电流方面也表现出色。因为相比之下单管器件的出光单元的有源区面积较大引起更多的非辐射复合现象, 这样就需要更多的载流子来达到激射。

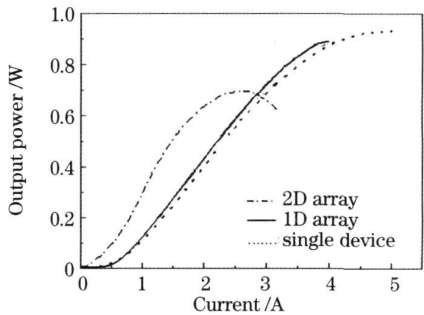


图 11 3 种结构的 $P-I$ 曲线
Fig. 11 $P-I$ curves of three structures

图 12 所示的 3 种器件的激光光谱图说明, 新型阵列的波长漂移和光谱半峰全宽均最小。由于 4 × 4 阵列各单元直径较小且排列密度大, 单元之间热干扰现象比较明显, 加重了器件的散热问题。严重的热干扰现象会影响注入电流的空间分布, 以及有源区增益和折射率分布, 从而降低了输出功率并引起波长红移。而单管的出光单元的直径较大引起电流注入不均匀导致红移比较明显。

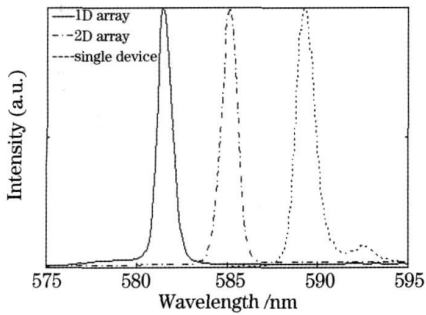


图 12 3 种结构的光谱特性

Fig. 12 Spectra of three structures

图 13 给出了 3 种器件在不同注入电流下的远场分布图, 以及 CCD 抓拍的相应电流下的光斑图片。对于单管器件来说, 当注入电流较低的时候, 由

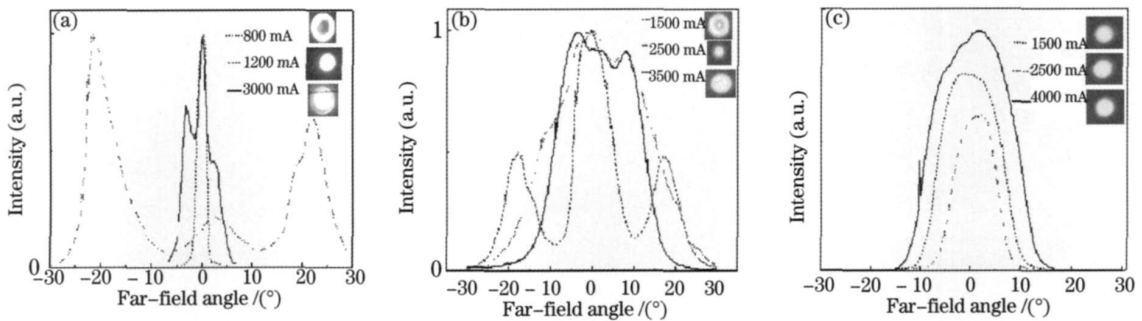


图 13 3 种结构激光器的远场分布。(a) 单管, (b) 二维阵列, (c) 新型一维阵列

Fig. 13 Far-field distributions of three structures. (a) single device, (b) 2D array, (c) new 1D array

5 结 论

设计了一种具有新型排列方式的 VCSEL 阵列。不同于国内外报道的单元直径与间距均相等的二维阵列, 该阵列由直径分别为 200, 150 和 100 μm 成中心对称分布的 5 个单元组成, 单元圆心间距分别为 250 μm 和 200 μm。通过调制阵列中各单元直径以及单元间距, 工作电流为 4 A 得到 1 kW/cm² 的高功率密度和高斯远场分布, 且在 0~ 6 A 范围的工作电流下远场发散角均小于 18°。与具有相同出光面积的单管器件和 4 × 4 二维阵列比较, 该阵列的光谱特性及光束质量均具有一定程度的提高。

于出光单元直径较大, 而且电流从欧姆接触层的边缘注入, 所以载流子在不能充满整个有源区的时候首先占据有源区边缘的位置, 使得远场出现环形的能量分布。随着注入电流的增大并达到 2 倍阈值左右时, 载流子逐渐布满有源区并达到全部激射, 这时的远场为较亮的圆形光斑。当电流继续增加, 有源区载流子开始拥挤并出现烧孔现象, 此时远场会出现一个主峰和几个次峰的能量分布。对于 4 × 4 阵列, 在注入电流较小为 1500 mA 时, 由于单元光束强度较小, 且单元之间间距较大, 光束耦合现象不明显, 各单元高斯光束叠加后在远场仍然呈现一系列峰值排列。随着注入电流的增大, 渐强的单元光束耦合现象逐渐明显, 远场呈近超高斯光束分布, 发散角较大^[15]。而新型一维阵列调整了阵列单元直径和间距, 使之呈中间单元直径较大并向两侧递减的中心对称分布, 相应的中间强度较高的单元光束与两侧强度递减的单元光束耦合后在远场形成高斯强度分布, 并且在 0~ 6 A 范围的工作电流下均能保证高斯分布和小于 18° 的发散角。实验结果与的模拟结果吻合较好。这样的光束输出既提高了激光功率密度, 也易于满足与光纤的高效耦合和高效固体激光抽运的要求。

参 考 文 献

- 1 Wang Zhenfu, Ning Yongqiang, Zhang Yan *et al.*. High-power and microlens-integrated vertical cavity surface emitting lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 19631967
王贞福, 宁永强, 张岩等. 微透镜集成大功率垂直腔面发射激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 19631967
- 2 Zhao Yingjie, Hao Yongqin, Li Guangjun *et al.*. Fabrication of new structure vertical-cavity surface-emitting laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 19461950
赵英杰, 郝永芹, 李广军等. 新型结构垂直腔面发射激光器的研制[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 19461950
- 3 Wang Tongxi, Guo Xia, Guan Baolu *et al.*. Study on the small signal modulation characteristic of internal-contact oxide-confined vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 10571061
王同喜, 郭霞, 关宝璐等. 内腔接触氧化限制型垂直腔面发射

- 激光器小信号调制特性研究[J]. 中国激光, 2009, **36**(5): 10571061
- 4 Cui Jinjiang, Ning Yongqiang, Zhang Yan *et al.*. High beam quality novel vertical cavity surface emitting laser array[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 19411945
崔锦江, 宁永强, 张 岩 等. 高光束质量新型垂直腔面发射激光器阵列[J]. 中国激光, 2009, **36**(8): 19411945
- 5 Hou Lifeng, Zhong Jingchang, Zhao Yingjie *et al.*. Law of wet oxidation rate in vertical cavity surface-emitting lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 790793
侯立峰, 钟景昌, 赵英杰 等. 垂直腔面发射激光器的湿法氧化速率规律[J]. 中国激光, 2009, **36**(4): 790793
- 6 Li Xiao, Wang Yongang, Zhang Shiqian *et al.*. Passively mode-locked side-pumped Nd YAG laser with SESAM [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 31033107
李 霄, 王勇刚, 张世强 等. 半导体可饱和吸收镜被动锁模侧面抽运 Nd YAG 激光器研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(11): 31033107
- 7 Li Te, Ning Yongqiang, Sun Yanfang *et al.*. Beam quality of 980 nm high power vertical cavity surface emitting laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5): 641645
李 特, 宁永强, 孙艳芳 等. 980 nm 高功率 VCSEL 的光束质量[J]. 中国激光, 2007, **34**(5): 641645
- 8 International Organization for Standardization, Lasers and laser-related equipment. Test methods for laser beam parameters, beam widths, divergence angle and beam propagation factor [S]. ISO 11146, 1996
- 9 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong *et al.*. The Principle of Laser (The Fourth Edition) [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000. 75
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘 等. 激光原理(第四版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000. 75
- 10 Eric R. Hegblom, Near M. Margalit, Brian J. Thibeault *et al.*. Current spreading in apertured vertical cavity lasers[C]. *SPIE*, 1997, **3003**: 176180
- 11 Li Ping, Sun Jiangqiang, Chen Huimin *et al.*. Study the model of laser diode emitted beam based on multimode Gaussian distribution[C]. *SPIE*, 2007, **6824**: 68241H
- 12 Du Baoxun. The Principle of Semiconductor Lasers [M]. Beijing: Arms Industry Press, 2004. 108
杜宝勋. 半导体激光器原理[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2004. 108
- 13 Spilios A. Riyopoulos, D. Dialetis, J. Liu *et al.*. Generic representation of active cavity VCSEL eigenmodes by optimized waist Gauss-Laguerre modes[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2001, **7**(2): 312327
- 14 Jiang Jianping. Semiconductor Laser [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000
江剑平. 半导体激光器[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000
- 15 Anthony A. Tovar. Multi-Gaussian beams as a super-Gaussian alternative[C]. *SPIE*, 2000, **3930**: 8794