

高功率人眼安全波段垂直腔面发射激光器

张星^{1,2}, 张建伟^{2*}, 宁永强², 王立军²¹长春中科长光时空光电技术有限公司, 吉林 长春 130102;²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

摘要 首次报道了连续输出功率 > 1 W、脉冲输出功率 > 10 W 的 1550 nm 波长垂直腔面发射半导体激光器 (VCSEL) 阵列。对 1550 nm VCSEL 激光器单个发光单元的热阻特性进行了分析, 建立了基于热阻分析及可变量产热量的 VCSEL 阵列热模型, 优化了 VCSEL 发光单元间距, 在理论上保证了阵列内部具有均匀的温度分布。制备了发光单元边缘间距为 30 μm 的高密度集成 1550 nm 波长 VCSEL 阵列, 并对其在连续工作及脉冲电源驱动条件下的输出特性进行了测试分析。当 VCSEL 阵列的工作温度为 15 $^{\circ}\text{C}$ 时, 最高连续输出功率达到 1.05 W; 即使工作温度增加至 65 $^{\circ}\text{C}$, VCSEL 的最高连续输出功率仍能达到 0.42 W。在脉宽为 5 μs 、重复频率为 1 kHz 的脉冲条件下, VCSEL 在 15 $^{\circ}\text{C}$ 时的最大峰值功率达到 10.5 W, 此时 VCSEL 呈现出热饱和现象。当脉冲功率为 10.5 W 时, 阵列远场的光斑仍然呈圆形对称形貌, 两个正交方向上的远场发散角分别为 26.69 $^{\circ}$ 和 26.98 $^{\circ}$ 。

关键词 激光器; 1550 nm 垂直腔面发射激光器阵列; 高功率; 人眼安全; 激光雷达

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221401

1 引言

垂直腔面发射半导体激光器 (VCSEL) 具有圆形对称光斑、窄的激光光谱及二维可集成等独特优势^[1-3]。高密度集成的 VCSEL 阵列的激光功率可以达到瓦级乃至数十瓦, 近年来, 高功率的 VCSEL 在 3D 智能感知领域中得到了广泛应用^[4-5]。发光波长为 850、905、940 nm 的 VCSEL 阵列技术相对成熟, 且具有高的激光功率与效率^[6-7]。目前, 3D 感知技术大多采用上述波长的 VCSEL 激光光源, 然而这类波长的激光易于对人眼角膜、视网膜有直接损伤^[8]。波长为 1550 nm 的 VCSEL 激光在通过眼球的过程中会被水快速吸收, 不易直接对人眼关键部位造成损伤, 因此其人眼安全阈值比 1000 nm 以下的激光高两个数量级以上^[9-10]。1550 nm 波长的光纤激光器对智能感知技术的体积、功耗及成本存在制约作用。1550 nm 边发射半导体激光器的腔面损伤特性限制了功率提升^[11], 并且边发射半导体激光器具有较高的成本, 其非对称椭圆光斑形貌^[12]增加了激光雷达光源系统的成本与体积。随着万物互联感知以及自动驾驶技术的不断发展, 未来有望实现更低成本与更小体积的 1550 nm VCSEL, 而如何实现瓦级甚至数十瓦的激光功率水平是当前 1550 nm VCSEL 面临的重要挑战^[13-14]。

受限于 InP 材料体系, 1550 nm VCSEL 无法采用

一次外延技术直接形成全部的外延层材料, 而必须采用更为复杂的材料和工艺结构来获取高可靠的分布布拉格反射镜 (DBR) 以及电流约束结构^[15]。例如, 为兼顾 P 型 DBR (P-DBR) 结构的反射率与电热特性, 需要将成熟的 AlGaAs DBR 键合至发光区, 或者是采用 AlInGaAs 半导体 DBR 与介质膜 DBR 结合的方式形成完整的 P-DBR 结构^[16]。为实现良好的电流约束, 须采用隧穿结结构刻蚀出高平整度的隧道结台面^[17], 并采用高质量的二次外延技术在隧道结台面表面继续外延生长 DBR 结构。因此, 单个 1550 nm VCSEL 发光单元的出光性能往往与近红外短波波段 (如 940 nm) VCSEL 相差极大。这主要是因为上述工艺引入了较为严重的热效应, 研究者极为关注这类激光器的热阻优化。将低热导率的 AlGaAs 反射镜结构与 1550 nm VCSEL 发光区进行键合, 激光器的热阻可以降低至 1300 K/W^[18]; 采用 InP 基四元 DBR 结构的 1550 nm VCSEL, 热阻可优化至 1500~3000 K/W^[19]。通过上述方法, 研究者实现了高性能的 1550 nm VCSEL。Hofmann 等^[20]报道了调制速率为 40 Gbit/s 的 1550 nm VCSEL。Caliman 等^[21]实现了单模输出 8 mW 的 1550 nm VCSEL。Rao 等^[22]采用高对比度光栅 (HCG) 技术实现了单模输出功率为 2.4 mW 的 1550 nm VCSEL, 并实现了速度为 40 Gbit/s 的无误码差分相移键控信号传输。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

收稿日期: 2022-11-07; 修回日期: 2022-11-24; 录用日期: 2022-12-16; 网络首发日期: 2023-02-07

基金项目: 国家自然科学基金 (62274165, 61874119, 52172165)、吉林省重点科技攻关项目 (20220201066GX)

通信作者: *zjw1985@ciomp.ac.cn

报道了国内首个单模功率超过 1 mW 的 1550 nm VCSEL^[13]。

高功率的 VCSEL 阵列技术在国际上鲜有报道。这是由于 1550 nm VCSEL 制备需要采用隧道结、二次外延及复合 DBR 或者晶圆键合等复杂的工艺,因此制备具有高密度集成特性的 1550 nm VCSEL 阵列是一项极具挑战的工作,而 VCSEL 阵列能否实现高功率输出则主要取决于阵列是否具备良好的散热特性。Mereuta 等^[14]采用光泵浦外腔面发射方案,实现了高功率 1550 nm 垂直外腔面发射激光器(VECSEL),通过晶圆键合工艺实现了 1550 nm 增益芯片的良好散热,获得了 3.65 W 的光泵浦 VECSEL 连续激光功率。

本文在前期 1550 nm VCSEL 单管研究的基础上,开发出高功率 VCSEL 阵列,通过对 VCSEL 的热特性进行优化,开发出连续输出功率为瓦级、脉冲输出功率超过 10 W 的 1550 nm VCSEL 阵列。文中第二部分主要介绍了 VCSEL 单元的热特性及优化方法与结果,第三部分介绍了 1550 nm VCSEL 在连续工作及脉冲电源驱动条件下的性能,第四部分为总结。

2 1550 nm VCSEL 的热特性分析与优化

2.1 VCSEL 的热阻特性测试及分析

热阻是模拟 VCSEL 热效应的关键参数,为获取准确的 VCSEL 单元热阻参数,我们对单个 VCSEL 的电热参数进行测试及分析。图 1 为 1550 nm VCSEL 单管连续工作时的功率-电压-电流曲线。VCSEL 单管的阈值电流为 6 mA,工作电流为 20 mA 时的激光功率可达 1.1 mW,VCSEL 的功率曲线呈现出较好的线性,并未出现明显的热饱和现象。插图为 VCSEL 在工作电流 10 mA 下的激光光谱,光谱中心波长为 1534.09 nm,并呈现出良好的单模特性。

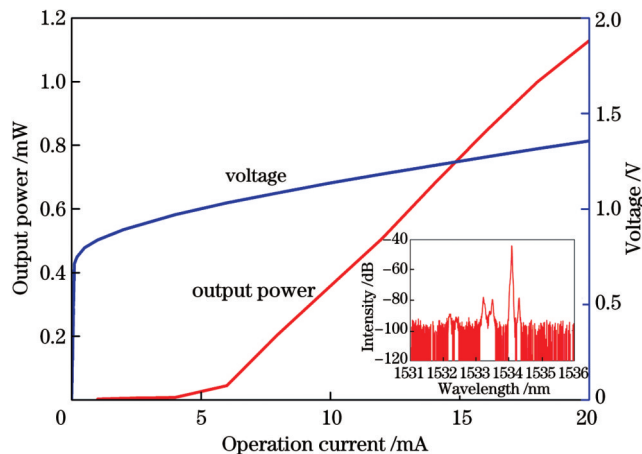


图 1 1550 nm VCSEL 单管的功率-电压-电流曲线及其工作电流为 10 mA 时的激光光谱

Fig. 1 Output power and voltage versus operation current for 1550 nm VCSEL single emitters with laser spectrum at operation current of 10 mA shown in inset

激光器的热阻(R_t)计算公式^[23]为

$$R_t = \frac{\Delta T}{IV - P_{out}}, \quad (1)$$

式中: ΔT 为激光器的温升; I 为激光器的工作电流; V 为激光器的工作电压; P_{out} 为输出的激光功率。由于 VCSEL 的波长随温度的漂移系数一般是固定的,假设该漂移系数为 K ,通过测量 VCSEL 的波长变化可以获取激光器的内部温升 ΔT :

$$\Delta T = \frac{\lambda - \lambda_0}{K}, \quad (2)$$

式中: λ 为激光器出光波长; λ_0 为激光器在无产热情况下的出光波长。因此,VCSEL 的热阻计算公式可表达为

$$R_t = \frac{\lambda - \lambda_0}{K(IV - P_{out})}. \quad (3)$$

为准确获取 VCSEL 的热阻,根据式(3)可以看出,须测量 VCSEL 的温度漂移系数 K 。在测试实际器件的热阻随工作电流的变化规律时,根据图 1 中的功率与电压曲线,结合测量的不同工作电流下的激光波长,就可以得出不同电流下的热阻值。为抑制 VCSEL 内部自产热效应,我们采用窄脉冲电源驱动 VCSEL,脉冲峰值电流为 10 mA,脉宽为 5 μ s,重复频率为 1 kHz,并通过半导体制冷器(TEC)控制 VCSEL 基座温度,获得的不同温度下 VCSEL 的波长变化曲线如图 2 所示。随着 VCSEL 工作温度的增加,激光波长逐渐红移,这是因为 VCSEL 本身的材料折射率增加,所以谐振腔有效腔长变长。经线性拟合,获取的 VCSEL 出光波长随工作温度的线性变化系数为 0.1005 nm/ $^{\circ}$ C。

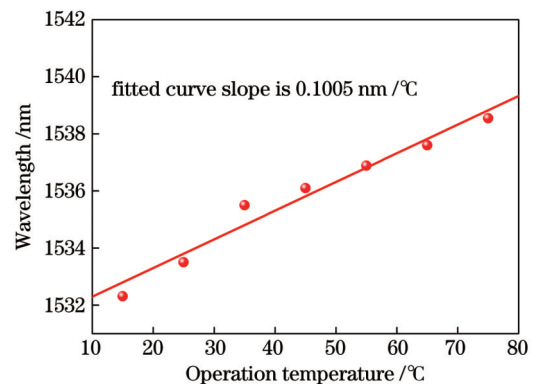


图 2 当脉宽为 5 μ s、重复频率为 1 kHz、脉冲峰值电流为 10 mA 时,1550 nm VCSEL 的出光波长与工作温度的关系

Fig. 2 Emission wavelength of 1550 nm VCSEL at different operation temperatures when pulse width is 5 μ s, repetition frequency is 1 kHz, and peak pulsed current is 10 mA

由于不同工作电流下 VCSEL 的内部自产热效应不同,因此为准确评估 VCSEL 的热效应,通过测试连续工作状态下 VCSEL 的激光波长随工作电流的变化

规律,反推出 VCSEL 在不同工作电流下的内部温升,并由此得出 VCSEL 内部的热阻随工作电流的变化规律,如图 3 所示。与 Müller 等^[19]报道的热阻(1500~3000 K/W)相比,我们报道的 VCSEL 热阻(2000~5000 K/W)略高。一方面在于我们采用了更多的半导体 DBR 材料,从而增加了芯片热阻;另一方面,相比于国外采用的金锡硬焊料,我们在将 VCSEL 芯片焊接到金刚石上时采用了热导率相对较低的 In 焊料,避免了 VCSEL 在焊接时出现过大的应力而性能恶化。

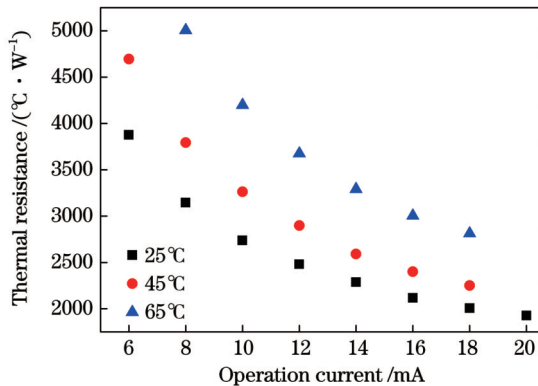


图 3 1550 nm VCSEL 单管在不同工作温度下的热阻随工作电流的变化

Fig. 3 Thermal resistance versus operation current under different operation temperatures for 1550 nm VCSEL single emitters

由图 3 可以看出,不同工作温度下的热阻变化趋势类似,随着工作电流的增加,热阻逐渐减小,该趋势与文献^[24]报道吻合。高温环境下 VCSEL 的热阻更大,这是因为半导体材料在高温下具有更高的热阻。拟合后热阻随发光单元工作电流的变化规律是我们计算 VCSEL 阵列内部各单元温度分布情况的

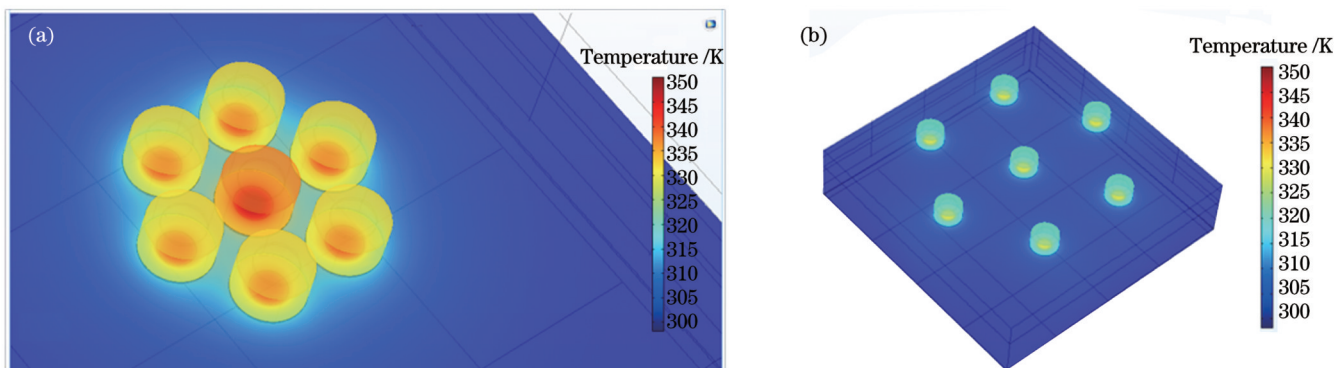


图 4 不同单元间距下六角蜂窝阵列单元的温度分布。(a) 5 μm ; (b) 30 μm

Fig. 4 Temperature distributions of hexagonal cellular array units under different unit spacings. (a) 5 μm ; (b) 30 μm

基础。图 5 为理论模拟的不同边缘间距下 VCSEL 阵列中心发光单元与边缘发光单元的内部温度分布情况。可以看出,当发光单元的边缘间距为 5、10、20 μm 时,位于中心位置的 VCSEL 发光单元的内部温度均高于

基础。

2.2 VCSEL 阵列的热分布模拟及优化

六角蜂窝状的单元排布是最常见的 VCSEL 阵列排布形式,在这种排布形式下,各单元的间距一致,发光单元之间具有相似的温度与电流分布。我们根据前面提取的 VCSEL 的热阻参数,对六角蜂窝状的 VCSEL 阵列中的发光单元的温度分布情况进行模拟,从而得出最佳的单元间距。

为避免高密度 VCSEL 阵列热模拟带来的极高运算量,我们简化了 VCSEL 阵列的模拟流程,采用了单个周期的六角蜂窝单元作为模拟对象,对蜂窝单元中心 VCSEL 发光单元的温度分布情况进行模拟。VCSEL 阵列间距的优化主要是为了避免相邻发光单元的热积累效应,单个周期六角蜂窝单元中心的温度情况具有代表性,因此我们采用该简化方法替代高密度 VCSEL 阵列模拟是合理的。VCSEL 阵列热模拟采用的热源位于台面中心位置,根据 VCSEL 单元的功率-电流-电压曲线,设置了与 VCSEL 实际工作时相同的发热量。VCSEL 周围设置为空气介质,环境温度设置为 300 K,且半导体材料与空气界面采用自然对流的热扩散方式,VCSEL 衬底底部与空气界面也设置为自然对流。

采用 COMSOL 软件内嵌的热分布模型模拟了不同单元间距下各个发光单元的温度分布情况,结果如图 4 所示。此时每个发光单元的工作电流为 10 mA。由图 4(a)可以看出,当单元间距较小时,受周边各单元热串扰的影响,中心发光单元内部出现了严重的热积累效应,其内部最高温度接近 350 K。而在单元间距增加后,中心发光单元的内部温度与边缘发光单元相同。因此,如果采用该间距制备更高密度的 VCSEL 阵列,其内部发光单元的热积累效应会得到缓解。

边缘发光单元的内部温度。随着 VCSEL 发光单元的边缘间距的不断增大,中心位置的 VCSEL 发光单元的内部温度逐渐降低,并且中心位置与边缘位置 VCSEL 发光单元的温度差距逐渐变小。在边缘间距

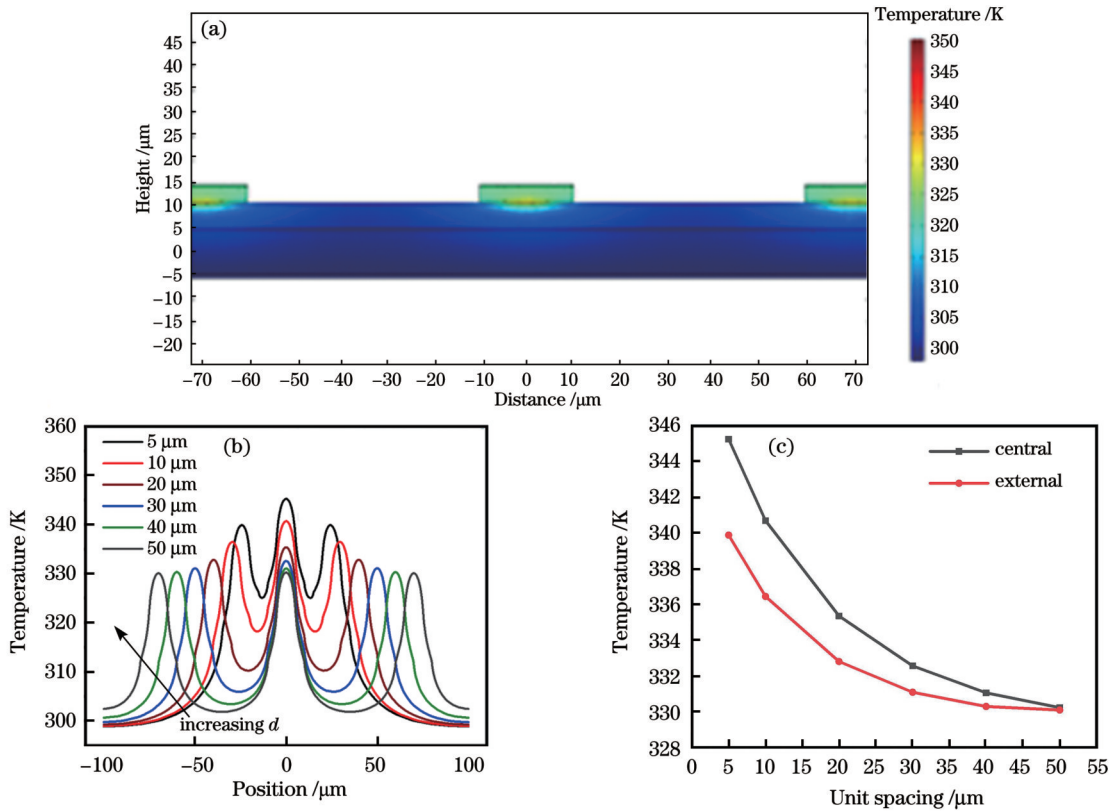


图 5 VCSEL 阵列发光区横截面的温度分布以及中心位置发光单元的内部温度随单元间距的变化。(a)单元间距为 30 μm 时中心与边缘发光单元的二维温度分布情况;(b)不同单元间距下 VCSEL 阵列发光区横截面的温度分布;(c)中心位置发光单元的内部温度随单元间距的变化

Fig. 5 Temperature distributions of cross sections of emission regions of VCSEL arrays, and inner temperature of light-emitting unit in central position versus unit spacing. (a) 2D temperature distributions of light-emitting units at center position and edge when unit spacing is 30 μm; (b) temperature distributions of cross sections of emission regions of VCSEL arrays under different unit spacings; (c) inner temperature of light-emitting unit at central position versus unit spacing

超过 30 μm 后,随着各发光单元边缘间距的进一步增加,中心位置 VCSEL 发光单元的内部温度的降低速度明显变慢。此后,进一步增加发光单元间距,中心位置 VCSEL 发光单元与边缘位置 VCSEL 发光单元的工作温度差距逐步减小,二者最终趋于一致,说明中心发光单元的温度受到边缘发光单元的影响越来越小。

由于我们制备的 1550 nm VCSEL 需要采用衬底剥离的方式,当单元间距较大时,阵列中各单元之间的电连接会受到一定影响,因此需要尽可能小的单元间距。我们依据模拟结果,选取高密度阵列内部各个 VCSEL 发光单元的边缘间距为 30 μm,这在很大程度上消除了各单元热串扰带来的内部热积累效应。

3 高功率 1550 nm VCSEL 测试结果

图 6 为制备的 1550 nm 高密度集成 VCSEL 阵列在不同工作温度下连续工作时的激光输出功率曲线,插图为 VCSEL 阵列的实物图。VCSEL 阵列包括 225 个发光单元,发光单元呈六角蜂窝状排布,列阵单个发光单元的台面尺寸为 30 μm,发光孔尺寸为 20 μm,发

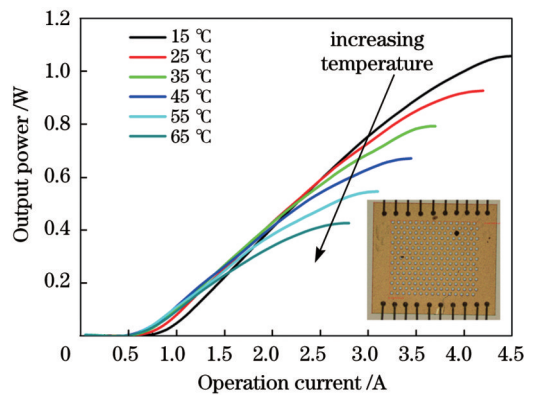


图 6 1550 nm VCSEL 阵列在不同工作温度下的激光输出功率随工作电流的变化,插图为 VCSEL 阵列的实物图
Fig. 6 Laser power output versus operation current for 1550 nm VCSEL array under different operation temperatures with physical map of VCSEL array shown in inset

光单元边缘间距为 30 μm。制备的高密度集成 VCSEL 阵列热沉采用金刚石散热片以增强散热能力,最后将带有 VCSEL 阵列的金刚石散热片封装在 TEC 控温的铜热沉基座上。可以看出,1550 nm VCSEL 阵列的输出功率随工作电流的变化规律与常规 VCSEL

阵列一致,即随着工作电流的增加,VCSEL阵列的输出功率逐渐饱和,并在更大工作电流下表现出明显的热反转现象。随着工作温度的增加,由于VCSEL阵列在高温下具有更为严重的内部热效应以及更差的散热效果,因此其饱和输出功率也逐步降低。当工作温度为 15°C 时,VCSEL阵列的最大饱和功率达到 1.08 W 。随着工作温度的增加,VCSEL阵列的热饱和功率逐步降低。然而,即使当工作温度增加到 65°C 时,VCSEL阵列的最大输出功率仍能达到 0.43 W 。

由图6可以看出,随着工作温度的增加,VCSEL阵列的阈值电流逐步由 0.8 A 降低至 0.5 A ,这是因为我们采用了比较大的增益峰与腔模蓝移量,即增益峰-腔模的大失配设计。由于发光区的增益峰温漂速率大于腔模波长的温漂速率,当工作温度增加时,发光区的增益峰逐渐向腔模位置靠近,VCSEL的有效模式增益随温度的增加而不断增加。该设计思想有利于提升VCSEL阵列在高温或者大电流工作条件下的性能。

图7为VCSEL阵列在 1.0 A 及 2.5 A 工作电流下的激光光谱图。VCSEL阵列呈现明显的多波长激射情况,光谱中心波长位于 1570 nm 附近,这是VCSEL单元工作在多模状态以及各发光单元之间的发光波长差异造成的。与 1.0 A 工作电流下的激光光谱相比,VCSEL阵列在 2.5 A 工作电流下的激光光谱有明显的展宽现象,且中心波长明显红移,这是大工作电流下的内部热积累效应引起的。

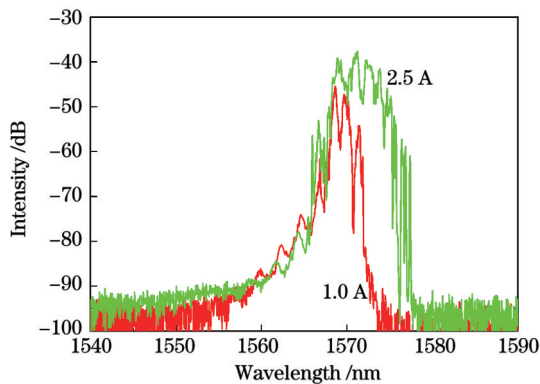


图7 不同工作电流下VCSEL阵列的激光光谱

Fig. 7 Laser spectra of VCSEL arrays under different operation currents

为验证 1550 nm VCSEL阵列的脉冲输出能力,采用脉宽为 $5\text{ }\mu\text{s}$ 、重复频率为 1 kHz 的脉冲电源驱动VCSEL阵列,获得的VCSEL阵列的脉冲激光峰值功率与电压随工作电流的变化规律如图8所示。此时VCSEL阵列的工作温度控制为 15°C 。可以看出,与图6所示的连续工作条件相比,脉冲电源驱动条件下VCSEL阵列的阈值电流有所增加,由 0.8 A 增加至 1.2 A 左右。这或许是由于脉冲电源驱动条件下VCSEL阵列各单元间的电容电感效应比较明显,且引

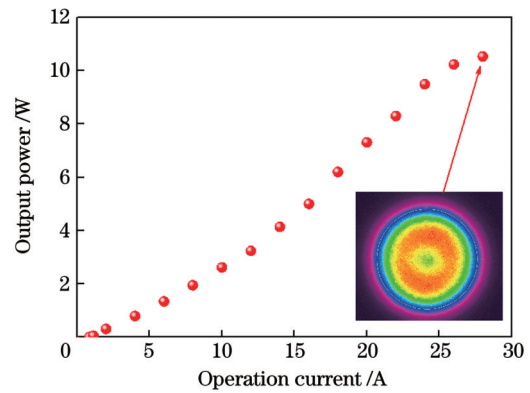


图8 1550 nm VCSEL阵列的脉冲激光峰值功率随工作电流的变化,插图为脉冲激光峰值功率为 10.5 W 时VCSEL阵列的远场光斑

Fig. 8 Peak power of pulse laser for VCSEL array versus operation current with far field spot of VCSEL array when peak power of pulse laser is 10.5 W shown in inset

线及封装方式引入的电阻更为明显,因此出现了电流耗散,实际VCSEL阵列工作所需的阈值电流增大。另外,由于脉冲电源驱动条件下发光区内部温度低于连续工作条件,我们采用的增益-腔模大失配设计结构在温度较低时也会使阈值电流有所增加。

虽然我们采用了脉冲驱动形式,然而从图8仍然可以看出明显的功率饱和现象,说明在该工作条件下VCSEL阵列内部仍存在热效应。VCSEL阵列的峰值功率随着工作电流的增加逐渐增加,并且功率曲线在电流为 12 A 左右时出现明显拐点。在工作电流超过 12 A 后,VCSEL阵列的斜率效率明显增加。这是因为我们采用了增益峰-腔模大失配设计,在电流超过 12 A 后,VCSEL阵列内部的热效应使增益峰-腔模匹配度更好。当工作电流为 28 A 时输出功率达到饱和,VCSEL阵列的最高脉冲峰值功率达到 10.5 W 。当VCSEL阵列工作电流为 28 A 时,阵列的远场光斑如图8插图所示。可以看出,此时远场光斑近似为环形光斑,热效应引起的环形光斑形貌影响了远场光斑的均匀性,然而此时VCSEL阵列的光斑形貌仍保持圆形对称形貌。

当脉冲输出功率为 10.5 W 时,VCSEL阵列远场在水平与垂直方向上的光斑轮廓及其发散角情况如图9所示。可以看出,激光光斑轮廓在中心位置处出现了明显凹陷,这与图8所示的VCSEL环形光斑形貌吻合,说明VCSEL阵列中心位置处的发光单元的发光功率受到热效应的影响而变小。由图9可以得出,两个正交方向上的远场发散角(半峰全宽)分别为 26.69° 和 26.98° ,说明VCSEL阵列的远场光斑在两个正交方向上有很好的对称性。

环形光斑的出现一方面是因为VCSEL阵列实际工作时的产热量较大,因此中心区域的发光单元容易出现功率饱和,从而光斑中心出现凹陷;另一方面是由

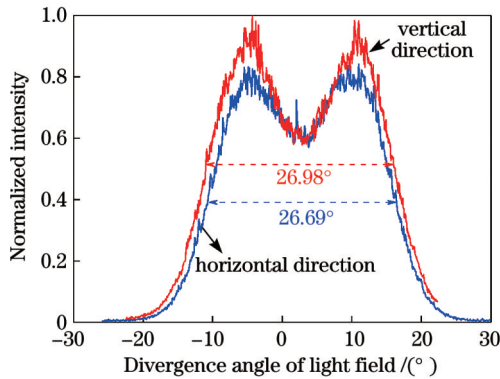


图9 当脉冲功率为 10.5 W 时,1550 nm VCSEL 阵列远场在正交方向上的光斑轮廓

Fig. 9 Light spot profiles of 1550 nm VCSEL array far field in orthogonal directions when pulse power is 10.5 W

于中心区域的温度较高,中心位置处的 VCSEL 发光单元的热积累严重,出现了空间烧孔效应,因此模式特性变差,从而出现了非高斯形貌的环形光斑。环形光斑会影响实际应用时的照明均匀性,严重制约器件的实用性^[25-27],因此,高功率 VCSEL 阵列的光束优化将是下一步我们的重点研究方向。

4 结 论

报道了高功率的 1550 nm VCSEL 阵列,并系统测试了 1550 nm VCSEL 阵列单元内部热特性,提取了热阻参数。采用简化的 VCSEL 阵列热模型优化了 VCSEL 阵列内部的热效应,确定了高密度阵列内的单元间距参数。制备的 1550 nm VCSEL 阵列的最大连续输出功率达到 1.08 W,最大脉冲输出功率达到 10.5 W。

参 考 文 献

- [1] Seurin J F, Zhou D L, Xu G Y, et al. High-efficiency VCSEL arrays for illumination and sensing in consumer applications[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9766: 97660D.
- [2] Zhou D L, Seurin J F, Xu G Y, et al. Progress in high-power high-brightness VCSELs and their applications[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9381: 93810B.
- [3] Zhang J W, Ning Y Q, Zhang X, et al. A high-peak-power vertical-cavity surface-emitting laser quasi-array was realized using optimized large-aperture single emitters[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2014, 53(7), 070303.
- [4] Li N, X, Ho C, Xue J, et al. Progress review on solid-state LiDAR and nanophotonics-based LiDAR sensors[J]. Laser & Photonics Review, 2022, 16(11): 2100511.
- [5] Kostamovaara J, Huikari J, LHallman et al. Laser ranging is based on high-speed/energy laser diode pulses and single-photon detection techniques[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(2): 7800215.
- [6] Li X P, Zhang X D, Yang J, et al. Wavelength-stable 1.1-kW diode laser array cooled by liquid metal[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(7): 434-437.
- [7] Hassan A M A, Gu X D, Nakahama M, et al. High-power operation of single-mode surface-grating long-oxide aperture VCSELs[J]. Applied Physics Letters 2021, 119(19): 191103.
- [8] Zhou D L, Seurin J F, Xu G Y, et al. Progress in vertical-cavity surface-emitting laser arrays for infrared illumination applications [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9001: 90010E.
- [9] Soltani M D, Sarbazi E, Bamiedakis N, et al. Safety analysis for laser-based optical wireless communications: a tutorial[J]. Proceedings of the IEEE 2022, 110(8): 1045-1072.
- [10] Dummer M, Johnson K, SROthwellet al. Role of VCSELs in 3D sensing and LiDAR[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11692: 116920C.
- [11] Ziegler M, Tomm J W, Reeber D, et al. Catastrophic optical mirror damage in diode lasers monitored during single-pulse operation[J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(19): 191101.
- [12] Zhao Z G, Duan K L, Lue B D. Non-equiphase Hermite-Gaussian model of diode laser beams[J]. Optik, 2008, 119(4): 167-170.
- [13] 张建伟, 张星, 周寅利, 等. 1550 nm 毫瓦级单横模垂直腔面发射半导体激光器[J]. 物理学报, 2022, 71(6): 064204. Zhang J W, Zhang X, Zhou Y L, et al. 1550-nm vertical-cavity surface-emitting laser with single-mode power of milliwatts[J]. Acta Physica Sinica 2022; 71(6): 064204.
- [14] Mereuta A, Nechay K, et al. Flip-chip wafer-fused OP-VECSELs emitting 3.65 W in the 1.55- μm waveband[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019, 25(6): 1700605.
- [15] Boehm G, Ortsiefer M, Shau R, et al. InP-based VCSEL technology covering the wavelength range from 1.3 to 2.0 μm [J]. Journal of Crystal Growth, 2003, 251(1/2/3/4): 748-753.
- [16] Blokhin S A, Nevedomsky S N, Bobrov M A, et al. 1.55- μm -range vertical-cavity surface-emitting lasers, manufactured by wafer fusion of heterostructures grown by solid-source molecular-beam epitaxy[J]. Semiconductors, 2020, 54(10): 1276-1283.
- [17] Muller M, Hofmann W, GBohmet al. Short-cavity long-wavelength VCSELs with modulation bandwidths exceeding 15 GHz[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(21): 1615-1617.
- [18] Syrbu A, Mircea A, Mereuta A, et al. 1.5-mW single-mode operation of wafer-fused 1550-nm VCSELs[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(5): 1230-1232.
- [19] Müller M, Hofmann W, Grundl T, et al. 1550-nm high-speed short-cavity VCSELs[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2011, 17(5): 1158-1166.
- [20] Hofmann W, Müller M, Wolf P, et al. 40 Gbit/s modulation of 1550 nm VCSEL[J]. Electronics Letters, 2011, 47(4): 270-271.
- [21] Caliman A, Mereuta A, Suruceanu G, et al. 8 mW fundamental mode output of wafer-fused VCSELs emitting in the 1550-nm band [J]. Optics Express, 2011, 19(18): 16996-17001.
- [22] Rao Y, Yang W J, Chase C, et al. Long-wavelength VCSEL using a high-contrast grating[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(4): 1701311.
- [23] Kyriakis-Bizaros E D, Halkias G. Thermal resistance evaluation of high-speed VCSELs: an isothermal optical transient technique[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14(3): 269-271.
- [24] Miyamoto T, Nishina T, YKashihara et al. Thermal resistance reduction of vertical-cavity surface-emitting lasers using thickness-modulated distributed Bragg reflector[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2008, 47(8): 6772-6776.
- [25] 王佳立, 徐孝彬, 吴家林, 等. 脉冲激光探测多平面目标回波特性[J]. 中国激光, 2022, 49(6): 0604004. Wang J L, Xu X B, Wu J L, et al. Echo characteristics of multiplane target detection using pulsed lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(6): 0604004.
- [26] 胡杰, 刘汉, 徐文才, 等. 基于三维激光雷达的道路障碍物目标姿态检测算法[J]. 中国激光, 2021, 48(24): 2410001. Hu J, Liu H, Xu W C, et al. Position detection algorithm for road obstacles based on 3D LiDAR[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(24), 2410001.
- [27] 刘芳华, 贺岩, 罗远, 等. 基于光子计数激光雷达的运动小目标测距测速系统[J]. 中国激光, 2021, 48(13): 1310001. Liu F H, He Y, Luo Y, et al. Moving target distance and velocity measurement system based on photo-counting lidar[J]. Chinese Journal of Lasers 2021; 48(13): 1310001.

Vertical-Cavity-Surface-Emitting Laser with High Power in Eye-Safe Band

Zhang Xing^{1,2}, Zhang Jianwei^{2*}, Ning Yongqiang², Wang Lijun²

¹*Ace Photonics Company Ltd., Changchun 130102, Jilin, China;*

²*State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China*

Abstract

Objective Lidar is a low-cost active detection tool for detecting a target's distance and 3D physical information. The vertical-cavity-surface-emitting laser (VCSEL) array is a light source that can improve the stability and compactness of lidar systems. However, the emission wavelength of a high-power VCSEL array is below 1000 nm, which can induce severe eye damage. Thus, the imaging range of the VCSEL lidar is limited. In this study, we report a high-power VCSEL array emitting at 1550 nm, an eye-safe wavelength.

Methods The severe self-heating is the main problem of the 1550 nm VCSEL. To alleviate the thermal accumulation within the VCSEL emitters, we optimize the distribution of emitters within the VCSEL array. To characterize the thermal distribution accurately, the changes in thermal resistance with temperature and operation current are measured. A thermal model based on the VCSEL hexagonal cellular array units is built, and the temperature distributions within the units are analyzed. Thus, the unit spacing can be optimized.

Results and Discussions The 1550-nm VCSEL array with an output power of more than 1 W under continuous-wave operation and more than 10 W under pulsed operation is reported (Figs. 6 and 8). Based on the characterization of the thermal resistance of single emitters under different operating currents, a thermal model of the VCSEL array is built, and the temperature distributions within different emitters of the array are simulated. As the distance between the edges of the VCSEL emitters exceeds 30 μm , the uniform temperature distribution within different emitters can be realized (Fig. 5). The output characteristics of the VCSEL array under continuous-wave and pulsed operations are characterized. The maximum output power of the VCSEL array can reach approximately 1.05 W in continuous-wave mode when the operating temperature is 15 $^{\circ}\text{C}$ (Fig. 6). The output power can reach 0.42 W even when the operating temperature of the VCSEL is increased to 65 $^{\circ}\text{C}$ (Fig. 6). The maximum output peak power of 10.5 W is obtained under pulsed operation with a pulse width of 5 μs and a repetition frequency of 1 kHz (Fig. 8). The profile of the far-field spot is still circularly symmetric, and the divergence angles are 26.69 $^{\circ}$ and 26.98 $^{\circ}$ in the orthogonal directions (Fig. 9).

Conclusions A high-power VCSEL array emitting at 1550 nm is reported. The internal thermal resistance is obtained by characterizing the thermal characteristics of the single emitters. The temperature distributions within the VCSEL array are simulated, and the distance between the emitters in the VCSEL array is optimized. The maximum continuous-wave output power of 1.08 W and pulsed output power of 10.5 W are achieved. The 1550-nm VCSELs have excellent eye safety performance and great advantages in terms of cost, volume, and integration in future technologies. We believe that the 1550-nm VCSEL array will have broad application prospects in 3D sensing, such as under-screen recognition, laser radar, and other fields in the future.

Key words lasers; 1550 nm vertical-cavity-surface-emitting laser array; high power; eye safe; lidar