

垂直腔面发射激光器低温光电特性*

秦璐¹⁾²⁾ 任杰¹⁾²⁾ 许兴胜^{1)2)†}

1) (中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

2) (中国科学院大学 材料与光电研究中心, 北京 100049)

(2019年3月27日收到; 2019年7月3日收到修改稿)

垂直腔面发射激光器通常被用作常温下 850 nm 波段短波长短距离光互连领域的激光光源, 多在室温下进行测试和使用. 在低温环境下垂直腔面发射激光器工作状态的表征是本文的研究重点. 我们表征了在不同温度下直流驱动垂直腔面发射激光器的发光光谱和 10% 占空比脉冲电流驱动垂直腔面发射激光器的发光光谱和功率-电流-电压曲线. 通过测试激光器在室温和 10 K 温度下性能的变化, 证明了现有的垂直腔面发射激光器在低温下仍能工作, 激光器在 10 K 低温环境下仍可以作为光互连的光源使用, 这一特点使得该激光器的应用范围可拓展至低温领域, 预示着垂直腔面发射激光器在低温光互连系统中具有应用价值.

关键词: 激光器, 低温, 光谱**PACS:** 42.55.Px, 07.20.Mc, 43.58.Kr**DOI:** 10.7498/aps.68.20190427

1 引言

垂直腔面发射激光器^[1](vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL) 是一种常用的微腔激光器. 在量子阱两侧通过材料淀积生长 20 对以上的分布式布拉格反射镜 (distributed Bragg reflector, DBR) 结构, 每对 DBR 具有高反射系数 (每侧反射率可以达到 99% 以上), 形成具有较高品质因子 (Q 值) 的微腔激光器结构. 1979 年, 日本东京工业大学 Kenichi Iga 教授团队实现了 77 K 下 InGaAs/InP 基 VCSEL 脉冲激射激光器, 阈值电流为 900 mA^[2]. 2001 年, Kucgta 等^[3] 报道的氧化孔限制型 850 nm VCSEL 的调制速率达到了 20 Gb/s. 2003 年, 电注入的 GaInNAsSb VCSEL 实现脉冲激射, 激射波长为 1.46 μm , 工作温度为 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ ^[4]. Moser 等利用 GaAs 材料制备了波长为

850 nm 的 VCSEL, 并实现了 81 fJ/bit 低功耗高速调制^[5]. 2006 年, Suzuki 等报道了波长为 1.1 μm 的 VCSEL, 调制速率达到 25 Gb/s^[6]; 2007 年, 该课题组再次利用掩埋隧道结构将 VCSEL 的调制速率进一步提高到 30 Gb/s^[7]. 随后, Chang 等利用氧化孔限制结构将 980 nm 的 VCSEL 的调制速率提高到 35 Gb/s^[8]; 同年, Anan 等研制的 GTJ 结构的 VCSEL 的调制速率接近 40 Gb/s^[9]. VCSEL 的高速特性的研究快速发展, 研究热点主要集中在 850 nm 和 980 nm 两个波段, 向高速率、低功耗和高温度稳定性三个方向发展^[10,11]. 2011 年, Mueller 等报道了波长为 1550 nm 直接调制带宽为 17 GHz 的短腔 VCSEL, 实现了 35 Gb/s 的无误码大信号传输^[12]. 2013 年, Dalir 和 Koyama 制备了波长为 980 nm 的 VCSEL 激光器, 并实现了 29 GHz 的调制带宽^[13]; 同年, Westbergh 等研制的 850 nm 氧化孔限制的 VCSEL 在 25 $^\circ\text{C}$ 下在 back-to-back

* 中国科学院先导 A(批准号: XDA18040300), 国家重点研发计划(批准号: 2016YFA0301200) 和国家自然科学基金(批准号: 61575191, 61627820, 61875252) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xsxu@semi.ac.cn

模式下调制速率达到 57 Gb/s 的无误码传输^[14]. VCSEL 内有源层的发光在 DBR 谐振腔中形成谐振增强, 氧化孔对注入电流和激光起到限制作用. 多年来, VCSEL 从起初在低温 77 K 下工作、阈值电流高达 900 mA 发展至今, 已经可以实现在室温下高速稳定工作, 其阈值电流大幅降低. 虽然 VCSEL 激光器主要工作于常温, 但其在低温领域的应用值得重视. 目前为止, 较大温度变化范围和低温环境下激光器的光电特性的研究报道很少. 在低温环境中, 低温可降低器件发热造成的损伤, 提高器件性能. VCSEL 自实现产品化以来, 常温下应用是其主要目标, 在低温下的研究和应用很少, 而这并不意味着 VCSEL 激光器的应用只能在室温环境. 随着低温技术的发展和低温环境下应用需求的增长, 人们对低温信息互联的需求也在增加. 在低温领域, VCSEL 作为光互连高速光源也将有重要的应用前景.

在激光器使用过程中由于驱动电流的注入使得激光器发热, 温度的升高会导致激光器的光电特性改变, 降低激光器的使用寿命. 在本文的实验中, 主要测试激光器在低温环境下的工作特性, 获得激光器的低温工作特性和结构参数的关系, 研究结果将对激光器在低温环境下的应用条件和结构与改进提供依据. 本文将测试并研究商用的 VCSEL 在 295 K 至 10 K 的环境中的激射光谱和功率-电流-电压曲线, 证明 VCSEL 仍能作为低温光互连的光源使用. 我们采用成熟的商用 VCSEL 进行低温光电特性研究, 低温环境下 VCSEL 激光稳定输出, 是对成熟的室温使用的 VCSEL 器件低温光电特性的有效验证, 将拓展室温下常用激光器的使用温度范围.

2 直流驱动模式下的光谱和功率-电流-电压特性

2.1 测试环境

实验使用的低温设备为 Janis 公司的无液氦低温致冷设备, 可以降温到最低 4.2 K. VCSEL 激光器被固定在低温真空腔室中, 通过外接脉冲电压源对其进行泵浦. 在腔室外, 我们搭建了空间光路用以将出射激光导入光谱仪. 其中, 低温腔的真空度保持为 10^{-6} mbar. 脉冲电压源给激光器提供 1.5 V 直流驱动电压.

2.2 直流驱动下激光器光电特性的测试

我们测试了从 295 K 到 10 K 降温过程中激光器的发光光谱和功率-电流-电压曲线. 通过测试的激光器的发光光谱, 研究激光器光学特性随温度降低的变化规律. 本文实验使用的激光器为常规商用的 GaAs 基、发光中心波长为 850 nm 的 VCSEL 激光器, 当激光器注入电流导致温度升高时, 激光器性能受到影响^[15]. 由于激光器工作时温度升高, 中心波长发生红移, 为了保证激光器的中心波长稳定在 850 nm, 器件的设计波长一般略低于 850 nm. 相反, 随着温度降低, 激光器发光波长会产生蓝移, 这种变化规律为激光器的设计和应用提供了参考.

实验中, 我们研究了随着温度的降低激光器工作特性的变化. 测试发现, 随着温度的降低, 激光器的阈值电流不断上升. 当温度降低到 10 K 时, 激光器线性工作驱动电流已经达到 20 mA 左右, 而在室温下工作电流是 7—15 mA. 室温下如果激光器工作在 20 mA 驱动电流的条件下, 就会使得激光器无法正常工作, 即有可能由于驱动电流过大, 造成器件过热, 直接损坏激光器. 如果室温下选择较低工作电流进行测试, 在低温环境下激光器如果还在同样的驱动条件下就无法激射, 也就无法测试激射光谱. 之所以选择使用恒定电压进行器件驱动, 因为同样驱动电压不同温度下器件电阻改变, 从而对应不同的驱动电流, 使激光器处于相对稳定的线性工作区间. 在恒定驱动电压下测试不同温度下光谱和功率-电流-电压曲线并进行对比, 分析得到阈值电流、微分电阻、中心波长等随温度下降的变化趋势. 在 1.5 V 直流驱动电压下, 激光器的室温工作电流为 15 mA. 在降温的过程中, 保持驱动电压为 1.5 V, 可以使得激光器在直流驱动条件下接近饱和状态, 使得激光器在发光强度较大, 保障其发光光谱能较容易被光谱仪测到.

在降温测试光谱过程中, 保持驱动电压不变, 收集光路保持准直, 以 5 K 步长进行降温, 测试不同温度下激光器的发光光谱. 从室温 295 K 开始降温, 不同温度下测得的光谱如图 1(a) 所示. 保持直流驱动电压不变, 温度持续下降到 10 K, 此时光谱强度是 295 K 下的 4 倍. 在整个降温过程中, 激光器都能在直流驱动下正常工作.

我们测试了不同温度下的激光光谱, 并对这些

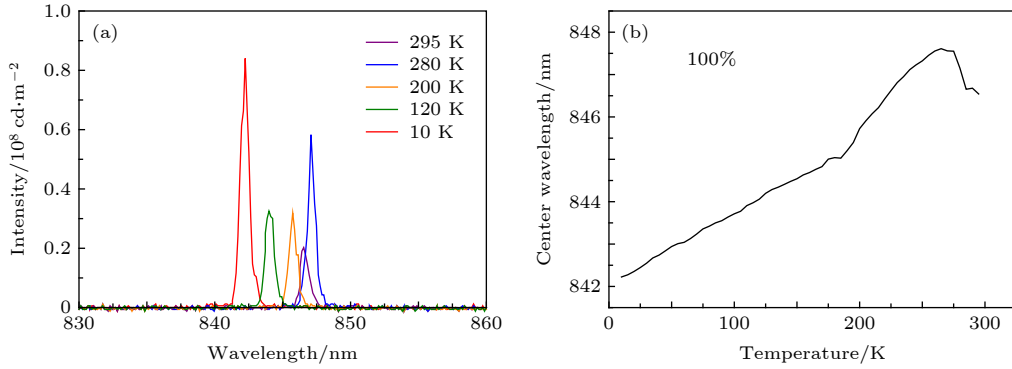


图 1 (a) 不同温度下直流驱动垂直腔面发射激光器光谱; (b) 直流驱动下激光器发光光谱的中心波长随温度变化情况

Fig. 1. (a) The spectra of VCSEL at different temperatures with direct-current supply; (b) the variation of the center wavelength at different temperatures with direct current.

光谱采用了洛伦兹函数进行拟合. 拟合使用的洛伦兹函数公式为

$$y = y_0 + \frac{2A_{amp}}{\pi} \frac{\omega}{4(\lambda - \lambda_c)^2 + \omega^2}, \quad (1)$$

其中 λ_c 为光谱中心波长, ω 为光谱的宽度, A_{amp} 为光谱的相对强度. 激光器所处的低温腔的温度连续下降. 温度从 295 K 下降到 265 K 过程中, 激光器光谱中心波长 λ_c 从 846.8 nm 红移至 847.6 nm, 然后从 265 K 下降到 10 K 过程中, λ_c 逐渐蓝移至波长 842.2 nm, 如图 1(b) 所示.

从图 1(b) 可以看出, 中心波长在 295 K 到 10 K 之间的总体变化趋势向短波长移动, 这主要是由温度对器件的影响引起的. 本文实验中使用的是常规 VCSEL 激光器, 购买自 Finisa 公司, 光谱中心波长为 850 nm, 带宽大于 1 GHz, 驱动电流为 7—15 mA, 额定功率为 1.5 mW. 该激光器是 TO 封装的 GaAs 基量子阱激光器, 工作在 850 nm 的 VCSEL 结构, 主要包括在 GaAs/AlGaAs 量子阱有源层两侧交替生长 GaAs/AlGaAs DBR 反射层, GaAs/AlGaAs 量子阱作为有源发光材料位于上下 DBR 层中间部分 [16,17]. 我们测试和分析了在大范围温度变化过程中该 VCSEL 光源的光电特性. DBR 反射镜层和有源材料的折射率随温度变化而变化, 增益谱和对应腔模均会随着温度的变化而变化 [18–21]. 当温度升高, 量子阱材料带隙变窄, 增益谱发生红移, 同时腔模模式也向长波长移动. 随着温度升高, 电子-空穴复合概率降低, 非辐射复合概率增大, 非辐射复合产生热量, 从而降低激光器的内量子效率. 另一方面, 当温度下降, 半导体带隙变宽, 增益谱和腔模模式均向短波长方向移

动, 增益谱随温度的移动速度一般快于腔膜模式随温度的移动速度, 增益谱和腔膜匹配关系示意图如图 2 所示.

在 295 K 到 265 K 之间, 测得器件中心波长产生了红移. 红移现象主要是由于在较高温度环境下电流注入导致器件局部升温造成的. 在 295 K 下降到 265 K 的过程中, 由于激光器处于较高温度状态, 激光器局部发热, 器件局部热量和低温腔交换速率较慢, 器件局部温度升高, 导致激光器中心波长红移. 在 265 K 附近, 激光器局部发热受到低温环境的影响最小, 激光器中心波长达到最大值 847.6 nm. 当温度进一步降低, 激光器的中心波长也随之蓝移, 这一现象主要是由于激光器腔膜模式和增益谱中心波长蓝移引起的. 当环境温度低于 265 K, 由驱动电流引起的局部发热被低温环境逐渐抵消, 激光器有源区红移效果逐步减弱, 随着温度的持续下降, 有源层增益谱中心波长开始蓝移, 腔膜模式同时向短波长方向移动, 蓝移效果逐

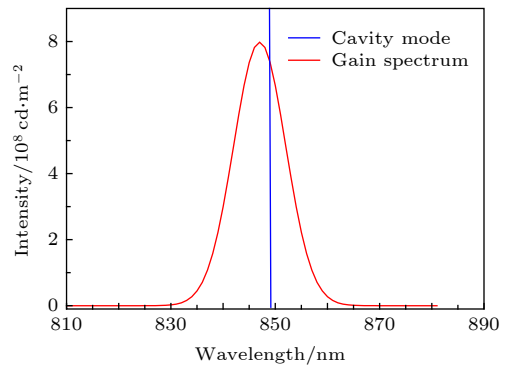


图 2 室温条件下的增益谱线与腔膜模式匹配示意图

Fig. 2. Schematic diagram of cavity mode and spectrum of VCSEL.

渐增强,激光器的中心波长由于这两种因素的共同影响向短波长方向移动.在低温腔降温过程中,保持激光器的驱动电压不变,局部升温产生的热量近似不变,但是低温腔温度会持续降低.随着环境温度的降低,激光器与环境热量交换速率加快,腔体降温吸收热量的速率逐渐大于激光器局部产热的速率,激光器从 265 K 继续降温时,发光中心波长逐渐蓝移,这一过程将一直持续到测试的极限温度 4.2 K.商用 VCSEL 激光器在 10 K 环境中仍能正常工作,与室温下的激光谱相比,其蓝移波长只有 5.4 nm,激光稳定输出.

如图 3(a) 所示,在 295 K—10 K 温度范围,我们测得激光器激射光谱的宽度随温度降低基本保持在 0.6 nm 左右,波动范围为 0.5—0.75 nm,波动幅度为 0.25 nm,在 294—125 K 温度范围内,激光器发光光谱的光谱宽度基本保持不变.随着温度降低到 125 K 以下,激光光谱宽度呈现下降趋势,在 10 K 左右达到 0.55 nm.

GaAs 基 VCSEL 激光光谱的相对强度 A_{amp} 随温度下降呈增长趋势,如图 3(b) 所示,在 295 K 到 265 K 之间存在一个尖峰,从 265 K 到 50 K 之间光谱强度呈缓慢上升趋势,在 50 K 到 10 K 之间,光谱强度快速增加.激光器发光光谱强度在 10 K 左右可以达到 250 K 时的 4 倍.光谱强度在 265—290 K 之间存在峰值,峰值出现在 280 K.由图 1(b) 可以发现,在 265—295 K 这一温度范围内发光光谱中心波长发生了红移.激光器的腔膜模式和增益谱线均具有随温度升高向长波长移动、随温度降低向短波长移动的规律,但是二者随温度的移动速度不同.265—295 K 的温度区域中器件的

电流注入引起局部升温现象占主导,初始腔膜模式在增益谱线右侧.由于增益谱线与腔膜模式均发生红移,增益谱线随温度升高红移移动速度快于腔膜模式随温度升高的红移速度,增益谱线和腔膜模式在 280 K 匹配最佳,进而得到 265—295 K 区域之间的光谱峰值较高.在 280 K 后温度继续下降,腔膜和增益谱线不再完全匹配,导致激光器发光强度下降.在 260 K 后,激光器主要处在不断降温过程中,环境的降温过程占主导,激光器的增益谱线和腔膜同时蓝移.随着温度降低,电子-空穴非辐射复合概率降低,辐射复合概率增加,量子阱材料发光的内量子效率增加,导致从 260 K 到 50 K 降温区间发光光谱强度不断增加.在 50 K 到 10 K 的降温区间中,激光器发光强度增长,这种现象不仅与温度降低器件量子效率增加相关,也和温度降低导致器件内部结构变化有关,在小于 50 K 低温下观察到了激光器出射光斑改变的现象.

3 脉冲驱动模式下的光谱及功率-电流-电压特性

3.1 脉冲电流驱动下的激光器光谱

直流驱动激光器会产生明显的局部升温,在较高温度范围使激光器发光中心波长产生红移.局部升温会增加激光器的串联电阻,影响激光器的发光性能.局部发热会导致器件的热损伤.为了降低器件局部发热现象的发生,我们采用脉冲电流驱动 VCSEL 进行测试,其中基本测试环境和 2.1 节中的一致.

在 295 K 温度下,使用低占空比的脉冲电流

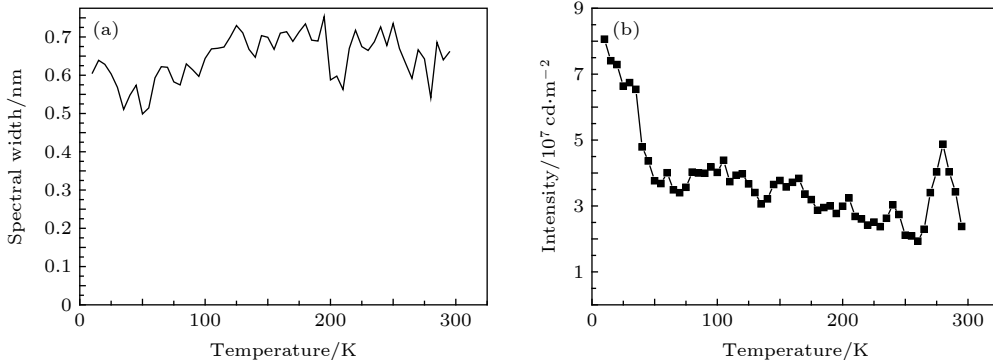


图 3 直流驱动下激光器发光光谱随温度的变化 (a) 激光光谱宽度随温度变化情况; (b) 激光强度随测试温度的变化

Fig. 3. The variation of spectral parameters at different temperatures with direct current. (a) The spectrum width varying with temperature; (b) the intensity varying with temperature.

进行泵浦,可以有效地减少器件的局部发热,保护器件的同时获得更好的激光器性能.但是降低占空比会引起激光器发光强度的下降,对比图 4(a)和图 1(a)可以看出,直流驱动下测试得光谱的强度比 10% 占空比脉冲电流驱动的测试光谱的强度高 6 倍左右.在 10 K 温度下,10% 占空比脉冲电流驱动和直流驱动测试得到的器件发光光谱明显不同.在低温 10 K 测试环境下,直流驱动激光器仍可以保持激射状态,且发光强度比常温更强.但是在电压幅值同为 1.5 V 的 10% 占空比脉冲驱动下,器件在低温 25 K 附近时已接近激射阈值条件,如图 4(b)所示,激射光谱的强度只有 250,且在 835 nm 附近出现宽光谱荧光包络.

在 10% 低占空比、驱动电压为 1.5 V 的测试条件下,图 4(c)所示的激光光谱的中心波长 λ_c 随温度下降的蓝移过程可以近似为线性变化,这主要是因为 10% 占空比脉冲电流驱动条件下激光器受注入电流产生的局部发热的影响明显降低,低温腔的降温对激光光谱中心波长蓝移起主要作用.如图 4(d)所示,脉冲驱动下光谱宽度 ω 参数随温度

的变化趋势与直流驱动测试的图 3(a)中的曲线类似,随温度的降低,光谱宽度在 0.5—0.8 nm 之间波动.相较于直流驱动,随着温度下降,光谱宽度有所减小,最小值达到 0.5 nm.

3.2 脉冲驱动下激光器的功率-电流-电压特性

在激光器测试过程中,随着温度降低,阈值电流逐渐增加,在 25 K 时,同样的驱动电压(1.5 V)下,激光器的驱动电流已经很接近阈值电流,激光器处于激射和荧光发光的共存状态,光谱的波长产生较大蓝移.在 11 K 温度下,驱动电流为 11.44 mA,根据图 5(a)中的功率-电流曲线得出的阈值电流是 13.41 mA,此时驱动电流已经低于阈值电流,激光器处于荧光发光状态,所测得的光谱不再是激射光谱,光谱产生非对称性变化,难以采用洛伦兹函数准确拟合.同样地,10% 占空比脉冲电流驱动下,在 295 K 的环境温度下,从图 5(b)中可以看出,激光器的阈值电流只有 5.04 mA,11 K 测试情况下的阈值电流是在 295 K 情况下的 2.66 倍.从

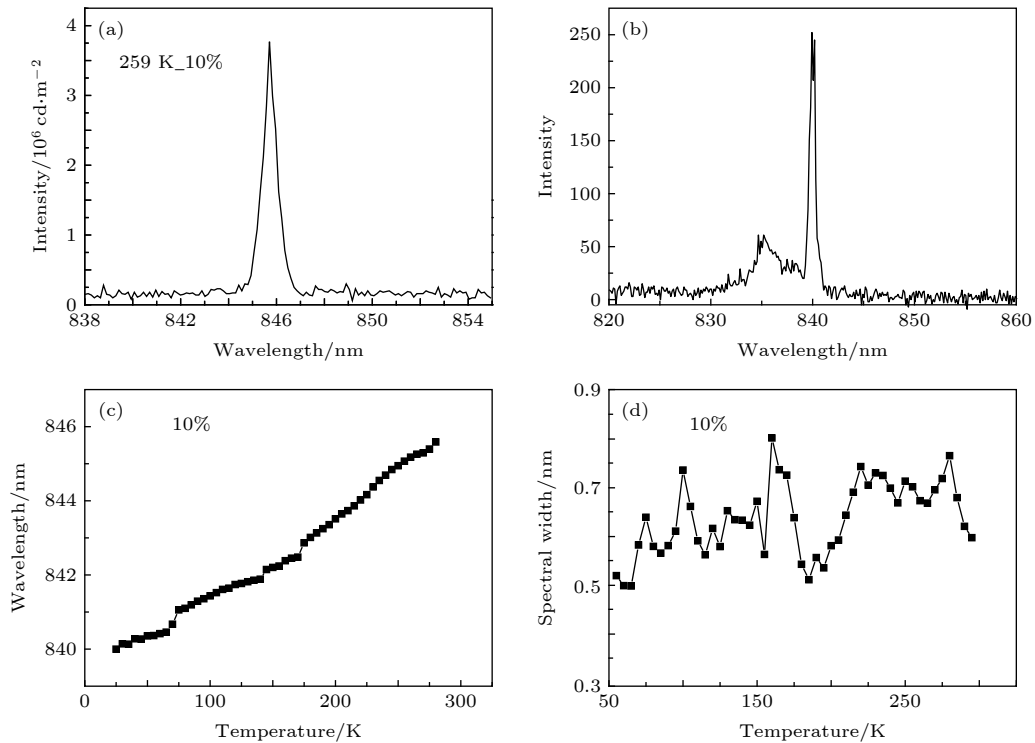


图 4 不同温度下 10% 占空比脉冲电流驱动器件特性测试结果. (a) 295 K 条件下激光光谱; (b) 25 K 条件下激射光谱; (c) 中心波长随温度的变化曲线; (d) 光谱宽度随温度的变化曲线

Fig. 4. The result of the VCSEL driven by pulse current with 10% pulse duty cycle at different temperatures. (a) The lasing spectrum at 295 K; (b) the lasing spectrum at 25 K; (c) the relationship between the center wavelength and temperature; (d) the relationship between the spectral width and temperature.

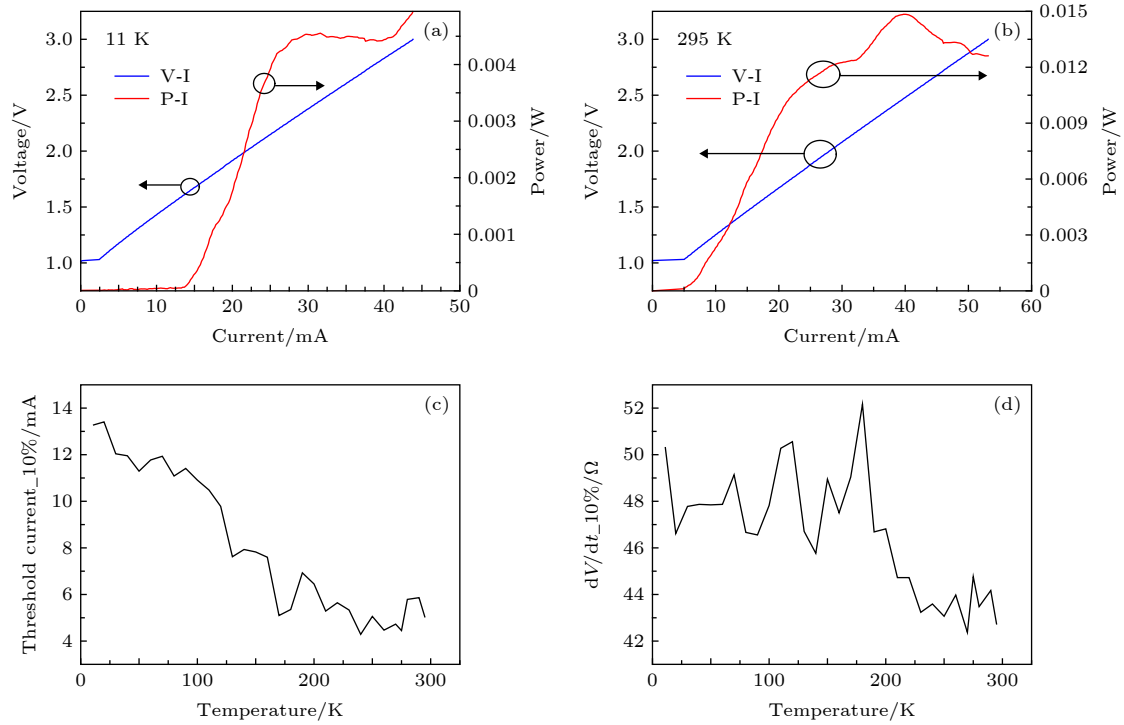


图 5 温度对 10% 占空比脉冲驱动的激光器光电特性的影响 (a) 11 K 温度下 10% 占空比脉冲电流驱动下功率-电流-电压曲线; (b) 295 K 温度下 10% 占空比脉冲电流驱动下的功率-电流-电压曲线; (c) 阈值电流随温度的变化曲线; (d) 微分电阻随温度的变化曲线.

Fig. 5. The opto-electrical properties of the VCSEL driven by pulse current with 10% duty cycle at various temperatures. (a) 11 K; (b) 295 K; (c) the laser threshold current as function of temperature; (d) the differential resistance as function of temperature.

图 5(a) 和 (b) 中的功率-电流曲线可以看出, 即使将占空比降低到 10%, 驱动电流的注入仍然不可避免地造成了器件的局部发热. 在 295 K 条件下, 功率-电流曲线上升到达第一个台阶 (31.47 mA) 后继续上升, 达到峰值 39.73 mA 后开始下降. 而在 11 K 条件下, 功率-电流曲线经过第一个台阶后功率-电流曲线继续上升, 没有达到饱和, 说明在 11 K 的环境温度下抵消了更多的热量, 使得激光器的饱和点向更大的电流方向移动.

如图 5(c) 所示, 随着激光器工作环境温度下降, 阈值电流呈增加的趋势. 这是由于激光器增益谱与腔模模式随温度降低以不同速度向短波长方向移动造成的. 虽然移动方向一致, 但是移动速度不同, 这导致腔模模式和增益谱之间的间隔随温度下降越来越大, 需要更高的能量注入才能使得激光器激励. 温度降低的同时会造成微分电阻升高, 如图 5(d) 所示, 在 295 K 到 230 K 之间微分电阻 (dV/dt) 变化较为平缓, 从 230 K 到 11 K 降温区间微分电阻整体呈上升趋势, 在 11 K 温度下微分电阻为 50 Ω .

10% 占空比脉冲电流驱动测试代表了低频的

脉冲驱动条件, 图 5 中的横坐标电流为激光器峰值电流, 按照占空比进行折算, 平均电流只有其十分之一. 使用的 VCSEL 激光器是商用的高速器件, 在光互连网络中广泛应用. 10% 占空比脉冲电流驱动在低温下的测试结果证明了商用高速激光器在低温光互连中有着广阔的应用空间, 可以将室温的诸多应用扩展到低温环境中, 为低温环境的光互连研究提供可靠的高速光源.

4 结 论

我们实验研究了垂直腔面发射激光器在低温下的发光特性. 激光器随环境温度的降低, 激光中心波长呈蓝移趋势. 直流驱动下环境温度降低和注入电流引起的局部升温之间会发生热量交换, 导致激光光谱先红移再蓝移. 低占空比脉冲电流驱动下激光器由于电流注入发热较少, 在降温过程中光谱不会发生红移. 中心波长为 850 nm 的垂直腔面发射激光器在环境温度从 295 K 下降到 10 K 的过程中, 激光中心波长蓝移仅约 5 nm, 并能在 10 K 温度下稳定工作; 激光器光谱宽度近似保持不变,

激光光谱强度随温度降低而增强;同时,激光器微分电阻和阈值电流有所增加.另外,在低温下,较小的直流偏置可以保持激光器的正常工作,有望实现基于垂直腔面发射激光器低温光互连.本文着重测试和研究了商用 VCSEL 在低温下的发光特性,对商用 VCSEL 在低温下作为激光光源、实现低温光互连具有一定的指导意义.

参考文献

- [1] Soda H, Iga K, Kitahara C, Suematsu Y 1979 *Jpn. J. Appl. Phys.* **18** 2329
- [2] Suzuki N, Hatakeyama H, Yashiki K, Fukatsu K, Tokutome K, Akagawa T, Anan T, Tsuji M 2006 2006 Ieee Leos Annual Meeting Conference Proceedings, Vols 1 and 2 (New York: Ieee) pp508
- [3] Pepeljugoski P, Kuchta D, Kwark Y, Pleunis P, Kuyt G 2001 15.6 gb/s transmission over 1km of next generation multimode fiber pp440-441
- [4] Wistey M A, Bank S R, Yuen H B, Goddard L L, Harris J S 2003 *Electron. Lett.* **39** 1822
- [5] Moser P, Hofmann W, Wolf P, Lott J A, Larisch G, Payusov A, Ledentsov N N, Bimberg D 2011 *Appl. Phys.Lett.* **98** 231106
- [6] Suzuki N, Hatakeyama H, Fukatsu K, Anan T, Yashiki K, Tsuji A 2006 *Electron. Lett.* **42** 975
- [7] Yashiki K, Suzuki N, Fukatsu K, Anan T, Hatakeyama H, Tsuji M 2007 *Jpn. J. Appl. Phys. Part 2* **46** L512
- [8] Chang Y C, Wang C S, Coldren L A 2007 *Electron. Lett.* **43** 1022
- [9] Yashiki K, Suzuki N, Fukatsu K, Anan T, Hatakeyama H, Tsuji M 2007 *Ieee Photonics Tech. Lett.* **19** 1883
- [10] Westbergh P, Gustavsson J S, Haglund A, Sunnerud H, Larsson A 2008 *Electron. Lett.* **44** 907
- [11] Valle A, Arizaleta M, Thienpont H, Panajotov K, Sciamanna M 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 131103
- [12] Mueller M, Hofmann W, Gruendl T, Horn M, Wolf P, Nagel R D, Roenneberg E, Boehm G, Bimberg D, Amann M C 2011 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **17** 1158
- [13] Dalir H, Koyama F 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 091109
- [14] Westbergh P, Safaisini R, Haglund E, Gustavsson J S, Larsson A, Joel A (edited by Choquette K D, Guenter J K) 2013 *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XVII*
- [15] Liu Y R, Davies A R, Ingham J D, Pentry R V, White I H 2005 *Ieee Photonics Technology Letters* **17** 2026
- [16] Tell B, Browngoebeler K F, Leibenguth R E, Baez F M, Lee Y H 1992 *Applied Physics Letters* **60** 683
- [17] Andersson J Y, Lundqvist L 1991 *Applied Physics Letters* **59** 857
- [18] Erdogan T, King O, Wicks G W, Hall D G, Anderson E H, Rooks M J 1992 *Applied Physics Letters* **60** 1921
- [19] Lin H H, Lee S C 1985 *Applied Physics Letters* **47** 839
- [20] Yong J C L, Rorison J M, White I H 2002 *Ieee Journal of Quantum Electronics* **38** 1553
- [21] Lu B, Zhou P, Cheng J L, Malloy K J, Zolper J C 1994 *Applied Physics Letters* **65** 1337

Optoelectronic properties of vertical-cavity surface-emitting laser at low temperature^{*}

Qin Lu¹⁾²⁾ Ren Jie¹⁾²⁾ Xu Xing-Sheng^{1)2)†}

1) (*State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

2) (*Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 27 March 2019; revised manuscript received 3 July 2019)

Abstract

The vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) is usually used as an 850nm short wavelength source for short-distance optical interconnection at normal temperature. In this study, the characterization of the VCSEL at low temperature was mainly studied. The laser spectra and the P - I - V curves are obtained with direct current and pulse current with 10% duty-cycle at different temperatures. It indicates that the VCSEL can work at 10K temperature environment. When the VCSEL laser is driven by direct current in a temperature range from 295 K to 10 K, the central wavelength of the laser is first red-shifted and then blue-shifted due to the change of environmental temperature and thermal effect on the device. With a pulsed-current driven source, the smaller the duty cycle, the less the heat generated by the device will be. The laser spectrum shows a blue-shift trend in the cooling process. The spectral width remains approximately stable in the cooling process. With temperature decreasing, the laser threshold current increases, and the lower the temperature, the larger the threshold current will be. It shows that the cavity mode and the gain spectrum shift with temperature changing. The cavity mode and the gain spectrum both shift to red with temperature increasing, and they shift to blue with temperature decreasing. But their shifting speeds are different. The mismatch between the cavity mode and the gain curve causes the device to need more energy for lasing. So the laser will work at a higher current driven at low temperature. The laser can work at low temperature as a stable light source. Therefore, the VCSEL has potential applications in optical interconnection system as a source at low temperature.

Keywords: laser, low temperature, spectrum

PACS: 42.55.Px, 07.20.Mc, 43.58.Kr

DOI: [10.7498/aps.68.20190427](https://doi.org/10.7498/aps.68.20190427)

^{*} Project supported by the Strategic Priority Research Program (A) of Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDA18040300), the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2016YFA0301200) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61575191, 61627820, 61875252).

[†] Corresponding author. E-mail: xsxu@semi.ac.cn