

高功率半导体激光器红外缺陷发射与热效应

越方禹^{1*}, 毛峰¹, 王涵¹, 张小玲¹, 陈晔¹, 敬承斌¹, 褚君浩^{1,2}

¹华东师范大学信息学院光电系极化材料与器件教育部重点实验室, 上海 200241;

²中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室, 上海 200083

摘要 高功率半导体激光器具有效率高、寿命长、体积小, 及成本低等优点, 在国防军事、材料加工和抽运源等领域具有广泛应用。阐述了镓砷/GaAs 基红外波段激光器和镓氮/GaN 基蓝绿光波段激光器的缺陷类型、发射特征, 以及相关研究进展, 通过聚焦商用器件, 利用变条件分波段发射谱及其热像, 展示了与缺陷相关的发射信号来源和空间分布, 分析了内部光学损伤(COD)动力学, 指出了现有“外 COD”模型在解释器件热退化机理上的局限性。

关键词 激光器; 高功率半导体激光器; 红外缺陷发射; 热效应

中图分类号 O474

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.110001

Infrared Defect Emission and Thermal Effect in High Power Diode Lasers

Yue Fangyu^{1*}, Mao Feng¹, Wang Han¹, Zhang Xiaoling¹,
Chen Ye¹, Jing Chengbin¹, Chu Junhao^{1,2}

¹Key Laboratory of Polar Materials and Devices, Ministry of Education, Department of Optoelectronics, School of Information Science Technology, East China Normal University, Shanghai 200241, China;

²National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

Abstract High power laser diodes (HPLDs) have been widely used in the defense sector, material processing, and pumping sources, considering their advantages such as high efficiency, long lifetime, small size, and low cost. This study describes the types and emission characteristics of the defects and the related advances in GaAs-based near infrared lasers and GaN-based blue-green lasers. By focusing on the commercial devices and using the condition-variable emission spectra for separated wavebands and the corresponding thermal imaging, the origination and spatial distribution of the emission signals related to the defects are determined. The internal catastrophic optical damage (COD) mechanism is also analyzed. Furthermore, the limitation of the current “external COD” model for interpreting the thermal evolution mechanism of the devices is pointed out.

Key words lasers; high power diode laser; infrared defect emission; thermal effect

OCIS codes 140.2020; 140.6810; 300.6250

1 引言

半导体激光器是以半导体材料为工作物质产生激光输出的一种光电器件, 其工作原理是通过一定的激励方式(如电注入、光注入等), 在半导体物质的能带(如导带与价带)之间, 实现非平衡载流子的粒

子数反转, 当处于粒子数反转状态的大量电子与空穴复合时, 便产生受激发射。半导体激光器于 1962 年被成功研制后, 于 1970 年实现了室温连续激光输出, 后采用(应变)量子阱等新颖结构, 开发出了多种构造的激光二极管(LDs)^[1-3]。这种激光器具有阈值电流低、转换效率高、输出功率大, 及使用寿命长

收稿日期: 2018-11-19; 修回日期: 2018-12-15; 录用日期: 2018-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(61790583, 61874043, 61775060, 61874045)

* E-mail: fyyue@ee.ecnu.edu.cn

等优点。一般地,单模功率输出超过 500 mW 的 LDs 可称为高功率半导体激光器(HPLDs)^[4]。从材料体系分,HPLDs 主要有镓砷/GaAs 基和镓氮/GaN 基两类,前者工作在近红外波段,而后者则工作于蓝绿光范围。就器件要求而言,高功率输出和高光束质量是研制半导体激光器的两项基本指标^[5],其中高功率输出是首要考虑的关键参数,而其他指标例如高转化效率、高可靠性,以及高光束质量等,可在功率提升之后逐步改进。为提高输出功率,可将多个单管激光器芯片集成封装,形成激光器巴条、或将多个巴条堆叠形成激光器叠阵。目前,单管连续输出功率已超半百瓦量级,面阵器件连续峰值功率可达数百千瓦^[6]。

但对于电光转换效率最高可达 75% 的 HPLDs,其剩余电能会引起器件升温,导致器件退化甚至引起灾难性光学损伤(COD)^[7-8],进而影响器件的可靠性,制约器件实现更高的光学功率输出。早在半导体激光器问世初期,实验上就观测到器件在高功率抽运下因 COD 而失效的现象,随即掀起了 COD 的研究热潮,包括通过镀膜来抑制腔面氧化、利用各种钝化技术来控制表面态密度和腔面发热、结合宽波导大光学腔结构设计降低腔面光功率密度等方式^[9-11],以提高器件抗 COD 能力。但由于 HPLDs 的尺寸小、外延结构复杂,其腔内局部瞬间热效应造成的器件损伤是永久性的、破坏性的,因此有关 HPLDs 的缺陷及其热效应动力学的基础研究一直是国际上研制更高功率激光器的热点和难点。

目前与器件退化及 COD 相关的研究工作,主要是基于器件已完成 COD 的实验结果^[12-14],而对于器件在退化时,尤其是在 COD 前后,对其腔体内部的热动力学研究甚少,以致有关器件热效应的来源只能简单归因于器件中,特别是衬底中的缺陷,而对缺陷态产生的物理机制、演变过程,以及其对热贡献的动力学过程并不清晰^[12,15-17]。同时,还形成了 COD 机理共识,即激光器腔体端面因存在大量表面态或缺陷态,在高光功率密度作用下吸收光子致使腔面温度迅速升高,进而诱发腔面处带隙收缩加剧光子吸收,这种恶性循环最终导致腔体端面烧毁、激光器失效^[18]。基于这一被广泛接受的“外 COD”模型,就单管器件的稳定性优化和提升而言,除了对器件结构设计进行优化外,当前实验上仍以改进腔体端面为主,包括各种腔面钝化、全反镜等技术,以提高器件 COD 阈值。

对于工作中的 HPLDs,除了窄的特定激光波长

发射外,其辐射信号还包括^[19-20]:1) 来自具有增益效果的阱层自发辐射信号,该信号覆盖激光器的激光波长。2) 来自量子结构中垒层、波导层、甚至熔覆层的自发辐射信号。这些本身就比较宽的辐射信号不仅会在室温环境下被展宽,而且还会被因重掺杂而形成的简并缺陷态所展宽,同时器件工作时的载流子升温效应也会进一步展宽这些辐射信号。3) 来源于缺陷态并能与上述辐射信号明显区分开的短波红外(SWIR)辐射信号,位于 1~2 μm 。4) 来源于器件热效应(温度升高)而产生的中波红外(MWIR)辐射信号。

需要指出的是,在研究小尺寸光电器件的热效应时,除了空间分辨这一难点外,关键点是获取热效应在红外波段的谱分辨信号,特别是在热效应发生初期,器件内部热辐射并不显著,其辐射的中红外波段信号往往被强的室温背景宽辐射信号所淹没^[21],因此,在原位研究半导体激光器退化及其 COD 机理时,还需要借助具有一定特色,特别是在能有效消除强室温背景干扰信号的同时,仍能提取器件的本征热辐射弱信息的前沿研究手段,才可从本质上揭示器件热起源及其演化规律,进而达到提升器件稳定性的目的。

本文首先聚焦 980 nm GaAs 基 HPLDs 的光发射谱特性,通过不同条件下的分波段光热信号探测,阐述体系中的缺陷态起源、分布,及其载流子复合机理,揭示器件热效应动力学及其导致的 COD 机理。同时,对 GaN 基 HPLDs 的部分近期结果给予分析和展望。

2 样品信息及实验条件

2.1 样品信息

GaAs 基 980 nm 激光器是基于 InGaAs/AlGaAs 单量子阱的非对称波导结构。器件前后腔面涂层的反射率分别约为 3% 和 99%。器件腔长为 3.9 mm,p 型面朝上封装,内部损耗为 0.7 cm^{-1} ,斜率效率为 0.97 W/A,阈值为 75 mA。在 750 mA 下进行加速老化实验。GaN 基 450 nm 激光器是基于非对称多量子阱和 GaN:Si(Mg)形成 n(p)型导电结构的光学活性区。发射带偏离中心,条宽为 15 μm ,p 型面朝上封装。器件腔长为 1.2 mm,阈值为 150 mA。为便于比较,取参考样品为腔面无涂层结构。

2.2 实验细节

稳态电/光致发光(EL/PL)谱在傅里叶变换红外(FTIR)光谱仪或可见-紫外分光光度计上进行。

其中, FTIR 光谱仪具备连续扫描(RS)和步进扫描(SS)两种模式,并配备了具有直交流信号双路输出的高灵敏度锗和碲镉汞探测器,部分测试在步进扫描模式下进行,且具有调制锁相放大技术,以有效消除室温背景辐射信号^[20-21]。器件工作时处于稳态或瞬态注入电流等两种条件。实验采用正入射方式收集辐射信号。测试中,器件工作温度稳定在 (25.0 ± 0.2) °C。脉冲注入模式下,光路系统配备多波段热像同步探测系统。

3 实验结果与讨论

3.1 GaAs 基 HPLDs

图 1 给出了在稳态注入电流的条件下, InGaAs/AlGaAs 单量子阱结构的前腔电致发光(EL)谱,范围覆盖约为 $0.8 \sim 7.5 \mu\text{m}$ 。需要指出的是, $3 \mu\text{m}$ 以上波段的曲线作了归一化处理,坐标轴均采用了对数坐标。由图 1 可知,在 60 mA 的低注入条件下(低于阈值 75 mA),结构仅给出了峰值位于 980 nm 左右(图 1 中 A 区)的强发射信号,其源自量子结构中 InGaAs 阱层的自发辐射信号。同时,在远离阱层发射谱峰位约 $3 \mu\text{m}$ 以上的 MWIR 区,存在半峰全宽极宽的强发射信号。不难理解,该信号最可能源于室温背景辐射干扰信号(由 Planck 黑体辐射公式得知,其中心波长约为 $10 \mu\text{m}$)^[20-22]。同时,在高电流注入条件下,器件本身也会产生热效应而辐射 MWIR 信号。图中在波长范围约为 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 的区间内存在相对较弱的发光信号,即处于 SWIR 波段(B 区)。从器件结构和发光峰型来判断,该发光信号具有缺陷态特征,可能源于包括阱层和垒层的活性区、以及覆盖层或

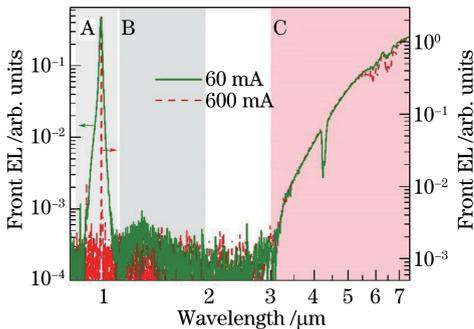


图 1 在不同稳态注入电流条件下基于非对称 InGaAs/AlGaAs 单量子阱结构的 HPLD 前腔的 EL 谱
Fig. 1 EL spectra from front facet of HPLD based on asymmetric InGaAs/AlGaAs single quantum well structure at different steady-state injection currents

衬底中的缺陷态。

为方便比较,图中也给出了注入电流为 600 mA 时(远高于器件阈值)的前腔发射谱。在高注入电流条件下,器件结构阱层中发生了明显的受激辐射,并发射了峰值在 980 nm 左右的激光谱线,而光谱曲线中几乎未见位于 SWIR(约 $1 \sim 2 \mu\text{m}$)范围内的缺陷发射信号,这就表明在器件发生受激辐射时,其 SWIR 缺陷发射相关的跃迁得到了较好的抑制。为分别获取器件激光信号和 MWIR 辐射信号(C 区),实验过程中采用了多组滤波片。

为分析器件热辐射信号的谱分辨结果,图 2 给出了器件在 600 mA 稳态注入条件下,基于 FTIR 步进扫描和连续扫描的前腔发射谱结果。但由于在 600 mA 下器件已发生受激辐射(A 区),其激光线很强,因此采用了包括长通、短通在内的多种组合滤波片。考虑到注入的稳态电流大小相同,器件内部所产生的热效应应比较接近。因此,对 MWIR 波段发射信号(C 区)的高能端(短波侧)进行了归一化处理。图中显示在步进扫描模式下, MWIR 波段的信号得到了部分抑制,即在步进扫描模式下已完全消除了室温背景辐射的干扰,剩余信号仅为器件热效应导致的辐射信号^[20]。同时在该模式下,器件在 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 范围内与缺陷相关的 SWIR 发射信号(B 区)也得到了极大地放大。

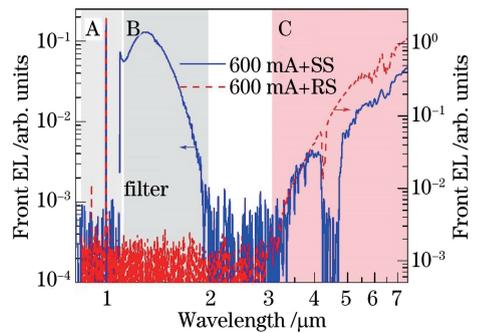


图 2 电流注入为 600 mA 的条件下从前腔探测到的 EL 信号

Fig. 2 EL signal from front facet at injection current of 600 mA

在 600 mA 稳态注入条件下,器件前腔和侧面的 EL 对比图如图 3 所示。图中侧腔数据为对数坐标。其中前、侧两个方向的辐射绝对强度并不具有可比性,但每个谱中不同波段的信号却具有可比性。光谱测试均是在基于 FTIR 步进扫描模式下进行的,即光谱信号已彻底消除了室温背景辐射信号^[20-21]。由图可知,除了在器件前腔可探测到激光线(A 区)、SWIR

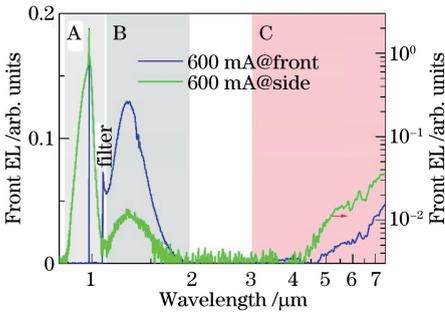


图3 600 mA 直流注入条件下,器件结构前腔和侧腔 EL 谱
Fig. 3 EL spectra from front and sidefacets of device at injection direct current of 600 mA

发射信号(B区),及 MWIR 发射信号(C区)外,从器件腔体侧面也能探测到明显的阱层自发辐射信号和因受激发射而产生的激光谱线。在侧面的 SWIR 和 MWIR 信号也具有可比性,且相较于器件前腔辐射信号,腔体侧面的 MWIR 信号要强若干数量级(如对 SWIR 信号进行归一化)。

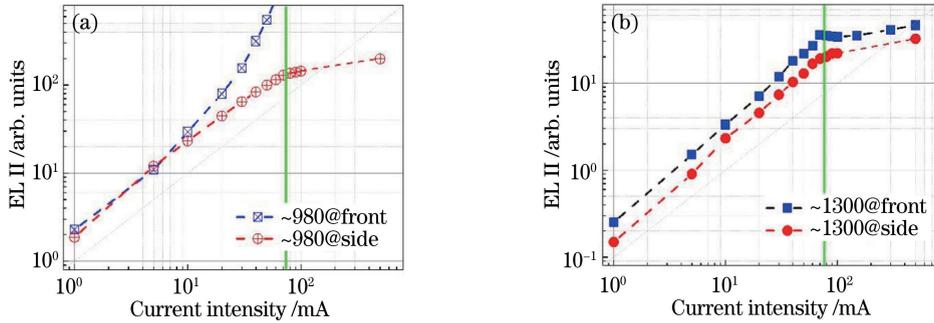


图4 稳态注入电流条件下,器件的 EL 积分强度。(a)腔体前端面和腔体侧面在 980 nm 处的 EL 积分强度;
(b)与缺陷相关的且位于 1.3 μm 处的 EL 积分强度
Fig. 4 EL II of device at steady-state injection current. (a) EL II from cavity front and side facets at 980 nm;
(b) defect-related EL II at 1.3 μm

在利用脉冲电流注入加速老化时^[23-24],器件发生 COD 前后激光腔体(沿波导方向)的 SWIR 和 MWIR 热像信息空间分辨谱如图 5 所示。图中器件在 COD 发生前,腔体内沿着波导方向存在较明显的 MWIR 热信号,但 SWIR 信号显示器件未发生任何因热效应导致的点缺陷发射。当脉冲注入电流引起器件 COD 时(其由器件的激光输出功率与注入电流强度的依赖关系判定),除了波导方向的热效应外,在 MWIR 信号上可以看到更接近腔体前端面的点缺陷热发射(这一点在 SWIR 成像上更明显),其呈现出了由点缺陷向前后腔扩散的动力学,且向前腔扩展的速度远远快于向后腔扩展的速度。在 COD 发生后,SWIR 中可见沿腔体方向的明显缺陷发射信号,在 MWIR 中可见因热积累导致的点缺陷

图 4 给出了在不同稳态注入电流条件下的器件腔体前端面和侧面发射谱积分强度(II)演化规律,图中的坐标轴均采用对数坐标。其中,图 4(a)为 980 nm 处积分强度与注入电流的依赖关系,图 4(b)为 1.3 μm 处与缺陷相关的 SWIR 发射信号与注入电流的依赖关系。由图 4(a)可知,腔体前端面在 980 nm 处的发光强度呈现出了明显的超线性规律,即当电流高于阈值 75 mA 后,结构中的量子阱层发生受激辐射,输出激光。然而,从侧面数据分析可知,在阈值以下,侧面发光信号仅源于阱层的自发辐射(明显的线性演化规律),而在超过阈值后,却呈现出了亚线性并趋于近饱和状态。由图 4(b)可知,无论是腔体前端面还是侧面,与缺陷相关的 SWIR 信号在阈值以下呈现出了明显的线性依赖关系(双对数坐标系中斜率约为 1;高效率的自发辐射特征),而在阈值以上,其则呈现出了类似于侧面在 980 nm 处的演化规律,即亚线性并趋于饱和。

发射及其动力学。受到成像系统的视野和放大倍数的影响,MWIR 右侧(z 方向)比 SWIR 的成像短。

随着进一步脉冲的施加(步进式增加脉冲强度),该点缺陷的热辐射在空间上有向前腔面移动的演化趋势,且热效应更加明显。这种步进式脉冲强度的增加,必将引起前腔面热效应的持续积累,最终导致前腔面材料烧毁,从而使器件失效。

图 5 中脉冲式电流注入调控 980 nm HPLDs (基于非对称 InGaAs/AlGaAs 单量子阱结构)退化的实验结果明确揭示了,器件在发生 COD 前后若干脉冲时间内,腔体内部的热演化规律。由该实验观测到的机制显然不同于现有的“外 COD 机制”,即腔面材料对激射光子的不断吸收形成热积累,降低了其光学带隙,增加了其对激射光子的吸收,这种

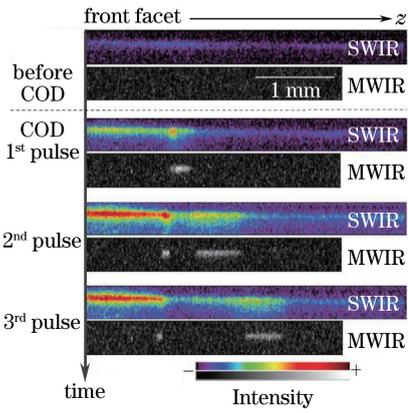


图 5 脉冲电流注入下 COD 前后器件所发出的 SWIR 和 MWIR 信号的热像动力学

Fig. 5 Thermal image dynamics corresponding to SWIR and MWIR signals of device before and after COD under pulsed injection current

非良性循环导致的热积累最终将烧毁腔体(前)端面。虽然在实验过程中,每台激光器都具有其特定的 COD,但几乎所有被研究器件(或结构)的 COD 并非直接发生于其腔体端面,而是源于腔体内部,即“内 COD”。尽管这些器件发生 COD 的起始位置并不总是在内部同一“地点”,但基本都接近前腔面部分,具有从 COD 起点以一定扩散速率向端面演化的规律(这也与腔内光强分布理论一致^[25])。同时,在器件中还观测到了强 SWIR 缺陷发射信号,若简单地将此 SWIR 信号认为是 GaAs 衬底中缺陷态对阱层自发辐射线的再吸收所产生的发射信号,在物理机制上是相悖的,因为 GaAs 作为器件结构的衬底材料(室温截止波长约 870 nm),其对 980 nm 激光波长几乎是“透明”的^[20,26]。

3.2 GaN 基 HPLDs

与成熟的 GaAs 基激光器相比,在蓝绿光发射区及更短波长范围存在重要应用前景的 GaN 基半导体激光器(如 InGaN/GaN 结构),其 GaN 基质导热性更好、制备的激光器阈值电流也更低,但其单管最大连续输出功率却偏低(仅几瓦级)^[27-29],这对本身利用昂贵的自支撑 GaN 衬底进行制备的蓝色激光器而言,极大地限制了其应用范围。一般认为导致器件效率低的原因是缺少优质的衬底材料^[30-31],即使已有多种尝试拟改善 GaN 衬底“丰富的”缺陷态,但相较于 GaAs 而言,GaN 基质(或衬底)的位错密度仍高了好几个数量级,致使其器件输出功率至少低了一个数量级以上。因此,如何揭示器件结构中的缺陷态及其引起的热动力学,对有效提高该类器件输出功率具有指导意义。

基于 InGaN/GaN 多量子阱结构的 440 nm 激光器源于阱层的 EL 谱结果如图 6 所示。图中在稳态注入电流强度 I 小于阈值(150 mA)的条件下,阱层仅给出自发辐射信号,峰宽(半峰全宽约为 80 meV)且强,而在电流强度 I 大于阈值(400 mA)的注入条件下,阱层发生了明显的受激辐射,其发射峰窄,位于 440 nm 附近。

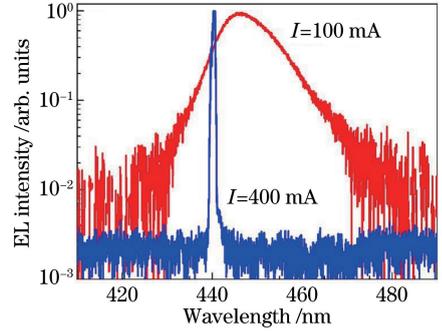


图 6 在稳态注入直流条件下基于 InGaN/GaN 多量子阱结构的 440 nm 激光器前腔的 EL 谱
Fig. 6 EL spectra from front facet of 440 nm laser based on InGaN/GaN multiple quantum well structure under steady-state injection direct current

为揭示器件结构中的缺陷态信息,实验对器件前腔的发射谱信号进行了可见-近红外/V-NIR 波段的探测。图 7(a)给出了在不同注入电流条件下,器件前腔在 V-NIR 范围内(约 500~900 nm)的 EL 信号,其中在 540 nm 处因滤波片存在着短波截止边。由图可知,在该范围内的 EL 信号很强。尽管已有大量文献报道了此波段信号,并将其归因于 GaN 衬底的缺陷发射^[32],但是通过实验发现,随着注入电流的增加,该波段发射信号的高低能量侧存在明显的不同演化规律,如图中阴影部分所示的 D 区(580 nm 附近)和 E 区(800 nm 附近),其中 D 区发光强度随注入电流增加的变化趋势为先增加较快,随后变化不大;而 E 区发光强度在低注入电流时无明显发光信号,但随着注入电流的增大,骤然变得极其明显。其中 D、E 两区演化规律对应的注入电流强度临界点均位于器件的阈值附近(位于 150 mA 附近)。

图 7(b)给出了 D、E 两部分发射峰的积分强度与注入电流的依赖关系,由图中的激光器阈值标记可知,在能量较高的 D 区,其发光强度随注入电流先是线性增加,而后在注入电流超过阈值时,呈现出明显的饱和现象(类自发辐射);相反,在能量较低的 E 区,其发光强度在阈值以下基本为零,一旦注入电流超过阈值,其积分强度呈现出明显的线性增加规律,即在整个注入电流的过程内,其存在类激光器的注入电

流-功率输出($P-I$)曲线的超线性特征(其阈值与器件结构的阈值 150 mA 相吻合),这表明 D、E 两区的发射机制不一定相同,不能简单将其归于 GaN 衬底缺陷态的自发辐射。D 区所对应的发射可能源于缺陷态的自发辐射特征,而 E 区的发射则可能源于激光器发生受激辐射后,激光诱导的光辐射伴峰。同时,从

辐射信号的超线性关系和器件内部可能存在的温度效应来判断,E 区的辐射并非由器件热效应而导致的辐射信号。事实上,最近的空间分辨结果显示^[22],D 区所对应的发射带并非源于衬底层的缺陷态,而是源于活性区中与 GaN 基相关的缺陷发射,至于 E 区的物理起源则有待进一步研究。

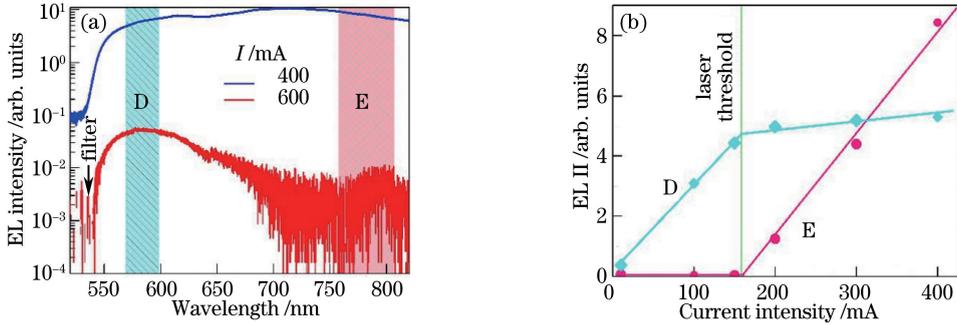


图 7 在不同注入电流强度下 440 nm 激光器的 EL 谱及其分析结果。(a)前腔 EL 谱;
(b) EL 积分强度随注入电流强度的变化

Fig. 7 EL spectra and analysis results of 440 nm laser under different injection current intensities. (a) EL spectra from front facet; (b) EL II versus injection current intensity

器件结构在 SWIR 范围内的稳态注入 EL 谱如图 8 所示。为方便比较,图中对比显示了该器件 GaN 衬底的光致发光(PL)谱。图中左侧因滤波片原因,其存在明显的截止边;右侧则因锗探测器响应波段原因,仅能显示至 1700 nm。受上述两种原因影响,EL 谱在该波段的短波侧和长波侧均存在截止边,仅显示约 800~1600 nm 波段信号。但即使在激光器阈值以下(100 mA),该发射信号也很强。随着注入电流的增加(如 400 mA),该信号得到了明显的放大(其中因空气原因,在谱线上存在大气吸收的特征谱,如 1100 nm 附近为水汽吸收;1400 nm 附近为水汽和二氧化碳的吸收)。通过改变注入电流的大小,并结合调制 PL 谱结果,发现此宽发射信号两侧亦表现出不同的演化规律,见图中 F 区

(900~1200 nm)和 G 区(1500~1700 nm),即 F 区积分强度随注入电流呈现出类似于图 7(b)中 D 区的自发辐射特征,而 G 区积分强度则表现出随注入电流呈近线性增加的特征。同时,图中给出了 GaN 衬底的 PL 谱结果(即 sub_SSPL,其基于 FTIR 步进扫描模式,已完全消除室温背景辐射在长波侧的影响)。通过比较可知:1) 衬底 PL 谱与器件的 EL 谱在 SWIR 波段极为相似,这表明并非源自量子阱结构特殊电子结构的 SWIR 发射信号,而只可能源于缺陷态的发射,且与 GaN 基质(并非仅限衬底)存在一定的相关性;2) 器件即使在 100 mA 的稳态注入电流条件下仍然存在一定的内部热效应,其短波侧已拓展至 1500 nm 附近;3) 在高注入电流条件下,器件内部热效应显著增强,并与 SWIR 缺陷发射信号耦合。

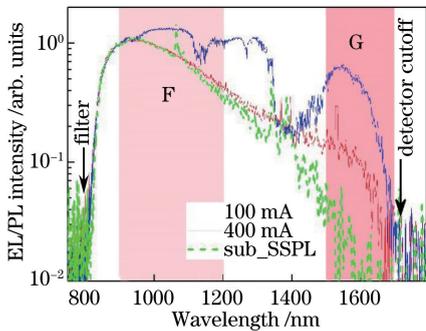


图 8 在不同注入电流条件下,440 nm 激光器前腔的 EL 谱
Fig. 8 EL spectra from front facet of 440 nm laser at different injection currents

更为重要的是,在脉冲电注入时(脉宽为 $1 \mu\text{s}$ 量级,重复频率为 1 kHz 量级),实验还观测到在器件热效应(G 区)得到显著抑制的同时,F 区的 1150 nm 附近出现了明显的光放大现象,如图 9 所示。如前所述,1100 nm 附近为大气(水汽)的强吸收区,能在这一峰位范围观测到强的发射尖峰,对应器件中缺陷态的强自发辐射区,存在极其显著的光放大/增益效应,甚至可能存在激射,该过程会在数量级上限制电致非平衡载流子在阱层产生本征激射的数量,从而导致该类器件存在本征激光输出功率瓶颈。

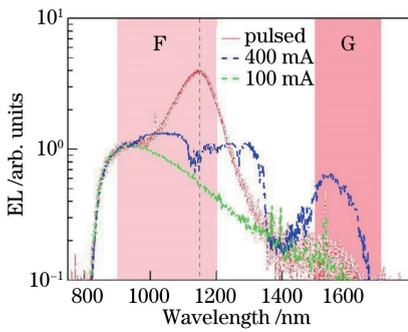


图9 在不同注入电流条件下,440 nm激光器前腔的EL谱
Fig. 9 EL spectra from front facet of 440 nm laser under different injection currents

近期中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所所在InGaN激光器研制方面^[33]的成果是通过在低成本且易于电学集成的硅衬底上采用AlN/AlGaIn缓冲层结构获得了413 nm输出的室温InGaIn激光器,该器件结构有望从本质上解决高成本且缺陷态丰富的GaIn衬底带来的负面影响。但值得注意的是,正如前文所述,通过对GaIn基HPLDs中可见波段的缺陷发射进行分析,发现GaIn衬底并非是该类缺陷态发射的唯一来源,而是与GaIn基质有关(如阱层InGaIn等)^[22],因此,对GaIn基激光器的功率输出瓶颈的研究具有实际意义。

4 结束语

研制HPLDs的核心是获得高功率输出、高光束质量,除样品制备和器件加工外,了解并掌握器件的结构设计和结构中的缺陷分布相关性也是其研制中的关键因素之一,这是由于在追求高功率激光输出的同时,缺陷则因非辐射复合导致的热效应将会引起器件失效甚至COD,继而影响器件的电光效率和寿命。虽然器件的COD无法从根源上避免,但是可以从其产生的物理机制角度获得一些启示,从而为优化器件结构设计、P/N型掺杂等提供实验基础。

实验结果表明,GaAs基HPLDs存在明显的SWIR缺陷发射,其可以用于研究并分析器件中非平衡载流子的产生和复合,及其导致的热效应动力学过程,基于非对称InGaAs/AlGaAs单量子阱结构的内COD机制,论证了现有外COD模型的局限性,为研究或优化GaAs基HPLDs热效应提供了新的分析思路。

对于蓝绿光GaIn基激光器而言,尽管在440 nm InGaIn/GaIn多量子阱结构中观测到了丰

富的缺陷态及其发射信号,以及与其相关的热辐射特征,但有关这些缺陷在器件结构中的来源、空间分布,特别是在SWIR波段产生光放大辐射的机制仍不清晰,后期有必要从空间、时间、谱分辨,及其对应的热像信息方面着手,继续对光学输出功率存在数量级偏低的该类激光器缺陷态及其引起的器件内部热效应动力学行为进行深入研究,分析其非平衡载流子的特殊复合机制和途径,揭示器件中SWIR缺陷的来源(是源于GaIn基质的本征缺陷,还是因In引入的杂质态)及其影响器件COD阈值和本征功率输出的物理因素,为GaIn基激光器光学输出功率瓶颈的突破、器件稳定性的提高等方面提供实验指导。

致谢 感谢 Jens W. Tomm 资深研究员(Max-Born Institute for Nonlinear Optics and Short Pulse Spectroscopy)和 Martin Hempel 博士(Fraunhofer Institute for Reliability and Microintegration IZM, Berlin, Germany)的帮助。

参 考 文 献

- [1] Wang D, Li X Q. New progress in semiconductor lasers and their applications[J]. Optics and Precision Engineering, 2001, 9(3): 279-283.
王德, 李学千. 半导体激光器的最新进展及其应用现状[J]. 光学精密工程, 2001, 9(3): 279-283.
- [2] Bachmann F, Loosen P, Poprawe R. High power diode lasers[M]. New York: Springer, 2007.
- [3] Yang G W, Xu J Y, Xu Z T, et al. Reliability of InGaAs/AlGaAs strained quantum well lasers [J]. Chinese Journal of Semiconductor, 1999, 20 (4): 278-283.
杨国文, 徐俊英, 徐遵图, 等. InGaAs/AlGaAs应变量子阱激光器的可靠性[J]. 半导体学报, 1999, 20 (4): 278-283.
- [4] Wang H. Fabrication of continuous-wave high power semiconductor laser [D]. Xi'an: Xidian University, 2007.
王辉. 连续大功率半导体激光器的研制 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
- [5] Ma X Y, Wang J, Liu S P. Present situation of investigations and applications in high power semiconductor lasers [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 189-194.
马骁宇, 王俊, 刘素平. 国内大功率半导体激光器研究及应用现状[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2):

- 189-194.
- [6] Wang L J, Ning Y Q. High power semiconductor laser[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.
王立军, 宁永强. 高功率半导体激光器[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
- [7] Wang W Z, Jing H Q, Qi Q, *et al.* Reliability test and failure analysis of high power semiconductor laser [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2017, 38(2): 165-169.
王文知, 井红旗, 祁琼, 等. 大功率半导体激光器可靠性研究和失效分析[J]. 发光学报, 2017, 38(2): 165-169.
- [8] Hempel M, Tomm J W, Stojetz B, *et al.* Kinetics of catastrophic optical damage in GaN-based diode lasers [J]. Semiconductor Science and Technology, 2015, 30(7): 072001.
- [9] Xu Z W, Qu Y, Wang Y Z, *et al.* Simulation analysis of high power asymmetric 980 nm broad-waveguide diode lasers [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(4): 1094-1098.
徐正文, 曲轶, 王钰智, 等. 高功率 980 nm 非对称宽波导半导体激光器设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1094-1098.
- [10] An N, Lu P, Wei Z P, *et al.* Optimization of n-type waveguide structure for 980 nm diode laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(10): 101015.
安宁, 芦鹏, 魏志鹏, 等. 980 nm 半导体激光器 n 型波导结构优化[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(10): 101015.
- [11] Zhou M, Zhao D G. Barrier and well thickness designing of InGaN/GaN multiple quantum well for better performances of GaN based laser diode [J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(7): 077802.
周梅, 赵德刚. InGaN/GaN 量子阱垒层和阱层厚度对 GaN 基激光器性能的影响及机理[J]. 物理学报, 2016, 65(7): 077802.
- [12] Liu D. Thermal characteristics of high power vertical-cavity surface-emitting laser [D]. Changchun: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2012.
刘迪. 高功率垂直腔面发射激光器的热行为特性[D]. 长春: 中国科学院研究生院, 2012.
- [13] Wang S N, Bo B X, Xu L Y, *et al.* Thermal analysis on semiconductor laser with non-injection region[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2014, 35(8): 969-973.
王胜楠, 薄报学, 许留洋, 等. 基于腔面非注入区的半导体激光器的热特性分析[J]. 发光学报, 2014, 35(8): 969-973.
- [14] Sin Y, LaLumondiere S, Foran B, *et al.* Catastrophic degradation in high-power InGaAs-AlGaAs strained quantum well lasers and InAs-GaAs quantum dot lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8640: 86401G.
- [15] Wen P Y, Zhang S M, Liu J P, *et al.* Catastrophic degradation of InGaN/GaN blue laser diodes [J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2016, 16(4): 638-641.
- [16] Sweeney S J, Lyons L J, Adams A R, *et al.* Direct measurement of facet temperature up to melting point and COD in high-power 980 nm semiconductor diode lasers [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2003, 9(5): 1325-1332.
- [17] Gong X Q, Feng S W, Yang H W, *et al.* Degradation analysis of facet coating in GaAs-based high-power laser diodes [J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2015, 15(3): 359-362.
- [18] Cao Y L, Wang L, Pan Y Z, *et al.* Catastrophic damage of high-power semiconductor quantum well laser during the measurement[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2002, 23(5): 477-480.
曹玉莲, 王乐, 潘玉寨, 等. 高功率半导体量子阱激光器测试中的灾变性损伤[J]. 发光学报, 2002, 23(5): 477-480.
- [19] Hempel M, Tomm J W, Ziegler M, *et al.* Catastrophic optical damage at front and rear facets of diode lasers[J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(23): 231101.
- [20] Hempel M, Tomm J W, Yue F Y, *et al.* Short-wavelength infrared defect emission as a probe of degradation processes in 980 nm single-mode diode lasers[J]. Laser & Photonics Reviews, 2014, 8(5): L59-L64.
- [21] Yue F Y, Chu J H, Wu J, *et al.* Modulated photoluminescence of shallow levels in arsenic-doped $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x \approx 0.3$) grown by molecular beam epitaxy[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(12): 121916.
- [22] Kernke R, Wang H, Hong J, *et al.* Origin of yellow emissions from (In, Ga, Al) N based 450 nm emitting diode lasers[J]. OSA Continuum, 2019, 2(5): 1496-1501.
- [23] Tomm J W, Ziegler M, Hempel M, *et al.*

- Mechanisms and fast kinetics of the catastrophic optical damage (COD) in GaAs-based diode lasers [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2011, 5(3): 422-441.
- [24] Ziegler M, Pomraenke R, Felger M, *et al.* Infrared emission from the substrate of GaAs-based semiconductor lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(4): 041101.
- [25] Zhou L. Research on anti catastrophic optical damage of high power semiconductor laser diodes [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014.
周路. 高功率半导体激光器抗 COD 关键技术研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2014.
- [26] Yuan Q H, Jing H Q, Zhang Q Y, *et al.* Development and applications of GaAs-based near-infrared high power semiconductor lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(4): 040003.
袁庆贺, 井红旗, 张秋月, 等. 砷化镓基近红外大功率半导体激光器的发展及应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(4): 040003.
- [27] Tomiya S, Hino T, Goto S, *et al.* Dislocation related issues in the degradation of GaN-based laser diodes [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, 10(6): 1277-1286.
- [28] Auf der Maur M A, Pecchia A, Penazzi G, *et al.* Efficiency drop in green InGaN/GaN light emitting diodes: the role of random alloy fluctuations [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(2): 027401.
- [29] Tomm J W, Kernke R, Mura G, *et al.* Catastrophic optical damage of GaN-based diode lasers: sequence of events, damage pattern, and comparison with GaAs-based devices [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2018, 47(9): 4959-4963.
- [30] Wang J X, Sun D Z, Wang X L, *et al.* Study on photoluminescence of high quality GaN [J]. *Journal of Applied Optics*, 2001, 22(2): 35-38.
王军喜, 孙殿照, 王晓亮, 等. 高质量氮化镓材料的光致发光研究 [J]. *应用光学*, 2001, 22(2): 35-38.
- [31] Tang W C, Rosen H J, Vettiger P, *et al.* Evidence for current-density-induced heating of AlGaAs single-quantum-well laser facets [J]. *Applied Physics Letters*, 1991, 59(9): 1005-1007.
- [32] Tomm J W, Ziegler M, Talalaev V, *et al.* New approaches towards the understanding of the catastrophic optical damage process in in-plane diode lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7230: 72300V.
- [33] Sun Y, Zhou K, Sun Q, *et al.* Room-temperature continuous-wave electrically injected InGaN-based laser directly grown on Si [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(9): 595-599.