

半导体激光器输出功率影响因素的研究进展

黄佳瑶¹, 尚林¹, 马淑芳¹, 张帅¹, 刘青明¹,
侯艳艳¹, 孔庆波¹, 许并社^{1,2}

(1. 陕西科技大学 材料原子·分子科学研究所, 陕西 西安 710021)

(2. 太原理工大学 新材料界面科学与工程教育部重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要: 大功率半导体激光器是现代激光加工设备、激光再制造设备、激光医疗、激光显示以及国防设备中重要的关键基础元器件和核心组件, 在工业和国防等领域有着广泛的应用。提高半导体激光器的输出功率首先需要确定影响功率输出的因素, 然后通过优化外延材料、芯片结构和制备工艺来解决这些问题。因此, 对大功率半导体激光器输出功率影响因素的研究具有重要的意义。基于此, 主要对限制 GaAs 基大功率半导体激光器输出功率的因素进行了综述, 总结了近几年 GaAs 基大功率半导体激光器在腔面灾变、载流子泄漏、双光子吸收以及纵向空间烧孔方面的研究进展, 这对进一步提高半导体激光器的输出功率、优化半导体激光器的结构设计、改进外延材料的质量以及提高材料的外延技术具有重要意义。

关键词: 大功率半导体激光器; 输出功率; 腔面灾变; 载流子泄漏; 双光子吸收; 纵向空间烧孔

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2021)03-0218-07

Research Progress on Impact Factors to Output Power of Semiconductor Laser

HUANG Jiayao¹, SHANG Lin¹, MA Shufang¹, ZHANG Shuai¹, LIU Qingming¹,
HOU Yanyan¹, KONG Qingbo¹, XU Bingshe^{1,2}

(1. Institute of Atomic and Molecular Science, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

(2. Key Laboratory of Interface Science and Engineering in Advanced Materials of Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: High-power semiconductor lasers are indispensably fundamental and essential components in the fields of equipment for modern laser processing, laser remanufacturing, laser medical treatment, laser displaying and national defense. They have extensive applications in industrial and defense fields. In order to increase the output power of semiconductor lasers, it is necessary to determine the impact factors of output power. Then, the output power improvement might be achieved through optimizing materials, structure and preparation process of semiconductor laser. Therefore, it is of great significance to study the impact factors on output power of semiconductor lasers. In this paper, the limitations for output power improving of GaAs-based high-power semiconductor lasers were reviewed. The research progress on catastrophic optical damage, carrier leakage, two-photon absorption and longitudinal spatial hole burning of GaAs-based high-power semiconductor lasers was summarized. It might accelerate the output power increasement, structural design optimization, materials quality improvement, and epitaxy technology promotion of semiconductor lasers.

Key words: high-power semiconductor laser; output power; catastrophic optical damage; carrier leakage; two-photon absorption; longitudinal spatial hole burning

收稿日期: 2019-08-04 修回日期: 2019-12-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(21972103); 国家重点研发计划项目(2016YFB0401803); 山西省重点研发计划项目(201703D111026)

第一作者: 黄佳瑶, 女, 1995年生, 硕士研究生

通讯作者: 许并社, 男, 1955年生, 教授, 博士生导师,
Email: xubs@tyut.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.201908013

1 前言

半导体激光器具有体积小、质量轻、可靠性高、效率高、寿命长等优点。近年来, 随着输出功率的不断提高, 半导体激光器在越来越多的应用领域逐渐取代了传统固体激光器和气体激光器的主导地位。大功率半导体激光器是大多数高性能激光系统的泵浦源, 其光电转换

效率较高、易于制造。以大功率半导体激光器为基础的工业和军事应用在全球范围内迅猛发展,涵盖了工业生产、激光通信、激光医疗、激光显示、自动化控制及军事国防装备等方面^[1]。

近年来,通过不断提高光电转换效率,半导体激光器的输出功率越来越高。然而,仍存在许多潜在的物理机制限制了半导体激光器的最大输出功率。例如,由于灾难性的光学反射镜损坏,设备可能会在材料缺陷处^[2]或前腔面处^[3]发生故障;例如,在高注入电流下,许多学者都观察到功率饱和、热翻转现象^[4-9]。早期文献中提到限制半导体激光器输出功率的因素包括:①在高注入电流下,空穴迁移率较低导致的有源区下方电子的泄漏^[6];②P型波导层中载流子的积累与重新复合^[7];③量子阱内载流子捕获速率与受激复合速率不平衡导致的增益压缩效应^[8];④纵向烧孔效应^[9];⑤双光子吸收效应;⑥侧向反波导效应^[10]。基于此,本文总结了影响大功率半导体激光器输出功率的主要因素及其研究进展,以期优化激光器外延生长技术和芯片结构、改进材料生长质量以及提高激光器输出功率提供参考。

2 限制输出功率的因素

2.1 腔面灾变效应

腔面灾变(catastrophic optical damage, COD)效应是限制半导体激光器输出功率的最重要问题,它会导致激光器输出功率大幅或全部损失。早在1973年,Eliseev就将COD效应描述为微爆炸^[11];1979年,Henry等^[12]发表了一篇关于造成COD根本原因的文章;Waters^[13]详细阐述了COD效应导致半导体激光器失效的过程,这些早期研究中提出的大多数观点现在仍然被很多学者引用。

COD效应最初是由于环境气氛对半导体激光器芯片腔面的影响,产生了表面界面态,形成深能级复合中心,从而造成了半导体材料的氧化。激光器受激辐射产生电子空穴对后,这些电子空穴对在前腔面深能级复合中心以非辐射方式重新复合,使前腔面产生热量,从而减小了出光面带隙。出光面带隙的减小引起腔面更强的光吸收,这就形成了一个正反馈回路。半导体激光器大功率输出时,上述正反馈效应使得腔面升温加快,导致腔面有源区材料熔融并产生COD效应,最终造成器件失效。COD效应的产生严重制约了半导体激光器的大功率工作。为了得到输出特性更好、稳定性更高的半导体激光器,COD问题成为科研人员研究的热门课题。

2013年,北京工业大学Qiao等^[14]对大功率AlGaAs/GaAs激光器的COD瞬态热特性进行了研究。研究发现,COD发生后在前腔面上观察到两个熔点(图1),其位置

与热成像的热闪位置完全匹配,此时前腔面温度也升高了305℃,这是由于电子空穴对的非辐射复合增强,更多的电能转化为热能。因此,瞬态热特性对COD的发生有重要影响,抑制芯片过高的瞬态温度是防止COD发生的重要途径。

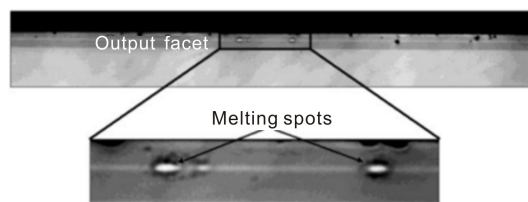


图1 COD发生后在出光面观察到的两个熔点^[14]

Fig. 1 Two melting spots observed on the output facet after COD occurred^[14]

2015年,Leonhäuser等^[15]发现增加前腔面反射率会削弱光反馈对光的近场模式和发射光谱的影响,从而降低半导体激光器发生COD的风险。研究表明,前腔面反射率的增加使得近场光场分布更加均匀,且外部光反馈对近场模式的影响会显著减小。这也意味着增加前腔面反射率有助于避免COD的发生。

2016年,美国通快公司提出用声子弹跳模型来分析COD效应的传播动力学过程^[16]。研究发现,声子弹跳模型的预测结果与所观察到的衍射模式一致:COD发生后,熔融的半导体材料从边缘冷却到中心并在中间留下一个狭窄的通道,这样透射声子就会在其中衍射。此外,通快公司还用该模型对COD的起源和传播速度、功率密度下降时COD连续相的演化、低阶横向激光模式的形成、界面横向模式的重新分布以及表征微观结构的衍射图进行了综合解释,这为研发大功率半导体光电器件开辟了新途径。

2018年,Rauch等^[17]研究了950 nm宽波导激光器中由光学反馈和电注入失调造成的光学灾变。通过对反馈点的定位(图2),使反馈点覆盖P侧高掺杂层,从而最大限度地降低了发生COD的阈值。结果表明,由于光反馈在激光器前腔面附近的吸收具有很强的局域性,所以产生了低的损伤阈值。

COD效应是限制激光器输出功率的最重要机制。近几年的研究表明,COD是一个快速(在1 ns内可产生宏观缺陷)、不可逆的缺陷生成过程,且激光又为COD缺陷的生长提供了能量。因此,这种缺陷产生机制对于大功率半导体器件来说尤为突出。弄清COD产生的过程及物理机理的同时,防止或抑制COD的发生,从而进一步提高半导体激光器的输出功率。

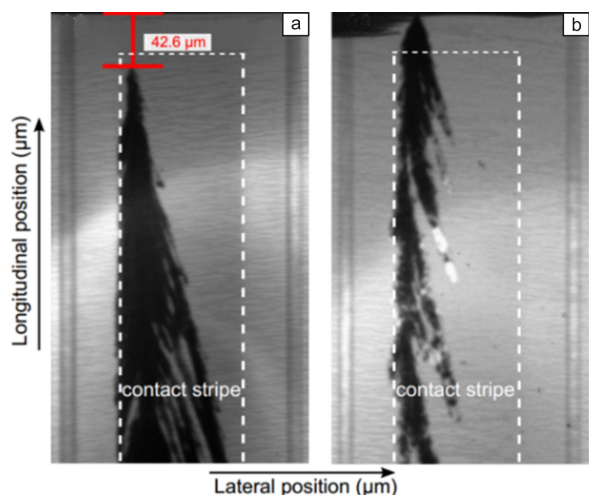


图 2 COD 发生后器件产生的两种失效模式^[17]: (a) 器件失效, (b) 腔面失效

Fig. 2 Two damage patterns of devices after COD occurred^[17]: (a) device damage, (b) cavity damage

2.2 功率饱和机制

大功率半导体激光器的结构往往采用宽波导结构, 波导层厚度为微米级。由于波导模式与高掺杂 P 型波导层重叠减少, 从而减小了激光器内部光学损耗。然而, 在非常高的电流密度下, 激光器却出现了功率饱和及热翻转现象。这是由于与薄的有源层相比, 波导层占比很大, 使得光限制因子减小, 造成功率饱和, 从而限制了这类激光器的输出功率。研究发现, 造成激光器输出功率饱和的物理机制主要有两种, 一是有源区载流子泄漏至波导层造成载流子的积累^[8, 18]; 二是双光子吸收效应^[19-22]。

2.2.1 载流子的泄漏

在高注入电流下, 半导体激光器有源区中的载流子泄漏至波导层, 导致波导层中载流子的积累。这是因为当注入电流很高时, 激光器内部有源区温度升高, 热电子发射增强, 造成了载流子逃逸。波导层中载流子重新复合以及自由载流子的吸收与散射都造成了半导体激光器损耗的增加和输出功率的降低。

2008 年, 德国 Ferdinand-Braun 研究所 Pietrzak 等^[23]研究发现, 随着电流的增加, 半导体激光器的输出功率逐渐减小。该团队认为这不是一种热效应, 因为激光器的发射波长并没有增加。在高注入电流下, 量子阱的势垒相对较小, 载流子从量子阱中逃逸并在波导层中积累, 这些逃逸的载流子在波导层处重新复合, 导致半导体激光器的输出功率降低。

2012 年, Avrutin 等^[24]研究了由于波导层中载流子积累引起的半导体激光器输出功率下降的问题。研究发现, 窄的非对称波导结构既可以使激光器实现低内损耗

和基模工作, 又不会引起其输出功率的下降。这是因为在窄的非对称波导结构中, 波导层较薄, 光限制因子高。故在高注入电流下, 相对于宽波导激光器, 窄波导激光器的光电转换效率优势更为突出, 甚至其输出功率可能得到提高。

2017 年, 德国 Ferdinand-Braun 研究所 Klehr 等^[25]研究了脉冲电流下 808 nm 脊波导激光器的光电特性。注入脉冲电流时, 激光器中部分载流子没有在有源区重新复合, 而是在脊波导层中积累; 在脉冲电流结束时, 电子回流并产生反向电流。研究发现, 低量子效率是由垂直和横向载流子泄漏引起的, 如图 3 所示。也就是说, 波导层中电子的积累以及反向电流的产生造成了载流子的泄漏, 降低了量子效率。

波导层中载流子的积累造成了载流子在波导层中重新复合和自由载流子的吸收与散射, 增加了激光器的内损耗, 导致其输出功率饱和。另外, 在高注入电流下, 电流也会提供载流子, 这也可能是造成激光器在高电流下输出功率下降的原因。关于波导层中载流子的积累, 有研究表明^[7, 24], 使用窄的非对称波导结构可以避免这种情况的产生。但是, 宽波导结构可以提高 COD 损伤阈值, 故针对具体的激光器结构设计需要权衡考虑各个要素, 使激光器各方面性能尽可能达到最优。

2.2.2 双光子吸收效应

双光子吸收效应是由自由载流子在波导层的吸收引起的, 其中最主要的是由双光子吸收生成的空穴所引起的价带吸收。与其它机制不同, 双光子吸收是半导体材料中的一个基本过程, 是不可避免的, 只能通过降低半导体材料中的光通量改善。

2014 年, Dogan 等^[26]研究了半导体激光器的双光子吸收效应。研究发现, 双光子吸收是一个非线性过程, 它限制了半导体激光器中光子的有效提取, 而光子的有效提取随光通量的增加呈非线性增长。因此, 设计大功率半导体激光器的结构要求增加光模式大小来减少光通量, 且不影响其他关键参数。结果表明, 耦合光波导激光器光束的发散度较小, 输出光斑为近圆形, 光斑直径约为 4 μm 且快轴方向模式尺寸大, 减小了输出端面的光功率密度, 也降低了 COD 的发生概率。

2016 年, Avrutin 等^[27]从理论上分析了半导体激光器横向结构对双光子吸收的影响。研究表明, 双光子吸收会产生两种显著的作用: 直接效应和间接效应。在对称波导激光器中, 双光子吸收的影响主要表现在双光子吸收产生的载流子扩散以及其被有源区捕获。这种双光子吸收的直接效应会导致载流子被耗尽, 此时, 直接效应成为限制激光器功率输出的主要因素。但是, 对于有

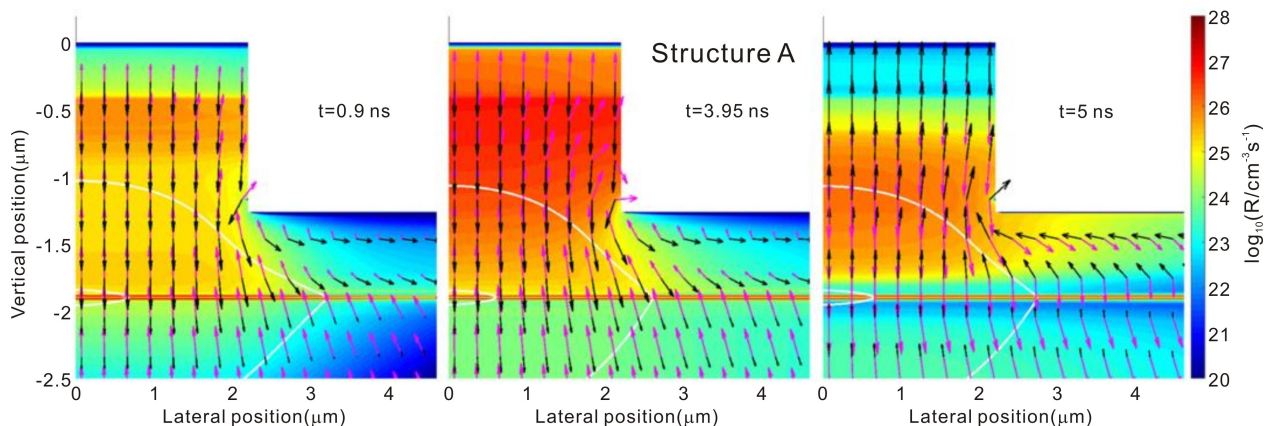


图3 脉冲电流对脊波导激光器电流密度、模式分布和非受激复合速率 R 的影响(R 根据右边的对数刻度用颜色来表征;每幅图中两条白线分别代表80%和1%的光强轮廓线;箭头表示电子(紫色)和空穴(黑色)的流动密度)^[25]

Fig. 3 Effect of pulse current on calculated current densities, mode profiles and non-stimulated recombination rates R of ridge-waveguide lasers (R is color coded according to the logarithmic scale on the right-hand side; two white lines in each panel representing 80% and 1% contours of the optical intensity; arrows representing the particle flow densities of electrons (purple) and holes (black))^[25]

源层位置向P型波导层严重偏移的情况,即非对称宽波导结构,双光子吸收产生的载流子引起了自由载流子的吸收,此时,间接效应成为限制激光器功率输出的主要机制。因此,在优化半导体激光器设计时,既要考虑双光子的影响,又要考虑扩散电流引起波导层中载流子不均匀积累的影响。

2017~2018年,Ryvkin等^[28-29]发现,在重掺杂N型波导层结构中,可以通过减小空穴的价带吸收减小波导层中的热积累,抑制半导体激光器在高温下的光损耗,从而提高激光器的输出功率。该模型包括电流注入和双光子吸收效应产生的空穴所引起的价带吸收效应,以及双光子吸收的直接效应。结果表明,与相同结构下弱掺杂N型波导层相比,重掺杂N型波导层产生的损耗要小得多。因此,重掺杂波导激光器具有较高的输出功率和光电转换效率。

双光子吸收和载流子泄漏共同造成了半导体激光器的功率饱和,但可以通过重掺杂N型波导层来减弱这种效应,提高激光器的输出功率,如图4所示^[28]。

2.3 纵向空间烧孔效应

半导体激光器的前后端面通常要镀一个高反射膜和一个低反射膜,以最大限度地实现激光器的大功率输出。因此,激光内部光强的纵剖面是高度不对称的,从而导致脊波导方向载流子密度的不均匀分布。这些空间不均匀性形成了载流子的纵向空间烧孔效应,且其与腔长有关,腔长越长,纵向空间烧孔效应越明显。这不仅降低了高电流注入下激光器的光学增益和输出功率,也影响了激光器的非线性和稳定性。研究人员对边发射半导体激光器纵向空间烧孔效应已经进行了深入研究^[30-36],通过了解载流子空间分布机理,优化激光器结构,使激光器非线性效应最小化,从而提高激光器性能^[33]。

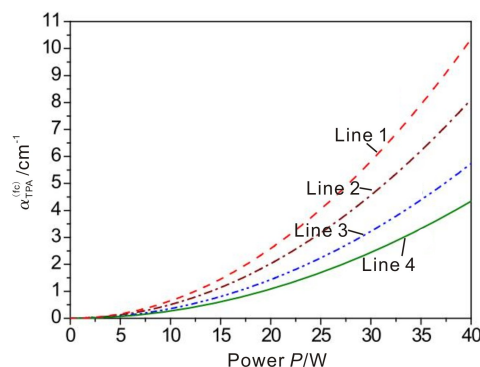


图4 不同掺杂水平下,N型波导层中由双光子吸收引起的非平衡载流子的内吸收与输出功率的关系(line 1- $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, line 2- $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, line 3- $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, line 4- $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)^[28]

Fig. 4 Power dependence of the internal absorption due to nonequilibrium carriers induced by two-photon absorption with different doping levels in N-optical confinement layer of $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ (line 1), $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (line 2), $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (line 3), $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (line 4)^[28]

2011年,英国约克大学Ryvkin和Avrutin^[31]针对边发射半导体激光器提出了一种光子和载流子密度纵向分布的物理模型,分析了载流子对激光器输出功率的影响。只有当前腔面反射率极小时,纵向空间烧孔效应才会对激光器的输出功率产生直接影响,这是由于空间载流子的不均匀分布导致有源区载流子泄漏,从而使激光器输出功率降低。

2014年,美国罗斯-霍曼理工学院Hao等^[37]建立了一个自洽模型来计算半导体激光器的纵向光子密度分布、载流子密度分布和增益分布情况。分析了不同参数对纵向空间烧孔效应的影响。结果表明,较大的注入电流、

较长的腔长和较短的发光波长会加剧纵向空间烧孔效应。该研究还证明,腔长超过 2 毫米时纵向空间烧孔效应会影响激光器的最大输出功率。该研究对优化半导体激光器的结构设计具有一定的参考价值。

2017 年, Rauch 等^[38]从理论上论证了热诱导的折射率在横向和纵向上的变化,不仅会导致前腔面近场光斑的收缩,还会导致后腔面近场光斑的扩大。然而,单一的横向自热引起的折射率变化(通常称为热透镜效应)不会导致近场光斑的收缩。因此,为防止前腔面近场光斑的收缩,在纵向保证器件温度的均匀性是有必要的。

2019 年, Avrutin 和 Ryvkin^[39]研究了纵向空间烧孔效应对前后腔面反射率高度不对称的谐振腔半导体激光器性能的影响,并分析了其对载流子非辐射复合的影响。

结果表明,在低注入电流下,纵向空间烧孔效应增加了非辐射复合电流,对输出功率影响不大;但在高注入电流下,纵向空间烧孔效应显著影响激光器的输出功率。该研究利用纵向空间烧孔影响因子修正了输出功率函数表达式,发现纵向空间烧孔效应可以用输出损耗与总损耗之比来估计。在内部损耗远小于耦合损耗的前提下,得到了高度不对称谐振腔中出光面反射率和纵向空间烧孔影响因子的函数表达式,分析估算结果与数值模拟结果一致,如图 5 所示。

由于纵向空间烧孔效应限制了前腔面反射率的大小和腔长,通过实验或理论计算研究纵向空间烧孔效应对激光器输出功率和光电转换效率的影响,这为大功率半导体激光器的设计提供新的思路。

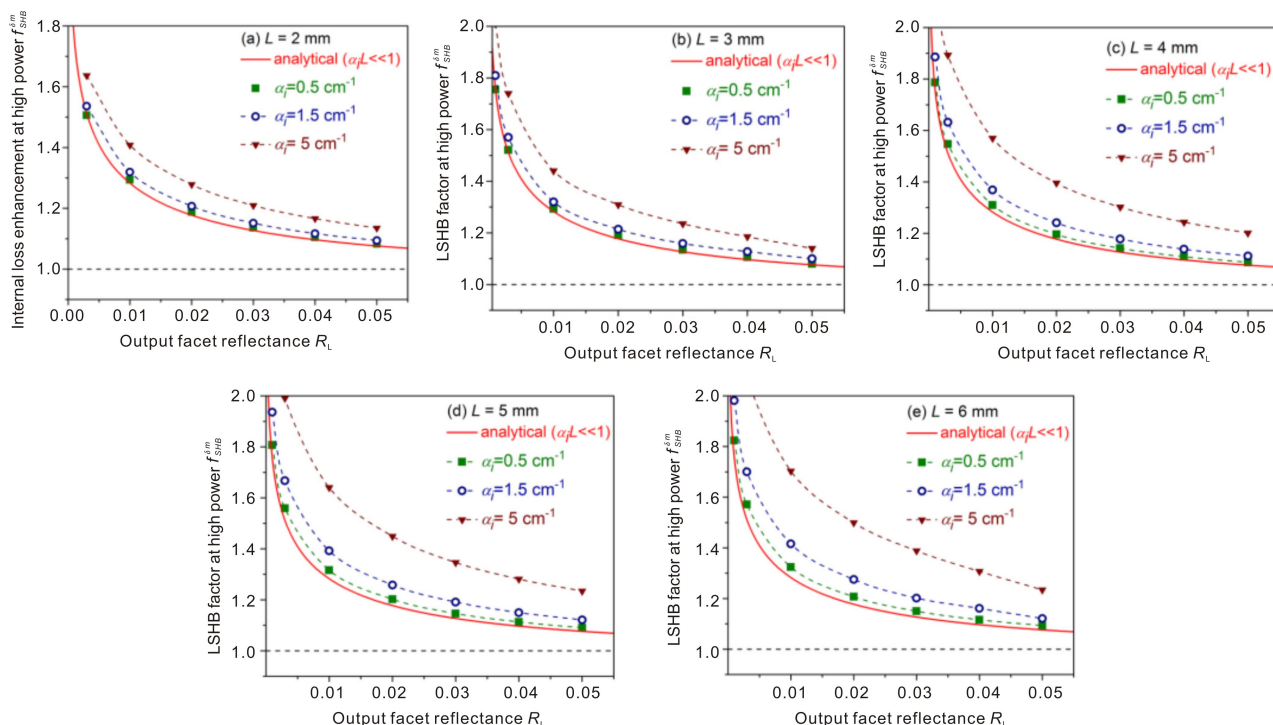


图 5 不同腔长和内部吸收下,纵向空间烧孔因子(LSHB)与出光面反射率的关系(图中实线为分析结果,虚线为数值模拟结果)^[39]

Fig. 5 With different cavity lengths and internal absorptions, longitudinal spatial hole burning (LSHB) factor as a function of the output facet reflectance (the solid line representing analytical results and dashed line representing numerical results)^[39]

3 提高输出功率的方法

半导体激光器的最大输出功率受 COD 的限制,因此对腔面处理技术的研究意义重大。2013 年,剑桥大学 Guo 等利用密度泛函理论对氮钝化 GaAs/Al₂O₃ 界面进行模拟^[40],发现氮有很好的 GaAs 表面钝化潜力。2015 年, Arab 等^[41]使用金属有机化学气相沉积(MOCVD)设备选择性生长了 GaAs 纳米结构,随后采用异质外延生长了 AlGaAs 层进行表面保护。2017 年,长春理工大学许留洋等^[42]利用射频等离子法对 GaAs 半导体表面进行了 S-N

混合等离子体钝化实验。光致发光(PL)测试结果表明,经过 S-N 混合等离子体钝化的 GaAs 样品的 PL 强度提高了 135%。2019 年,中国科学院半导体研究所王鑫等^[43]开发了一种单管芯半导体激光器腔面真空解理钝化工艺,这是一种在真空中解理并直接对半导体激光器腔面蒸镀钝化膜的方法。该研究采用 ZnSe 材料作为钝化膜材料,使制备的器件的输出功率提高了 23%。

载流子在波导层中的积累及双光子吸收均造成了半导体激光器输出功率的饱和,严重影响了激光器的性能。2014 年,德国 Ferdinand-Braun 研究所 Hasler 等^[44]研究了

一种极端双不对称结构(EDAS)激光器,该结构减轻了P型波导层中载流子积累的影响,输出功率较传统结构的激光器得到了提高。2015年,Yamagata等^[45]研究发现半导体激光器的功率饱和与有源区温度、热透镜均有关系,通过减小激光器电压、增大脊条宽度可实现激光器的大功率、高效率输出。2018年,俄罗斯圣彼得堡学术大学Zhukov等^[46]研发了一种耦合大光腔结构的边发射量子阱激光器。这种结构的激光器可以抑制横向模式的产生且具有较低的内部损耗,与传统结构相比,其内部损耗低至 0.4 cm^{-1} ,达到了最优结果。2018年,Wilkens等^[47]研究了EDAS激光器,发现该类型激光器具有较好的光束质量,且内损耗低、单模特性好,在波分复用系统中具有很好的应用。

纵向空间烧孔效应和腔长有关,腔长越长,纵向空间烧孔效应越明显。2012年,Chen等^[48]设计了一种纵向图案化的电接触结构,有效缓解了激光器的纵向空间烧孔效应。2015年,Yamagata等^[45]研究了915 nm的大功率非对称非耦合限制异质结构(ADCH)激光器。通过优化有源区的限制因子以及N型波导层和P型波导层的比例,减小了4和6 mm长腔结构的内部损耗,提高了激光器的输出功率和光电转换效率。2015年,Demir等^[49]在长腔器件中,采用开腔结构来提高载流子密度和光子密度的均匀性,缓解了纵向空间烧孔效应,获得了更高输出功率和光电转换效率的激光器。该研究还对比了标准腔结构和开腔结构的半导体激光器^[50],与标准腔结构相比,开腔结构激光器具有更均匀的纵向增益和腔内光强。因此,开腔结构激光器具有较低的由线性和非线性效应引起的功率损失。

4 结 语

大功率半导体激光器的发展程度代表着光电子产业的最高水平,其应用范围逐渐扩展到日常生活的方方面面,受到世界各国的高度重视。因此,关于大功率半导体激光器输出功率的研究也越来越多,本文总结了限制输出功率的几个主要因素,主要包括:COD效应、载流子泄漏效应、双光子吸收效应以及纵向空间烧孔效应,研究和理解这几种物理机制对提高大功率半导体激光器输出功率具有重要的指导意义。

通过分析上述4种限制输出功率的因素,未来可以从以下几个方面来减弱甚至消除它们对激光器输出功率的影响:①改进半导体激光器的芯片外延技术,改善材料的生长质量,减少材料内部缺陷及损耗;②优化半导体激光器的结构设计,缓解载流子泄漏、纵向空间烧孔效应等问题;③优化器件工艺。采用腔面处理技

术^[51-52]、腔面钝化工艺等方法提高COD损伤阈值。此外,通过大通道热沉、微通道热沉等工艺增加激光器芯片的散热,解决由激光器有源区热积累引起的器件结温升高^[53-54]而导致性能和可靠性下降的问题,进一步提高大功率半导体激光器的输出功率。

参考文献 References

- [1] 袁庆贺,井红旗,张秋月,等.激光与光电子学进展[J],2019,56(4):35-48.
YUAN Q H, JING H Q, ZHANG Q Y, *et al.* Materials China Laser & Optoelectronics Progress[J], 2019, 56(4): 35-48.
- [2] CRUMP P, WENZEL H, ERBERT G, *et al.* IEEE Photonics Technology Letters[J], 2008, 20(16): 1378-1380.
- [3] ZIEGLER M, TOMM J W, REEBER D, *et al.* Applied Physics Letters[J], 2009, 94(19): 191101.
- [4] VINOKUROV D A, KAPITONOV V A, LYUTETSKIĬA V, *et al.* Technical Physics Letters[J], 2006, 32(8): 712-715.
- [5] PIETRZAK A, CRUMP P, WENZEL H, *et al.* Semiconductor Science and Technology[J], 2009, 24(3): 035020.
- [6] WANG X, CRUMP P, WENZEL H, *et al.* IEEE Journal of Quantum Electronics[J], 2010, 46(5): 658-665.
- [7] PIETRZAK A, CRUMP P, STASKE R, *et al.* Peak Power from 60- μm Broad Area Single Emitter Limited to 50-W by Carrier Escape [C]//Proceedings of 2008 Conference on Lasers and Electro-Optics. San Jose: Optical Society of America, 2008.
- [8] SLIPCHENKO S O, SOKOLOVA Z N, PIKHTIN N A, *et al.* Semiconductors[J], 2006, 40(8): 990-995.
- [9] WENZEL H, CRUMP P, PIETRZAK A, *et al.* Maximum Output Power of Broad-Area Laser Diodes [C]//Proceedings of 2009 9th International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices. Gwangju: IEEE, 2009.
- [10] KOMISSAROV A, MAIOROV M, MENNA R, *et al.* Waveguide Collapse in InGaAsP Ridge-Waveguide Lasers with Weak Lateral Optical Confinement [C]//Technical Digest. Summaries of Papers Presented at the Conference on Lasers and Electro-Optics. Baltimore: IEEE, 2001.
- [11] ELISEEV P G. Journal of Luminescence[J], 1973, 7: 338-356.
- [12] HENRY C H, PETROFF P M, LOGAN R A, *et al.* Journal of Applied Physics[J], 1979, 50(5): 3721-3732.
- [13] WATERS R G. Progress in Quantum Electronics [J], 1991, 15(3): 153-174.
- [14] QIAO Y, FENG S, XIONG C, *et al.* Physica Status Solidi A[J], 2013, 210(11): 2379-2383.
- [15] LEONHÄUSER B, KISSEL H, UNGER A, *et al.* Feedback-Induced Catastrophic Optical Mirror Damage (Comd) on 976 nm Broad Area Single Emitters with Different Ar Reflectivity [C]//High-Power Diode Laser Technology and Applications XII. California: IEEE, 2014.
- [16] ZHANG Q, XIONG Y, AN H, *et al.* Scientific Reports [J], 2016, 6: 19011.

- [17] RAUCH S, HOLLY C, ZIMER H. IEEE Journal of Quantum Electronics[J], 2018, 54(4): 1-7.
- [18] RYVKIN B S, AVRUTIN E A. Journal of Applied Physics[J], 2007, 101(12): 123115.
- [19] AHMAD F R, TSENG Y W, KATS M A, *et al.* Optics Letters[J], 2008, 33(10): 1041-1043.
- [20] BOGGESS T, MIRL A, MOSS A, *et al.* IEEE Journal of Quantum Electronics[J], 1985, 21(5): 488-494.
- [21] PENZKOFER A, BUGAYEV A A. Optical and Quantum Electronics[J], 1989, 21(4): 283-306.
- [22] KARKHANEHCHI M M, MARSH J H, HUTCHINGS D C. Applied Optics[J], 1997, 36(30): 7799-7801.
- [23] HUANG R K, CHANN B, MISSAGGIA L J, *et al.* High-Power Coherent Beam Combination of Semiconductor Laser Arrays [C]//Proceedings of High-Power Coherent Beam Combination of Semiconductor Laser Arrays. San Jose: IEEE, 2008.
- [24] AVRUTIN E A, RYVKIN B S. Carrier Accumulation in the Optical Confinement Layer, Its Effect on Power Limit in High Power and Brightness Laser Diodes, and Laser Design to Overcome This Limitation[C]//2012 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series. Seattle: IEEE, 2012: 53-54.
- [25] KLEHR A, WÜNSCHE H J, LIERO A, *et al.* Semiconductor Science and Technology[J], 2017, 32(4): 045016.
- [26] DOGAN M, MICHAEL C P, ZHENG Y, *et al.* Two Photon Absorption in High Power Broad Area Laser Diodes[C]//High-Power Diode Laser Technology and Applications XII. San Francisco: SPIE LASE, 2014.
- [27] AVRUTIN E A, RYVKIN B S. Semiconductor Science and Technology[J], 2016, 32(1): 015004.
- [28] RYVKIN B S, AVRUTIN E A, KOSTAMOVARA J T. Semiconductor Science and Technology[J], 2017, 32(12): 125008.
- [29] RYVKIN B S, AVRUTIN E A, KOSTAMOVARA J T. Semiconductor Science and Technology[J], 2018, 33(10): 105010.
- [30] RIGROD W W. Journal of Applied Physics[J], 1965, 36(8): 2487-2490.
- [31] RYVKIN B S, AVRUTIN E A. Journal of Applied Physics[J], 2011, 109(4): 043101.
- [32] NANNICHI Y. Journal of Applied Physics[J], 1966, 37(8): 3009-3012.
- [33] FANG W C W, BETHEA C G, CHEN Y K. Journal of Selected Topics in Quantum Electronics[J], 1995, 1(2): 117-128.
- [34] BENNETT A J, CLAYTON R D, XU J M. Journal of Applied Physics[J], 1998, 83(7): 3784-3788.
- [35] RINNER F, ROGG J, FRIEDMANN P, *et al.* Applied Physics Letters[J], 2002, 80(1): 19-21.
- [36] WENZEL H, CRUMP P, PIETRZAK A, *et al.* New Journal of Physics[J], 2010, 12(8): 085007.
- [37] HAO T, SONG J Y, LEISHER P O. Rate Equation Analysis of Longitudinal Spatial Hole Burning in High-Power Semiconductor Lasers [C]//Semiconductor Lasers and Laser Dynamics VI. Brussels: SPIE Photonics Europe, 2014.
- [38] RAUCH S, WENZEL H, RADZIUNAS M, *et al.* Applied Physics Letters[J], 2017, 110(26): 263504.
- [39] AVRUTIN E A, RYVKIN B S. Journal of Applied Physics[J], 2019, 125(2): 023108.
- [40] GUO Y, LIN L, ROBERTSON J. Applied Physics Letters[J], 2013, 102(9): 091606.
- [41] ARAB S, CHI C Y, SHI T. ACS Nano[J], 2015, 9(2): 1336-1340.
- [42] 许留洋, 高欣, 袁绪泽, 等. 光电子·激光[J], 2017, 28(2): 143-146.
- XU L Y, GAO X, YUAN X Z, *et al.* Journal of Optoelectronics · Laser[J], 2017, 28(2): 143-146.
- [43] 王鑫, 朱凌妮, 赵懿昊, 等. 红外与激光工程[J], 2019, 48(1): 77-81.
- WANG X, ZHU L N, ZHAO Y H, *et al.* Infrared and Laser Engineering[J], 2019, 48(1): 77-81.
- [44] HASLER K H, WENZEL H, CRUMP P, *et al.* Semiconductor Science and Technology[J], 2014, 29(4): 045010.
- [45] YAMAGATA Y, YAMADA Y, MUTO M, *et al.* 915 nm High-Power Broad Area Laser Diodes with Ultra-Small Optical Confinement Based on Asymmetric Decoupled Confinement Heterostructure (ADCH) [C]//High-Power Diode Laser Technology and Applications XIII. San Francisco: SPIE LASE, 2015.
- [46] ZHUKOV A E, GORDEEV N Y, SHERNYAKOV Y M, *et al.* Semiconductors[J], 2018, 52(11): 1462-1467.
- [47] WILKENS M, WENZEL H, FRICKE J, *et al.* IEEE Photonics Technology Letters[J], 2018, 30(6): 545-548.
- [48] CHEN Z G, BAO L, BAI J, *et al.* Performance Limitation and Mitigation of Longitudinal Spatial Hole Burning in High-Power Diode Lasers [C]//Novel In-Plane Semiconductor Lasers XI. San Francisco: SPIE OPTO, 2012.
- [49] DEMIR A, PETERS M, DUESTERBERG R, *et al.* 29. 5 w Continuous Wave Output from 100 μm Wide Laser Diode [C]//High-Power Diode Laser Technology and Applications XIII. San Francisco: SPIE LASE, 2015.
- [50] DEMIR A, PETERS M, DUESTERBERG R, *et al.* IEEE Photonics Technology Letters[J], 2015, 27(20): 2178-2181.
- [51] ARSLAN S. Novel Concepts in High Power Semiconductor Lasers [D]. Ankara: Bilkent University, 2018.
- [52] KAHRAMAN A, GÜR E, AYDINLI A. Semiconductor Science and Technology[J], 2016, 31(8): 085013.
- [53] 郭怀新, 黄语恒, 黄宇龙, 等. 中国材料进展[J], 2018, 37(12): 1017-1023.
- GUO H X, HUANG Y H, HUANG Y L, *et al.* Materials China [J], 2018, 37(12): 1017-1023.
- [54] 张忠卫, 陈杰. 中国材料进展[J], 2017, 36(2): 141-148.
- ZHANG Z W, CHEN J. Materials China[J], 2017, 36(2): 141-148.