

450 nm GaN 基半导体激光器腔面反射率的优化

杜维川^{1,2}, 康俊杰^{1,2}, 李弋^{1,2}, 谭昊^{1,2}, 周坤^{1,2,*}, 胡耀^{1,2}, 张亮^{1,2}, 王昭^{1,2}, 郭林辉^{1,2},
高松信^{1,2}, 武德勇^{1,2}, 唐淳^{1,2}

¹中国工程物理研究院高能激光重点实验室, 四川 绵阳 621900;

²中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900

摘要 分析腔面反射率对 GaN 基半导体激光器斜率效率和输出功率的影响, 并对出射波长为 450 nm 的激光器进行实验验证。结果表明, 对于非对称谐振腔结构, 通过优化腔面反射率, 可以抑制空间烧孔非线性效应, 提高器件的微量子效率和最大输出功率。当前腔面反射率为 5% 时, 斜率效率大于 $1.3 \text{ W} \cdot \text{A}^{-1}$, 并在 3 A 的连续工作电流下, 获得了 2.6 W 的高功率输出。

关键词 激光器; 半导体激光器; GaN; 腔面反射率; 空间烧孔

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0614002

Optimization of Facet Reflectivity of 450-nm GaN-Based Semiconductor Lasers

Du Weichuan^{1,2}, Kang Junjie^{1,2}, Li Yi^{1,2}, Tan Hao^{1,2}, Zhou Kun^{1,2,*}, Hu Yao^{1,2},
Zhang Liang^{1,2}, Wang Zhao^{1,2}, Guo Linhui^{1,2}, Gao Songxin^{1,2},
Wu Deyong^{1,2}, Tang Chun^{1,2}

¹Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

²The Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract We analyze and experimentally verify the impact of facet reflectivity on slope efficiency and output power of 450-nm GaN-based semiconductor lasers. The results reveal that for asymmetric resonator structures, the nonlinear effect of longitude spatial hole burning can be suppressed by optimizing the facet reflectivity, thereby improving the differential quantum efficiency and maximum output power of the device. A high slope efficiency of $>1.3 \text{ W} \cdot \text{A}^{-1}$ is obtained at the facet reflectivity of 5%, and a high power output of 2.6 W is obtained at the operating current of 3 A.

Key words lasers; semiconductor lasers; GaN; facet reflectivity; longitude spatial hole burning

OCIS codes 310.1860; 140.5960; 140.4780

1 引 言

半导体激光器具有体积小、重量轻、效率高、易集成等优点, 在工业加工、通信、医疗、军事等领域有着广泛的应用。氮化镓(GaN)是第三代半导体材料的代表, 是近 20 年发展起来的新型宽禁带直接带隙半导体材料, GaN 及其三元和四元合金发射波长覆盖了从紫外到红外波段。GaN 基激光器具有结构简单、使用方便、电-光转换效率高、寿命长等优点,

基于 GaN 的紫光(约 400 nm)、蓝光(约 450 nm)和绿光(约 520 nm)激光器在激光生物医学、激光彩色显示、激光高密度数据存储、激光光谱学、激光照明、激光指示、激光打印、激光倍频、激光水下成像与通信等领域有广泛应用, 近年来备受人们关注^[1-3]。

近年来, GaN 基激光器技术日渐成熟, 国内外多家研究机构和公司都报道了高功率的 GaN 基激光器。其中以日本的日亚公司最为突出, 该公司已经推出 3.5 W 高功率蓝光激光器商业化产品^[4], 其

收稿日期: 2018-09-12; 修回日期: 2018-12-06; 录用日期: 2019-02-25

基金项目: 四川省科技厅面上项目(2018JY0621)

* E-mail: zhokun2011@sinano.ac.cn

电-光转换效率最大可达到 41.2%。松下电器公司则报道了室温工作条件下单管芯输出激光功率可达到 7.2 W,电-光转换效率达到 38%,是迄今报道的功率最高的 GaN 基激光器^[5],充分显示了 GaN 激光器在高功率领域的应用潜力。国内一些研究所和高校也在 GaN 基激光器的研究方面实现了突破,在实验室环境下已实现功率大于 2 W 的激光输出^[5]。

当前 GaN 激光器的性能还有很大的提升空间。为了提升器件的输出效率,需要在外延结构设计、外延生长、管芯设计和制作等方面着手,降低器件的工作电压,提高器件的斜率效率。前腔面反射率是器件谐振腔的重要参数,对器件的阈值电流、斜率效率和输出功率有着重要的影响。对于非对称谐振腔设计的半导体激光器,空间烧孔(LSHB)是造成器件斜率效率下降和限制最大功率输出的重要因素^[6-10]。为了有效抑制空间烧孔效应,提升激光器的斜率效率和输出功率,本文对 GaN 基蓝光半导体激光器的腔面反射率设计进行研究,并在 3 A 的工作电流下,获得了接近 2.6 W 的高功率输出。

2 样品制备

为了研究前腔面反射率对激光器特性的影响,

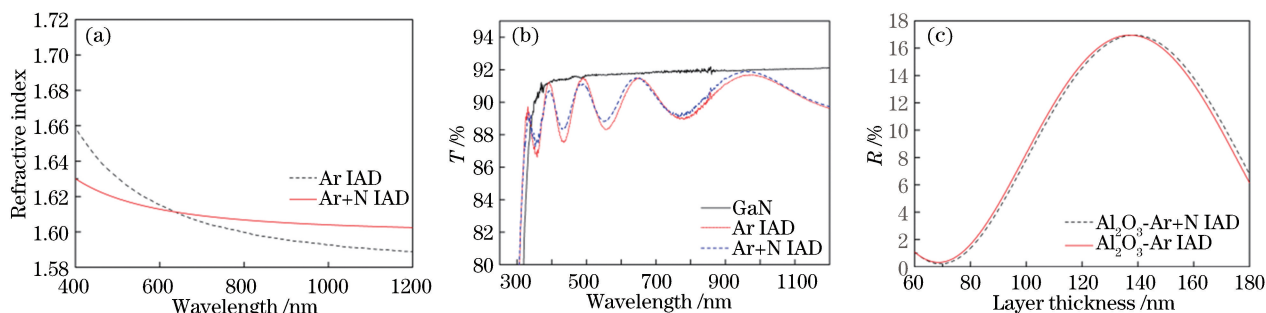


图 1 不同工艺条件下制备的薄膜样品的光学性质。(a)透射率曲线;(b)光学常数;(c)膜厚与腔面反射率的关系

Fig. 1 Optical characteristics of film samples under different processing conditions. (a) Transmission curve;

(b) optical constant; (c) film thickness versus facet reflectivity

3 测试结果与讨论

在 GaN 自支撑体衬底上外延生长了基于 InGaN 量子阱的蓝光激光器,通过标准工艺制成了腔长为 1 mm,单管芯发光区宽度为 25 μm 的厘米巴条,利用电子束蒸发技术制备了腔面膜,其中后腔面反射率大于 99.8%。通过改变单层膜厚度,实现了前腔面反射率在 0.1%~18%之间连续变化;利用脉冲测试平台,在脉冲宽度为 1 μs ,重复频率为 1 kHz 的条件下,测量了不同前腔面反射率样品的阈值电流和斜率效率;样品经封装后,在连续测试条

需要在激光器前腔面沉积不同厚度的薄膜以改变其反射率,因此需要准确地获取薄膜的光学常数。使用包络线法求解薄膜的光学常数,利用 Ares 710 型电子束蒸发镀膜机在不同离子源辅助条件下,在石英基底上制备了 600 nm 厚的 Al_2O_3 单层膜。利用分光光度计测量了透射率曲线,并计算了薄膜样品的光学常数,如图 1(b)所示。从图 1(b)可以看出,在不同的离子源辅助条件下,膜层的折射率不同。只使用 Ar 离子辅助(IAD)时,薄膜的色散现象较为明显,在低波段折射率较大,当波长大于 810 nm 时,折射率较小。而在 Ar+N 离子辅助下,薄膜在波长为 450 nm 时的折射率为 1.62,理论上在 GaN 基底上可以实现低于 0.1% 的反射率。利用 Macleod 软件计算了两种工艺条件下,前腔面反射率与膜厚之间的关系。可以看出,在适当的工艺条件下,通过调整膜层厚度,可以获得极低的前腔反射率,如图 1(c)所示。本实验选取 Ar+N 离子辅助条件,在 GaN 激光器前腔面上制备了厚度分别为 70, 78, 85, 89, 93, 109, 136 nm 的单层 Al_2O_3 薄膜,对应的反射率为 0.1%, 1%, 2.5%, 4%, 5.5%, 12%, 18%,后腔面高反膜膜系为 $\text{GaN}/10 \text{ nm } \text{Al}_2\text{O}_3/10(\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2)/\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{air}$,反射率均高于 99.8%。

件下,测量了样品的输出功率。

3.1 阈值电流

半导体激光器阈值电流密度 J_{th} 与模式增益系数、透明电流密度、腔长、腔面反射率的关系为

$$\ln(J_{\text{th}}) = \left[\frac{\alpha_i}{G} + \ln(J_{\text{tr}}) \right] + \frac{\ln(R_f R_b)^{-1}}{2G} \times \frac{1}{L}, \quad (1)$$

式中: J_{th} 为器件的阈值电流密度; J_{tr} 为透明电流密度; α_i 为内部光学损耗,本研究中 $\alpha_i = 10 \text{ cm}^{-1}$; G 为模式增益系数; R_f 、 R_b 分别为前腔反射率与后腔反射率,本研究中 $R_b = 0.998$; L 为腔长,本研究中 $L = 0.1 \text{ cm}$ 。

在脉冲条件下得到的阈值电流密度与腔长的关系如图 2 所示。从图 2 可以看出,本研究测得的实验数据具有较好的线性度,阈值电流密度随着腔面反射率的减小而增大。通过线性拟合可以得出器件的模式增益系数为 12.5 cm^{-1} ,透明电流密度 J_{tr} 为 $221 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

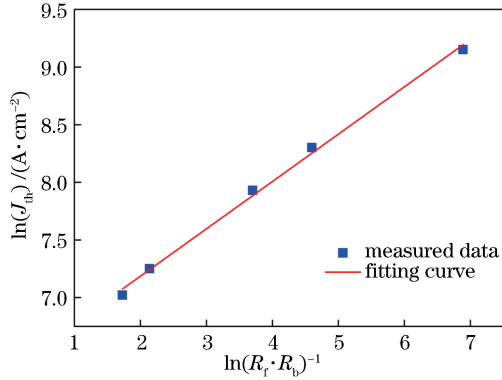


图 2 阈值电流密度与腔面反射率的关系图
Fig. 2 Relationship between threshold current density and facet reflectivity

3.2 微分子子效率

微分子子效率 η_d 是指半导体激光器在阈值电流以上工作时,输出光子数随着注入载流子数值的增加而提高的比率,由内量子效率 η_i 、内损耗 a_i 和镜面损耗 a_m 共同决定。

$$\eta_d = \eta_i \frac{a_m}{a_m + a_i}, \quad (2)$$

$$a_m = \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_f R_b}. \quad (3)$$

利用脉冲测试平台,测量了不同前腔面反射率器件的斜率效率 S ,表达式为

$$S = \frac{dP}{dI} = \frac{h\nu}{e} \eta_d, \quad (4)$$

式中: P 为出光功率; I 为工作电流; $h\nu$ 为光子能量; e 为电子电荷量。可以看出,微分子子效率与斜率效率在数值上存在简单的转换关系。

图 3 中数据点为在低占空比(0.1%)脉冲测试条件下,得到的不同前腔反射率样品的微分子子效率,曲线为考虑了空间烧孔的理论仿真值。从图 3 可以看出,随着前腔面反射率的升高,微分子子效率先升高后减小。当反射率约为 5% 时,器件的微分子子效率 η_d 将达到峰值,对应的斜率效率将高于 $1.3 \text{ W} \cdot \text{A}^{-1}$ 。

在经典理论中,如(2)式和(3)式的描述,当后腔面反射率一定时,对于同种结构的器件,前腔面反射率越小,斜率效率将越高,这与图 3 的实验结果并不

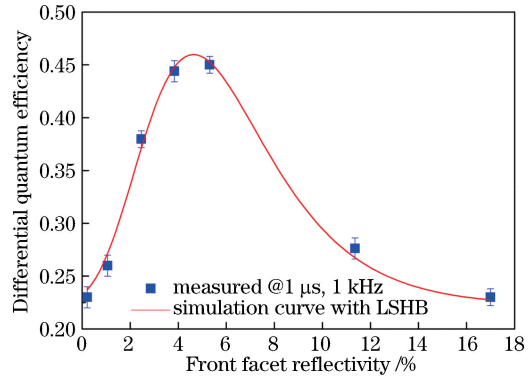


图 3 不同前腔面反射率下的微分子子效率
Fig. 3 Differential quantum efficiency versus front facet reflectivity

相符。由于非对称谐振腔结构(即 $R_f \neq R_b$)受空间烧孔与双光子吸收等非线性效应的影响,当反射率低于某个特定值时,反射率继续降低则可能造成增益压缩,从而导致器件微分子子效率下降^[11]。其根本原因在于:在非对称谐振腔中,前、后腔面的反射率存在较大差异,造成内部光场分布不均匀,导致内部载流子分布不均匀,从而出现空间烧孔现象,对器件的微分子子效率产生影响,同时也会导致最高输出功率下降,其影响大小与腔长、内部光学损耗、反射率设计有关。此外,腔面反射率过低,也会造成载流子泄漏,导致斜率效率下降。

3.3 器件封装测试结果

利用 LOOMIS 公司生产的 LSD 100 型裂片机将前腔面反射率为 5% 的巴条解理成单管,然后封装在微通道冷却器上,保持 P 面向上。在 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 的冷却水温度下测试了器件的 P - I 特性,如图 4 所示。

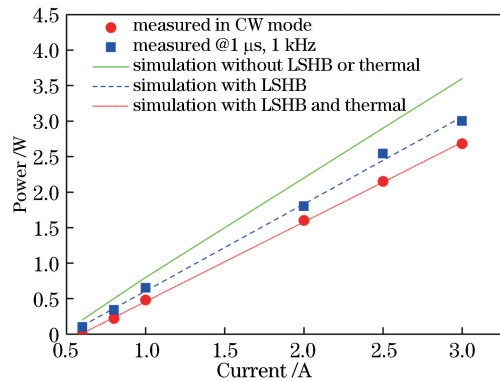


图 4 前腔面反射率为 5% 时器件的 P - I 特性
Fig. 4 P - I characteristic of device with 5% front facet reflectivity

如图 4 所示,方块是在脉宽为 $1 \mu\text{s}$,重复频率为 1 kHz 的脉冲测试条件下得到的出光功率,虚线表示在理论计算过程中,忽略了热量对器件的影响得

到的出光功率,可以看出,两者的符合程度较高,这是由于器件在 0.1% 的低占空比、短脉冲工作条件下,器件内部产热较少,与不考虑空间烧孔和热效应的理想情况相比较,其功率损耗约 0.42 W@3 A。圆点为在连续工作模式下测得的出光功率,与理想情况相比,功率损失约为 0.92 W@3 A,其中热效应导致的功率损失约为 0.5 W@3 A。这主要是因为 GaN 基半导体激光器 P 面外延层较薄,采用倒装易出现腔面遮挡,因此本研究采用了正装封装,导致器件散热能力较差,即热阻较大,在连续工作时的结温较高,后续通过倒装封装设计,有望进一步提高输出功率

4 结 论

GaN 是一种非常重要的宽禁带半导体材料,在众多领域有着重要的应用潜力。空间烧孔与热效应限制了器件的最高输出功率,其中热效应需要在封装方式中予以解决,以降低器件的热阻。空间烧孔效应是使用非对称谐振腔的必然结果,可以通过降低器件内部光学损耗,减小腔长,优化腔面反射率等方式进行抑制。其中优化腔面反射率是一种快速而有效的措施,可以提升器件的微量子效率和最大输出功率。本研究对波长为 450 nm 的 GaN 基蓝光激光器的前腔面膜反射率进行了研究,结果表明,前腔面反射率为 5% 的器件,具有较高的斜率效率,斜率效率大于 $1.3 \text{ W} \cdot \text{A}^{-1}$,并在连续工作模式下,获得了 2.6 W 的高功率输出。

参 考 文 献

- [1] Charash R, Kim-Chauveau H, Lamy J M, *et al.* Cleaved-facet violet laser diodes with lattice-matched $\text{Al}_{0.82}\text{In}_{0.18}\text{N}/\text{GaN}$ multilayers as n-cladding [J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(20): 201112.
- [2] Avramescu A, Lermer T, Müller J, *et al.* InGaN laser diodes with 50 mW output power emitting at 515 nm [J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(7): 071103.
- [3] Farrell R M, Haeger D A, Hsu P S, *et al.* Determination of internal parameters for AlGaIn-cladding-free m-plane InGaIn/GaN laser diodes [J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(17): 171115.
- [4] NICHIA. Laser diode [EB/OL]. [2018-12-01]. <http://www.nichia.co.jp/en/product/laser.html>.
- [5] Liu J P, Zhang L Q, Li D Y, *et al.* GaN-based blue laser diodes with 2.2 W of light output power under continuous-wave operation [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(24): 2203-2206.
- [6] Higashi T, Ogita S, Soda H, *et al.* Optimum asymmetric mirror facet structure for high-efficiency semiconductor lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1993, 29(6): 1918-1923.
- [7] Wang X Z, Crump P, Wenzel H, *et al.* Root-cause analysis of peak power saturation in pulse-pumped 1100 nm broad area single emitter diode lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2010, 46(5): 658-665.
- [8] Wenzel H, Crump P, Pietrzak A, *et al.* Theoretical and experimental investigations of the limits to the maximum output power of laser diodes [J]. New Journal of Physics, 2010, 12(8): 085007.
- [9] Wenzel H, Crump P, Pietrzak A, *et al.* The analysis of factors limiting the maximum output power of broad-area laser diodes [J]. Optical and Quantum Electronics, 2009, 41(9): 645-652.
- [10] Wenzel H. Basic aspects of high-power semiconductor laser simulation [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(5): 1502913.
- [11] Hao T, Song J, Liptak R, *et al.* Experimental verification of longitudinal spatial hole burning in high-power diode lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9081: 90810U.