

980 nm 半导体激光器腔面温度特性分析

郑晓刚 李特 芦鹏 曲轶 薄报学 刘国军 马晓辉 李再金

(长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要 研究分析了 980 nm 半导体激光器的腔面温度特性。半导体激光器腔面光学灾变损伤(COD)是限制器件寿命和高功率输出的主要因素,通过分析腔面热源,建立腔面温度分布模型,分析了腔面温度场分布。设计了以金刚石为钝化膜的腔面增透膜和高反膜,模拟和对比了镀有金刚石钝化膜与未镀金刚石钝化膜的 980 nm 半导体激光器腔面温度特性。分析结果表明,镀有金刚石钝化膜比未镀金刚石钝化膜的器件的腔面温度低 9.0626 °C。因此在 980 nm 半导体激光器腔面镀金刚石钝化膜能够有效降低腔面温度,提高腔面 COD 阈值。

关键词 激光器;半导体激光器;光学灾变损伤;腔面温度;金刚石

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1102004

Analysis of Temperature Characteristics of 980 nm Semiconductor Laser Facet

Zheng Xiaogang Li Te Lu Peng Qu Yi Bo Baoxue Liu Guojun
Ma Xiaohui Li Zaijin

(National Key Laboratory of High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract Temperature characteristics of 980 nm semiconductor laser facet are analyzed. Catastrophic optical damage (COD) of semiconductor laser facet is the main reason which limits the lifetime and output power of laser. Through analyzing the heat source produced by facet, the model of facet temperature distribution is established and facet temperature field distribution is analyzed. Antireflection film and high reflection film with diamond passivation film are designed to simulate and contrast facet temperature characteristics of 980 nm semiconductor lasers with and without diamond passivation film. Simulation results show that the temperature of the former is lower than the latter of 9.0626 °C. It can effectively reduce the facet temperature and improve the COD threshold of 980 nm semiconductor laser when coated with diamond passivation film.

Key words lasers; semiconductor lasers; catastrophic optical damage; facet temperature; diamond

OCIS codes 140.5960; 140.6810; 310.6805

1 引言

目前大功率半导体激光器常用于抽运固体激光器与光纤激光器,在激光医疗、激光通信、材料加工和军事等领域应用广泛。半导体激光器的可靠性是一项重要指标,如何提高半导体激光器腔面的光学灾变损伤(COD)一直是研究的热点^[1-3]。对于大功率半导体激光器,器件在高光功率密度工作时产生的腔面 COD 现象限制了器件的最大输出功率,严重地影响

器件的可靠性。因此,在制备器件时,应对其温度特性进行模拟分析,并提高器件的 COD 阈值。

半导体激光器在低注入电流条件下工作时,有源区的温升相对较小,载流子扩散是产生热量的主要过程。随着注入电流增加,腔面的温度逐渐上升,导致有源区量子阱禁带宽度降低、腔面光子密度增加,并引起非辐射复合。非辐射复合进一步增加了腔面温度。如此形成一个恶性循环的过程,加速了

收稿日期: 2013-05-15; **收到修改稿日期**: 2013-06-04

基金项目: 国家自然科学基金(61107054)、吉林省科技发展计划项目(201201124)

作者简介: 郑晓刚(1988—),男,硕士研究生,主要从事半导体激光技术方面的研究。E-mail: jamesmail@163.com

导师简介: 李再金(1980—),男,博士,助理研究员,主要从事半导体激光技术方面的研究。

E-mail: lizaijin@126.com(通信联系人)

COD 的发生^[4]。COD 的发生主要有三个阶段^[5]：
 1) 器件在长时间工作时腔面温度会达到一个临界值(120 °C~160 °C)，超过临界值后就会发生 COD；
 2) 腔面温度过高，形成热失控，严重时加剧 COD；
 3) 靠近腔面附近的缺陷会进一步扩散，导致继发性 COD。

为提高半导体激光器腔面 COD 阈值，最常见的方法是在腔面蒸镀钝化膜。钝化膜可起到钝化和保护腔面的双重作用，是抑制腔面退化和 COD 发生的直接手段^[6]，从而实现半导体激光器的大功率工作。本文选取金刚石膜作为腔面的钝化膜来降低腔面温度，提高腔面 COD 阈值。金刚石膜常作为红外光学器件的窗口膜层，用以提高腔面透射率并作为保护层^[7]。金刚石的禁带宽度(5.5 eV)大于 GaAs 的禁带宽度(1.42 eV)，能够有效地抑制腔面非辐射复合产生。同时，金刚石膜的热导率比其他光学薄膜材料的热导率高出两个数量级，能够有效降低腔面热量的积累，提高半导体激光器腔面 COD 阈值。

2 物理模型

当半导体激光器正常工作时，半导体激光器产生的热量主要有两部分，有源区热源和非有源区热源^[8-10]：1) 有源区热源 Q_{act} 是指在工作状况下，有源区会产生大量的载流子和光子，载流子发生非辐射复合、辐射复合以及自发辐射复合时产生的热量；2) 非有源区热源即腔面热源 (Q_F) 由欧姆损耗产生的焦耳热 (Q_J)。

腔面总温度分布

$$Q = Q_{act} + Q_J \quad (1)$$

但是，半导体激光器在大的连续电流或者高强度电

流脉冲作用下，腔面温度会逐渐升高，使得腔面发生光再吸收，产生更多的热量，引起量子阱能带隙收缩造成更多的光吸收进而产生更多的热量。因此，在大的连续电流或者高强度电流脉冲作用下，对于腔面处的温度分布，必须引入腔面光损耗热源 Q_{opt} ^[5]，即高温条件下腔面光再吸收所产生的热量。

所以在大的连续电流或者高强度电流脉冲作用下腔面热源

$$Q_F = Q_{opt} + Q_J \quad (2)$$

腔面总温度分布

$$Q = Q_{act} + Q_F \quad (3)$$

而

$$Q_{act} \approx \frac{E_{ph}}{d_w} J(1 - \eta_i),$$

$$Q_{opt} \approx \alpha_i \frac{\Gamma}{\omega d_w} \frac{P_{out}}{1 - R_F} \cdot [\exp(-\alpha_m z) + R_F \exp(\alpha_m z)], \quad (5)$$

$$Q_J = J^2 \rho_i, \quad (6)$$

式中 J 为电流密度， E_{ph} 为光子的能量， η_i 为受激发射内量子效率， d_w 为量子阱的厚度， α_i 为光损耗， Γ 为光场限制因子， ω 为激光器条宽， P_{out} 为出射光功率， R_F 为前腔面反射率， α_m 为总腔面损耗， z 为与腔面的轴向距离， ρ_i 为每层的电阻率。

3 模拟及分析

模拟分析了 980 nm 半导体激光器腔面膜及热特性分布。980 nm 半导体激光器外延材料是以 InGaAs/AlGaAs 三元材料为基础的，其结构如图 1 (a) 所示，采用对称波导结构。外延材料为在 n^+ -GaAs 衬底上依次生长的 1.5 μm Al_{0.3}Ga_{0.7}As 覆盖层，0.6 μm GaAs 波导，8 nm In_{0.2}Ga_{0.8}As 有源

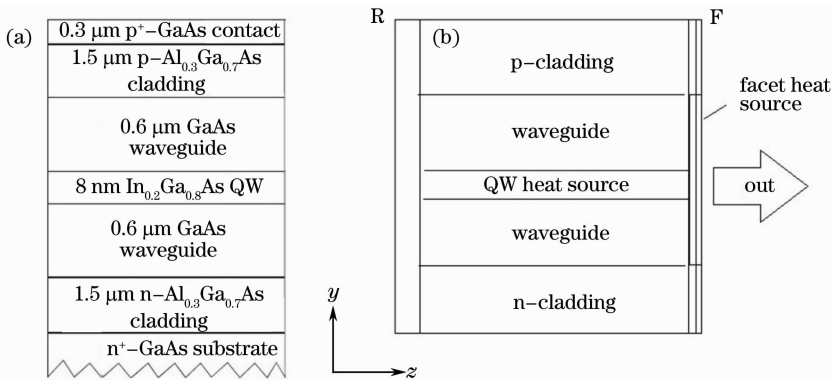


图 1 (a) 980 nm 半导体激光器外延材料结构；(b) 半导体激光器工作时热源分布

Fig.1 (a) 980 nm semiconductor laser epitaxial material structure; (b) heat source distribution of semiconductor laser in use

区, 0.6 μm GaAs 波导, 1.5 μm Al_{0.3}Ga_{0.7}As 的 p⁺ 覆盖层, 0.3 μm 高掺杂的 p⁺-GaAs 接触层。外延材料倒封装于热沉上。图 1(b) 为半导体激光器工作中各热源分布位置, 其中 R 指后腔面, F 指前腔面, QW 为量子阱。选取参数为 $J=2\text{ A}$, $E_{ph}=1.36\text{ V}$, $\eta_i=0.9$, $\alpha_i=32\text{ cm}^{-1}$, $\Gamma=2\%$, $P_{out}=2\text{ W}$, ρ_i 近似取为 $3\times 10^{-3}\ \Omega\cdot\text{cm}$, 热沉温度为 25 °C。

通过 TFCalc 膜系设计软件优化设计了前腔面膜和后腔面膜, 前腔面膜采用金刚石、Al₂O₃ 作为增透膜, 后腔面采用金刚石、TiO₂、SiO₂ 作为高反膜。表 1 为模拟所用到薄膜的材料特性参数。

表 1 薄膜材料特性参数

Table 1 Material characteristic parameters of thin films

Material	Heat conductivity / (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	Refractive index
Diamond	2000	2.4
Al ₂ O ₃	33	1.62
SiO ₂	1.38	1.46
TiO ₂	1.8	2.3

优化设计结果如图 2、3 所示。图 2 为前腔面膜透射率曲线, 980 nm 波长中心透射率达 99% 以上。图 3 为后腔面膜反射率曲线, 980 nm 中心波长反射率达到 96% 以上。满足膜系设计特性要求。

通过 ANSYS 有限元软件模拟了 980 nm 半导

表 2 980 nm 半导体激光器材料特性参数

Table 2 Material characteristic parameters of 980 nm semiconductor laser

Layer	Material	Length / μm	Width / μm	Thickness / μm	Heat conductivity / (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	Heat capacity / (J · g ⁻¹ · K ⁻¹)	Material density / (g · cm ⁻³)
n ⁺ -type GaAs substrate	GaAs	1000	500	100	44	0.327	5.318
n-type cladding	Al _{0.3} Ga _{0.7} As	1000	500	1.5	12.15	0.366	4.852
waveguide	GaAs	1000	500	0.6	44	0.327	5.318
QW	In _{0.2} Ga _{0.8} As	1000	100	0.008	23	0.344	5.232
waveguide	GaAs	1000	500	0.6	44	0.327	5.318
p ⁺ -type cladding	Al _{0.3} Ga _{0.7} As	1000	500	1.5	12.15	0.366	4.852
p ⁺ -type GaAs	GaAs	1000	500	0.3	44	0.327	5.318
solder	indium	1000	500	7	82	0.23	7.31
heatsink	copper	5000	5000	1000	384	0.383	8.94

模拟并分析了未镀和镀有金刚石钝化膜的 980 nm 半导体激光器前腔面温度分布特性, 分别如图 4 和图 5 所示。

由图 4 可知, 未镀金刚石钝化膜的 980 nm 半导体激光器腔面最高温度为 79.5208 °C, 而图 5 中镀有金刚石钝化膜的 980 nm 半导体激光器腔面最高温度为 70.4582 °C, 即镀有金刚石钝化膜比未镀金

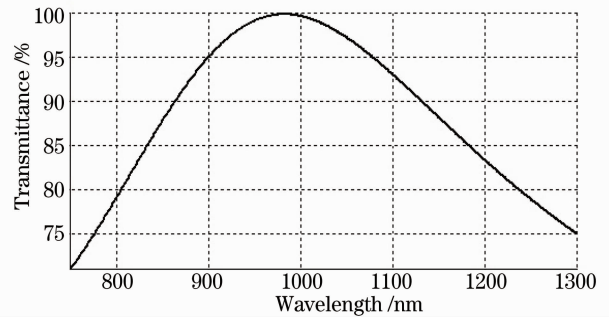


图 2 TFCalc 模拟前腔面增透膜透射率曲线
Fig. 2 Transmittance curve of front facet film simulated by TFCalc

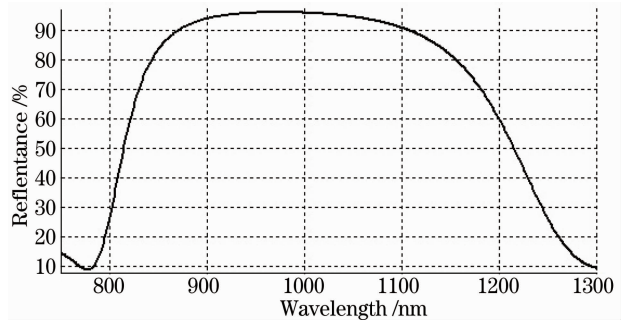


图 3 TFCalc 模拟后腔面高反膜反射率曲线
Fig. 3 Reflectance curve of rear facet film simulated by TFCalc

体激光器腔面温度特性。模拟所用到的材料特性参数^[11]如表 2 所示。

刚石钝化膜的器件腔面温度低 9.0626 °C。半导体激光器在大电流工作时, 腔面处的温度不断升高, 温度越高腔面处的光吸收越大, 加剧了腔面 COD, 当温度达到一定程度时就会发生 COD。因此镀有金刚石钝化膜的器件具有良好的腔面温度特性, 可有效提高半导体激光器腔面 COD 阈值。

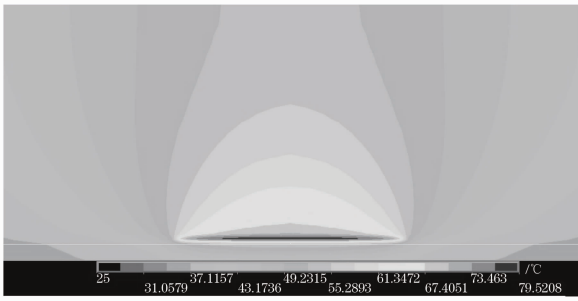


图 4 未镀金刚石钝化膜的 980 nm 半导体激光器前腔面温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of 980 nm semiconductor laser without diamond film on front facet

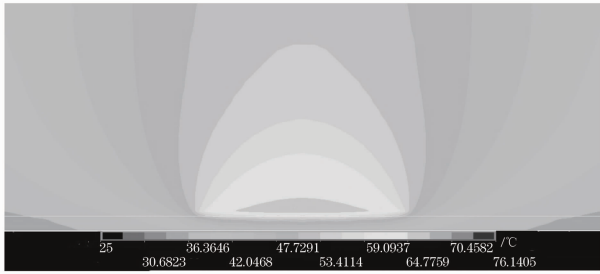


图 5 镀有金刚石钝化膜的 980 nm 半导体激光器前腔面温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of 980 nm semiconductor laser with diamond film on front facet

4 总 结

研究了 980 nm 半导体激光器腔面 COD 的机制,讨论了前腔面因光吸收所引起的温度特性变化,优化设计以金刚石为钝化膜的前后腔面膜系,并对比模拟分析镀有金刚石钝化膜与未镀金刚石钝化膜 980 nm 半导体激光器腔面温度特性。分析结果表明,未镀金刚石钝化膜的 980 nm 半导体激光器腔面最高温度为 79.5208 °C,镀有金刚石钝化膜的 980 nm 半导体激光器腔面最高温度为 70.4582 °C,镀有金刚石钝化膜比未镀金刚石钝化膜的腔面温度低 9.0626 °C。金刚石作为腔面钝化膜可以在腔面与增透膜之间再提供一个势垒,防止前腔面膜里的

活性离子扩散到有源区,并且金刚石极高的热导率能够降低腔面热量的积累,可有效改善器件腔面的热场分布,在腔面镀金刚石钝化膜能够有效提高 980 nm 半导体激光器腔面 COD 阈值。

参 考 文 献

- 1 U Menzel, R Pucher, A Barwolff, *et al.*. Facet heating and axial temperature profiles in high-power AlGaAs/GaAs laser diodes [J]. *Microelectronics Reliability*, 1998, 38(5): 821-825.
- 2 S J Sweeney, L J Lyons, A R Adamset, *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.
- 3 A K Chin, Z Wang, K Luo, *et al.*. Failure-mode analysis of high power, single mode, 980 nm, pump laser-diodes [C]. *SPIE*, 2003, 4993: 84-90.
- 4 M Bou Sanayeh, P Bricka, W Schmida, *et al.*. The physics of catastrophic optical damage in high-power AlGaInP laser diodes [C]. *SPIE*, 2008, 6997: 699703.
- 5 Dan Yanson, Moshe Levia, Moshe Shamaya, *et al.*. Facet engineering of high power single emitters [C]. *SPIE*, 2012, 7918: 79180Z.
- 6 Liu Bin, Liu Yuanyuan, Cui Bifeng. Long term aging and failure analysis for 980 nm laser diodes[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(9): 091406.
刘 斌, 刘媛媛, 崔碧峰. 980 nm 半导体激光器长期老化结果及失效分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(9): 091406.
- 7 Guo Yanlong, Wang Shuyun, Yuan Xiao, *et al.*. Research progress of optical application of diamond carbon films and diamond-like carbon films[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(7): 44-50.
郭延龙, 王淑云, 袁 孝, 等. 金刚石膜及类金刚石膜的光学应用研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(7): 44-50.
- 8 Vyacheslav S Vikhrenko. Heat Transfer-Engineering Applications[M]. Rijeka; Croatia InTech, 2011. 1-26.
- 9 Martin Hempel, Jens W Tomm, Mathias Ziegler, *et al.*. Catastrophic optical damage at front and rear facets of diode lasers [J]. *Appl Phys Lett*, 2010, 97(23): 231101.
- 10 Zhang Jianwei, Ning Yongqiang, Zhang Xing, *et al.*. Analysis of the thermal model based on the carrier injection mechanisms within the semiconductor laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(10): 1002003.
张建伟, 宁永强, 张 星, 等. 基于载流子注入产热机制的半导体激光器热模型分析[J]. *中国激光*, 2012, 39(10): 1002003.
- 11 E Kowalczyk, L Ornoch, Z Gniazdowski, *et al.*. Dynamics of thermo-optical properties of semiconductor lasers [C]. *SPIE*, 2007, 6456: 64561G.

栏目编辑:张 腾