

## 超高效率 940 nm 半导体激光阵列的低温特性研究

丁永康<sup>1,2</sup>, 周立<sup>1,2</sup>, 谭少阳<sup>1,2</sup>, 邓国亮<sup>1</sup>, 王俊<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>四川大学电子信息学院, 四川 成都 610041;<sup>2</sup>苏州长光华芯光电技术股份有限公司, 江苏 苏州 215009

**摘要** 提高半导体激光器的输出功率及电光转换效率一直是国内外的研究热点。本文针对应用在低温环境下的半导体激光器, 优化其外延结构中波导层的材料组分, 有效降低了器件的串联电阻, 使其在低温环境中有更好的性能表现。制备了腔长为 2.5 mm 的 940 nm 半导体激光阵列(巴条), 并在 -65~5 °C 的温度范围内对其进行性能表征。对比波导层优化前后两种结构的低温特性, 结果显示, 优化后的外延结构在低温下的性能大幅提升。由于低电阻特性, 优化后的外延结构在 -65 °C、占空比为 8%(200 μs, 400 Hz) 的准连续条件下的最大电光转换效率高达 82.3%, 远高于结构优化前的 78.5%, 而且其在 1000 W 输出功率下的电光转换效率为 71.3%。

**关键词** 激光器; 电光转换效率; 高功率; 低温特性; 波导; 半导体激光阵列

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1101004

## 1 引言

高功率高效率的半导体激光阵列在工业加工和固体激光系统中被广泛应用<sup>[1]</sup>, 其中, 940 nm 半导体激光器是 Yb:YAG 固体激光器的理想泵浦源, 其输出波长恰好位于 Yb:YAG 晶体的吸收峰处, 因而具有较高的泵浦效率<sup>[2]</sup>。高的电光转换效率可以减少废热的产生, 降低散热系统的复杂性, 提升整体激光系统的工作效率与可靠性, 降低系统成本<sup>[3]</sup>。2007 年, 美国 JDSU 公司研制出了填充因子为 43% 的 940 nm 半导体激光阵列, 其在 100 W 输出功率时的电光转换效率可达到 76%, 代表了当时室温条件下电光转换效率的最高水平<sup>[4]</sup>。2011 年, 中国电子科技集团第十三研究所报道了一款填充因子为 50% 的 976 nm 半导体激光巴条, 在室温连续条件下, 其电光转换效率达到了 71% (在 114.2 W 输出功率下)<sup>[5]</sup>; 2019 年, 中国科学院西安光学精密机械研究所报道了 940 nm 巴条, 其在室温准连续条件下的最高电光转换效率为 72.4%<sup>[6]</sup>。

一般室温条件下, 9xx nm 半导体激光芯片的最高电光转换效率为 70%~75%<sup>[7]</sup>。为进一步提高

电光转换效率, 降低应用温度是最直接有效的方法<sup>[8]</sup>。在高能激光系统中, 晶体一般需要用液氮制冷。半导体激光器阵列泵浦源采用同一制冷系统就可工作在低温环境下, 无需水冷系统, 低温制冷的附加功耗可通过保温措施降至数瓦内, 因此, 研究低温应用中半导体激光器的工作特性具有重要意义<sup>[9]</sup>。2006 年, 美国 nLight 公司的 Crump 等<sup>[10]</sup>报道了低功率输出的 975 nm 单管芯片, 其在 -10 °C 下的电光转换效率为 76%, 在温度低至 -50 °C 时, 其峰值电光转换效率可达到 85%, 是目前为止报道的 9xx nm 半导体激光器电光转换效率的最高水平。2016 年, FBH 小组报道了 940 nm 准连续千瓦级巴条, 其填充因子为 75%, 腔长为 4 mm, 在 203 K 测试温度下的最高电光转换效率可达到 77%, 在 1000 W 工作功率下的电光转换效率为 70%<sup>[11]</sup>。

针对低温应用环境, 本文研究了 940 nm 半导体激光器的温度特性。首先分析了温度对电光转换效率的影响机理, 并基于现有结构, 对波导层的组分进行优化, 使器件在低温工作时不仅具有低电阻特性, 还保持着较高的内量子效率。针对优化前后两种外延结构的器件, 测试并分析了它们在 -5、-25、

收稿日期: 2021-12-07; 修回日期: 2021-12-30; 录用日期: 2022-02-05

通信作者: \*wjdz@scu.edu.cn

-45 °C 下的内量子效率及内损耗,然后分别测试了 -65~5 °C 温度范围内两种巴条器件的光电性能,分析了阈值电流、斜率效率、串联电阻、开启电压的温度特性,获得了最大电光转换效率随温度变化的曲线,同时计算得到了能量损耗随温度变化的曲线。本文可为进一步提高半导体激光器的电光转换效率以及探索电光转换效率的极限提供参考。

## 2 理论分析

半导体激光器的电光转换效率为输出光功率  $P_{out}$  与输入电功率  $P_{in}$  的比值,其表达式为<sup>[12]</sup>

$$\eta_c = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \eta_d \frac{\hbar\nu(I - I_{th})}{qI(V_0 + IR_s)}, \quad (1)$$

式中: $\eta_c$  为电光转换效率; $\hbar\nu$  为光子能量; $q$  为电子电荷量; $\eta_d$  为外微分量子效率; $I_{th}$  为阈值电流; $V_0$  为开启电压; $R_s$  为串联电阻; $I$  为工作电流。外微分量子效率  $\eta_d$  的表达式为

$$\eta_d = \eta_i \frac{\alpha_m}{\alpha_m + \alpha_i}, \quad (2)$$

其中,

$$\alpha_m = \frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{R_l R_r}\right), \quad (3)$$

式中: $\eta_i$  为内量子效率; $\alpha_m$  为腔面损耗; $\alpha_i$  为内损耗; $L$ 、 $R_l$ 、 $R_r$  分别为器件腔长、前腔面反射率和后腔面反射率。由式(1)可以看出,影响半导体激光器电光转换效率的主要因素有  $\eta_d$ 、 $I_{th}$ 、 $V_0$ 、 $R_s$ 。

在低温环境下,材料有更高的光增益、更少的非辐射复合和更少的载流子泄漏效应,因此,器件的内量子效率和斜率效率更高,阈值电流更低,从而使得电光转换效率提高;但是随着温度降低,部分载流子被冻结以及由接触或者其他异质壁垒导致的界面效应会使半导体激光器的电阻变大,这是限制低温下电光转换效率提高的主要因素<sup>[13-14]</sup>。因此,针对低温应用进行结构优化时,首先需要考虑电阻对电光转换效率的影响,设计具有低电阻特性的外延结构。半导体激光器的电阻主要包括体材料的电阻和各个界面之间的电阻,其中体材料的电阻为器件电阻的主要来源,其大小为每一层电阻的叠加,即

$$R_s = \sum \frac{d_i}{WL} \frac{1}{n_i q \mu_{e,i} + p_i q \mu_{h,i}}, \quad (4)$$

式中: $d_i$  为各层厚度; $W$  为器件条宽; $n_i$  为各层的电子浓度; $\mu_{e,i}$  为各层的电子迁移率; $p_i$  为各层的空穴浓度; $\mu_{h,i}$  为各层的空穴迁移率。式(4)表明,串联电阻与掺杂浓度、材料迁移率和各层厚度有关。

文献[15]对半导体激光器各层的电阻值进行研究后指出,体电阻绝大部分来自波导层。一般情况下,降低串联电阻的方式有以下三种:1)提高掺杂浓度;2)使用迁移率更高的材料;3)减薄外延层。提高掺杂浓度会使吸收损耗增大,降低器件的输出功率<sup>[16]</sup>,不利于电光转换效率的提升;减薄外延层会使腔面功率密度增大,降低损伤阈值。为了降低总电阻且不损失功率和可靠性,本课题组采用了优化波导层组分进而提高材料迁移率的方式。

$Al_xGa_{1-x}As$  是 940 nm 半导体激光器最常用的材料,其中波导层的铝含量一般为 20% (质量分数)左右<sup>[13]</sup>。材料迁移率随着铝含量的降低而提高,且随着温度降低会进一步提高<sup>[17]</sup>,但铝含量降低会使波导层形成的势垒降低,对载流子的限制能力减弱,加重载流子泄漏,使器件性能劣化。因此,在常温应用时,一般不采用更低铝含量的材料作为波导材料。在低温应用中,载流子的热能会随温度的降低而降低,使得相对势垒高度增大,载流子泄漏被抑制。因此,可以通过降低波导层中铝含量的方式来提高材料的迁移率,同时降低器件的体材料电阻且不损失功率,从而提高低温下半导体激光器的电光转换效率<sup>[13]</sup>。

## 3 器件制备与实验系统

现有的 940 nm 半导体激光器结构 A 为非对称、大光腔的外延结构,包括 n-GaAs 缓冲层、n-AlGaAs 包覆层、n-AlGaAs 波导层、InGaAs 应变量子阱、p-AlGaAs 波导层、p-AlGaAs 包覆层和 p-GaAs 欧姆接触层。对于现有的结构 A,其波导层中铝组分的质量分数为 20%。本课题组通过降低波导层中铝组分的含量,设计了一种具有更低电阻的外延结构 B,以提升器件在低温环境中的电光转换效率。以上两种不同波导组分的外延结构都是采用金属有机物化学气相沉积(MOCVD)设备 Aixtron G4 进行外延生长得到的,p 型与 n 型掺杂分别采用 C 和 Si,掺杂水平保持一致。外延结构生长完成后,采用光刻、刻蚀等工艺制成脊波导结构,再使用等离子体化学气相沉积设备生长  $SiO_2$  绝缘介质膜,在介质膜上刻蚀出电极窗口,在 p 面蒸镀 Ti/Pt/Au,n 面经减薄抛光后蒸镀 Ge/Au/Ni/Au,形成良好的欧姆接触电极。采用高质量的腔面钝化工艺进行处理,得到了单元发光区宽度为 230  $\mu m$ 、腔长为 2.5 mm、填充因子为 90% 的 cm-bar 芯片,芯片的前后腔面分别镀增透膜与高反膜。两种结构的巴条芯片均封装在微

通道纯铜热沉上进行光电性能测试。整个测试系统置于低水汽(水汽体积分数小于 0.001%)的洁净手套箱内,采用抗低温制冷剂为巴条热沉制冷,制冷温度范围为 10~−70 °C,用 SZ-DFC-N1001 型温控仪器反馈温度,在占空比为 8%(200 μs,400 Hz)的准连续条件下进行测试,使用 OPHIR L100(500) A-PF-120 型功率计采集输出光功率。

## 4 器件测试与结果分析

### 4.1 内量子效率和内损耗测试

在−5、−25、−45 °C下对两种结构的内损耗  $\alpha_i$  和内量子效率  $\eta_i$  进行测试。解理得到两种结构 4 种不同腔长(1.5、2、2.5、3 mm)的单管芯片,腔面一端未镀膜,另一端镀高反膜。基于腔长与外微分量子效率倒数之间的线性关系进行拟合,拟合公式为

$$\frac{1}{\eta_e} = \frac{2L\alpha_i}{\eta_i \ln\left(\frac{1}{R_r R_f}\right)} + \frac{1}{\eta_i} \quad (5)$$

两种结构的内损耗  $\alpha_i$  和内量子效率  $\eta_i$  的测试结果如图 1 所示。

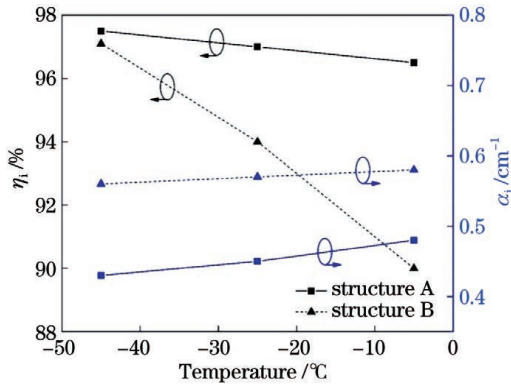


图 1 两种结构的内量子效率和内损耗随温度的变化  
Fig. 1 Variation of internal quantum efficiency and internal loss of two structures with temperature

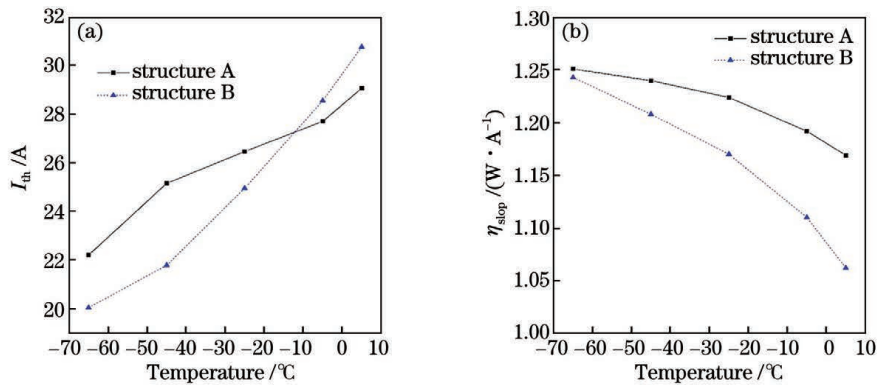


图 2 温度对巴条阈值电流和斜率效率的影响。(a)对阈值电流  $I_{th}$  的影响;(b)对斜率效率  $\eta_{slope}$  的影响

Fig. 2 Influences of temperature on threshold current and slope efficiency of two bars. (a) Influence on threshold current; (b) influence on slope efficiency

随着温度由−5 °C降低至−45 °C,优化结构 B 的内量子效率由 90.0% 上升到 97.1%,内损耗由 0.58  $\text{cm}^{-1}$  降低到 0.56  $\text{cm}^{-1}$ ,结构 A 的内量子效率由 96.5% 上升到 97.5%,内损耗由 0.48  $\text{cm}^{-1}$  降低到 0.43  $\text{cm}^{-1}$ 。由于结构 B 波导层中铝组分含量降低,波导层-量子阱形成的有效势垒降低,因此载流子泄漏严重;随着温度降低,载流子的热能降低,由量子阱泄漏到波导层的载流子减少,内量子效率大幅提高。常规结构 A 波导层-量子阱形成的有效势垒足够高,常温下能够抑制载流子泄漏;随着温度降低,内量子效率的提高并不显著。内损耗随温度的降低而降低,其原因是:随着温度降低,器件的阈值电流减小,量子阱内的载流子浓度降低,因此器件的内损耗降低。综上分析,推测结构 B 在更低温度下会有更好的性能表现。

### 4.2 巴条(阵列)芯片测试

在−65~5 °C温度范围内对封装在微通道热沉上的巴条芯片进行变温测试,分析两种结构巴条阈值电流  $I_{th}$ 、斜率效率  $\eta_{slope}$ 、串联电阻  $R_s$ 、开启电压  $V_0$  和电光转换效率等指标的温度特性。

图 2(a)显示,随着温度由 5 °C降低至−65 °C,结构 A 的阈值电流从 29.1 A 降低至 22.2 A,结构 B 的阈值电流从 30.8 A 降低至 20.0 A。这是因为随着温度降低,非辐射复合减少,透明载流子浓度降低,因此阈值电流密度降低。图 2(b)为两种结构的斜率效率随温度变化的趋势,可见:随着温度从 5 °C降低到−65 °C,结构 A 的斜率效率从 1.169 W/A 提高到 1.251 W/A,提高比例仅为 7%,而结构 B 的斜率效率由 1.062 W/A 提高到 1.243 W/A,提高比例为 17%。斜率效率的提升是由于低温下载流子泄漏减少,内量子效率提升。结合 4.1 节的测试结果可知,随着温度降低,结构 B 的内量子效率比



结构 A 提升得更大,故其斜率效率的提升更加明显。

图 3(a)、(b)分别为两个结构的串联电阻  $R_s$  和开启电压  $V_0$  随温度的变化趋势。随着温度从 5 °C 降低到 -65 °C,结构 A 的串联电阻从 0.371 mΩ 增大到 0.40 mΩ,结构 B 的串联电阻从 0.277 mΩ 提高到 0.287 mΩ。随着温度降低,串联电阻的提高源于异质壁垒导致的界面效应,且由于结构 B 波导层的铝组

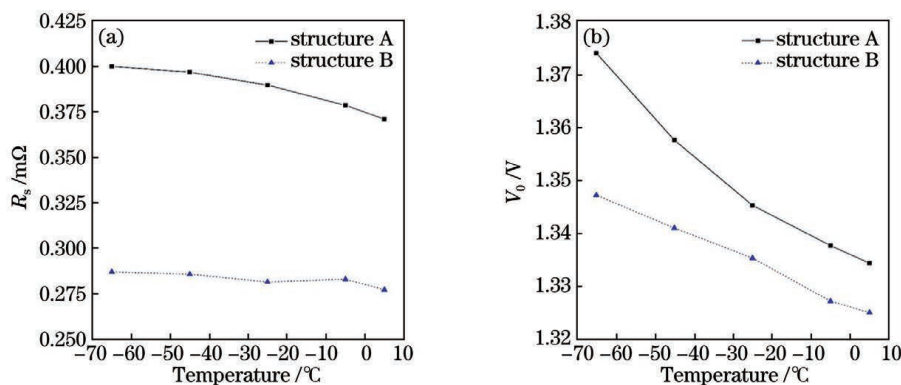


图 3 温度对巴条串联电阻和开启电压的影响。(a)对串联电阻  $R_s$  的影响;(b)对开启电压  $V_0$  的影响

Fig. 3 Influence of temperature on series resistance and turn-on voltage of two bars. (a) Influence on series resistance; (b) influence on turn-on voltage

图 4 为两种结构在 -65 °C 下的光-电流-电压曲线 (LIV 曲线) 及电光转换效率特性曲线。对于结构 B, 因体材料电阻的优化, 其工作电压低于结构 A 的工作电压, 并且由于低温下载流子的热能降低, 泄漏效应被抑制, 其输出功率接近结构 A 的输出功率。当电流为 300 A 时, 结构 B 的电光转换效率最大, 为 82.3%, 远高于结构 A 的 78.5%; 在 1000 W 输出功率下, 结构 B 的电光转换效率为 71.3%。

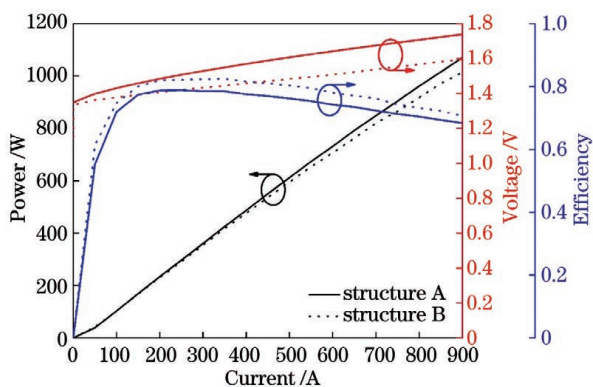


图 4 -65 °C 下两种结构的 LIV 曲线

Fig. 4 LIV curves of two structures at -65 °C

图 5 为两种结构最高电光转换效率随温度变化的曲线, 最高电光转换效率随温度的降低而提高; 随着温度由 5 °C 降低至 -65 °C, 结构 A 的最高电光转换效率由 74.9% 提升至 78.5%, 结构 B 的最高电光转换效率由 70.3% 提升至 82.3% (效率提升更为明显)。

分含量更低, 材料的迁移率更高, 所以结构 B 的体电阻相对于结构 A 大幅降低。随着温度从 5 °C 降低到 -65 °C, 结构 A 的开启电压从 1.334 V 增大到 1.374 V, 结构 B 的开启电压从 1.325 V 提高到 1.347 V。开启电压由准费米能级差和能带不匹配产生的界面电压两部分组成, 随着温度降低, 有源区的带隙宽度变大, 准费米能级差变大, 因此开启电压增大。

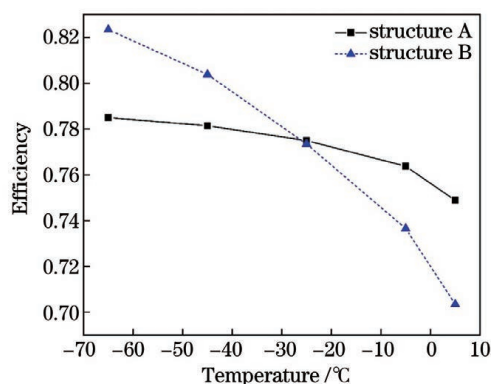


图 5 两种结构最高电光转换效率随温度的变化

Fig. 5 Variation of maximum electro-optical conversion efficiency of two structures with temperature

进一步分析最高电光转换效率下的能量损失路径, 对于后期结构优化具有重要意义。除了输出的光能量  $P_{out}$ , 其余的能量损失路径主要包括以下 4 个部分<sup>[18]</sup>: 1) 自发辐射和非辐射复合引起的阈值电流损耗; 2) 由载流子吸收和泄漏引起的外微量子效率损耗; 3) 串联电阻引起的焦耳热损耗; 4) 能带不匹配引起的电压损耗。将这些因素进行量化分析, 可得到两个结构的能量损失占总输入能量的比例, 如图 6 所示。

图 6(a)、(b)分别为结构 A 和结构 B 在最大电光转换效率下的能量损耗随温度变化的曲线。对于结构 A, 随着温度由 5 °C 降低至 -65 °C, 阈值电流

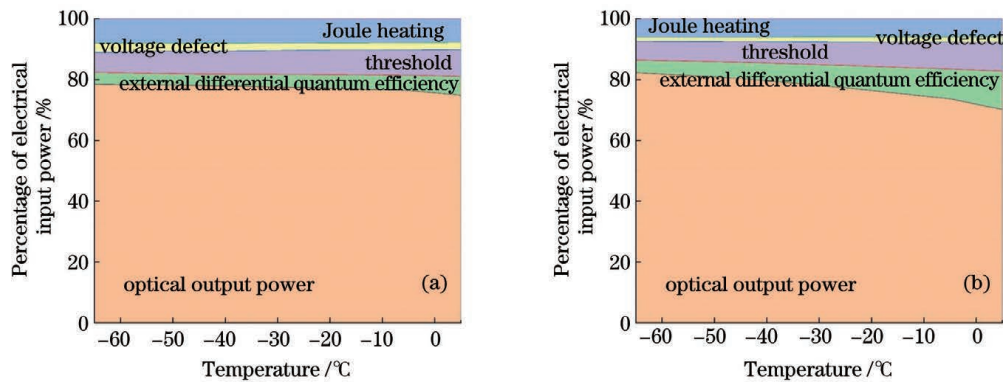


图 6 最大电光转换效率下的能量损耗随温度变化的趋势。(a)结构 A;(b)结构 B

Fig. 6 Variation of energy loss at the maximum electro-optical conversion efficiency with temperature. (a) Structure A; (b) structure B

引起的损耗占比从 8.7% 降至 6.6%，外微分量子效率引起的损耗占比从 6.2% 降至 3.9%，焦耳热引起的损耗占比从 7.7% 提高至 8.0%，缺陷电压引起的损耗占比从 2.5% 提高至 3%；对于结构 B，随着温度由 5 °C 降低至 -65 °C，阈值电流引起的损耗占比从 9.4% 降至 6.2%，外微分量子效率引起的损耗占比从 12.6% 降至 4.1%，焦耳热引起的损耗占比从 5.9% 提升至 6.0%，缺陷电压引起的损耗占比从 1.8% 降至 1.4%。

温度为 5 °C 时，结构 A 的能量损耗主要为阈值电流损耗和焦耳热损耗，分别占总能量的 8.7% 和 7.7%；当温度降低至 -65 °C 时，由于非辐射复合减少，内量子效率提高，阈值电流降低，其损耗降低至 6.6%，而焦耳热损耗却提升至 8.0%，这是限制电光转换效率提高的主要因素。温度为 5 °C 时，结构 B 的能量损耗主要源于阈值电流损耗和外微分量子效率导致的损耗，它们分别占总能量的 9.4% 和 12.6%，主要原因是结构 B 的相对势垒高度较低，存在严重的载流子泄漏现象；当温度降低至 -65 °C 时，载流子泄漏被抑制，这两部分能量损耗均大幅降低，同时结构 B 的串联电阻更低，焦耳热引起的能量损耗仅为 6.0%，因此其电光转换效率更高。需要指出的是，虽然结构 B 的串联电阻引起的损耗占比较结构 A 低，但其仍占总能量损失的 1/3，是进一步提高电光转换效率需要重点优化的方向。

## 5 结 论

基于现有结构，本课题组设计了一种低电阻特性的巴条芯片，对比了两种外延结构的巴条在不同温度下的性能，同时分析了内量子效率和内损耗随着温度降低的变化以及巴条的电光转换效率的温度

变化特性。在 -65 °C 环境下，该优化结构的巴条的电阻为 0.287 mΩ，较优化前的 0.40 mΩ 得到大幅改善，并且由载流子泄漏引起的能量损失在低温下有效降低，巴条的最大电光转换效率达到了 82.3%，且在 1000 W 输出功率时的电光转换效率达到了 71.3%。本文研究表明，通过降低波导层中铝组分的含量可以使器件具有低电阻特性，同时使器件在低温环境下保持较高的内量子效率。本研究对于进一步提升半导体激光阵列的电光转换效率具有一定的指导意义。

## 参 考 文 献

- [1] 宁永强, 陈泳屹, 张俊, 等. 大功率半导体激光器发展及相关技术概述[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0114001.  
Ning Y Q, Chen Y Y, Zhang J, et al. Brief review of development and techniques for high power semiconductor lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0114001.
- [2] Körner J, Jambunathan V, Hein J, et al. Spectroscopic characterization of Yb<sup>3+</sup>-doped laser materials at cryogenic temperatures [J]. Applied Physics B, 2014, 116(1): 75-81.
- [3] Crump P, Frevert C, Hösler H, et al. Cryogenic ultra-high power infrared diode laser bars[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9002: 900211.
- [4] Peters M, Rossin V, Everett M, et al. High-power, high-efficiency laser diodes at JDSU[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6456: 64560G.
- [5] 安振峰, 林琳, 徐会武, 等. 976 nm 高效率半导体激光器[J]. 半导体技术, 2011, 36(5): 345-347.  
An Z F, Lin L, Xu H W, et al. 976 nm high efficiency semiconductor lasers [J]. Semiconductor Technology, 2011, 36(5): 345-347.

- [6] Zhao Y L, Wang Z F, Yang G W, et al. Research on 940 nm kilowatt high efficiency quasi-continuous diode laser bars [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11170: 1117040.
- [7] 陈良惠, 杨国文, 刘育衍. 半导体激光器研究进展 [J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500001.  
Chen L H, Yang G W, Liu Y X. Development of semiconductor lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500001.
- [8] Frevert C, Crump P, Bugge F, et al. Study of waveguide designs for high-power 9xx-nm diode lasers operating at 200 K [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8965: 89650O.
- [9] Crump P A, Tränkle G. A brief history of kilowatt-class diode-laser bars [J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11301: 113011D.
- [10] Crump P, Grimshaw M, Wang J, et al. 85% power conversion efficiency 975-nm broad area diode lasers at  $-50^{\circ}\text{C}$ , 76% at  $10^{\circ}\text{C}$  [C]//2006 Conference on Lasers and Electro-Optics and 2006 Quantum Electronics and Laser Science Conference, May 21-26, 2006, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE Press, 2006.
- [11] Frevert C, Bugge F, Knigge S, et al. 940 nm QCW diode laser bars with 70% efficiency at 1 kW output power at 203 K: analysis of remaining limits and path to higher efficiency and power at 200 K and 300 K [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9733: 97330L.
- [12] Wang J, Smith B, Xie X M, et al. High-efficiency diode lasers at high output power [J]. Applied Physics Letters, 1999, 74(11): 1525-1527.
- [13] Frevert C, Crump P, Bugge F, et al. The impact of low Al-content waveguides on power and efficiency of 9xx nm diode lasers between 200 and 300 K [J]. Semiconductor Science and Technology, 2016, 31(2): 025003.
- [14] Leisher P O, Dong W M, Grimshaw M P, et al. Mitigation of voltage defect for high-efficiency InP diode lasers operating at cryogenic temperatures [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(24): 1829-1831.
- [15] Crump P, Erbert G, Wenzel H, et al. Efficient high-power laser diodes [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(4): 1501211.
- [16] 曼玉选, 仲莉, 马骁宇, 等. 极低内部光学损耗 975 nm 半导体激光器 [J]. 光学学报, 2020, 40(19): 1914001.  
Man Y X, Zhong L, Ma X Y, et al. 975 nm semiconductor lasers with ultra-low internal optical loss [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(19): 1914001.
- [17] Shur M, Singh J. Physics of semiconductor devices [J]. Physics Today, 1990, 43(10): 98-99.
- [18] 宋云菲, 王贞福, 李特, 等. 808 nm 半导体激光芯片电光转换效率的温度特性机理研究 [J]. 物理学报, 2017, 66(10): 104202.  
Song Y F, Wang Z F, Li T, et al. Efficiency analysis of 808 nm laser diode array under different operating temperatures [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(10): 104202.

## Low-Temperature Characteristics of Ultra-High Efficiency 940 nm Semiconductor Laser Bars

Ding Yongkang<sup>1,2</sup>, Zhou Li<sup>1,2</sup>, Tan Shaoyang<sup>1,2</sup>, Deng Guoliang<sup>1</sup>, Wang Jun<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> College of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610041, Sichuan, China;

<sup>2</sup> Suzhou Everbright Photonics Co., Ltd., Suzhou 215009, Jiangsu, China

### Abstract

**Objective** High-power semiconductor laser bars have numerous substantial applications in material processing and scientific research fields. In particular, it can be used as a key pump source for high-energy-class solid-state lasers. The electro-optical conversion efficiency of the pump source will affect the energy consumption of the solid-state laser, volume, and weight of the cooling system. The highest electro-optical conversion efficiency of the laser bars at room temperature is approximately 75%. The electro-optical conversion efficiency of the laser bars is determined by series resistance, internal quantum efficiency, internal optical loss, threshold current, and turn-on voltage. Improving the internal quantum efficiency is an effective path for increasing electro-optical conversion efficiency. Furthermore, lowering the operating temperature is crucial for increasing the internal quantum efficiency, making it the most direct method for achieving high electro-optical conversion efficiency. The pump sources and the crystals

can be cooled using low-temperature liquids for some high-energy-class solid-state laser systems. The series resistance increases when the temperature decreases, which can limit the improvement of electro-optical conversion efficiency. Therefore, it is crucial to study the low-temperature characteristics of the laser bars and propose techniques to improve them. The structure of the laser bar should be substantially optimized to improve both internal quantum efficiency and series resistance. In this study, a 940 nm semiconductor laser bar is designed for low-temperature operation by optimizing the epitaxial structure. The series resistance of the laser bar is reduced compared with the pre-optimized structure, whereas the internal quantum efficiency is maintained at high value. The peak efficiency of the laser bar is approximately 82.3% at  $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Methods** The series resistance can be reduced by lowering the Al content for high carrier mobility in the waveguide. The waveguide with a low Al content  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  leads to a low bandgap between the waveguide and quantum well. The carrier leakage from the quantum well into the waveguide increases, which results in low internal quantum efficiency and high optical loss. The bandgap between the waveguide and quantum well will increase, while the thermal energy of carriers will decrease as the temperature decreases. Thus, the carrier leakage will be reduced at low temperatures. Elaborately designed low Al content  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  can be sufficiently used in the waveguide for low-temperature operation without suffering a carrier leakage. In this study, structure B is the optimized structure with a lower Al content  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  in the waveguide, whereas structure A is pre-optimized. The vertical layers were grown using metal-organic chemical vapor deposition and then processed into a 1 cm laser bar with a 90% fill factor and 2.5 mm cavity length. The laser bars were soldered p-side down onto micro-channel cooled heat sinks and measured at a temperature range from  $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and the low-temperature performances of structures A and B were measured. The temperature dependence of internal quantum efficiency and internal optical loss is obtained from cavity-length-dependent measurements, and the effect of temperature on the electro-optical conversion efficiency is analyzed.

**Results and Discussions** As temperature decreases from  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the internal quantum efficiency of structure B rises from 90% to 97.1%, whereas structure A rises from 96.5% to 97.5% (Fig. 1). The performance improvement of structure B at low temperature is more evident than that of structure A because of the substantial improvement in the internal quantum efficiency. The threshold current decreases from 30.8 to 20.0 A for structure B, and the slope efficiency increases from 1.062 to 1.243 W/A when the temperature decreases from  $-5$  to  $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Fig. 2). The turn-on voltage increases from 1.325 to 1.347 V, and the series resistance increases from 0.277 to 0.287 m $\Omega$  (Fig. 3). At  $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the peak electro-optical conversion efficiency of structure B increases to 82.3% when the current is 300 A. The conversion efficiency when the power is 1000 W for structure B is 71.3% (Fig. 4). To the best of our knowledge, this is the best result of the electro-optical conversion efficiency for semiconductor laser bars.

**Conclusions** A semiconductor laser bar with low series resistance and relatively high internal quantum efficiency is designed for low-temperature operation. The structure is optimized elaborately with a low Al content  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  in the waveguide. The peak electro-optical conversion efficiency of the optimized structure increases to 82.3% at  $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The constituents of power loss at the peak of the efficiency under different temperatures were also studied. It is observed that the main factor affecting the electro-optical conversion efficiency at low temperatures is the series resistance. By continuously reducing the device resistance, high efficiency at low temperature will be obtained if carrier leakage and optical loss can be controlled.

**Key words** lasers; electro-optical conversion efficiency; high power; low-temperature characteristics; waveguide; semiconductor laser array