

# MOPA 半导体激光器的偏振控制研究

王浩淼<sup>1,2</sup>, 贺钰雯<sup>1,2</sup>, 李弋<sup>1,2</sup>, 胡耀<sup>1,2</sup>, 张亮<sup>1,2</sup>, 杜维川<sup>1,2\*</sup>, 高松信<sup>1,2</sup>,  
唐淳<sup>1,2</sup>, 马骁宇<sup>3</sup>, 刘素平<sup>3</sup>

(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;  
3. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

**摘要:** 主控振荡功率放大(MOPA)激光器的可以实现高功率、高光束质量输出而受到更多关注。为了提高 MOPA 激光器的偏振度以减小偏振合束时的效率损失, 有源区采用 InGaAs/AlGaAs 压应变单量子阱, 脊型波导 1.35  $\mu\text{m}$  的深刻蚀方案提高 TE 模式的光限制因子, 锥形放大器采用金属应力调控增加量子阱中的压应变。结合这两种方案, 不仅提高了两个区域的偏振度, 同时减小了偏振角度差。采用标准工艺制备的 MOPA 器件实现了 11W@15A 连续输出和 90% 以上的偏振度。

**关键词:** 半导体激光器; 近红外; 应变; 高偏振度

## Investigation of Polarization Characteristics in Semiconductor Master Oscillator Power Amplifier

Wang Haomiao<sup>1,2</sup>, He Yuwen<sup>1,2</sup>, Li Yi<sup>1,2</sup>, Hu Yao<sup>1,2</sup>, Zhang Liang<sup>1,2</sup>, Du Weichuan<sup>1,2\*</sup>, Gao Songxin<sup>1,2</sup>, Tang Chun<sup>1,2</sup>, Ma Xiaoyu<sup>3</sup>, Liu Suping<sup>3</sup>

(1. The Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, CAEP, Mianyang 621900, China;  
2. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China;  
3. Institute of Semiconductor, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** To improve of polarization of master oscillator power amplifier (MOPA), the factors which have impact on the polarization characteristics of ridge and tapered waveguides are studied. The optical confinement factor of TE-mode in ridge waveguide is enlarged by 1.35  $\mu\text{m}$  deep etching, whereas the TE optical gain in tapered amplifier is improved through on-chip metal stress regulation. Combining the methods above, the degree of polarization (DOP) of two section are prominently enhanced in addition to reduced polarization angle difference. Finally, a 90% DOP of the MOPA has been achieved by standard process fabrication.

**Key words:** semiconductor laser, near-infrared, strain, high polarization

**PACS:**

### 一 引言

高亮度、大功率的半导体激光器是近年来固态激光领域的研究热点, 不仅可以成为新一代高能固态激光器的理想泵浦源, 也可以直接应用在材料加工、医疗、光学检测、光通讯和激光雷达等工业领域, 在军用和民用产品中均具有迫切的发展需求和广阔的应用市场<sup>[1]</sup>。主控振荡功率放大(MOPA)激光器由折射率引导的窄脊型单模激光振荡器(MO)

和增益引导的锥形放大器(PA)组成, 因其独有的近衍射极限输出, 有潜力成为高亮度大功率光源而受到更多关注。2005年, 德国夫琅和费研究所报道了 976nm 的 MOPA 激光器, 实现了 7.7W 衍射极限高亮度输出<sup>[2]</sup>。2017年, 德国费迪南布劳恩研究所(FBH)采用大光腔和三量子阱的外延结构, 通过离子注入增加脊型两侧高阶模损耗, 研制出了连续输出功率高达 16W, 最大电光转换效率为 57% 的锥形

作者简介 (Biography): 王浩淼 (1995-), 男, 四川成都人, 助理研究员, 博士学位, 主要研究方向为 III-V 族半导体激光器. E-mail: hao\_miao\_wang@163.com

\* 通讯作者 (Corresponding author): 杜维川, E-mail: weichuan@126.com

激光器<sup>[3]</sup>。国内对 MOPA 的研究进展也取得了重大突破。中物院应用电子学研究所报道了 10W 连续激光高亮度 MOPA 激光器<sup>[4]</sup>,并深入研究了脊型和锥形放大器的增益谱失配现象,通过在脊型两侧进行离子注入,提高两个区域的增益匹配度,从而实现高亮度激光输出<sup>[5]</sup>。

在偏振合束方案中,为提高耦合效率和光束质量,除了对半导体激光器的亮度有较高需求外,还对子束的偏振度(DOP)和子束间的偏振角度一致性提出了较高要求<sup>[6]</sup>。在 MOPA 激光器中,脊型波导和锥形放大器之间的偏振态一致性是决定其输出性能好坏的另一个关键因素。当 MO 区和 PA 区出现偏振态失配时,PA 区只能对电场矢量方向相同的种子光进行选择放大,降低了放大效率,自发辐射增强引起光束质量的恶化。

本文研究了 980 nm MOPA 激光器中两个区域的偏振匹配问题和控制方法,对脊型波导采用深刻蚀设计以增强 TE 模式的光限制因子,同时利用片上金属应力调控方案以提高锥形放大器中 TE 模式的材料增益系数。提高了两个波导的偏振度,减小了两者之间的偏振角度差,最终制备的 MOPA 器件实现了 90% 以上的高偏振输出。

## 二 结构设计

### 2.1 外延设计

采用金属有机物化学气相外延在偏向 $\langle 111 \rangle$ 面 $15^\circ$ 的 N 型 GaAs (001) 衬底上生长 MOPA 激光器的外延层。首先生长  $1.25 \mu\text{m}$  Si 掺杂  $\text{Al}_{0.4}\text{GaAs}$  下限制层,随后生长  $1.6 \mu\text{m}$   $\text{Al}_{0.15}\text{GaAs}$  下波导层,放置于  $100 \text{ nm}$  的  $\text{Al}_{0.08}\text{GaAs}$  光限制层中的  $9 \text{ nm}$  的压应变

$\text{In}_{0.18}\text{GaAs}$  单量子阱有源区, $0.8 \mu\text{m}$   $\text{Al}_{0.15}\text{GaAs}$  上波导层厚度为,最后生长  $1 \mu\text{m}$  Zn 掺杂  $\text{Al}_{0.4}\text{GaAs}$  P 型限制层和  $200 \text{ nm}$  C 掺杂 GaAs 欧姆接触层。

图 1(a) 为外延结构的折射率分布和光场分布图。外延波导采用非对称超大光腔结构,InGaAs 量子阱位置靠近 P 侧,目的是让光场分布偏向 N 层,减少空穴吸收损耗,提高灾变光学镜面损伤(COMD)的功率阈值。同时,上波导较薄可以减少串联电阻,提高电光效率。波导层采用  $2.4 \mu\text{m}$  超大光腔结构,优化量子阱的位置使基模  $\text{TE}_{00}$  与一阶模  $\text{TE}_{01}$ 、二阶模  $\text{TE}_{02}$  的光限制因子比分别为 2.88、39.3。与基模相比,较小的高阶模光限制因子可以保障快轴方向上基模稳定激射。此时 P 型波导与 N 型波导的厚度比约为 1:2。

### 2.2 器件设计

MOPA 结构的示意图如图 1(b) 所示,器件总长  $15 \text{ mm}$ ,它由分布布拉格反射光栅(DBR 区)、提供单模种子源的窄脊型波导(MO 区)和实现行波放大的锥形波导(PA 区)三个区域组成,三段独立电极可以分别加电驱动。6 阶 DBR 区通过电子束曝光和干法刻蚀工艺制作而成,刻蚀深度约  $1.1 \mu\text{m}$ ,总长  $1 \text{ mm}$ ,反射率设计为 30%,光栅两侧设计有微电极加热器(Heater)用于光谱热调谐。MO 区的脊宽和腔长分别为  $3 \mu\text{m}$  和  $7 \text{ mm}$ ,刻蚀深度为  $1.1 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 。PA 区长度为  $7 \text{ mm}$ ,采用离子注入形成张角全角为  $3^\circ$  的锥形增益波导,出光口宽度约为  $400 \mu\text{m}$ 。通过电子束蒸镀  $\text{SiO}_2$  绝缘膜,制备电注入窗口,P 面电极为 Ti/Pt/Au, N 面电极为 Ni/AuGe/Pt/Au。前后腔反射率设计为  $<0.1\%$  以抑制脊型和锥形波导之间的反馈光耦合。

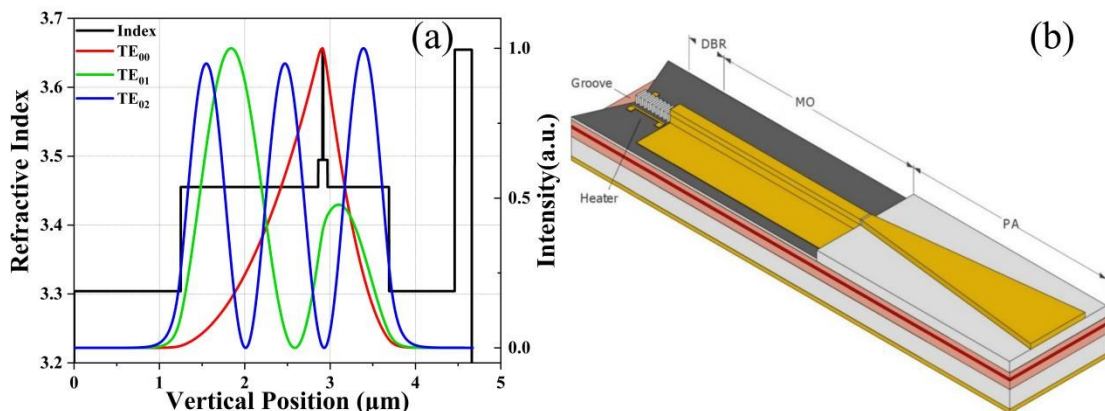


图 1 (a) 980 nm 半导体激光器的折射率、光场分布图;(b) MOPA 器件结构示意图

Figure 1 (a) Refractive index and calculated optical field distribution diagram of 980 nm semiconductor laser; (b) Schematic diagram of MOPA structure

### 三 器件测试与讨论

在应变量子阱半导体激光器中,偏振特性由两个因素所决定:波导结构的偏振选择性和有源区材料增益的偏振选择性,即  $G = \Gamma \cdot g$ 。波导的脊宽和刻蚀深度影响二维波导中 TE、TM 模式数量和光限制因子大小;InGaAs 量子阱中的量子尺寸效应与压应变相结合会使电子-重空穴复合的动量矩阵元平方值更大,相应产生的 TE 模式增益占据主导<sup>[7]</sup>。由于 MO 区和 PA 区中波导结构不同,因此两个区域的偏振影响因素需要分开讨论。

#### 3.1 脊型波导

在窄脊型波导中,不同刻蚀深度形成的折射率台阶约为  $1 \sim 2 \times 10^{-3}$ ,通过有限差分法进行二维波导光场分布模拟计算,如图 2(a)所示。点线图为脊型波导的刻蚀深度从  $1.0 \mu\text{m}$  变化到  $1.6 \mu\text{m}$  时,TE<sub>00</sub> 和 TM<sub>00</sub> 的光限制因子的变化趋势。TE 基模和 TM 基模的光限制因子随着刻蚀深度的增加而增大,刻蚀深度超过  $1.05 \mu\text{m}$  后,TE 模式的光限制因子将大于 TM 模式,两者的光限制因子差异随刻蚀深度的增加而逐渐增大。这意味着增加刻蚀深度,TE<sub>00</sub> 模式增益由于其光限制因子增大而占据主导,模式竞争使 TM<sub>00</sub> 模式受到抑制,输出激光的偏振度得到提高。而在大于  $1.4 \mu\text{m}$  后,慢轴方向上出现 TE<sub>10</sub> 高阶模式可能会降低脊型的光束质量。因此脊型波导的刻蚀深度选择在  $1.05 \sim 1.35 \mu\text{m}$  之间。随后单独制备了 4 种刻蚀深度的窄脊型激光器,刻蚀深度分别为  $1.05 \mu\text{m}$ 、 $1.15 \mu\text{m}$ 、 $1.25 \mu\text{m}$ 、 $1.35 \mu\text{m}$ ,其他设计参数均相同。验证实验的偏振度统计结果如图 2(b)所示,所有脊型的测试电流均为  $1.2 \text{ A}$ 。随着刻蚀深度的增加,窄脊型激光器的偏振度逐渐提高,平均偏振度从 70% 增加至 95%,一致性也得到了明

显提升,标准差从 20% 降低至 2%。图 2(c)对比了脊型输出激光功率随刻蚀深度的变化情况,随着刻蚀深度的增加,脊型侧壁与光场的交叠增大,内损耗增加导致整体输出功率下降;随着刻蚀深度从  $1.05 \mu\text{m}$  增加至  $1.25 \mu\text{m}$ ,而 TE 基模的输出功率也出现下降趋势,但在  $1.35 \mu\text{m}$  处增大。考虑到光束质量和偏振度的需求,我们认为  $1.35 \mu\text{m}$  的刻蚀深度最佳。上述实验结果说明增加脊型波导中的 TE<sub>00</sub> 模式光限制因子可以得到稳定的高偏振度激光输出。

#### 3.2 锥形放大器

在锥形器件中,由于慢轴方向上没有折射率限制,TE<sub>00</sub> 模式和 TM<sub>00</sub> 模式的光限制因子为常数,均由外延结构决定。在半导体激光器中,向激光器施加的应力对输出激光的偏振特性、阈值电流、功率和光谱等影响很大。可以通过向锥形放大器施加压力来改变材料增益的偏振选择性,进而改善输出光束的偏振特性<sup>[8]</sup>。将锥形芯片两侧用铜片垫高,从中间利用弹簧针施加压力,测试时 P 面向上。图 3(a)画出了测试脉冲电流  $I_{\text{rw}} = 0 \text{ A}$ ,  $I_{\text{tp}} = 5 \text{ A}$  时,PA 在不同压力下输出功率、偏振度及偏振夹角的变化规律。压力较小时,偏振角度与水平线夹角为  $-110^\circ$ ,可以判断此时输出光中 TM 模和 TE 模并存,而 TM 模占据主导,因此偏振度较低,仅为 55%,此时透明载流子浓度最高,因此总功率最低,仅为  $2.53 \text{ W}$ 。随着施加压力的增加,量子阱中重空穴带上移逐渐超过轻空穴带,TM 模式的增益降低而 TE 模式的增益提高,偏振角度逐渐向水平偏转,功率和偏振度也逐渐增加。在较大的压力下,量子阱中重空穴能级远高于轻空穴能级,电子-重空穴复合占据主导。锥型区域处于 TE 模式输出状态,偏振角度与水平方

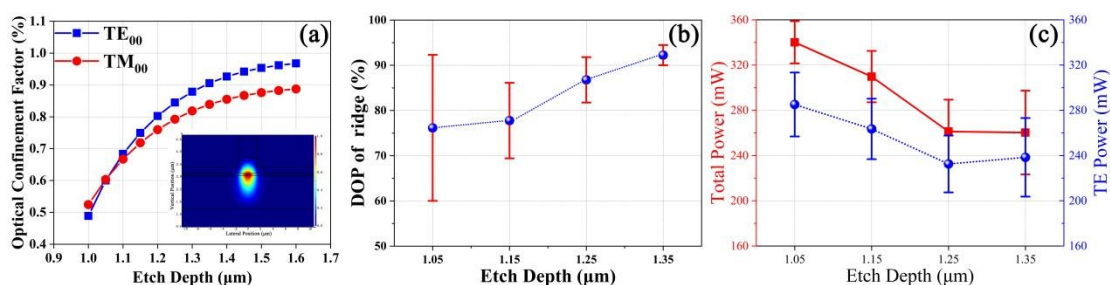


图 2 (a)脊型波导中 TE<sub>00</sub> 和 TM<sub>00</sub> 模的光限制因子随刻蚀深度的变化;(b)不同刻蚀深度下脊型的偏振度变化趋势;(c)不同刻蚀深度下脊型的总功率和 TE 模式功率变化情况

Figure 2 (a) The variation of the optical confinement factor of TE<sub>00</sub>-mode and TM<sub>00</sub>-mode in ridge waveguide with etched depth. (b) The trend of degree of polarization variation of ridge section under different etching depths. (c) The total power and TE-mode power varies from etching depths.



向的夹角旋转为 $-15^\circ$ ,偏振度提升至95%,透明电流密度也降低至最小,功率提高至3.05W并保持稳定。图3(b)为锥型器件的输出光谱随与施加压力的变化情况,当压力较小时,峰值波长在1012 nm附近,压力略微增大后,光谱发生了模式跳变,峰值波长红移至1018 nm。结合该器件的偏振变化规律,我们认为锥形波导中TM模式转变成了TE模式。随着压力继续增大,光谱发生蓝移,这是因为量子阱的带隙随压应变的增加而变宽所致。

### 3.3 MOPA 器件

上述压力实验表明:在器件制备过程中引入了张应变,部分抵消了量子阱材料的压应变,锥形器件的偏振度较低。为了调控片上应力大小,我们利用金属材料较大的热膨胀系数,设计不对称的P、N金属厚度,对器件施加压应变以提高TE模式增益。图4(a)为MOPA器件的偏振度、偏振角度与水平线夹角与P、N金属厚度差的变化曲线,测试电流均为

$I_{RW}=1.2\text{ A}$ ,  $I_{TP}=5\text{ A}$ 。P面金属较薄时,MOPA的偏振度较低约60%且不稳定,偏振角度与水平线几乎垂直,TM模式增益较高。随着P面金属厚度的增加,可以观察到MOPA的偏振角度逐渐旋转至水平,TE模式增益得到明显加强。当P、N金属厚度差为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 时,MOPA器件偏振度提升到90%以上且偏振角度几乎水平,输出激光主要为TE模式。图4(b)为P、N金属厚度差为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 时,脊型、锥形和MOPA器件的偏振度、偏振夹角对比图。从图中可以发现MOPA器件的偏振特性主要取决于锥形放大器,它们与脊型波导之间存在 $10\sim 20^\circ$ 的偏振角度差,我们认为这与衬底具有 $15^\circ$ 的倾角相关。该结果说明我们设计的片上应力调控方案在MOPA器件的偏振特性控制方面取得了优异的效果,减小了脊型波导和锥形放大器之间偏振角度差,提高了MOPA器件的偏振度。

在 $15^\circ\text{C}$ 水冷条件下,我们对比了两种MOPA激

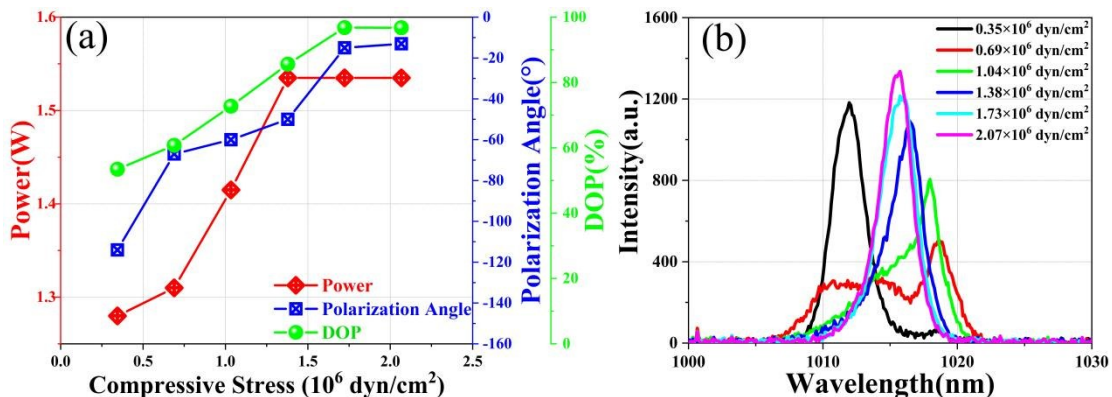


图3 (a)锥形波导的功率、偏振角度与水平夹角、偏振度随压力的变化曲线;(b)锥形波导激光光谱随压力变化情况

Figure 3 (a) The trend curve of the power, polarization angle and degree of polarization of tapered waveguide with stress. (b) Emission spectrum of taper section with different stress.

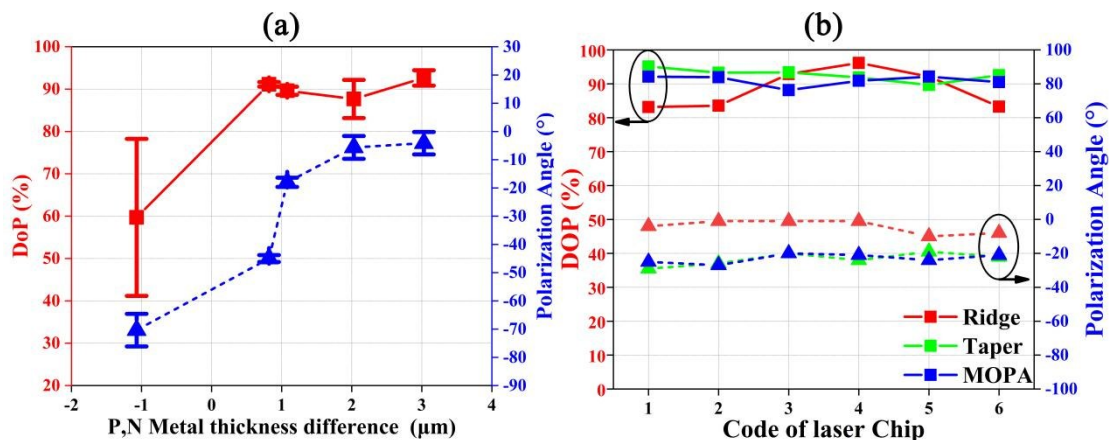


图4 (a)PN金属厚度差对MOPA偏振度、偏振角度的影响;(b)脊型、锥形、MOPA器件的偏振度与偏振角度

Figure 4 (a) The influence of PN metal thickness difference on DOP and polarization angle of MOPA

光器的连续输出功率、偏振度和功率转换效率随 PA 电流的变化趋势,如图 5(a)、(b)所示。两种器件的脊型波导电流为均  $IRW=1.2A$ ,为放大器提供足够强的种子源功率。图中虚线空心圆、实线实心圆折线分别为改善前、后的 MOPA 器件测试曲线。可以明显看出,对比改善前的 MOPA 器件在  $15A$  下输出功率为  $9.21W$ ,偏振度仅为  $78.9%$ ,最高电光转换效率为  $52.1\% @ 5A$ ;改善后的 MOPA 器件将输出功率、偏振度和电光转换效率分别提升至  $11.57W$ 、 $90.9%$  和  $59.8\% @ 5A$ 。上述实验说明,通过对增加脊型波导的刻蚀深度、调控锥形放大器的金属应力,提高了 MO 和 PA 两部分的偏振度,实现了放大器对种子源输出光场的电矢量进行高效放大,从而提升了 MOPA 半导体激光器的输出功率、偏振度和电光转换效率。

改变热沉温度,在  $5\sim 25^{\circ}C$  下测试了器件的连续输出功率和偏振特性。如图 6 所示,随着温度的增加,该 MOPA 器件在  $15A$  下的输出功率从  $11.71W$  下降至  $9.41W$ ,我们认为温度增加导致的载流子泄露和非辐射复合增强是功率下降的主要原因。在  $5\sim 15^{\circ}C$  温度范围内,输出功率可以保持在  $11W$  以上,更高的温度下器件的 P-I 曲线出现热饱和现象。另外,随热沉温度的增加,器件的偏振度则从  $91.1%$  下降至  $84.8%$ ,仍能维持较高的偏振度。这说明在  $5\sim 15^{\circ}C$  的温度范围内,器件性能可以拥有很高的稳定性。

#### 四 总结

我们研究了片上集成 MOPA 激光器的偏振特性,分别研究了脊型波导和锥形放大器的偏振调控

方法。脊型波导中,通过深刻蚀设计提高了 TE 模式的光限制因子;而在锥形放大器中,通过调整金属电极的厚度差以增强量子阱的压应变,从而增强 TE 模式的材料增益。结合这两种技术方案,在  $15^{\circ}C$  水温下, MOPA 器件的输出功率大于  $11.57W @ 15A$ ,偏振度大于  $90%$  的 MOPA 器件,可以作为偏振相关的合束方案中理想的高亮度半导体激光器光源。

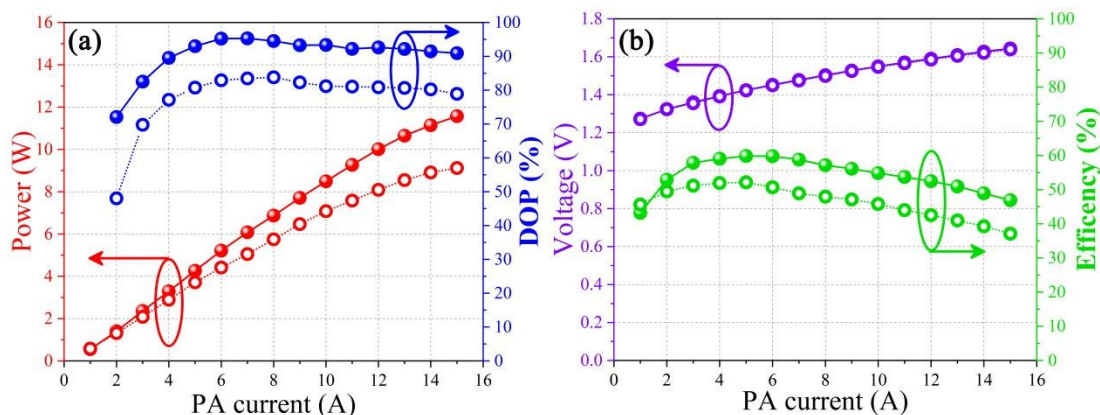


图 5 改善前、后 MOPA 器件的(a)功率、偏振度和(b)电压、转换效率随偏置电流的变化曲线

Figure 5 (a) The power and DOP (b) voltage and efficiency of MOPA lasers as a function of PA current before and after enhancement

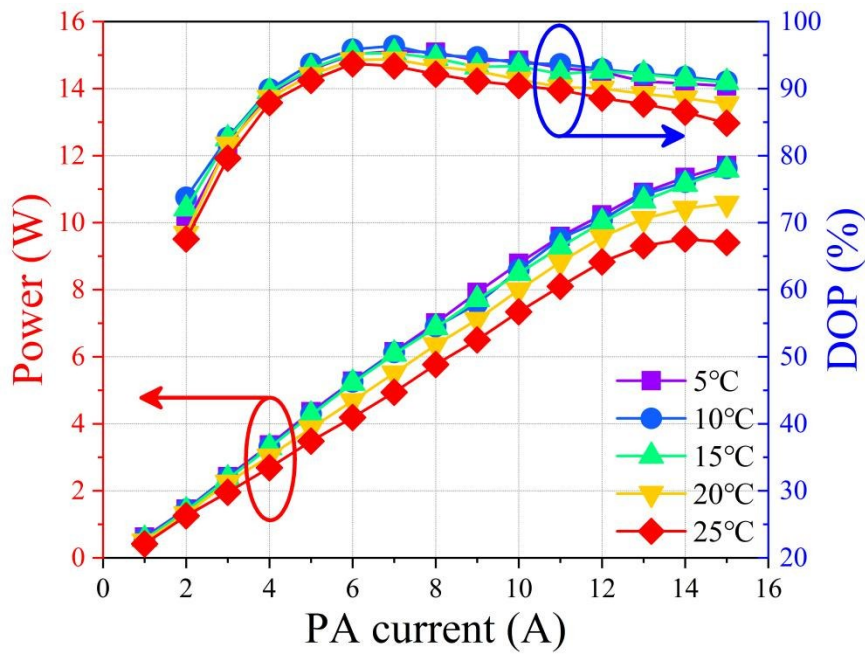


图 6 MOPA 器件的功率和偏振度随热沉温度的变化: Figure (6) The impact of heat sink temperature on the power and DOP of MOPA device

#### 参考文献

- [1] KÖNIG H, ZEDIKER M S, GRÖNNINGER G, *et al.* Scaling brilliance of high power laser diodes [M]. High-Power Diode Laser Technology and Applications VIII. 2010.
- [2] PASCHKE K, SUMPF B, DITTMAR F, *et al.* Nearly diffraction limited 980-nm tapered diode lasers with an output power of 7.7 W [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, **11**(5): 1223-7.
- [3] BELYANIN A A, SMOWTON P M, MÜLLER A, *et al.* 1030nm DBR tapered diode laser with up to 16 W of optical output power [M]. Novel In-Plane Semiconductor Lasers XVI. 2017.
- [4] 杜维川, 何林安, 弋李, *et al.* 10W 近衍射极限输出的高效率窄线宽主控振荡放大半导体激光器 [J]. *Journal of Millimeter Waves*, 2023, **42**(1):
- [5] HE L A, DU W, LI Y, *et al.* Investigation of the gain match in high brightness 980 nm tapered diode laser [J]. *Journal of Luminescence*, 2023, **257**
- [6] ZEDIKER M S, ROSENKRANTZ E, YANSON D, *et al.* High-power laser diodes with high polarization purity [M]. High-Power Diode Laser Technology XV. 2017.
- [7] BAE S-J, LEE Y-T. Tensile-strained 1.3  $\mu\text{m}$  InGaAs/InGaAlAs quantum well structure of high temperature characteristics [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2009, **40**(10): 749-56.
- [8] 沈力, 皮浩洋, 辛国锋, *et al.* 半导体激光器阵列偏振特性及其与应力关系的实验研究 [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(5):