光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024022103

# 高温高斜率效率 1 060 nm 单模半导体激光器

李睿骁*，卢翔孟，赵　伦，张雪阳，廖苗苗，罗庆春，邹佩洪，邱高山，张　靖

（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

**摘　要：** 1 060 nm 半导体激光器在高能激光系统种子源、空间激光雷达等领域具有广泛的应用，受限于砷化镓体系 InGaAs 量子阱材料大应力，在 1 060 nm 波段激光器外延生长缺陷密度较高，且由于目前该波段激光器结构设计普遍采用窄波导结构，腔内损耗和非辐射复合水平较高，激光器斜率效率较低，高温特性较差。传统 InGaAs 压应变量子阱势垒高度较低加剧了激光器的高温特性劣化。文章通过优化激光器外延生长条件并采用应变补偿量子阱结构和厚 N 包层结构，精确控制材料应力和势垒高度，降低腔内损耗，减小远场发散角，研制出了一种高性能 1 060 nm 单模半导体激光器，斜率效率在 85 ℃时依然超过 0.9 W/A。此外，通过引入分布式反馈激光器悬浮掩埋光栅结构实现了激光器波长锁定，斜率效率超过 0.7 W/A。

**关键词：** 单模激光器；1 060 nm 半导体激光器；分布式反馈激光器；高斜率效率

**中图分类号：** TN248.4；O436　**文章编号：** 1001－5868(2024)04－0558－04

## High-temperature High-slope-efficiency 1 060 nm Single-mode Semiconductor Laser

LI Ruixiao, LU Xiangmeng, ZHAO Lun, ZHANG Xueyang, LIAO Miaomiao,
LUO Qingchun, ZOU Peihong, QIU Gaoshan, ZHANG Jing

(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

**Abstract:** Currently, 1 060 nm semiconductor lasers are widely applied in areas that include space LiDAR and high-energy laser systems. Because of the high stress of InGaAs on a GaAs substrate, 1 060 nm semiconductor lasers usually have a large number of defects. In addition, 1 060 nm semiconductor lasers always have a thin waveguide layer for a large confinement factor. This produces a large cavity loss and non-radiation combination, which leads to poor slope efficiency and high-temperature characteristics. Moreover, the conventional GaAs barrier cannot effectively confine the carriers in the quantum well, which degrades its performance when the operating temperature is high. This study optimized the growth conditions and applied stress-compensated quantum wells to effectively control the stress and barrier height. Enlarging the *N* cladding thickness also reduced the loss in the cavity. Consequently, we invented a high-performance 1 060 nm semiconductor laser, which had a slope efficiency as high as ever recorded (0.9 W/A) at both room and high temperature. Through the buried DFB grating, it also realized operation in a single longitudinal mode with a high slope efficiency of 0.7 W/A.

**Key words:** single-mode laser; 1 060 nm semiconductor laser; DFB laser; high slope efficiency

## 0　引言

1 060 nm 单模半导体激光器被广泛应用于光纤激光器种子源、激光泵浦源等领域，其温度特性和斜率效率对特种应用环境及低能耗应用场景有重要影响。目前的 1 060 nm激光器主要基于砷化镓

**收稿日期：**2024－02－21.

* **通信作者：**李睿骁

材料体系和铟镓砷量子阱结构，量子阱铟组分含量较高，相对砷化镓的应力可以达到2%以上，属于大应变材料，外延生长难度大，材料易翘曲，易引入缺陷，从而造成激光器的损耗增加和斜率效率降低。此外，铟镓砷量子阱带隙较大，与传统GaAs无应变垒所形成的势垒高度较低，载流子限制能力较弱，高温情况下的载流子溢出情况较为明显，非辐射复合机率较大，高温劣化特性较为显著。

相较于974 nm，808 nm和传统通信的O，C，L波段激光器，1 060 nm单模半导体激光器相关研究较少。侧向微纳结构高阶模抑制是一种有效的大脊宽单模技术，在120 μm脊宽的条件下仍然可获得近高斯分布的远场图样，但由于脊宽增加，载流子密度降低，其激光器阈值超过100 mA，输出功率为130 mW，斜率效率仅为0.27 W/A，其基于分布式布拉格反射镜的波长锁定激光器斜率效率为0.1 W/A[1-2]。中科院半导体所的张娜玲等通过锥形脊波导结构并采用GaAsP势垒实现了高达2 W的近高斯分布光场输出，但斜率效率较低，仅为0.61 W/A[3]。Wang等运用InGaAs量子阱和GaAs势垒并采用800 nm大光腔制备了分布式布拉格反馈激光器，通过双沟脊波导实现了大电流下的基模工作，边模抑制比超过45 dB，但阈值超过50 mA，且斜率效率仅为0.55 W/A[4]。通过引入应变补偿可以显著提升激光器的载流子注入效率和高温可靠性，张岩等运用该技术实现了65 ℃下的高温工作，最大斜率效率达到1 W/A，但所采用的GaAs材料能带结构限制了1 060 nm激光器工作温度的进一步突破，且其垂直发散角高达43°以上，为光纤耦合等封装工艺带来了较大挑战，同时，该研究未提及在掩埋光栅等复杂工艺影响下的性能变化情况[5]。FBH提出扩展激光器波导层厚度对增大激光器输出功率有显著影响，并对波导层厚度与高阶模式之间的关系进行论证，提出一种大光腔非对称波导结构，该结构可大幅降低光场密度和腔内损耗，同时能够抑制高阶模激射，对大功率高效率1 060 nm激光器结构设计提供了新可能，但大光腔一般意味着更低的光限制因子，将会导致阈值较高[6]。

本研究通过采用应变补偿量子阱，在降低材料应力的同时，增大量子阱势垒高度从而加强载流子限制作用，同时增加波导层和包层的Al组分，设计出渐变过渡的能带结构，降低工作电压。此外，研究摒弃了此前多被采用的窄波导结构，将波导层厚度提升至1 μm，等效光场直径达到0.47 μm以上，腔内损耗得到有效改善。经过上述措施，所制备的1 060 nm单模半导体激光器输出功率达到200 mW以上，斜率效率达到0.94 W/A，其光场呈现出高斯分布特性，体现了其良好的单模特性，该特性在85 ℃高温环境下得到了很好的延续，斜率效率仍然高于0.9 W/A。为验证该结构在波长锁定技术中的应用，通过GaAs/GaInP/GaAs悬浮光栅对纵模进行选择，制备出中心波长为1 059.92 nm的单频半导体激光器，输出功率达到150 mW以上，斜率效率达到0.7 W/A，达到国内领先水平。

## 1 激光器结构设计

图1展示了1 060 nm单模半导体激光器的结构，其从下往上由GaAs衬底、GaAs缓冲层、高折射率的AlGaAs N型包层、低折射率的AlGaAs无掺杂波导层、嵌在波导层内的应变补偿量子阱、高折射率的AlGaAs P型包层和高掺杂N型接触层构成。脊波导结构用于控制光场的横向模式，双沟则用于实现电流约束，其同时对增加高阶模泄露有一定意义。脊波导的高度与激光器的模式稳定性关系显著，为控制脊波导高度，本结构在包层中嵌入GaInP阻刻层，通过选择性腐蚀确保晶圆面内的脊波导形貌一致。该结构中采用的GaAsP势垒如图2所示可以达到0.32 eV，对载流子（尤其是高温状态下）限制作用显著。AlGaAs材料往往可以实现更高的势垒，但在量子阱等光场集中的区域引入含Al材料会大幅降低激光器的可靠性，这将对腔面镀膜等工艺提出更高要求。为降低光子密度、减轻腔内损耗，减小远场发散角，该结构增加了N包层厚度，从图3中可以看出光场分布得到了有效展宽。

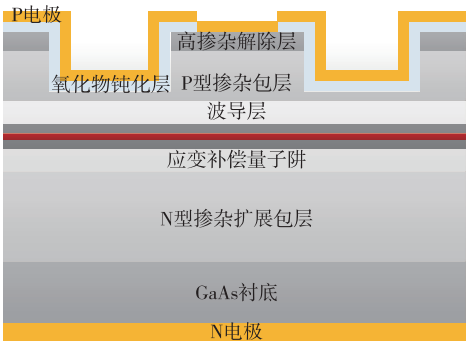



图1 1 060 nm单模半导体激光器的结构示意图

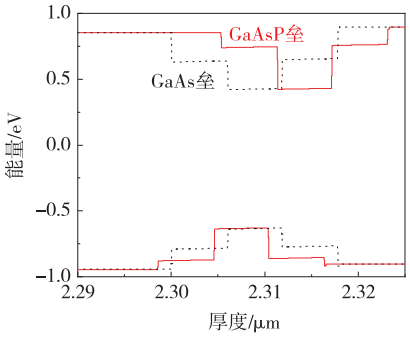


图 2　GaAsP 和 GaAs 势垒对比图

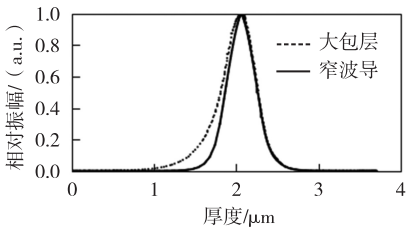


图 3　窄波导和大包层结构的近场分布图

## 2　单模激光器实验结果

### 2.1　单模激光器制备方法

为实现激光器单模工作，首先需进行脊波导形成工艺，脊波导宽度限制在 5 μm 以内，由于传统的 GaAs/AlGaAs 材料体系湿法腐蚀选择比较低，湿法工艺脊形呈正梯形，在极端条件下甚至会出现三角形脊等情况，这将对电流注入和模式控制造成不利影响。因此，本文将采用 ICP 干法刻蚀和湿法腐蚀相结合的背波导形成工艺，通过控制 ICP 刻蚀条件保证脊波导垂直度，并采用湿法腐蚀改善刻蚀面形貌并精确控制刻蚀深度。脊波导形成后，需进行电介质膜溅射实现电隔离，在脊波导表面的电介质膜上运用自对准工艺完成电极窗口的制备。P 电极选取 Ti/Pt/Au 作为蒸镀材料，在适当的温度下与高掺杂的 GaAs 接触层形成合金，实现低接触电阻。在 P 电极工艺完成后，经过减薄、N 型电极蒸镀、解离、镀膜等工艺即可完成单模激光器芯片的制备。

### 2.2　单模激光器性能及分析

常温工况下的激光器芯片性能测试结果如图 4 所示。图 4 为激光芯片的输出功率曲线，受限于芯片测试平台探测器饱和功率，连续电流扫描测试仅进行至输出功率为 60 mW，经 TO 器件级封装后测得功率曲线延长线上的点。从图中可以看出，该芯片阈值仅为 19 mA，最高斜率效率达到 0.94 W/A，输出功率在 TO 器件级测试中达到了 220 mW。为验证激光器芯片在高功率下的模式特征，本研究在输出功率为 220 mW 时进行了远场测试，测试结果如图 5～6 所示，其远场光场分布曲线为高斯分布，曲线不稳定波动主要源于探测器的灵敏度和噪声。从图中可以看出通过引入大包层设计，激光器芯片远场发散角从 43°降低到 30°，且阈值不到 20 mA。

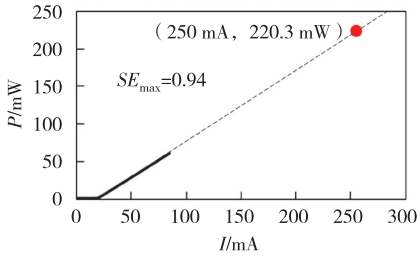


图 4　常温下的单模半导体激光器功率特性

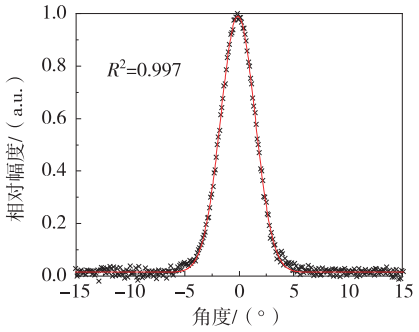


图 5　常温下单模激光器 $x$ 轴远场特性

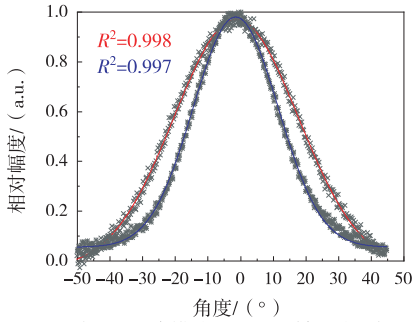


图 6　常温下单模激光器 $y$ 轴远场特性

本研究将工作温度设置为 85 ℃完成了输出功率测试，并进行了高温老化试验，其测试结果如图 7 所示。由于模式增益在高温下的劣化，激光器芯片阈值电流升至 45 mA，但斜率效率基本不变，仍维持在 0.9 W/A 以上。在高温老化试验中，激光器经历 600 h 的 85 ℃高温工作，其输出功率仅下降不到 3.0%，这表明该材料具备低缺陷和高可靠性。

蝶形封装是 1 060 nm 单模激光器最广泛的应用形式之一，本研究运用楔形光纤设计了一套低成本蝶形封装方案，其蝶形封装模块的功率斜率效率达到 0.72 W/A，最大功率达到 154.8 mW，在同品类产品中属于领先水平。

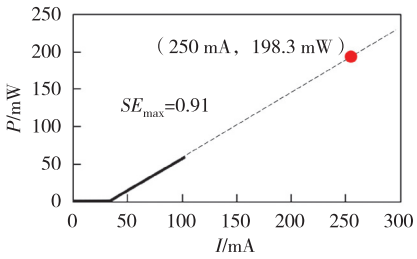



图 7 85 ℃高温下的单模半导体激光器功率特性

## 3 波长锁定激光器实验结果

### 3.1 波长锁定激光器结构设计和制备方法

为实现单模激光器波长锁定，本研究采用了如图 8 所示的 GaAs/GaInP/GaAs 悬浮光栅结构，其基本制备工艺与单模激光器相同，但在外延生长阶段需采用电子束直写或全息干涉曝光的方式再一次外延片表面完成光栅制备，随后在保证光栅形貌的基础上完成后续外延层的生长。在这里，悬浮光栅设置于 P 型包层内，光栅的 $kL$ 设置为 1。

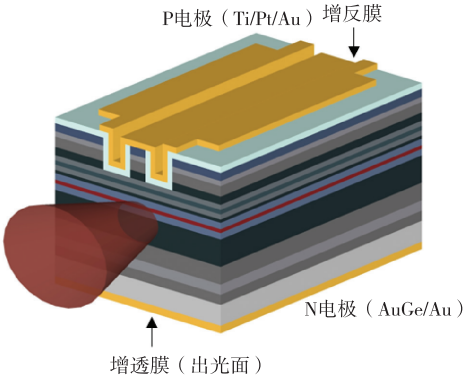
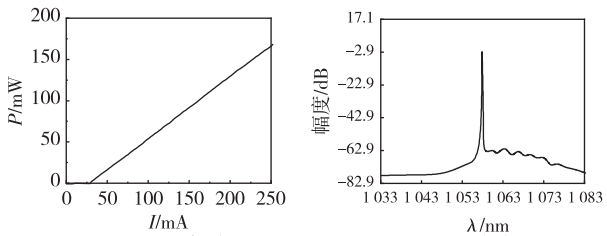



图 8 波长锁定激光器结构

### 3.2 波长锁定激光器性能及分析

图 9(a)是制备的波长锁定激光器输出功率情况，激光器芯片阈值电流仅为 30 mA，输出斜率效率高达 0.75 W/A，同时根据如图 9(b)所示的光谱特性测试显示，该激光器波长被锁定在 1 059.9 nm，边模抑制比达到 53 dB 以上。




(a) 输出功率特性 (b) 光谱特性

图 9 波长锁定激光器性能曲线

## 4 结论和展望

本研究通过插入层等外延手段生长了应变补偿量子阱，该结构有效增强了载流子限制作用，激光器芯片在 85 ℃高温下的斜率效率特性与常温下基本一致，且在 600 h 高温老化后，功率变化率仅为 3%。本研究增加波导层厚度至 1 μm，形成了大光腔结构，该结构有效降低了腔内的光子密度和损耗，激光器芯片斜率效率达到 0.94 W/A。此外，本研究通过悬浮光栅技术实现了激光器波长锁定，边模抑制比达到 53 dB 以上，斜率效率超过 0.75 W/A。未来可以通过增加量子阱对数进一步降低激光器阈值，也可以通过增加波导层厚度并结合掺杂渐变技术和脊波导结构设计来实现超大光腔单模工作，以进一步降低光束发散角，实现圆形光斑，从而为降低耦合及整形光学系统复杂度提供支撑。

**参考文献：**

[1] 齐 军，邹永刚，范 杰，等. 1 064 nm 侧向微结构宽脊波导半导体激光器[J]. 中国激光，2021，48(13)：45-52.
Qi Jun，Zou Yonggang，Fan Jie，et al. 1 064 nm wide-ridge waveguide semiconductor laser with lateral microstructure[J]. Chinese J. of Lasers，2021，48(13)：45-52.

[2] 王 皓. 1 064 nm DBR 半导体激光器结构的研究[J]. 电子测试，2017，(Z1)：17-18.
Wang Hao. Study on the structure of 1 064 nm DBR semiconductor laser[J]. Electronic Test，2017，(Z1)：17-18.

[3] 张娜玲，井红旗，袁庆贺，等. 高功率 1 060 nm 锥形激光器[J]. 光学学报，2022，42(5)：145-150.
Zhang Naling，Jing Hongqi，Yuan Qinghe，et al. High power 1 060 nm tapered laser[J]. Acta Optica Sinica，2022，42(5)：145-150.

[4] Wang Wei，Zhai Teng，Wang Hao，et al. Distributed feedback semiconductor laser with double-trench ridge waveguide structure[J]. Acta Photonica Sinica，2017，46(6)：158-163.

[5] 张 岩，王彦照，李庆伟，等. 高可靠性 1 060 nm 单横模半导体激光器[J]. 半导体技术，2018，43(9)：659-663.
Zhang Yan，Wang Yanzhao，Li Qingwei，et al. High reliability 1 060 nm single lateral mode semiconductor lasers [J]. Semiconductor Devices，2018，43(9)：659-663.

[6] Spiessberger S，Schiemangk M，Wicht A，et al. Narrow linewidth DFB lasers emitting near a wavelength of 1 064 nm [J]. J. Lightwave Technol.，2010，28(17)：2611-2616.

**作者简介：**

**李睿骁**(1994—)，男，陕西省咸阳市人，博士，主要研究方向为半导体激光器和光子集成技术。