光子和光电子集成专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022032904

# 用于共封装光学的高功率连续波DFB激光器

刘　耀[1]，黄永光[1,2]*，张瑞康[1,2]，刘祎慧[2]

（1. 河南仕佳光子科技股份有限公司，河南 鹤壁 458030；
2. 中国科学院半导体研究所 半导体材料科学重点实验室，北京 100083）

**摘　要：** 为了应对共封装光学(CPO)系统对硅光外置光源提出的高功率、低噪声、低功耗等要求，设计了一种波长在1 310 nm附近的AlGaInAs多量子阱(MQW)高功率连续波(CW)分布反馈(DFB)激光器芯片。通过在有源层MQW的下方插入一层InGaAsP远场减小层，实现光模场向n型包层下移，减小远场发散角的同时降低了量子阱区的光限制因子和整体的光吸收损耗，制作的激光器可以实现高斜率效率、非致冷高温高功率工作。测试结果显示，该激光器在25 ℃下，阈值电流为20 mA，斜率效率为0.46 W/A，输出功率为173 mW@400 mA；当注入电流为300 mA时，激光器的水平和竖直发散角分别是15.2°和19.1°，边模抑制比大于55 dB，洛伦兹线宽小于600 kHz，相对强度噪声(RIN)小于－155 dB/Hz；在85 ℃高温下，激光器阈值电流为32 mA，输出功率达到112 mW@400 mA。

**关键词：** 共封装光学；连续波；多量子阱；AlGaInAs；分布反馈激光器

**中图分类号：** TN248.4　**文章编号：** 1001－5868(2022)02－0267－06

## High-Power CW-DFB Laser for Co-Packaged Optics

LIU Yao[1], HUANG Yongguang[1,2], ZHANG Ruikang[1,2], LIU Yihui[2]

(1. Henan Shijia Photons Technology Co. Ltd., Hebi 458030, CHN; 2. Key Lab. of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, CHN)

**Abstract:** In order to meet the requirements of co-packaged optics (CPO) system, a multi-quantum well (MQW) continuous wave (CW) high-power distributed feedback (DFB) laser with high power, low noise and low loss is designed with the wavelength of 1 310 nm. There is a specially optimized far-field reduction layer (FRL) below the MQW active layers to pull optical mode into the lower n-cladding layers. This design can reduce the internal loss of waveguide and the optical confinement factor. The fabricated DFB laser exhibits high slope efficiency and enables uncooled CW operation at high ambient temperatures. Test results indicate that the output power, threshold current and slope efficiency of the DFB laser are achieved to 173 mW@400 mA, 20 mA and 0.46 mW/mA at 25 ℃, respectively. When the injection current is 300 mA, the far-field patterns divergence angle is 15.2°×19.1°, the sidemode suppression ratio (SMSR) is higher than 55 dB, the relative intensity noise (RIN) of laser is less than －155 dB/Hz, and the Lorentz linewidth is less than 600 kHz. The output power and the threshold current of the DFB are achieved to 112 mW@400 mA and 32 mA at 85 ℃, respectively.

**Key words:** co-packaged optics (CPO); continuous wave (CW); multiple quantum well (MQW); AlGaInAs; distributed feedback (DFB) laser

**收稿日期：**2022－03－29.
**基金项目：**国家重点研发计划项目(2018YFB2201500).
* **通信作者：**黄永光　**E-mail:** huangyg@sjphotons.com

## 0 引言

共封装光学(CPO)技术[1-3]是面向新一代高速、大容量光通信及光互连应用最有前景的技术解决方案。共封装技术将光收发单元与 ASIC 芯片封装在一个封装体内,通过将光子器件和电子器件封装在同一个载板上,实现低功耗、高带宽的信号传输。基于硅基材料的光电芯片共封装技术发展最为迅速。然而,鉴于硅材料为间接带隙材料,自身不易发光,因此在硅基光电子芯片中其光源器件仍然需要依赖 InP/GaAs 材料的半导体激光器。目前,主流硅基光子学的高密度共封装技术将连续波(CW)激光器光源[4]单独外置,作为高密度封装体的外围可插拔单元。这样的设置有如下优点:一是实现了易失效光源元件的可更换和可标准化生产;二是激光器的外置减少了硅芯片单元的散热压力,有利于系统稳定性;三是外部光源单元可以灵活配置,如采用波分光源或者非致冷光源等。

2021 年光通信行业标准组织发布了连续波-波分复用多源协议《CW-WDM MSA Technical Specifications Rev 1.0》,对基于硅基光子学的高密度共封装光学、光学计算和人工智能等新兴应用的外置光源进行了初步的规范[5]。该协议要求连续波的外置激光器光源满足单模、高功率、低噪声、低功耗、连续稳定工作,对工作波长(O 波段)、最高相对强度噪声(RIN)、最低激光器功率等都做了明确的要求。

CW-DFB 激光器是目前 CPO 技术最优的外置光源选择。已有不少文献对 O 波段 DFB 激光器的高功率工作能力[6-9]进行了研究,发现有源区采用 InGaAsP 量子阱材料的大功率激光器存在特征温度较低[8]、高温性能差的问题。相比之下,AlGaInAs 材料结构的导带偏移量更大,对电子的限制作用更好。但由于存在较大的内部损耗等问题,有源区采用 AlGaInAs 量子阱材料的大功率激光器在实际制作方面也存在诸多难点。Piprek 等分析了限制 AlGaInAs DFB 激光器实现大功率、稳定工作的限制因素,通过采用非对称的 p 型限制层和 n 型限制层优化光场分布的方法提升了激光器的输出功率[8]。2019 年,本文作者报告了采用插入远场减小层调整光模场分布的方案,制作了基于 AlGaInAs 量子阱材料的高功率 CW-DFB 激光器,实现了激光功率在 75 ℃ 下大于 60 mW@250 mA[9]。

本文针对 CPO 提出的更高性能的外置光源的需求,对压应变 AlGaInAs 量子阱的 CW-DFB 激光器芯片进行了优化设计。通过对波导结构中引入的远场减小层位置、厚度、组分等的优化设计有效减小了远场发散角,提升了激光器的斜率效率。制作了双沟脊波导形状的 CW-DFB 激光器,该激光器工作波长在 1 310 nm 附近,室温下斜率效率为 0.46 mW/mA,输出功率为 173 mW@400 mA,洛伦兹线宽小于 600 kHz@300 mA,相对强度噪声(RIN)小于−155 dB/Hz@300 mA。

## 1 CW-DFB 芯片设计与制作

### 1.1 DFB 结构优化设计

提升 CW-DFB 激光器出光功率的主要措施包括增大光功率斜率效率、提高饱和电流和提升单模工作电流范围[10]。限制光功率升高的主要因素是热饱和现象和光学灾变损伤。当前研究的该款激光器芯片其热饱和现象是功率提升的主要限制因素。优化热饱和现象可以通过增加腔长、增大波导宽度、优化掺杂浓度减小内部损耗等方法,但是增大腔长、

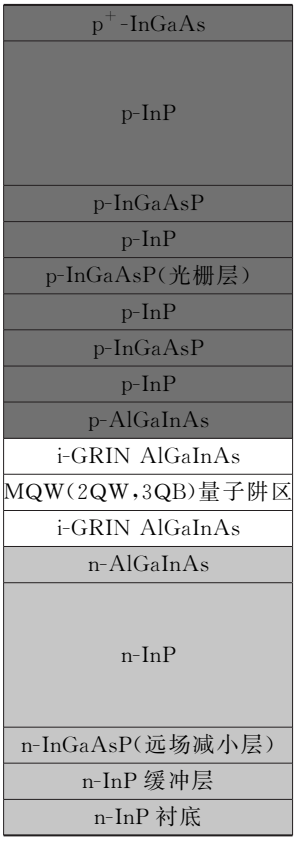
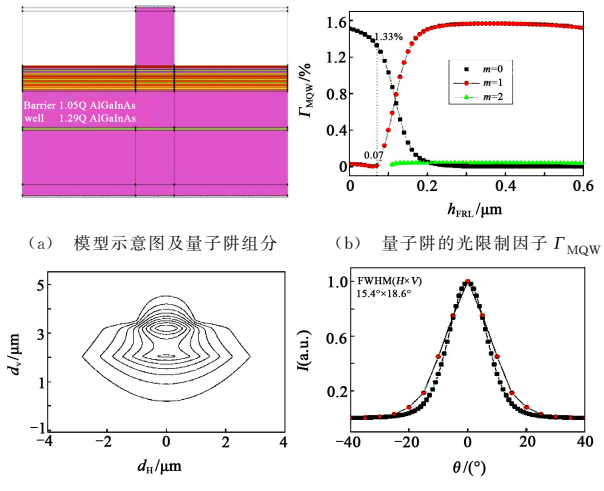



图 1 芯片外延结构

增大波导宽度等容易造成斜率效率下降，导致整体功耗偏大。虽然通过优化掺杂来减少内部损耗是目前提升功率的重要方法，但是降低掺杂可能导致电阻增大，同样可能造成使用中整体功耗过大。因为 p 型包层材料的光吸收远大于 n 型包层材料，半导体激光器的光吸收损耗主要来自于 p 型包层。为降低主要损耗、提升发光功率，采用特殊设计的波导结构将光场下拉到光损耗相对低的 n 型包层区是直接有效的措施，典型的方案如参考文献[8]所采用的 p 型包层薄、n 型包层厚的非对称渐变设计，以及文献[9]所采用的引入远场减小层的设计。本文采用的外延结构如图 1 所示，其典型特点是采用了两层应变为 1.37%的 AlGaInAs 量子阱材料，并在 n 型区插入了一层 InGaAsP 材料作为远场减小层（Far-Field Reduction Layer，FRL）。

图 2 给出应用波导模场理论模拟的 DFB 激光器的光限制因子和近场、远场光强分布。图 2(a)是波导结构模型图，其量子阱和量子垒分别由 1.29Q 和 1.05Q AlGaInAs 组成。图 2(b)展示了不同的 FRL 厚度下基模、一阶膜、二阶膜的量子阱区的光限制因子（$\Gamma_{MQW}$）；曲线表明 FRL 越厚，$\Gamma_{MQW}$ 越小。当 FRL 厚度 $h_{FRL}$ 为 70 nm 时激光器单模激射，基模的 $\Gamma_{MQW}=1.33\%$，而一阶模的光限制因子基本为 0；但是当 FRL 的厚度继续增大，基膜和一阶模将出现模式竞争，因此将 $h_{FRL}$ 控制在 70 nm。图 2(c)是 $h_{FRL}=70$ nm 的激光器光场强度的等高线分布图，可见激光器光场下移。图 2(d)是激光器远场发散角分布，按照半高全宽（FWHM）计算得出垂直远场发散角为 18.6°，水平发散角为 15.4°。




(a)　模型示意图及量子阱组分　　(b)　量子阱的光限制因子 $\Gamma_{MQW}$

(c)　出光面光场分布的等高线图　　(d)　远场发散角

图 2　DFB 激光器结构模拟结果

## 1.2　材料特性分析

通过提高激光器的内量子效率、降低激光器本征损耗来提高激光器的功率需要利用最终的材料优化实现。激光器输出功率的表达式为

$$P=\eta_{slope}(I-I_{th}) \tag{1}$$

式中，$\eta_{slope}$ 为斜率效率，$I$ 为注入电流，$I_{th}$ 为阈值电流。同样电流下，斜率效率越大，激光器功率越大。阈值电流相关的阈值条件表达式为

$$\Gamma g_{th}=\alpha_i+\alpha_m \tag{2}$$

式中，$\Gamma$ 为光限制因子，$g_{th}$ 为阈值增益，$\alpha_i$ 为本征损耗，$\alpha_m$ 为腔面损耗。腔面损耗 $\alpha_m$ 由激光器腔长和前后腔面的反射率决定。本征损耗 $\alpha_i$ 由激光器各层的光限制因子和载流子浓度决定。斜率效率的表达式为

$$\eta_{slope}=\eta\frac{h\nu}{q}\frac{\alpha_m}{\alpha_m+\alpha_i} \tag{3}$$

式中，$\eta$ 为内量子效率，影响内量子效率的主要因素是载流子的非辐射复合，包括量子阱区、波导区以及泄露到量子阱外的载流子。

按照设计结构，通过 MOCVD 设备生长了激光器材料，用此外延结构制作了 FP 激光器。通过 TEC 控温的测试工作台进行不同温度功率-电流（$P$-$I$）曲线的测试，提取不同腔长 FP 激光器 $I=100$ mA 时的斜率效率；应用式(1)～(3)求解出 FP 激光器在 25 ℃，$I=100$ mA 下的内量子效率 $\eta=0.84$ W/A，本征损耗 $\alpha_i=6.88$ cm$^{-1}$。从图 3 可以看出，随着温度的升高，内量子效率不断降低，85 ℃下该设计材料的内量子效率降低至 0.69 W/A。根据高温的内量子效率水平，该外延结构能满足高温无制冷工作。

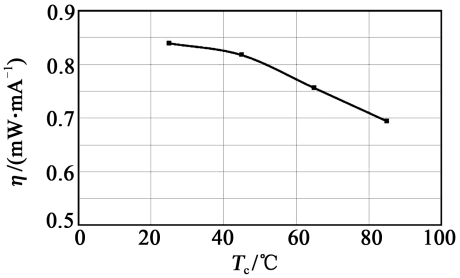



图 3　FP 激光器在不同温度下的内量子效率

## 1.3　激光器制作

制作双沟脊波导 DFB 激光器采用了两次外延生长。首先，采用金属有机化学气相外延沉积（MOCVD）生长一次外延结构；然后通过电子束光刻系统（EBL）制作光栅结构，随后再使用 MOCVD 二次外延，完成外延片生长。

为提高激光器的单模成品率和波长精确度，采用电子束光刻技术制作有源区光栅结构，借助电子束曝光技术可以微调光栅周期，得到不同波长的DFB激光器。图4为光栅掩膜图形的扫描电镜图片。波长和光栅周期的关系式为

$$\lambda = 2\Lambda n_{\mathrm{eff}} \tag{4}$$

式中，$\lambda$ 是波长，$\Lambda$ 是光栅周期，$n_{\mathrm{eff}}$ 是有效折射率。

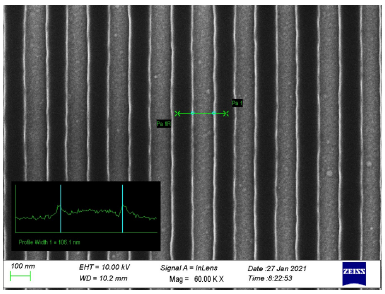


图4 光栅掩膜图形的SEM图

外延和晶圆工艺流程如图5所示，外延片生长完成后，进行晶圆工艺。晶圆工艺具体工艺步骤如下：(1)采用光刻制作波导图形后，用干法刻蚀和湿法腐蚀相结合的方法制作脊形波导结构。(2)在晶圆表面生长320 nm绝缘$SiO_2$介质膜。(3)通过光刻在脊波导顶端开出窗口，再用等离子体干法刻蚀脊波导顶端$SiO_2$，露出脊波导表面的InGaAs接触层，然后清洗胶膜。(4)光刻并制作电极图形，然后在p面蒸镀Ti/Pt/Au。(5)对p面金属进行电镀Au加厚。(6)将晶圆用蜡粘在磨盘上，对晶圆背面进行减薄。(7)在晶圆背面溅射AuGeNi合金，并退火去应力。

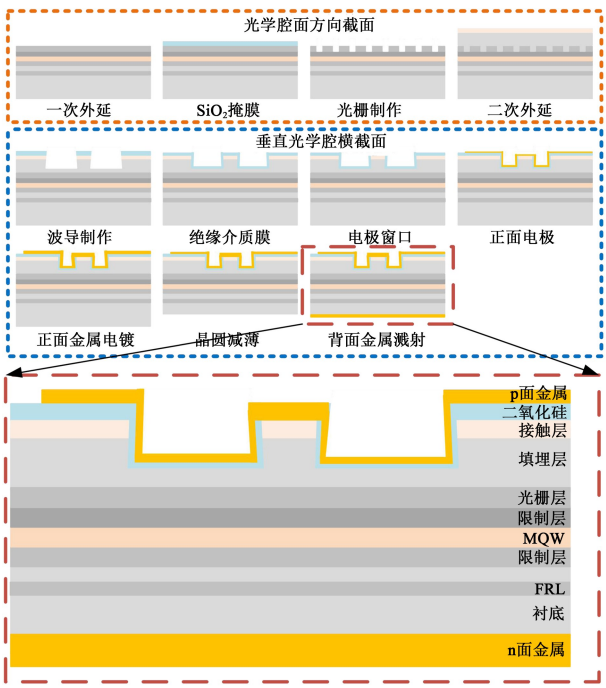



图5 外延和晶圆工艺流程图

晶圆工艺完成后，将晶圆解理为Bar条在端面镀上光学膜，光学膜AR面反射率为0.1%，HR面反射率为97.3%，最后将Bar条解离成激光器芯片，图6给出该芯片显微镜下的图片，图中标示了激光器芯片的具体尺寸。

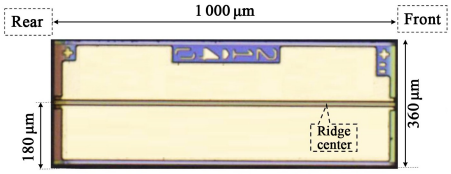



图6 芯片显微镜照片

## 2 器件性能

图7为制作的DFB激光器在不同温度下的功率-电流($P$-$I$)曲线，图中测试温度后续标注为$T_c$指的是芯片测试台的TEC控温温度。当$T_c$在−10～85 ℃变化时，注入电流从0增加至400 mA，$P$-$I$曲线均不断上升，且曲线平滑。当$T_c$为25 ℃，功率是173 mW@400 mA，对应的斜率效率为0.46 mW/mA。当$T_c$在−10～85 ℃变化时，同样驱动电流下激光器芯片功率不断下降，阈值电流从20 mA上升至32 mA。尽管激光器的输出功率随着测试温度的升高而降低，但该器件在$T_c$=85 ℃、$I$=400 mA条件下，输出功率为112 mW。

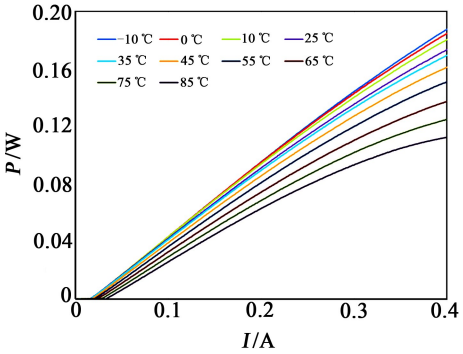



图7 不同温度条件下DFB激光器的$P$-$I$曲线

图8是测试温度$T_c$在−10～85 ℃变化、注入电流$I$=300 mA时的光谱图。随着温度的升高，激光器的中心波长红移，变化范围为1 304.68～1 313.44 nm，计算出中心波长随温度的平均漂移系数为0.092 nm/℃。在整个测试温度变化过程中，激光器都表现出很好的单模特性，边模抑制比

(SMSR)始终保持在 55 dB 以上。

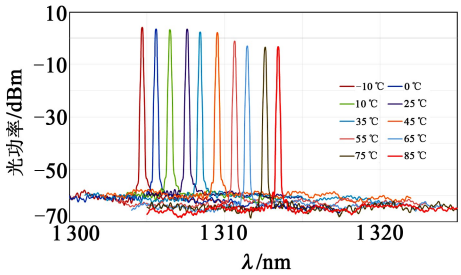



图 8　不同温度条件下 DFB 激光器光谱

小发散角有利于提高激光器对硅波导和光纤的耦合效率，从而在较低电流下实现同样的输出光功率，有助于降低系统功耗。采用探测器扫描系统进行了 $T_c$=25 ℃、$I$=300 mA 激光器的发散角测试。如图 9 所示，激光器的水平发散角为 15.2°，垂直发散角为 19.1°，与仿真结果相差不大。

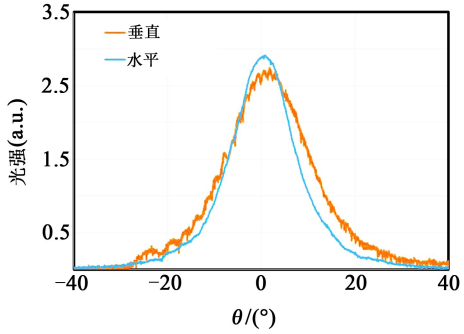



图 9　$T_c$=25 ℃，$I$=300 mA 下激光器远场发散角

激光器相对强度噪声(RIN)会造成接收机灵敏度劣化，影响整个链路的性能。为了测试方便，文中用于测试 RIN 和线宽的激光器，均为 CW-DFB 激光器芯片封装的成控温 TOSA。采用 SYCATUS A0010A 搭建的测试系统进行了 RIN 和相位噪声谱的测试。图 10 为 $T_c$=25 ℃，$I$=300 mA 下的 RIN 测试结果，可以看到在 10 MHz～20 GHz，激光器的RIN值均小于−155 dB/Hz，满足多源协议小

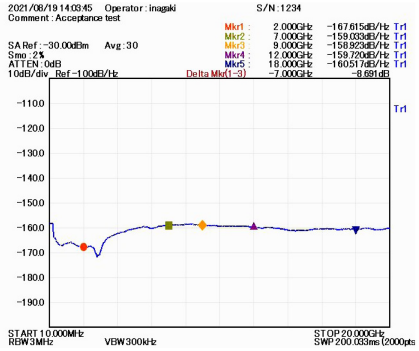


图 10　$T_c$=25 ℃，$I$=300 mA 下 CW-DFB 激光器 RIN 谱

于−135 dB/Hz 的要求。图 11 为 $T_c$=25 ℃，$I$=300 mA 下相位噪声曲线图，软件自动拟合曲线数据，得到洛伦兹线宽小于 600 kHz，满足 WDM 多源协议小于 20 MHz 的需求。

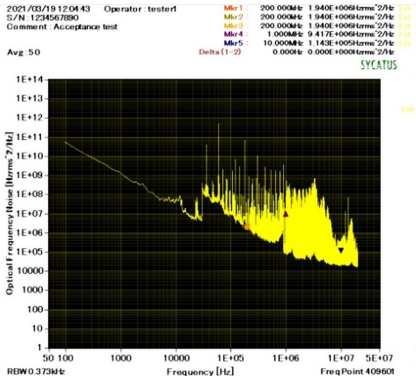



图 11　$T_c$=25 ℃，$I$=300 mA 下 CW-DFB 激光器相位噪声谱

## 3　结论

本文报道了一种基于 n 型 InGaAsP 远场减小层设计的高功率小发散角的 CW DFB 激光器。测试结果表明：在 25 ℃ 下，该激光器功率达到 173 mW@400 mA，斜率效率为 0.46 W/A，工作波长在 O 波段，远场发散角的水平轴和垂直轴均小于 20°，边模抑制比大于 55 dB@300 mA，洛伦兹线宽小于 600 kHz，RIN 小于−155 dB/Hz，该性能满足 CW-WDM MSA 多源协议的要求，可以支持 CPO 应用。

**参考文献：**

[1] Krishnamoorthy A V, Thacker H D, Torudbakken O, et al. From chip to cloud: Optical interconnects in engineered systems[J]. J. of Lightwave Technol., 2017, 35(99): 3103-3115.

[2] 孙　瑜，刘丰满，薛海韵. 高速高密度光电共封装技术[J]. 中兴通讯技术，2018，24(4)：27-32.
Sun Yu, Liu Fengman, Xue Haiyun. High-speed and high-density optoelectronic co-package technologies [J]. ZTE Technology J., 2018, 24(4): 27-32.

[3] Fathololoumi S, Nguyen K, Mahalingam H, et al. 1.6 Tbps silicon photonics integrated circuit for co-packaged optical-IO switch applications[C]// IEEE Optical Fiber Communication Conf., 2020.

[4] Johnson J E, Bacher K, Schaevitz R, et al. Performance and reliability of advanced CW lasers for silicon photonics applications[C]// 2022 Optical Fiber Communications Conf. and Exhibition (OFC), San Diego, CA, USA, 2022.

[5] CW-WDM MSA. CW-WDM MSA technical specifications Rev

1.0[EB/OL]. https://cw-wdm.org/(2022-04-02).

[6] Mathur A, Ziari M. High power 1.3 μm DFB lasers[J]. Electron. Lett., 1998, 34(24): 2334-2336.

[7] Garbuzov D Z, Maiorov M A, Menna R J, et al. High-power 1 300 nm Fabry-Perot and DFB ridge-waveguide lasers[J]. Proc. of SPIE-The International Society for Optical Engin., 2002, 4651: 92-100.

[8] Piprek J, White J K, Springthorpe A J. What limits the maximum output power of long-wavelength AlGaInAs/InP laser diodes? [J]. IEEE J. of Quantum Electron., 2002, 38(9): 1253-1259.

[9] Liu Y, Wang J, Huang Y, et al. High-power AlGaInAs/InP DFB lasers with low divergence angle[C]// 2019 Conf. on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conf. (CLEO/Europe-EQEC), 2019.

[10] 王 皓. 高性能高速直调激光器与大功率DFB激光器研究[D]. 北京：中国科学院大学, 2019.
Wang Hao. Research on high performance high speed directly modulated laser and high power DFB laser[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.

## 作者简介：

**刘 耀**(1989—)，男，光学专业硕士，工程师，从事半导体激光器研发；

**黄永光**(1981—)，男，理学博士，中国科学院半导体研究所副研究员，中国科学院大学硕士生导师，河南仕佳光子科技股份有限公司有源技术总监，主要从事半导体激光器和光子集成芯片的设计与制造工艺研究。