

1.3 μm 高速直调半导体激光器

夏施君^{1,2,3}, 许博蕊^{1,2,3}, 徐鹏飞⁴, 包帅⁴, 王任凡⁵, 朱尧⁵, 李伟^{1,2,3}, 祝宁华^{1,2,3*}

¹中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083;

²中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049;

³中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049;

⁴江苏华兴激光科技股份有限公司, 江苏 徐州 221300;

⁵武汉敏芯半导体股份有限公司, 湖北 武汉 430223

摘要 设计一种基于 AlGaInAs 材料的 1.3 μm 高速直调半导体激光器, 该激光器采用脊波导、长度较短的腔和 11 个 5 nm 厚度的多量子阱结合 30 nm 厚度的缓变折射率分别限制异质结结构 (GRIN-SCH), 实现了低阈值、宽带宽和较大功率的光输出。采用均匀光栅和不对称腔面镀膜的方式实现了稳定的单纵模输出。最终制得的 1.3 μm 高速直调半导体激光器, 在室温下, 阈值电流为 7.5 mA, 3 dB 小信号调制带宽可达 25 GHz, 大信号背靠背传输速率可达 40 Gb/s, 斜率效率为 0.35 mW/mA, 最大输出功率约为 39 mW, 边模抑制比可达 40 dB。

关键词 激光器; 1.3 μm 直调激光器; 宽带宽; 大功率; 低阈值

中图分类号 O475

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1614001

1.3 μm High-Speed Directly Modulated Semiconductor Laser

Xia Shijun^{1,2,3}, Xu Borui^{1,2,3}, Xu Pengfei⁴, Bao Shuai⁴, Wang Renfan⁵, Zhu Yao⁵, Li Wei^{1,2,3},
Zhu Ninghua^{1,2,3*}

¹State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

²College of Materials Science and Opto-Electronics Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁴Jiangsu Huaxing Laser Technology Co., Ltd., Xuzhou 221300, Jiangsu, China;

⁵Wuhan Mindsemi Company Limited, Wuhan 430223, Hubei, China

Abstract A 1.3 μm high-speed directly modulated semiconductor laser based on AlGaInAs material is designed. The designed laser uses the ridge waveguide structure, the cavity with short length and eleven multi-quantum wells with thickness of 5 nm combined with the graded index separate confinement heterostructure (GRIN-SCH) with thickness of 30 nm to achieve laser output with low threshold, wide bandwidth and high power. A stable single longitudinal mode output is achieved by using uniform grating and asymmetric cavity surface coating. Based on the 1.3 μm high-speed directly modulated semiconductor laser at room temperature, the threshold current is about 7.5 mA, the 3 dB small signal modulation bandwidth can reach 25 GHz, the large signal back-to-back transmission rate can reach 40 Gb/s, the slope efficiency is 0.35 mW/mA, the maximum output power is about 39 mW, and the side mode rejection ratio can reach 40 dB.

Key words lasers; 1.3 μm directly modulated lasers; wide bandwidth; high power; low threshold

收稿日期: 2022-02-17; 修回日期: 2022-03-10; 录用日期: 2022-03-24

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB2201101, 2018YFE0201000)、国家自然科学基金(E0FY310001)、中国科学院战略性先导科技专项 B 类(XDB43000000)

通信作者: *nhzhu@semi.ac.cn

1 引言

进入信息化时代以来,人们对通信容量、信息收集整合与传输速度等性能的需求一直在增长。个人移动终端、家庭用户数据流量的激增为接入网带来了巨大的压力,传输速度为 10 Gb/s 的以太网已经难以满足数据高速传输的需求,进而需要速率更高的以太网来支持^[1-3]。大体而言,针对激光光场的调制手段可以被分为两种,一种为利用外部调制器件如电吸收调制器(EAM)或马赫-曾德尔调制器(MZM)的外调制,另一种则是直接将数据信号加载至激光器驱动电流上的直接调制。与外调制相比,直接调制具有结构简单、成本低、体积小、线性度高、可靠性高和稳定性高的优点,进而被广泛应用于数据中心、接入网和超级计算机的光通信系统中。因此,关于增大直接调制激光器带宽的研究具有重大意义^[4-6]。

20 世纪 90 年代开始,研究人员就在增大直调激光器带宽方面进行了大量研究,研究主要围绕 III-V 族材料 InGaAsP 和 AlGaInAs 展开^[6-9]。由于 $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ 材料体系具有更大的导带偏移量、对电子限制能力更强、可有效减小非辐射复合、可提升载流子注入效率且具有良好的温度特性,因此吸引了更多研究人员的注意^[10]。2008 年, Otsubo 等^[9]研制出了具有 15 个多量子阱(MQW)结构的掩埋异质结半导体激光器,在 25 °C 温度下, 阈值电流为 $I_{\text{th}} = 9.4 \text{ mA}$, 调制速率可达 25 Gb/s。2009 年, Tadokoro 等^[11]研制出了具有 8 个 AlGaInAs 多量子阱结构的脊波导结构半导体,在 25 °C 温度下, 阈值电流为 $I_{\text{th}} = 8.4 \text{ mA}$, 并可以获得 25 Gb/s 的调制速率。2019 年, Sasada 等^[12]通过优化 AlGaInAs 量子阱结构结合非对称波纹间距调制光栅结构制得直调激光器,该激光器在 25 °C 温度下 3 dB 带宽可达 34.2 GHz, 阈值电流为 $I_{\text{th}} = 8.5 \text{ mA}$ 。有源区多量子阱结构的设计是高速直调半导体激光器设计的关键点,随着量子阱个数的增加,器件的光限制因子和内损耗都会增加,进而对器件的阈值电流、出光功率和调制带宽都有较大的影响^[13]。同时,阈值电流、出光功率和调制带宽之间的关系往往是相互制约的。

为了缓解高速激光器阈值电流、出光功率和调制带宽的矛盾,本文提出了一种结构简单的 1.3 μm 波段的高速直调激光器,并对有源区多量子阱的结构进行了优化。激光器采用具有高微分增益的 AlGaInAs 多量子阱分别限制异质结结构,采用了 11 个 5 nm 厚度的多量子阱结构,在实现高速调制的同时,促进了阈值电流的降低和输出光功率的提高。

2 基本原理与器件制作

2.1 基本原理

直调激光器的调制带宽主要受限于弛豫振荡频率 f_r 、阻尼因子和电容电阻的乘积(RC 时间常数,其中 R 为电阻, C 为电容)。弛豫振荡频率的表达式^[14]为

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{v_g}{q} \Gamma \eta_i \frac{dg}{dN} (I_b - I_{\text{th}}) / V}, \quad (1)$$

式中: v_g 为群速度; q 为基本电荷; Γ 为有源区的光限制因子; η_i 为内量子效率; dg/dN 为微分增益; I_b 为偏置电流; V 为有源区体积; g 为增益系数; N 为载流子密度。一方面,可以通过增加光限制因子 Γ 、减小有源区体积 V 和增加微分增益 dg/dN 来提高弛豫振荡频率。另一方面,可以通过优化盖层掺杂浓度、减小接触电阻、减小电极图形尺寸和填充低介电常数的材料等方法来减小 RC 时间常数。

当阈值处的复合项主要考虑自发辐射和俄歇复合时,可以得到激光器的阈值表达式^[15],即

$$I_{\text{th}} = \frac{qV}{\eta_i} \left[BN_{\text{tr}}^2 e^{2(\langle \alpha_i \rangle + \alpha_m) / (r_{g_0})} + C' N_{\text{tr}}^3 e^{3(\langle \alpha_i \rangle + \alpha_m) / (r_{g_0})} \right], \quad (2)$$

式中: $\langle \alpha_i \rangle$ 为内部损耗; α_m 为腔面损耗; B 和 C' 分别为与自发辐射和俄歇复合有关的系数; N_{tr} 为透明载流子密度; g_0 为阈值增益系数。因此,可以通过增大光限制因子 Γ 、减小内部损耗 $\langle \alpha_i \rangle$ 、减小腔面损耗 α_m 和减小有源区体积 V 来减小阈值电流。

阈值以上的激光器载流子处于锁定状态,即增益处于稳态,此时激光器的出光功率表达式为

$$P_0 = \eta_i \left(\frac{\alpha_m}{\alpha_m + \langle \alpha_i \rangle} \right) \frac{hv}{q} (I - I_{\text{th}}), \quad (3)$$

式中: I 为驱动电流; h 为普朗克常数; v 为频率。由式(3)可以看出,当内损耗增大时,激光器的输出功率会降低。

综合而言,对于多量子阱结构的激光器而言,量子阱的个数越多,光限制因子呈现变大的趋势,而内损耗也在变大。利用 Crosslight 软件对本文中激光器的 AlGaInAs 量子阱结构进行仿真,仿真了 8~13 个 5 nm 厚度的多量子阱结构,仿真结果如图 1 所示。可以发现,随着多量子阱个数的增加,光限制因子在增加,而内损耗也在增加。在器件带宽增加的同时,器件的阈值电流和出光功率都会有所降低,故在结构设计时要兼顾光限制因子和内损耗的影响,最终本实验选择 11 个多 AlGaInAs 量子阱结构进行器件有源层的设计。

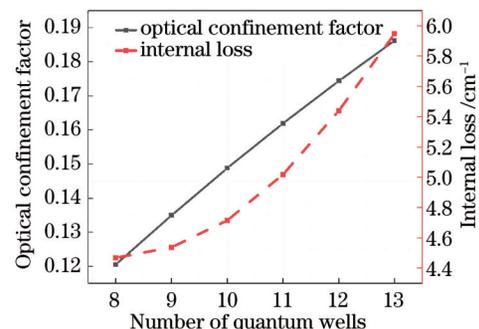


图 1 光限制因子和内损耗随量子阱个数变化的仿真结果
Fig. 1 Simulation results of optical confinement factor and internal loss varying with number of quantum wells

除了采用多量子阱层之外,还采用缓变折射率分别限制异质结结构(GRIN-SCH),其“漏斗”作用可以实现对光子和载流子的限制。同时,能对光场进行拓展以起到导波的作用,降低光能密度。采用腔长为 $200\ \mu\text{m}$ 、脊宽为 $2\ \mu\text{m}$ 的结构来减小有源区的体积。采用尺寸较小的电极图形和将光栅层设置在 N 型层中来降低器件的 RC 常数。上述设计方法均能有效减小器件带宽。

2.2 器件制作

图 2(a)为所提激光器的三维结构图。该激光器的腔长为 $200\ \mu\text{m}$ 、宽度为 $250\ \mu\text{m}$ 、脊宽为 $2\ \mu\text{m}$ 、侧向波导结构为双沟道脊波导结构。通过合理设计脊宽和

沟宽,高阶模可以泄漏到双边无增益的区域中,进而可以提高基模的单模稳定性^[16-17]。

图 2(b)为所提激光器三维结构的剖面图,也是材料的外延结构图,材料制备采用金属有机化合物化学气相沉积法(MOCVD)。在 N-InP 衬底上生长厚度为 $500\ \text{nm}$ 的 N-InP 缓冲层,在其后生长厚度为 $40\ \text{nm}$ 的一阶光栅周期为 $203\ \text{nm}$ 的 InGaAsP 均匀光栅层。值得注意的是,与传统的位于 P 型层中的光栅层不同,所提结构将光栅置于 N 型层中。由于在 N 型半导体材料中,传输电流的载流子是电子,电子具有比 P 型半导体中空穴更高的迁移率,因此可以减小寄生电阻,提高分布式反馈(DFB)激光器的调制速率^[18]。

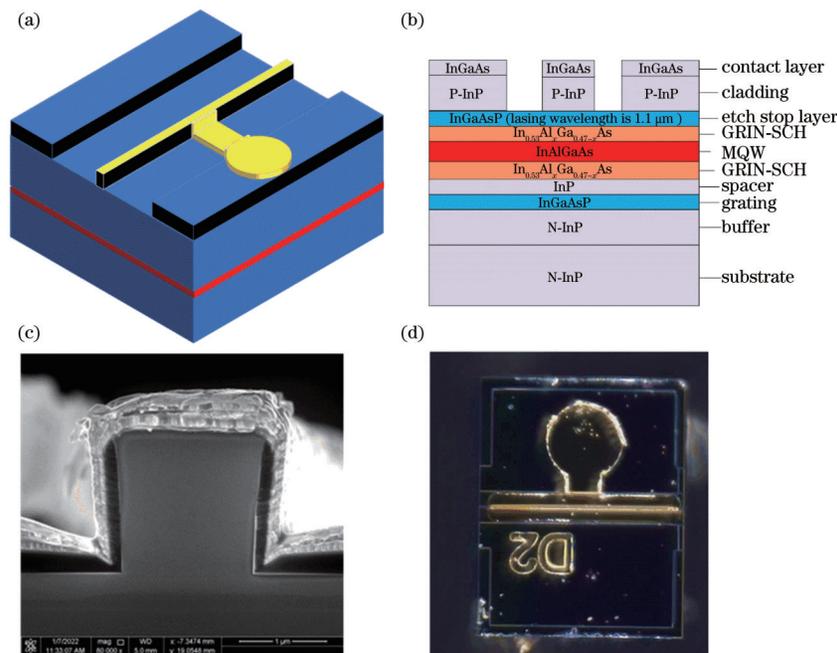


图 2 $1.3\ \mu\text{m}$ DFB 激光器。(a)激光器三维结构示意图;(b)激光器外延结构示意图;(c)激光器脊波导的扫描电子显微镜图;(d)实际制得的管芯的俯视图

Fig. 2 $1.3\ \mu\text{m}$ DFB laser. (a) Schematic diagram of three-dimensional structure of laser; (b) schematic diagram of epitaxial structure of laser; (c) scanning electron microscope diagram of ridge waveguide in laser; (d) top view of actual manufactured core

对于均匀光栅而言,DFB 激光器的激光模式并不是正好出现在布拉格波长处,而是对称地出现在布拉格波长两边^[19]。为获得稳定的单模输出,所提激光器采用均匀光栅结合不对称端面反射率来破坏双模对称性^[20],背光面镀高反膜,反射率为 95% ,出光面镀增透膜,反射率为 0.5% 。在采用全息法获得周期为 $203\ \text{nm}$ 的均匀光栅之后,进行二次外延,依次生长厚度为 $30\ \text{nm}$ 的 $\text{In}_{0.53}\text{Al}_x\text{Ga}_{0.47-x}\text{As}$ GRIN-SCH 的下限制层,11 个厚度为 $5\ \text{nm}$ 的 AlGaInAs 多量子阱有源层和厚度为 $30\ \text{nm}$ 的 $\text{In}_{0.53}\text{Al}_x\text{Ga}_{0.47-x}\text{As}$ GRIN-SCH 的上限制层。该激光器通过采用 11 个厚度为 $5\ \text{nm}$ 的多量子阱结构在保持了量子阱约束效应的同时,展现了有源层,使得光限制因子 Γ 增大并增加了模式增益。同时,实现了高速调制,进而有利于降低阈值电流和提高光功率输出^[13]。GRIN-SCH 层渐变的组分可以有效改善晶格的匹配度和提高晶体外延质量,减少内部的缺陷和非

辐射复合中心的数量,同时又起到导波的作用,降低光能密度^[21-22]。在生长完上限制层以后,在其上生长 $20\ \text{nm}$ 厚的 InGaAsP 刻蚀终止层、 $1.6\ \mu\text{m}$ 厚的 InP 盖层和 $200\ \text{nm}$ 厚的 InGaAs 接触层,此时就完成了器件材料的生长。

在外延材料生长之后,进行双沟脊波导结构的制备。首先,一版光刻制作脊和沟道形貌。随后,采用感应耦合等离子体(ICP)干法刻蚀和湿法腐蚀相结合的方式制作 $13\ \mu\text{m}\text{-}2\ \mu\text{m}\text{-}13\ \mu\text{m}$ 的双沟脊波导结构,该结构可以增加高阶模式的损耗、抑制高阶模式的激射和实现稳定的基模激射。该双沟脊波导结构的扫描电子显微镜图如图 2(c)所示,脊宽为 $2\ \mu\text{m}$ 、脊高约为 $1.6\ \mu\text{m}$ 。随后,进行采用 PECVD 生长二氧化硅、二版光刻开电极窗口、三版光刻制作电极形貌、磁控溅射 P 面电极、P 面电极剥离、N 面减薄抛光,以及磁控溅射 N 面电极操作。接着,用解理机将芯片解理成腔长为

200 μm 的 bar 条,进行腔面镀膜,背光面镀高反膜,反射率为 95%,出光面镀增透膜,反射率是 0.5%。在镀膜后,用解理机将 bar 条解理成宽度为 250 μm 的管芯,如图 2(d)所示。其中,中心横向细条为激光器的脊波导,覆盖在脊上的矩形条和圆形盘为激光器的 P 面电极,电极圆盘直径为 60 μm ,使用小尺寸电极的目的是降低芯片电容,进而增加芯片带宽。此外,芯片腔长选用 200 μm 的目的是通过减少有源区的光子寿命来增加带宽。

3 实验结果与讨论

首先,将制得的尺寸为 200 $\mu\text{m} \times 250 \mu\text{m} \times 130 \mu\text{m}$ 的激光器管芯置于钢板上,在芯片测试平台上进行功率-电流-电压(P-I-V)测试和光谱测试,测试温度控制在 25 $^{\circ}\text{C}$,P-I-V 测试结果如图 3 所示。可以发现,芯片的电阻约为 8.5 Ω ,阈值电流为 $I_{\text{th}}=7.5 \text{ mA}$,斜率效率为 $M_{\text{SE}}=0.35 \text{ mW/mA}$,140 mA 电流下的最大输出功率为 $P_{\text{out}}=39 \text{ mW}$ 。

此外,测试了不同温度下的 P-I 曲线,其结果如图 4(a)所示。可以发现,不同温度下器件的阈值电流有所不同。激光器阈值电流与温度的关系为

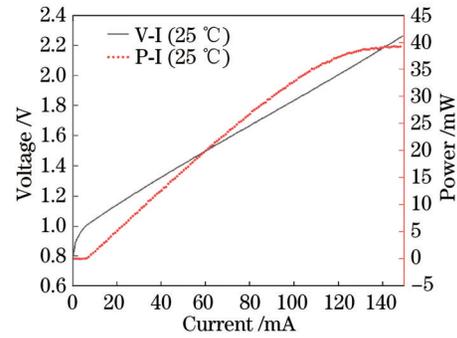
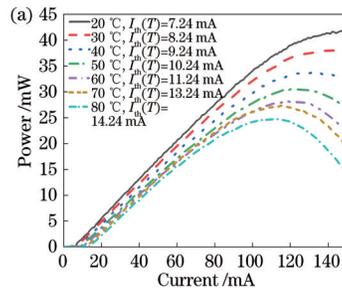


图 3 激光器 P-I-V 测试结果

Fig. 3 P-I-V test results of laser

$$I_{\text{th}}(T) = I_{\text{th}}(T_r) \exp\left(\frac{T - T_r}{T_0}\right), \quad (4)$$

式中: T_r 为室温; $I_{\text{th}}(T)$ 为芯片温度 T 下的阈值电流; T_0 为表征半导体激光器温度稳定性的重要参数,通常称为特征温度,激光器特征温度越大表示激光器性能越稳定。根据图 4(a)获得的信息绘制出阈值电流与温度的关系曲线并进行特征温度的拟合,其结果如图 4(b)所示,拟合计算可得激光器的特征温度为 88.3 K。

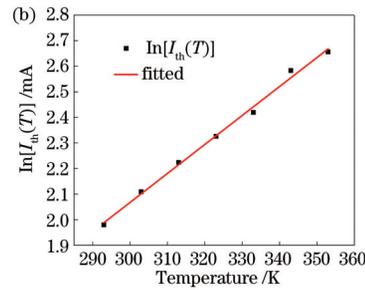


图 4 激光器的特征温度测试。(a) 20~80 $^{\circ}\text{C}$ 的 P-I 测试结果;(b) 阈值电流和温度的关系曲线,以及特征温度拟合

Fig. 4 Characteristic temperature test of laser. (a) P-I test results at 20~80 $^{\circ}\text{C}$; (b) relation curve between threshold current and temperature, and characteristic temperature fitting

实验测试了 25 $^{\circ}\text{C}$ 温度下器件在不同电流(10~70 mA)下的光谱图,如图 5 所示。可以发现,该器件可以实现稳定的单模输出,边模抑制比(SMSR)高达 40 dB。在电流为 30 mA 下,激光波长为 1310.6 nm,波长随着驱动电流的增大而发生红移,波长的电流漂移系数为 0.025 nm/mA。当注入电流升高时,会引起结温的升高,从而使激光器的波长向长波长方向移动。下面将对激光器的结温进行测试分析。

将器件温度控制在 20 $^{\circ}\text{C}$,设置脉冲电流源的脉冲宽度为 40 μs ,脉冲周期为 1000 μs 、占空比为 4%,此时激光器的激光波长为 1310.2 nm,由于此时激光器的散热非常快,因此可以将激光器芯片的结温近似为环境温度。保持此时脉冲电流源的设置,对器件温度进行调节,测得的激光器输出光谱和波长随温度的变化关系如图 6 所示。图 6(a)为不同温度下的激光光谱。图 6(b)为波长与温度的关系和线性拟合的结果。由拟合结果可得,激光器的波长随温度的漂移系数为

0.08 nm/K,激光波长与芯片温度的关系为

$$\lambda = 0.08195(T - 20) + 1310.2, \quad (5)$$

根据式(5)所示关系就可以从激光器的激光波长推断出激光器芯片的结温。

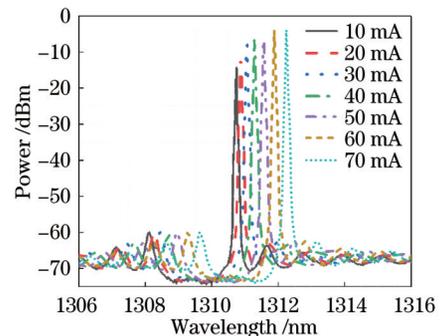


图 5 25 $^{\circ}\text{C}$ 温度下器件在不同电流下的光谱图

Fig. 5 Spectral diagram of device at different currents under 25 $^{\circ}\text{C}$

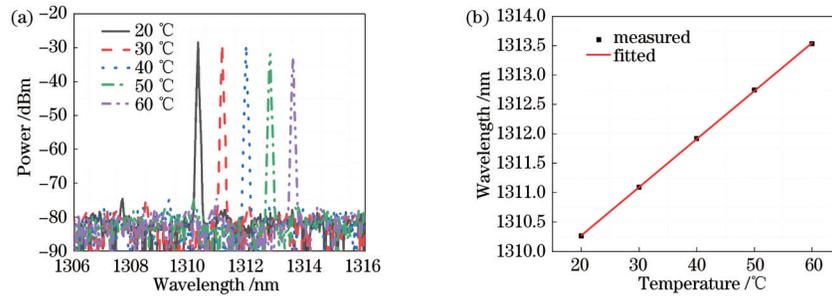


图 6 激光器在 40 μs 脉冲宽度、1000 μs 脉冲周期下的光谱随温度的变化。(a) 不同芯片温度下的激光光谱; (b) 器件激光波长与芯片温度的关系曲线, 以及线性拟合的结果

Fig. 6 Laser spectrum varying with temperature at pulse width of 40 μs and pulse period of 1000 μs . (a) Lasing spectra at different chip temperatures; (b) relationship between lasing wavelength of device and chip temperature, and result of linear fitting

采用延时自外差法测量激光器线宽, 测试中采用 22 km 的单模光纤进行延时, 利用声光移频器将拍频率移动至 70 MHz 处, 在 25 $^{\circ}\text{C}$ 温度、30 mA 激光器驱动电流下, 所测得的激光器线宽如图 7 所示。利用 Lorentz 函数进行拟合, 如图 7 中实线所示, 可得该激光器的线宽为 1.5 MHz。

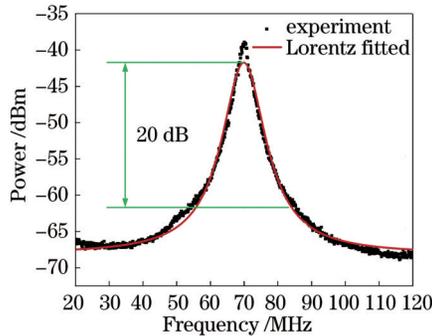


图 7 激光器线宽测试结果
Fig. 7 Test result of laser linewidth

激光器在不同电流 (30~70 mA) 下的频率响应曲线如图 8 所示。将芯片焊接在高速微带上, 利用电流源 (Stanford Research Systems, Model LDC501) 给器件加直流偏置, 利用矢量网络分析仪 (Rohde & Schwarz, ZVA40) 给器件加载高频信号, 利用高速探针 (GGB Industries) 给芯片同时加载直流偏置信号和

激光器输出进行光电转换, 最终电信号会回到矢量网络分析仪中, 由此获得器件的频率响应。激光器在不同电流 (30~70 mA) 下的频率响应曲线如图 8 所示, 其中 S_{21} 为矢网输入和输入信号的功率变化。可以看出, 随着电流的增大, 器件 3 dB 带宽也在增大, 当电流增大到一定程度时器件带宽增加受限。在 50 mA 的电流下, 器件的带宽最大, 可达 25 GHz。

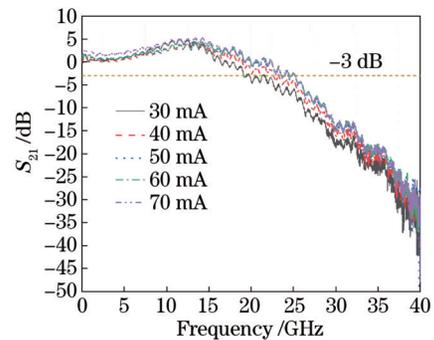


图 8 激光器在不同电流下的频率响应测试曲线
Fig. 8 Frequency response test curves of laser under different currents

最后, 为验证器件的数据传输能力, 对激光器进行了背靠背 (BTB) 眼图测试。在 25 $^{\circ}\text{C}$ 的温控下, 当驱动电流为 50 mA, 信号峰峰值电压 (V_{pp}) 为 0.8 V 时, 不同传输速率下的眼图测试结果如图 9 所示。图 9(a)~

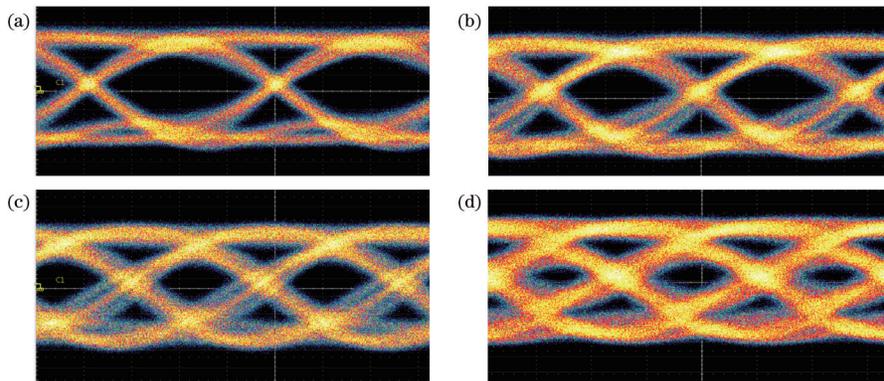


图 9 25 $^{\circ}\text{C}$ 温度下不同传输速率的眼图测试结果。(a) 25 Gb/s; (b) 30 Gb/s; (c) 35 Gb/s; (d) 40 Gb/s
Fig. 9 Eye graph test results of different transmission rates at 25 $^{\circ}\text{C}$. (a) 25 Gb/s; (b) 30 Gb/s; (c) 35 Gb/s; (d) 40 Gb/s

(d)分别为 25, 30, 35, 40 Gb/s 传输速率下的眼图测试结果。可以发现,在以上传输速率下,眼图均较为清晰张开,故本文中研制的激光器的大信号传输速率可达 40 Gb/s。

结合第 2 节的论述,综合而言,所提器件采用 11 个厚度为 5 nm 的 AlGaInAs 多量子阱分别限制异质结结构,在提高微分增益、增大光限制因子情况下,在实现高速调制的同时,降低了阈值电流和提高了光功率输出。选用短腔长(200 μm)减小器件的有源区体积,提高器件的弛豫振荡频率,进而提升带宽。通过减小器件体积、调整光栅层分布、选用小电极面积和减小器件的电容电阻的方式来增大器件带宽。

4 结 论

制备了 1.3 μm 波段高速直调半导体激光器,该器件有源区采用 11 个厚度为 5 nm 的 AlGaInAs 多量子阱分别限制异质结结构,均匀光栅分布在有源区下方,并采用较短的腔长(200 μm)和尺寸较小的电极图形。由实验结果可知:在 25 $^{\circ}\text{C}$ 温度下,阈值电流为 7.5 mA,调制带宽可达 25 GHz@50 mA;当工作电流为 140 mA 时,出光功率可达 39 mW,斜率效率为 0.35 mW/mA,边模抑制比可达 40 dB。以一种较为简单的工艺和结构,实现了在大调制带宽下,较大的功率输出和较好的单模特性输出。基于此,所提激光器为高速传输的光通信网络和硅基光子集成提供了理想的光源。

参 考 文 献

- [1] 王皓. 高性能高速直调激光器与大功率DFB激光器的研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2019: 21-31.
Wang H. Research on high performance high speed directly modulated DFB laser and high power DFB laser [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019: 21-31.
- [2] 王皓, 张瑞康, 陆丹, 等. 1.55- μm 大功率高速直调半导体激光器阵列[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0914001.
Wang H, Zhang R K, Lu D, et al. 1.55- μm high-power high-speed directly modulated semiconductor laser array [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 0914001.
- [3] 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.
- [4] 张莉萌, 陆丹, 余力强, 等. InP 基少模半导体激光器[J]. 光学学报, 2015(S2): S206001.
Zhang L M, Lu D, Yu L Q, et al. InP-based few lateral-modes semiconductor laser[J]. Acta Optica Sinica, 2015(S2): S206001.
- [5] Zhu N H, Shi Z, Zhang Z K, et al. Directly modulated semiconductor lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(1): 17140365.
- [6] Nagarajan R, Fukushima T, Corzine S W, et al. Effects of carrier transport on high-speed quantum well lasers[J]. Applied Physics Letters, 1991, 59(15): 1835-1837.
- [7] Chen T R, Chen P C, Gee C, et al. A high-speed InGaAsP/InP DFB laser with an air-bridge contact configuration[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1993, 5(1): 4393674.
- [8] Lu H, Blaauw C, Benyon B, et al. High-power and high-speed performance of gain-coupled 1.3 μm strained-layer MQW DFB lasers[C]//Proceedings of IEEE 14th International Semiconductor Laser Conference, September 19-23, 1994, Maui, HI, USA. New York: IEEE Press, 1994: 51-52.
- [9] Otsubo K, Matsuda M, Takada K, et al. Uncooled 25 Gbit/s direct modulation of semi-insulating buried-heterostructure 1.3 μm AlGaInAs quantum-well DFB lasers[J]. Electronics Letters, 2008, 44(10): 631-632.
- [10] Paoletti R, Meliga M. Uncooled high-speed DFB lasers for gigabit Ethernet applications[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4646: 7-18.
- [11] Tadokoro T, Yamanaka T, Kano F, et al. Operation of a 25-Gbps direct modulation ridge waveguide MQW-DFB laser up to 85 $^{\circ}\text{C}$ [C]//Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference, March 22-26, 2009, San Diego, California. Washington, D.C.: OSA, 2009: OThT3.
- [12] Sasada N, Nakajima T, Sekino Y, et al. Wide-temperature-range (25–80 $^{\circ}\text{C}$) 53-Gbaud PAM4 (106-Gb/s) operation of 1.3- μm directly modulated DFB lasers for 10-km transmission[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(7): 1686-1689.
- [13] Wilcox J Z, Peterson G L, Ou S, et al. Length dependence of threshold current in multiple quantum well lasers[J]. Electronics Letters, 1988, 24(19): 1218.
- [14] Yamaoka S, Diamantopoulos N P, Nishi H, et al. Directly modulated membrane lasers with 108 GHz bandwidth on a high-thermal-conductivity silicon carbide substrate[J]. Nature Photonics, 2021, 15(1): 28-35.
- [15] Coldren L A, Corzine S W, Mašanović M L. Diode lasers and photonic integrated circuits[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [16] Wenzel H, Bugge F, Dallmer M, et al. Fundamental-lateral mode stabilized high-power ridge-waveguide lasers with a low beam divergence[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(3): 214-216.
- [17] Tan S Y, Zhai T, Wang W, et al. Design and fabrication of high power single mode double-trench ridge waveguide laser[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8965: 246-251.
- [18] 单智发, 张永. DFB 激光器外延结构及其制备方法: CN109510063A[P]. 2019-03-22.
Shan Z F, Zhang Y. DFB laser epitaxial structure and preparation method thereof: CN109510063A[P]. 2019-03-22.
- [19] 余金中. 半导体光子学[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 219-221.
Yu J Z. Semiconductor photonics[M]. Beijing: Science Press, 2015: 219-221.
- [20] 江剑平. 半导体激光器[M]. 北京: 电子工业出版社,

- 2000.
- Jiang J P. Semiconductor laser[M]. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2000.
- [21] Zah C E, Bhat R, Pathak B N, et al. High-performance uncooled 1.3- μm $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{AsInP}$ strained-layer quantum-well lasers for subscriber loop applications[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1994, 30(2): 511-523.
- [22] Blez M, Kazmierski C, Quillec M, et al. First DFB GRIN-SCH GaInAs/AlGaInAs 1.55 μm MBE MQW active layer buried ridge structure lasers[J]. Electronics Letters, 1991, 27(1): 93-95.