

1.55- μm 大功率高速直调半导体激光器阵列

王皓^{1,2,3**}, 张瑞康^{1,2,3*}, 陆丹^{1,2,3}, 王宝军^{1,2,3}, 黄永光^{1,2,3}, 王圩^{1,2,3}, 赵玲娟^{1,2,3}

¹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;

²低维半导体材料与器件北京市重点实验室, 北京 100083;

³中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

摘要 提出一种基于 AlGaInAs 材料的 1.55- μm 波段的大功率、高速直调分布反馈(DFB)激光器阵列。采用具有良好温度特性和高微分增益的 AlGaInAs 材料作为量子阱和波导层以实现大功率与高带宽的输出;引入稀释波导结构来减小有源区内部损耗,同时降低远场发散角;采用悬浮光栅并优化耦合系数以实现大注入电流下的单模稳定工作。最终实现了 1.5- μm 波段 5 波长的大功率直调激光器阵列,阵列波长间隔约为 5 nm,室温连续波(CW)工作时各通道输出光功率均大于 100 mW,单通道最大输出光功率为 160 mW,500 mA 工作电流范围内边模抑制比大于 55 dB,小信号调制带宽可达 7 GHz,激光器最小线宽为 520 kHz,相对强度噪声低于 -145 dB/Hz。

关键词 激光器; 1.55- μm 直调激光器; 大功率; 高带宽; 激光器阵列

中图分类号 O475

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0914001

1.55- μm High-Power High-Speed Directly Modulated Semiconductor Laser Array

Wang Hao^{1,2,3**}, Zhang Ruikang^{1,2,3*}, Lu dan^{1,2,3}, Wang Baojun^{1,2,3},
Huang Yongguang^{1,2,3}, Wang Wei^{1,2,3}, Zhao Lingjuan^{1,2,3}

¹Key Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

²Beijing Key Laboratory of Low Dimensional Semiconductor Materials and Devices, Beijing 100083, China;

³Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract We design and fabricate a 1.55- μm high-speed high-power distributed feedback laser array based on the AlGaInAs material. We adopt the AlGaInAs material that exhibits good temperature characteristics and high differential gain as a quantum well and waveguide layer to achieve high power and wide bandwidth. Further, we use a dilute waveguide to reduce internal loss and optimize the far-field divergence angle; subsequently, a suspended grating is used to optimize coupling coefficient, and the single-mode stable operation with large injection current is realized. Based on this optimized material structure, we fabricate a 1.5- μm laser array at five different wavelengths. In continuous-wave operation at room temperature, each laser in the array can achieve a single-mode lasing power of greater than 100 mW (the maximum output power of a single laser is 160 mW), a side-mode suppression ratio of greater than 55 dB, a small-signal-modulation bandwidth of 7 GHz, the narrowest linewidth of 520 kHz, and a relative intensity noise of -145 dB/Hz.

Key words lasers; 1.55- μm directly modulated lasers; high power; wide bandwidth; laser array

OCIS codes 140.5960; 140.3490; 140.3570; 140.3290

1 引 言

近年来,随着相干光通信^[1]、自由空间光通信、

激光制导和激光雷达等技术的发展^[2-3],具有传输损耗小、对人眼安全^[4]、受外界环境干扰小等优点的 1.55- μm 波段的单纵模大功率半导体激光器^[5],受到

收稿日期: 2019-03-14; 修回日期: 2019-04-02; 录用日期: 2019-05-05

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0402301)、国家自然科学基金(61335009, 61574137)

* E-mail: rkzhang@semi.ac.cn; ** E-mail: haowang@semi.ac.cn

国内外学者的广泛重视。目前该波段大功率分布反馈(DFB)激光器已经可以实现 440 mW 的输出^[6]。在微波光子学、自由空间光通信等领域的应用中,除了对激光功率有要求外,还需要激光器有较高的调制带宽,以满足系统无放大器高速工作需求。目前,大功率直调激光器已经可以实现单纵模 140 mW 输出,直调带宽达 7 GHz^[7]。为进一步提高通信带宽,可采用多波长阵列来进一步增加波长通道数。目前,大功率直调半导体激光器阵列的报道依然较少。

针对此问题,本文提出一种 1.5- μm 波段的 5 波长大功率直调 DFB 激光器阵列结构。激光器采用具有高微分增益的 AlGaInAs^[8] 量子阱结构,用于提高激光器的高温工作特性,保证多波长激光器阵列在高功率工作时的稳定性。

2 器件设计与制作

图 1(a)为材料的外延结构,材料制备采用金属有机化合物气相外延(MOCVD)。在 N-InP 衬底上

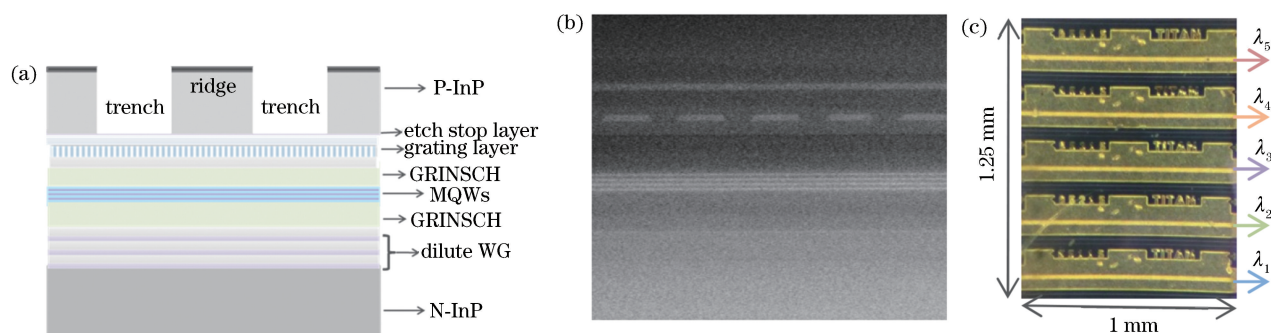


图 1 1.55- μm DFB 激光器。(a)材料外延结构示意图;(b)光栅截面扫描电镜图;(c)激光器阵列显微镜照片

Fig. 1 1.55- μm DFB laser. (a) Epitaxial structure of material; (b) scanning electron microscope (SEM) of grating cross section; (c) microscope graph of laser array

采用 ICP 干法刻蚀和湿法腐蚀相结合的方式制作了 $7\ \mu\text{m}$ - $2.2\ \mu\text{m}$ - $7\ \mu\text{m}$ 双沟脊波导结构,以有效增加高阶模的模式损耗、抑制高阶模激射、增强侧模稳定性。为了避免大电流下的载流子注入引起的反波导现象,设计有源区各层厚度,使得脊形波导与侧边的有效折射率差为 0.011。随后完成 PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition) 生长二氧化硅、开电注入窗口、蒸镀上接触电极、减薄及背面电极制备工艺后,将芯片解理为 1-mm 腔长的器件,进行前后端面的镀膜,前端面反射率为 0.1%,后端面反射率为 95%。镀膜后,解理成阵列管芯,如图 1(c)所示,图中金色部分为激光器的正面电极,横向亮色细条为激光器的脊波导,激光器阵列右

生长 3 对 100-nm-1.15Q(带隙波长 1.15 μm)和 500-nm-InP 交替生长的稀释波导(WG);再依次生长 130 nm Al 组分渐变的 Al_xGaInAs ($x: 0.423 \rightarrow 0.338$)缓变折射率分别限制层(GRINSCH)的下限值层,3 个 6 nm 光致发光波长为 1530 nm 的 AlGaInAs 量子阱(MQW),130 nm 的 GRINSCH 上限制层;生长 50 nm InP 光栅过渡层以及 20 nm InGaAsP 光栅层。GRINSCH 可有效减小载流子泄露,增大内量子效率,引入稀释波导层可降低远场发散角同时降低有源区的内部损耗^[6],悬浮光栅结构可以更容易地调控光栅耦合系数。利用电子束曝光结合电感耦合等离子体(ICP)干法刻蚀方法,根据光栅周期 Δ 与布拉格波长 λ 的对应关系 $2n\Delta = \lambda$,精确制作 5 个不同周期的一阶光栅,以实现多波长激射。而后二次外延生长 30-nm-InP 光栅盖层、20-nm-1.1Q InGaAsP 刻蚀停止层,Zn 掺杂浓度(分子浓度)为 $10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ 量级的 1.6- μm -InP 盖层及掺杂浓度为 3×10^{19} 的 0.2- μm -InGaAs 接触层,即完成了激光器材料的生长,如图 1(b)所示。

侧出光,不同波长激光器间隔 $250\ \mu\text{m}$,整个激光器阵列宽 1.25 mm。激光器阵列芯片正面电极朝上,将其烧结在氮化铝热沉上并进行测试。

3 实验结果与讨论

光栅结构以及耦合系数是 DFB 激光器设计的关键,耦合系数太大会导致空间烧孔,耦合系数太小会导致激光器多模激射。在该激光器阵列中采用了悬浮光栅结构,通过控制光栅厚度以及光栅与上限制层间 InP 过渡层厚度,来调控光栅的耦合系数。图 2(a)是光栅耦合系数随光栅厚度以及光栅与上限制层间 InP 厚度变化的仿真结果。如图所示,光栅耦合系数 κ 随着光栅厚度的增加而近线性增加,

随着 InP 厚度增大近似呈指数形式衰减。为了满足大功率单模输出,选用光栅层厚度为 20 nm,光栅层与上限制层间 InP 厚度为 50 nm,对应的 κ 值为 14 cm^{-1} ,用于 1-mm 腔长的器件。

采用稀释波导结构,可以降低材料的内部损耗。通过测量基于优化后的材料结构制作成的不同腔长 F-P(Fabry-Perot)激光器的斜率效率,寻找外量子效率与腔长的对应关系,从而拟合得到对应材料的内部损耗 α_i 和内量子效率 η_i 。图 2(b)所示为材料优化后所制作的不同腔长 F-P 激光器微分量子效率 η_d 与腔长 L 的关系,由图可知激光器的 $\eta_i =$

70.25% , $\alpha_i = 4.63 \text{ cm}^{-1}$ 。

图 3 所示为 $22 \text{ }^\circ\text{C}$ 下, CW 注入电流条件下镀膜后 1-mm 腔长的 5-波长 DFB 激光器阵列的功率-电流-电压(P - I - V)性能测试结果。从图 3(a)可以看出,激光器阵列中不同激光波长对应的激光器阈值大小稍有变化,阵列中的 5 个激光器功率在 400 mA 偏置电流内无扭折出现,保持很好的线性度,输出功率均大于 100 mW,斜率效率最高可达 0.44 W/A 。图 3 (b)所示为通道 1 的 P - I - V 结果,偏置电流为 700 mA 时,激光器输出功率可达 160 mW。

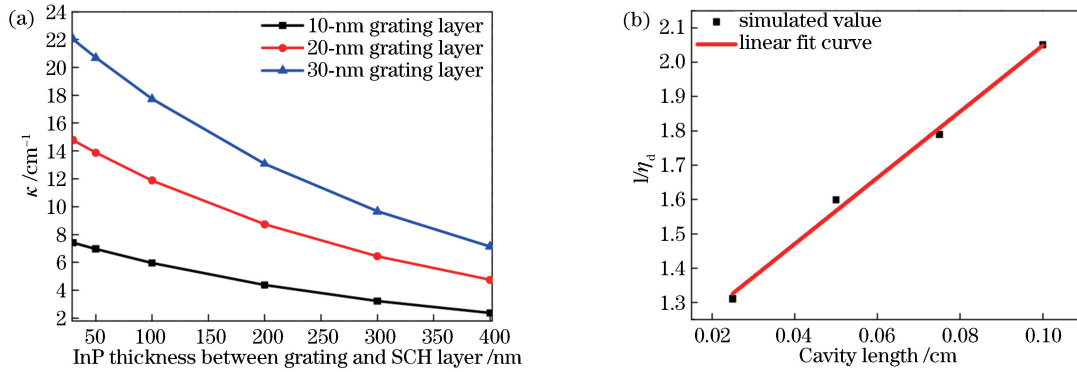


图 2 仿真测试结果。(a)上限制层和光栅层间 InP 厚度对光栅耦合系数 κ 的影响;
(b)微分量子效率 η_d 的倒数与腔长的关系

Fig. 2 Simulated and tested results. (a) κ versus InP thickness between grating and SCH; (b) reciprocal of differential quantum efficiency η_d versus cavity length

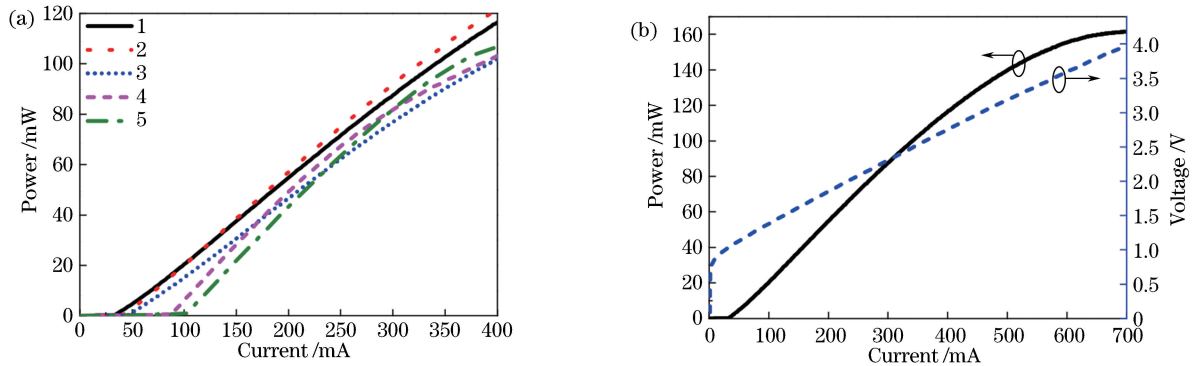


图 3 $22 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, CW 测试 1-mm 镀膜 DFB 激光器阵列的 P - I - V 曲线。(a) 5 个不同通道(波长)的 DFB 激光器阵列的 P - I 曲线;(b)通道 1 的 P - I - V 曲线

Fig. 3 P - I - V curves of 1-mm coated DFB laser array under CW operation at $22 \text{ }^\circ\text{C}$. (a) P - I curves of 5 channels (wavelengths) of DFB laser array; (b) P - I - V curves of channel 1

图 4 所示为 $22 \text{ }^\circ\text{C}$ 、CW 测试条件下腔长为 1 mm 的激光器阵列的光谱。图 4(a)所示为偏置电流为 300 mA 时的激光器阵列光谱曲线,5 个通道波长间隔约为 5 nm。通过改变激光器的驱动电流,可以调谐激光器的输出波长。图 4(b)所示为通道 1 单个激光器在不同工作电流下的光谱。当驱动电流

从 70 mA 增加到 500 mA 时,激光器波长变化了 4.2 nm。5-波长的 DFB 激光器阵列在整个工作电流内均为单模激射,边模抑制比(SMSR)均大于 55 dB。且 $22 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,在 500 mA 的偏置电流范围内,激光器阵列可覆盖波长范围为 22 nm ($1555.8 \sim 1577.8 \text{ nm}$)。

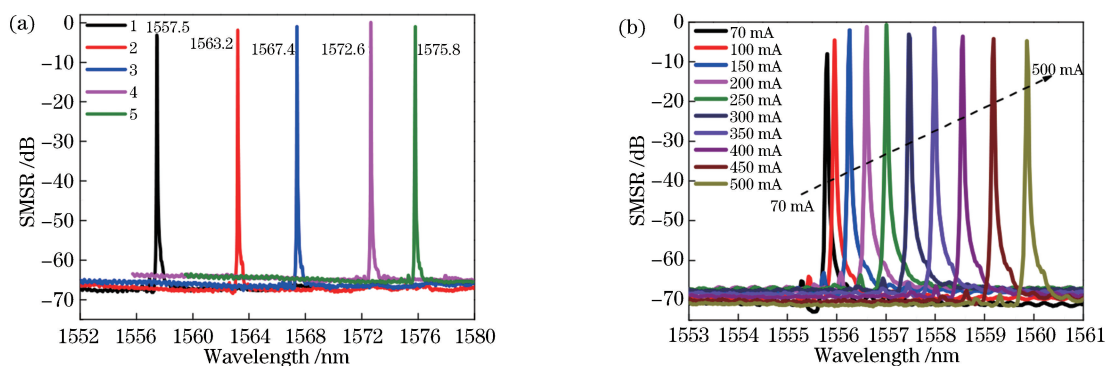


图 4 22 °C 时, CW 测试 1-mm 镀膜 DFB 激光器阵列光谱。

(a) 偏置电流为 300 mA 的 DFB 激光器阵列光谱; (b) 不同电流下 DFB 激光器通道 1 光谱

Fig. 4 Spectra of 1-mm coated DFB laser array under CW operation at 22 °C. (a) Spectra of DFB laser array with bias current of 300 mA; (b) spectra of channel 1 of DFB laser at different currents

图 5 所示为 22 °C 时无匹配电阻情况下, 通过高频探针直接加载调制信号, 借助矢量网络分析仪 (8510C, HP, 美国) 测试得到的不同偏置电流下激光器典型的小信号调制带宽, S_{21} 为小信号调制响应。由图可知: 全偏置电流范围内小信号响应比较平坦, 当偏置电流大于 300 mA 时, 3-dB 带宽即可达 7 GHz。

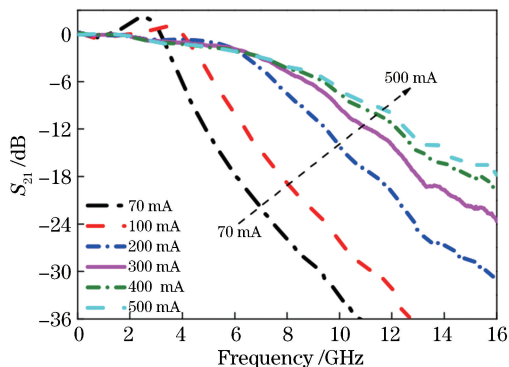


图 5 22 °C 时不同偏置电流下典型的小信号响应曲线

Fig. 5 Typical small signal responses under different bias currents at 22 °C

采用延时自外差法测量激光器线宽, 测试中利用 25 km 的单模光纤进行延时, 并用声光调制器将光拍频频率移动到 70 MHz 处, 所测得的典型光学线宽如图 6 所示。利用洛伦兹 (Lorentz) 函数对测试曲线进行拟合 (如图中实线所示)。激光器在偏置电流阈值以上 50 mA 处得到的最小线宽为 520 kHz。如图 7 所示为利用光信号分析仪 (70004A+70908A, HP, 美国) 所测得的激光器典型相对强度噪声 (RIN) 曲线。22 °C 下, 偏置电流为 450 mA 时, 在 0.045~22 GHz 频率范围内激光器的相对强度噪声曲线平坦, 均低于 -142 dB/Hz。

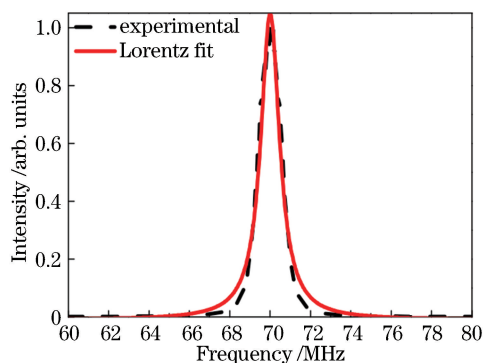


图 6 单个 DFB 激光器的典型光学线宽

Fig. 6 Typical optical linewidth of single DFB laser

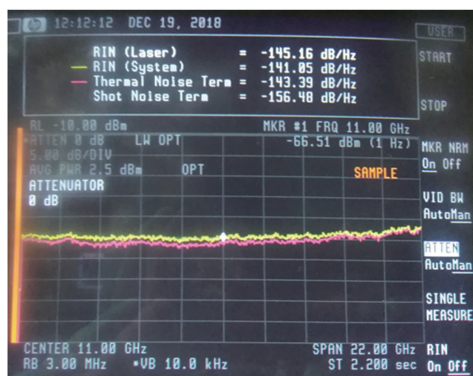


图 7 DFB 激光器的典型相对强度噪声曲线 (22 °C, 450 mA)

Fig. 7 Typical RIN curves of DFB laser (22 °C, 450 mA)

4 结 论

采用稀释波导结构以及悬浮光栅结构研制出基于 AlGaInAs 材料结构的工作波段为 1.55- μm 的 5-波长大功率高带宽 DFB 激光器阵列。在 22 °C、CW 测试条件下, 镀膜后 1-mm 腔长的 DFB 激光器阵列内所有通道激光器出光功率均大于 100 mW, 斜率效率高达 0.44 W/A; 在 500 mA 的偏置电流范

围内 SMSR 均大于 55 dB, 通道间隔约为 5 nm, 覆盖的波长范围为 1555.8 ~ 1577.8 nm, 3-dB 调制带宽可达 7 GHz, 最小线宽为 520 kHz, 相对强度噪声低于 -145 dB/Hz。该 DFB 激光器很有可能用于自由空间光通信与模拟通信, 并为硅基光子集成提供了理想的光源。

参 考 文 献

- [1] Burie J R, Beuchet G, Mimoun M, *et al.* Ultra high power, ultra low RIN up to 20 GHz 1.55 μm DFB AlGaInAsP laser for analog applications [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7616: 76160Y.
- [2] Kaushal H, Kaddoum G. Optical communication in space: challenges and mitigation techniques [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(1): 57-96.
- [3] Zhang X P, Zhang L B, Liu J, *et al.* Optical system of spatial narrow linewidth laser [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0414003.
张秀萍, 张林波, 刘军, 等. 空间窄线宽激光器光学系统研究[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0414003.
- [4] Garrod T, Brunet F, Galstad C, *et al.* High-power and high-efficiency distributed feedback (DFB) lasers operating in the 1.4-1.6 μm range for eye-safe applications[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8605: 86050I.
- [5] Li T, Chen R, Zhang Y, *et al.* The research progress and military application of 1.55 μm waveband semiconductor lasers[J]. Scientific Journal of Microelectronics, 2012, 2(2): 6-10.
李特, 陈融, 张月, 等. 1.55 μm 波段半导体激光器研究进展及军事应用[J]. 微电子期刊, 2012, 2(2): 6-10.
- [6] Menna R, Komissarov A, Maiorov M, *et al.* High power 1550 nm distributed feedback lasers with 440 mW CW output power for telecommunication applications [C]//Technical Digest. Summaries of papers presented at the Conference on Lasers and Electro-Optics. Postconference Technical Digest (IEEE Cat. No. 01CH37170), May 11, 2001, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE, 2001: CPD12.
- [7] Faugeron M, Tran M, Lelarge F, *et al.* High-power, low RIN 1.55- μm directly modulated DFB lasers for analog signal transmission [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(2): 116-118.
- [8] Zah C E, Bhat R, Pathak B N, *et al.* High-performance uncooled 1.3- μm Al_x/Ga_y/In_{1-x-y}/As/InP strained-layer quantum-well lasers for subscriber loop applications [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1994, 30(2): 511-523.