

大功率及高转换效率 2.1 μm GaInSb/AlGaAsSb 量子阱激光器

宋玉志, 宋甲坤, 张祖银, 李康文, 徐 云, 宋国峰, 陈良惠

(中国科学院半导体研究所 纳米光电子实验室, 北京 100083)

摘 要: 报道了激射波长为 2.1 μm 的 GaInSb/AlGaAsSb 双量子阱激光器。通过优化外延结构设计和欧姆接触, 无镀膜的宽条激光器达到了 9.8% 的峰值功率转换效率, 这比原来的值提高了 1.5 倍, 室温下得到了 615 mW 的连续激射功率输出和 1.5 W 的脉冲激射功率输出。这些激光器的阈值电流密度低至 126 A/cm², 斜率效率高达 0.3 W/A。通过测试不同腔长的激光器, 测得内损耗和内量子效率分别为 6 cm⁻¹ 和 75.5%, 均比原有器件有很大提升。激光器在连续工作 3 000 h 后, 功率没有明显下降。

关键词: GaInSb/AlGaAsSb; 激光器; 功率转换效率

中图分类号: TN365 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0505003

High power 2.1 μm GaInSb/AlGaAsSb quantum well laser diodes with high power conversion efficiency

Song Yuzhi, Song Jiakun, Zhang Zuyin, Li Kangwen, Xu Yun, Song Guofeng, Chen Lianghui

(Nano-Optoelectronics Laboratory, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: 2.1 μm GaInSb/AlGaAsSb double quantum well lasers were reported. With optimization of epitaxial design and ohmic contact, these uncoated broad-area lasers exhibited a maximum power conversion efficiency of 9.8% which was 1.5 times greater than previous value, a room temperature continuous wave output power of 615 mW and a pulsed wave output power of 1.5 W were achieved. The threshold current density of these lasers was as low as 126 A/cm², and the slope efficiency was as high as 0.3 W/A. By testing lasers with different cavity lengths, the internal loss and the internal quantum efficiency were measured as 6 cm⁻¹ and 75.5%, respectively, which were all improved compared with previous device. The output power of laser diode operated in CW mode shows no apparent degradation after 3 000 h.

Key words: GaInSb/AlGaAsSb; laser; power conversion efficiency

收稿日期: 2015-09-05; 修订日期: 2015-10-12

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2011CBA00608, 2012CB619203); 国家科技重大专项计划项目(2011ZX01015-001);
国家自然科学基金(61036010, 61177070, U1431231); 北京市自然科学基金(4112058)

作者简介: 宋玉志(1990-), 男, 博士生, 主要从事铟化物量子阱 FP 腔及 DFB 激光器方面的研究。Email: songyz@semi.ac.cn

导师简介: 陈良惠(1939-), 男, 工程院院士, 研究员, 主要从事新型量子阱光电子器件方面的研究。Email: chenlh@semi.ac.cn

0 引言

基于GaIn(As)Sb/AlGaAsSb 材料的第一类量子阱半导体激光器在 2.0~2.6 μm 波段范围正在吸引越来越多的研究兴趣。在这一波段,许多工业过程中产生的气体副产品都有很强的吸收峰,比如 NH₃ 的吸收峰位于 2.1 μm,CH₄ 的吸收峰位于 2.4 μm 等。这个波段的激光器在激光医疗领域以及通过可调谐半导体激光吸收光谱技术进行气体探测方面起了重要的作用。

目前,国内外已经有很多工作^[1-3]报道了这个波段的半导体激光器进展。对于激射波长为 2.1 μm 的 GaSb 基半导体激光器,国外较早展开了相关工作,早在 1992 年 Choi H K 组就报道了第一个连续激射(CW)2.1 μm GaSb 基量子阱激光器^[4],报道中采用高 Al 组分外延结构的激光器输出功率达到 190 mW,但是阈值电流较大,达到 260 A/cm²。后来陆续有瓦级的 2.1 μm 激光器阵列被报道。在 Razeghi M 组最近的一项工作中^[5],条宽为 3~5 μm 的 2.1 μm 波段窄条激光器表现出了高性能单纵模输出,镀增透增反膜后,在较小的功率下(约 40 mW)达到了较高的功率转化效率(约 20%以上),但受制于条宽,最大功率只有约 130 mW。国内的 GaSb 基激光器相关研究起步较晚,中国科学院半导体所^[6]和上海微系统所^[7]都曾有关报道,但 2.1 μm 波段的 FP 腔激光器仅有 30 mW^[7],无法获得大功率输出。在以前的报道中^[6,8],我们做了很多的工作来提高激射波长在 2.1 μm 附近的 GaSb 基第一类半导体量子阱激光器的特性。然而,高的工作电压以及低的功率转化效率限制了激光器的输出功率,这些问题还需要进一步的解决。

在文中,基于原有外延结构^[6],优化生长了激射波长为 2.1 μm 的半导体激光器外延片。在新的外延结构中,我们调整了包覆层中的 Al 的组分以获得更好的电学和光学特性。同时,也优化了 n 型 GaSb 欧姆接触来降低接触电阻。优化的宽条激光器内损耗和工作电压显著下降,功率转换效率(PCE)提高到了一个很高的值(约 9.8%),这些器件都没有镀增透及增反膜。通过测试不同腔长的激光器,内损耗和内量子效率的值分别被计算为 6 cm⁻¹ 和 75.5%。利用优化的激光器外延结构,激射波长为 2.1 μm、腔长 1.5 mm 条宽 90 μm 的半导体激光器在室温(300 K)下得到了

高达 615 mW 的连续功率输出以及高达 1.5 W 的脉冲功率输出,这是目前国内报道的 2.1 μm 波段激光器最大的功率输出。

1 材料及制备

激光器的外延结构是在固态源 Gen-II 型分子束外延系统中在 n 型 GaSb 衬底上生长的。Te 和 Be 分别作为 n 型和 p 型掺杂源。外延片的生长以生长一层 500 nm 厚的 n 型 ($1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)GaSb 缓冲层开始,然后生长一层 1.5 μm 厚的 n 型 ($5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) Al_{0.9}Ga_{0.1}As_{0.07}Sb_{0.93} 包覆层,接下来是生长非掺杂的有源区,其中包含两个 10 nm 厚有 1% 压应变的 Ga_{0.8}In_{0.2}Sb 量子阱,两个量子阱之间的势垒材料为 20 nm 厚的 Al_{0.35}Ga_{0.65}As_{0.02}Sb_{0.98} 层,量子阱和势垒夹在两个 300 nm 厚的非掺杂 Al_{0.35}Ga_{0.65}As_{0.02}Sb_{0.98} 波导层中,上包覆层为一层 1.5 μm 厚的 p 型 ($5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) Al_{0.9}Ga_{0.1}As_{0.07}Sb_{0.93} 层,最上层为 250 nm 厚的 p 型 GaSb ($1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) 接触层。图 1 显示了基于 GaInSb/AlGaAsSb 的双量子阱激光器外延片的能带结构示意图。和原有外延结构相比,提高了包覆层中的 Al 组分;而量子阱的个数保持为两个,这是因为以前有文献理论分析并证明两个量子阱对于 GaSb 基半导体激光器而言是最优选择^[9]。

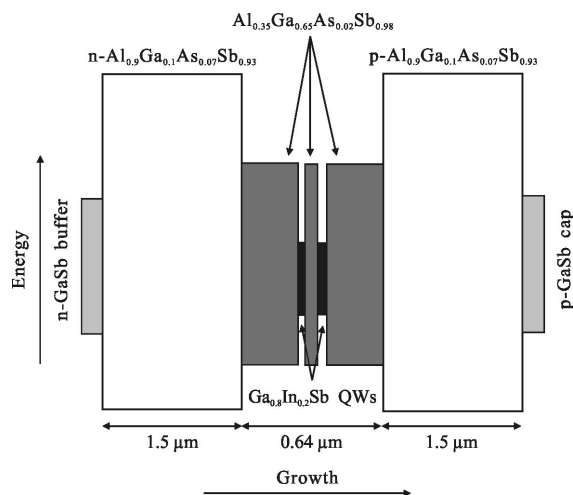


图 1 基于 GaInSb/AlGaAsSb 材料的双量子阱激光器的能带结构示意图

Fig.1 Schematic energy band diagram of the GaInSb/AlGaAsSb double QW laser wafer

使用接触式紫外光刻和湿法腐蚀工艺来制备高度为 1.5 μm 的脊条波导。然后使用等离子体增强化

学气相淀积系统(PECVD)生长一层 200 nm 厚的 SiO₂ 钝化层。通过反应离子刻蚀(RIE)来刻蚀顶层 SiO₂ 层来形成 90 μm 宽的电极窗口。通过磁控溅射生长 Ti (60 nm)-Pt(70 nm)-Au(1 300 nm) p 型金属接触层。整个外延片通过化学机械磨抛减薄到 110 μm 左右并且在衬底的 n 面溅射 AuGeNi(50 nm)-Au(300 nm) n 型金属接触层。完成以上步骤后,应用优化的快速退火工艺来形成良好的欧姆接触。外延片通过划片机划成 1~2 mm 长的激光器管芯,所有的激光器都是倒装在 c-mount 热沉上。这些没有镀膜的半导体激光器都是在室温下进行的测试。

2 性能和讨论

图 2(a)为优化器件(实线)和原有器件(虚线)在不同的电流下功率转换效率和连续激光输出功率的对比。原有器件尺寸为 90 μm 条宽和 1 mm 腔长,为了进行对比我们利用优化的外延结构制备了相同尺寸的优化器件且都无镀膜。看到优化器件的功率转

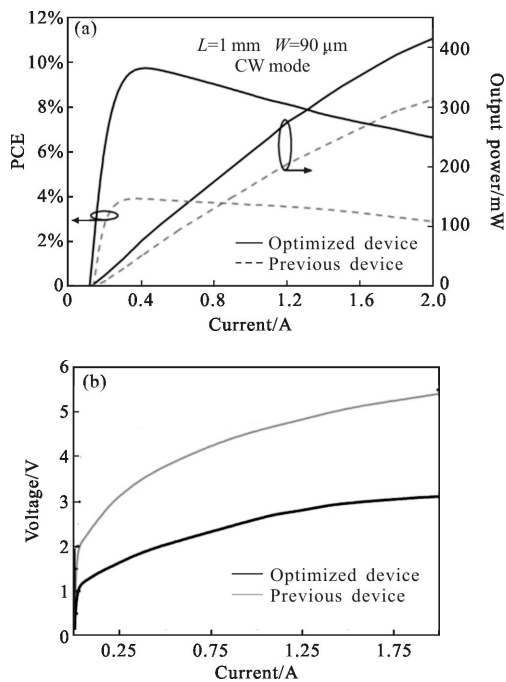


图 2 (a)室温下条宽 90 μm 腔长 1 mm 的激光器的功率转换效率和连续功率输出特性曲线,实线为优化器件,虚线为原有器件 (b)两种器件工作电压对比

Fig.2 (a) Power conversion efficiency and CW output power characteristics for both optimized (solid line) and previous (dash line) lasers with 90-μm-wide output aperture and 1-mm-long cavity measured at 300 K. (b) Contrast of the operation voltage for two devices

换效率在电流约 3 I_{th} 处达到最大值 9.8%, 作为对比,原有器件最大功率转换效率仅为 4%,优化器件的功率转换效率比原来提高了 1.5 倍。随着电流的增大,热效应引起了功率转换效率的降低。同时,从功率电流曲线可以看出,斜率效率从以前的 0.2 W/A 提高到了 0.3 W/A,且优化器件的功率有了很大提高。功率转换效率的提高和工作电压的降低密切相关,从图 2(b)可以看出,优化器件的工作电压相比原有器件大大降低。由于以上的性能的提高使得优化的半导体激光器得到的更高的功率输出,同时阈值电流相比以前也有降低。

为了测试内损耗和内量子效率,对腔长为 1~2 mm 的不同激光器在连续模式下进行了测试。图 3 为微分子量子效率的倒数 1/η₀ 和腔长 L 的拟合直线,其中实线表示优化器件,虚线表示原有器件。对于优化器件,从拟合曲线的斜率和截距可以计算出优化器件的内损耗和内量子效率分别为 6 cm⁻¹ 和 75.5%。相比原有器件,内量子效率显著提高,内损耗也减小了近一半。

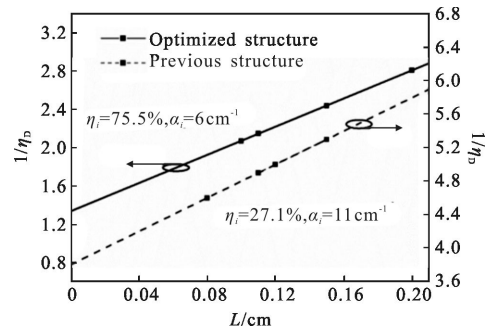


图 3 优化器件与原有器件微分子量子效率倒数 1/η₀ 和腔长 L 的关系

Fig.3 Inverse differential quantum efficiency versus the cavity length for both optimized and previous devices

激光器性能的提高主要是由于 AlGaAsSb 包覆层中 Al 组分的改变,n 型 GaSb 的金属欧姆接触的优化也是一个重要的因素。基于原有外延结构^[8],包覆层的结构从 Al_{0.6}Ga_{0.4}As_{0.02}Sb_{0.98} 改为 Al_{0.9}Ga_{0.1}As_{0.07}Sb_{0.98}。Al 组分的这一改变使 AlGaAsSb 材料的折射率发生改变,如图 4 所示,折射率由原来的 3.4 降低为 3.27,而波导层的折射率保持一个较高的值不变,因此,包覆层和波导层之间的折射率差将增大。折射率差的增大将会改变量子阱区域的光场限制因子,笔者利用半矢量有限差分算法计算了在波导层成分

保持不变的情况下,随着包覆层 Al 组分的变化光场限制因子相应的变化趋势,从图中可见随着 Al 组分的增加,折射率差变大,光场限制因子也相应增大,当 Al 组分取 0.9 时,光场限制因子取最大值。随着光场限制因子的增大,模式增益也因此变大^[10]。高的光场限制因子的优点是避免了激光模式和高掺杂的包覆层的交叠从而减小了内损耗,内量子效率也因此增加。这些因素导致了功率转换效率的提高和阈值电流密度的降低。而且,高的 Al 组分对于提高器件的电导率也是有益的^[11]。

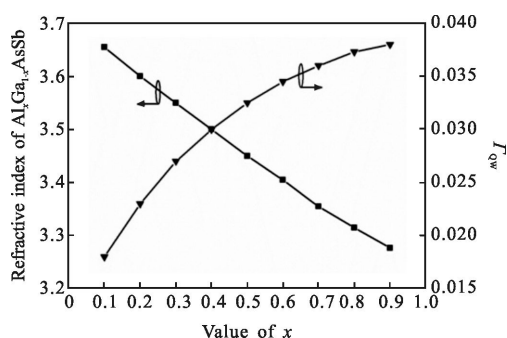


图 4 Al_xGa_{1-x}AsSb 材料折射率以及量子阱光场限制因子和 Al 组分之间的关系

Fig.4 Dependence of refractive index of Al_xGa_{1-x}AsSb and optical confinement factor of QWs on component of Al

对于 n 型 GaSb 金属欧姆接触,退火后在金属和半导体的界面处会形成一个金属-半导体互扩散区域。这个区域主要包含 Ga/Au 合金,这是由于 Au 扩散进入半导体导致的,而且这个区域是得到低的 n 型 GaSb 欧姆接触电阻率的一个关键因素。这一现象是和以前的报道^[12]相一致的。基于这个分析,我们优化了快速退火工艺来得到低的接触电阻以降低器件总体的串联电阻。从伏安(V-I)曲线可以推导出器件的串联电阻 R_s。对于原有器件,R_s 约为 1.2 Ω,而对于优化器件,R_s 降低到了约 0.5 Ω。串联电阻的降低导致了器件工作电压的降低,因此,该优化对于提高内量子效率和降低内损耗以及工作电压是有益的,这些改进也因此提高了功率转换效率和输出功率。

基于以上的优化,笔者用新的外延结构制备了高输出功率激光波长为 2.1 μm 的激光器,这些激光器的脊条电极窗口宽度为 90 μm,且都没有镀膜。由于低的内损耗,长腔长的激光器有望得到更大的功率输出。然而,激光器的腔长应该满足小于吸收长度 1/α 的条件。综合考虑,1.5 mm 腔长的激光器能得到

更好的输出特性。图 5 为优化的条宽 90 μm,腔长 1.5 mm 的激光器在室温下的连续功率输出特性及伏安特性曲线。阈值电流密度为 126 A/cm² (每个量子阱为 63 A/cm²),斜率效率约为 0.28 W/A。在电流为 3.5 A 时,最大的连续输出功率高达 615 mW。在高电流时,热效应的增加限制了输出功率。图 5 的插图显示了激光器在 2 A 时的激光光谱图,可以看出,激光器的峰值光谱为 2.1 μm。

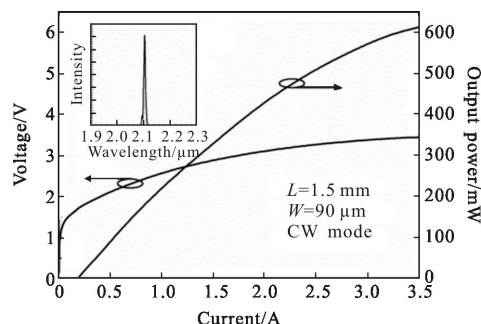


图 5 室温下条宽 90 μm 腔长 1.5 mm 的优化器件连续输出功率和伏安特性曲线,插图为器件在 2 A 时的激光光谱

Fig.5 CW output power and voltage-current characteristics for optimized device with 90-μm-wide output aperture and 1.5-mm-long cavity measured at 300 K. The inset shows the laser spectrum at 2 A

为了得到在没有热效应限制下激光器的功率输出特性,在脉冲模式下测试了激光器的输出功率,选取的激光器仍为上述腔长 1.5 mm,条宽 90 μm 的无镀膜激光器。测试条件为脉宽 10 μs,脉冲频率为 1 kHz。如图 6 所示,在电流为 7 A 时,得到的最大脉冲功率为 1.5 W。

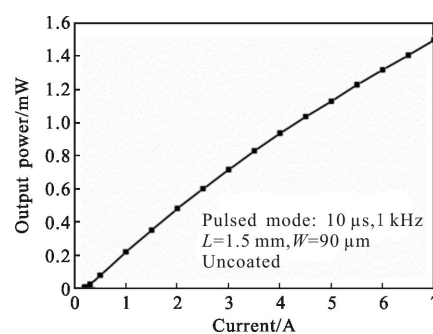


图 6 脉宽 10 μs 频率 1 kHz 下 1.5 mm 腔长激光器在室温下脉冲输出功率特性

Fig.6 Pulsed wave output power characteristics measured under 10 μs pulse width, 1 kHz repetition rate for 1.5 mm lasers at 300 K

笔者在室温下测试了激光器长时间工作在连续激射模式下输出功率变化,激光器被放置在一个温度控制台上,以保持激光器的工作温度约 20℃。激光器工作在最大功率转换效率点处,此时激光器的工作电流约为 0.42 A,连续输出功率约 100 mW。在此工作条件下,热效应对器件的限制是最小的而且激光器的功率输出也最稳定。激光器的输出功率每 24 h 测定一次,如图 7 所示,在激光器点亮超过 3 000 h 后,输出功率仍然保持一个恒定的数值,其中微小的抖动可以解释为功率计测试的微小误差。这说明了我们的制备的激光器有较高的功率稳定性及较长的使用寿命。

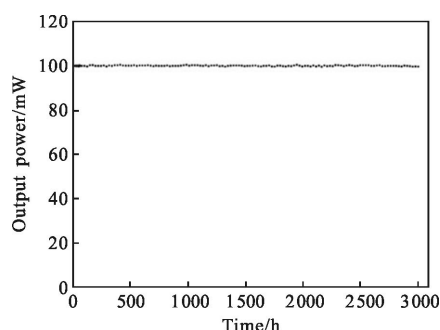


图 7 优化的激光器在室温下的寿命测试

Fig.7 Lifetime of optimized devices measured at RT

3 结 论

总之,通过外延结构以及快速退火工艺的优化,笔者制备了功率转换效率高达 9.8%的激射波长为 2.1 μm 的 GaSb 基双量子阱半导体激光器,这一功率转换效率比原有器件提高了 1.5 倍,器件的内损耗和内量子效率特性都得到的很好的改善。同时,利用优化的外延结构,制备了无镀膜的高功率的激光器,其连续输出功率为 615 mW,脉冲功率为 1.5 W。如果在以后的器件中引入增透增反膜,激光器的输出功率及功率转换效率将会得到更大的提高。

参 考 文 献:

[1] Choi H K, Eglash S J. Room-temperature cw operation at 2.2 μm of GaInAsSb/AlGaAsSb diode lasers grown by molecular beam epitaxy [J]. *Applied Physics Letters*, 1991,

59(10): 1165.
 [2] Zhang Yonggang, Gu Yi, Li Yaoyao, et al. Mid-infrared semiconductor light sources, detectors and its applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 1846–1850. (in Chinese)
 [3] Tian Chaoqun, Wei Donghan, Liu Lei, et al. Etching of GaSb-based materials of mid-infrared semiconductor laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3363–3366. (in Chinese)
 [4] Choi H K, Eglash S J. High-power multiple-quantum-well GaInAsSb/AlGaAsSb diode lasers emitting at 2.1 μm with low threshold current density [J]. *Applied Physics Letters*, 1992, 61(10): 1154.
 [5] Razeghi M, Toumié E, Brown G J, et al. High-performance single-spatial mode GaSb type-I laser diodes around 2.1 μm [C]//SPIE, 2013, 8993: 899319.
 [6] Xu Yun, Wang Yongbin, Zhang Yu, et al. High power 2-μm room-temperature continuous wave operation of GaSb-based strained quantum-well lasers [J]. *Chin Phys B*, 2013, 22(9): 094208.
 [7] Zhang Yonggang, Zheng Yanlan, Lin Chun, et al. Continuous wave performance and tunability of MBE grown 2.1 μm InGaAsSb/AlGaAsSb MQW lasers [J]. *Chinese Physics Letters*, 2006, 23: 2262.
 [8] Zhang Yu, Wang Yongbin, Xu Yun, et al. High-temperature (T=80℃) operation of a 2 μm InGaSb-AlGaAsSb quantum well laser [J]. *Journal of Semiconductors*, 2012, 33 (4): 044006.
 [9] Salhi A, Abdelmajid A. Self-consistent analysis of quantum well number effects on the performance of 2.3-μm GaSb-based quantum well laser diodes [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 5: 918.
 [10] Hilzensauer S, Giesin C, Schleife J, et al. High power diode lasers between 1.8 μm and 3.0 μm for military applications [C]//SPIE, 2013, 8898: 88980U.
 [11] Liang R, Chen J F, Kipshidze G, et al. High power 2.2 μm diode lasers with heavily strained active region [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2011, 23(10): 603.
 [12] Rahimi N, Aragon A A, Romero O S, et al. Electrical and microstructure analysis of nickel-based low-resistance ohmic contacts to n-GaSb [J]. *APL Materials*, 2013, 1(6): 062105.