

激光与光电子学进展

高功率低损耗 852 nm 法布里-珀罗激光器的研制

李耀斌^{1,2}, 李明^{1,2}, 邱平平^{1,2}, 颜伟年^{1,2}, 贾瑞雯^{1,2}, 阚强^{1,2*}

¹中国科学院半导体研究所材料科学重点实验室, 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

摘要 理论分析了内部损耗、内量子效率对激光器输出功率的影响, 并采用 PICS3D 软件对 852 nm 法布里-珀罗 (FP) 激光器进行综合优化设计。设计的器件具有小远场发散角、低内部损耗和高内量子效率等特点, 并在大电流下能够实现稳定的高功率输出。实验制备了基横模 852 nm FP 激光器, 内部损耗小于 1 cm^{-1} , 快轴发散角为 42.3° , 慢轴发散角为 5.6° , 未镀膜情况下的单边输出功率为 115 mW。理论分析结果和实验结果表明, 在增加波导层的厚度同时对波导层非掺杂可以降低载流子导致的光的吸收, 减小激光器内部损耗。通过增大上覆盖层 AlGaAs 材料中的 Al 组分和掺杂浓度, 可以有效地抑制载流子泄漏, 确保激光器实现高内量子效率。

关键词 激光器; 低内部损耗; 高内量子效率; 基横模

中图分类号 TN365

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP2022259.0314001

Design of High Power Low Loss 852 nm Fabry-Perot Laser

Li Yaobin^{1,2}, Li Ming^{1,2}, Qiu pingping^{1,2}, Yan Weinian^{1,2}, Jia Ruiwen^{1,2}, Kan Qiang^{1,2*}

¹Key Laboratory of Semiconductor Materials Science, 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

Abstract The influence of internal loss and internal quantum efficiency on the output power of the laser is theoretically analyzed, and the comprehensive optimization design of the 852 nm Fabry-Perot (FP) laser is carried out by using PICS3D software. The designed device has the characteristics of small far-field divergence angle, low internal loss, and high internal quantum efficiency, which can achieve stable and high power output under large current. The basic transverse mode 852 nm FP laser was fabricated with internal loss less than 1 cm^{-1} , divergence angle of fast axis is 42.3° , divergence angle of slow axis is 5.6° , and unilateral output power of 115 mW without coating. The theoretical and experimental results show that while increasing the thickness of the waveguide layer and non-doping the waveguide can reduce the absorption of light caused by carriers and reduce the internal loss of the laser. By increasing the component of Al and the doping concentration in the AlGaAs material, the carrier leakage can be effectively suppressed and the high internal quantum efficiency can be ensured.

Key words lasers; low internal loss; high internal quantum efficiency; fundamental transverse mode

1 引言

半导体激光器是原子钟中的核心光源。随着科

学技术的飞速发展, 确保时间和频率的精确以及对其进行准确测量在工业以及科研领域起着至关重要的作用。在北斗定位系统、制导、通信中都需要高度

收稿日期: 2021-04-14; 修回日期: 2021-05-06; 录用日期: 2021-05-12

通信作者: *kanqiang@semi.ac.cn

精确的时间频率标准^[1],原子钟发挥了关键作用。铯(Cs)原子钟作为目前精确度最高,稳定性最好的原子钟之一,在导航、卫星定位以空间光通信等领域起着至关重要的作用。852 nm的半导体激光器作为铯原子钟的核心部件之一倍受瞩目^[2-3]。在2006年,法国的Acatel Tales III-V实验室使用InGaAsP作为量子阱材料,实现了功率为280 mW的852 nm法布里-珀罗(FP)激光器^[4],之后通过改进工艺将斜率效率从0.9 W/A提高到了0.92 W/A^[5]。2014年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的徐华伟等^[6]制备了国内首个性能较好的852 nm FP激光器,斜率效率为0.64 W/A,激光器的条宽增加到100 μm时,最大输出功率为290 mW。2017年,北京工业大学廖翌如^[7]制作了输出功率为104 mW,激光波长为846.5 nm,输出光谱线宽为0.625 nm的FP激光器。这些研究报道都是基于激光器端面作为反射镜的FP激光器的相关研究。然而,这些高功率基横模半导体激光器的设计细节在已发表的学术文献中没有详细的讨论,使得系统的高功率激光器设计及优化仍然具有挑战。在设计高功率激光二极管时,一个重要的步骤是仔细选择合适的增益及波导结构,获得低内部损耗(α_i)和高内部量子效率(η_i)。研究表明,通过增加波导限制层的厚度和减少量子阱的数量,可以减少自由载流子吸收从而降低 α_i ^[8-9]。此外,当波导厚度达到1 μm以上且 α_i 最小化时, η_i 仍然会因为各种物理机制而降低^[10],包括多量子阱(MQW)^[11-12]的载流子泄漏和波导层中的非辐射复合过程^[13]。

本文利用商用半导体激光模拟软件进一步分析了影响 α_i 和 η_i 的物理机制,并实验制备了模拟设计的激光器,对其进行表征,以验证本文的仿真设计,为高功率基横模852 nm半导体激光器的设计优化提供进一步指导。通过数值仿真对激光器的结构进行设计和优化,以低内部损耗和高内部量子效率并重的原则,分别通过对激光器的波导结构、掺杂浓度等方面进行优化,采用了非对称1 μm宽波导双沟脊波导结构,在扩大光腔的同时保证基横模激射。最终实现FP激光器的内部损耗为0.977 cm⁻¹,快轴发散角为42.3°,慢轴发散角为5.6°时,输出功率为115 mW。

2 基本原理与实验仿真

实现较高的斜率效率、提高半导体激光器的功率饱和电流,以及基横模稳定工作是本文工作的基本设计原则。激光器的输出功率主要受斜率效率、热饱和

效应和端面损伤等因素的影响。理论表明,通过降低内部损耗和增大内量子效率可以提高斜率效率。同时,增大波导层的宽度和激光器的腔长 L 、减小激光器的串联电阻等可以明显增大激光器的饱和电流。此外,增大波导层厚度可以扩大有效光斑尺寸,提高端面光学灾变阈值功率,减小远场发散角。

激光器的斜率效率主要由内部损耗 α_i 、内量子效率 η_i 和腔长 L 三个参数决定,需要在降低内部损耗的同时确保内量子效率较高。虽然激光器的腔长越短,腔面损耗 α_m 越大,斜率效率就会越高,但为了使激光器工作在更大的电流下输出更大的功率,同时减小激光器的热效应,提高输出模式的稳定性,必须采用长腔长设计^[14],

$$S_e = \frac{hv}{q} \eta_i \frac{1}{1 + \frac{\alpha_i}{\alpha_m}} = \frac{hv}{q} \eta_i \frac{1}{1 + \frac{2L\alpha_i}{\ln(\frac{1}{R_1 R_2})}}, \quad (1)$$

式中: S_e 为斜率效率; h 为普朗克常数; v 为辐射电磁波的频率; q 为电荷量; R_1 为左侧腔面反射率; R_2 为右侧腔面反射率。

激光器的内部损耗主要与三个方面有关,即外延质量、材料的缺陷产生的光学散射和材料内部载流子吸收。激光器的外延质量的提高可以降低内部损耗,在这里不做进一步的分析。

本文主要通过通过对激光器波导结构进行优化从而降低自由载流子吸收效应而导致的内部损耗。自由载流子吸收引入的模式损耗正比于掺杂浓度分布和光场强度分布的空间交叠积分,如下所示,

$$\alpha_i = \frac{1}{p} \int a(x) |E(x)|^2 dx, \quad (2)$$

式中: $p = \int |E(x)|^2 dx$; $a(x)$ 为在 x 位置的材料吸收损耗; $E(x)$ 为横电(TE)光模式在垂直方向波导基模光场强度的一维分布。材料的掺杂浓度正比于材料的吸收损耗,可以表示为

$$\alpha = \Gamma(\sigma_n n + \sigma_p p), \quad (3)$$

式中: α 为材料的吸收损耗; Γ 为光限制因子; σ_n 和 σ_p 分别为电子和空穴的散射截面; n 和 p 为电子和空穴的体积浓度。利用crosslight软件计算得到了在注入电流为500 mA下载流子的浓度,由图1可以看出在大电流注入下,载流子主要集中在N型、P型覆盖层中,然后是量子阱,少部分来自波导层。P型和N型覆盖层中大量的掺杂元素电离导致其载流子浓度最高,而波导层的载流子浓度最低,小于 1×10^{17} cm⁻³。对于GaAs基半导体激光器,内部损耗主

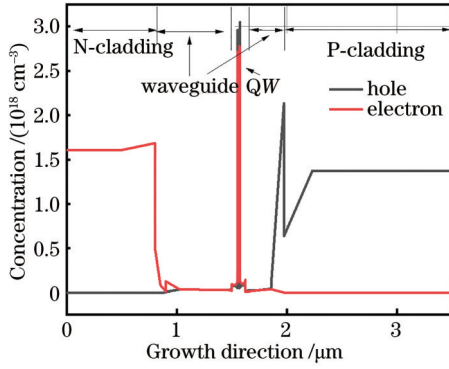


图 1 激光器在 500 mA 注入电流下的载流子浓度分布图
Fig. 1 Carrier concentration distribution of the laser at 500 mA injection current

要来自有源区和覆盖层的自由载流子吸收,还有小部分来自波导层^[15]。本文为了进一步研究影响内部损耗的因素,利用 PICS3D 软件进行以下两个方面的优化。首先是增大激光器的波导层厚度,减小掺杂浓度分布与激光器光场分布交叠的积分。其次是对波导层和覆盖层的掺杂浓度进行优化。为了便于分析,PICS3D 中建立的激光器的结构为宽接触激光器。本文器件的基础结构如图 2 所示,首先通过模拟计算出 α 随着 P 型波导层的厚度 W 、P 覆盖层和波导层的掺杂浓度的变化趋势。如图 3 所示,曲线 1 表示内部损耗随 P 型波导层的厚度 W 的变化,随着 P 型波导层厚度的增大,内部损耗开始直线下降,当 W 大于 600 nm 时,下降速度减缓。曲线 2 为固定 W 为 300 nm,波导层不掺杂情况下, α 随着覆盖层掺杂浓度变化的趋势,可以看到 α 随着覆盖层掺杂浓度增大而增大。曲线 3 是波导层掺杂浓度对内部损耗的影响,随着波导层掺杂浓度的增加, α 呈现出增大的趋势,但是变化较小。增大波导层的厚度、减小波导层

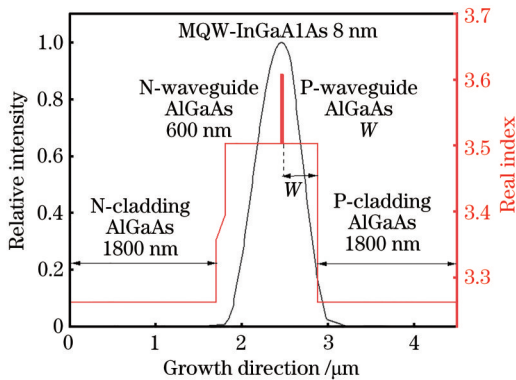


图 2 激光器的光场分布和有效折射率参数图
Fig. 2 Field distribution and effective refractivity parameter of laser

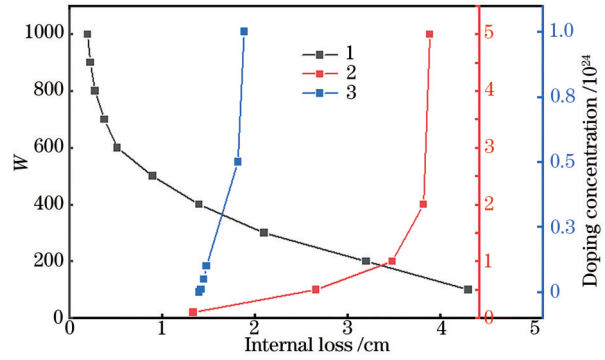


图 3 内部损耗随着 P 型波导层的 W 、P 覆盖层和波导层的掺杂浓度的变化趋势图
Fig. 3 Internal loss changes with W of the P-waveguide layer, doping concentration of P-cladding layer, and waveguide layer

和覆盖层的掺杂浓度均可以达到减小 α 的目的。但是,由于激光器的串联电阻随着掺杂浓度的减小而增大,导致功率饱和电流降低,所以不可能无限制地减小覆盖层的掺杂浓度。计算公式如下,

$$R_s = \sum_j \frac{\rho_j d_j}{W_d L}, \quad (4)$$

式中: R_s 为激光器的串联电阻; d_j 为第 j 层的厚度; ρ_j 为第 j 层的电阻率; W_d 为激光器的条宽, L 为激光器的腔长。激光器的串联电阻随着 P 型波导层厚度的增加基本呈线性增加^[16]。综合考虑到内量子效率和串联电阻的影响,波导层不掺杂,将 P 覆盖层渐变掺杂。在靠近有源区的一侧降低 P 覆盖层的分子掺杂浓度,在远离有源区的一侧增大分子掺杂浓度,P 覆盖层的分子掺杂浓度由 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 增加到 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,这样可以在降低损耗的同时保持串联电阻不增大。

要想提高激光器的斜率效率,除了减小其内部损耗,还要增大其内量子效率。内量子效率 η_i 的定义为产生受激辐射的电流与阈值以上的电流的比值,

$$\eta_i = \frac{I_{st}}{I - I_{th}}, \quad (5)$$

式中: I_{st} 为导致受激辐射的总电流; I_{th} 为阈值以上的电流。考虑到激光器的总电流为导致受激辐射加上自发复合、俄歇复合和载流子泄漏等部分的电流之和,(5)式可改写为

$$\eta_i = 1 - \frac{\sum (I_n - I_{n,th})}{I - I_{th}}. \quad (6)$$

由(6)式可看出,当激光器到达阈值后,随载流子浓度增加被钳制的电流不会导致激光器阈值以

上的内量子效率的降低。而导致 η_i 降低的真正原因是电流没有被完全钳制住,例如在有源区中,在大电流注入的情况下,会导致光子密度增加,从而引起增益压缩效应,需要更高的载流子浓度来维持阈值模式增益。另外,载流子形貌的空间烧孔效应也会导致部分载流子浓度发生变化,导致载流子没有被完全钳制住,引起 η_i 的降低。但相比较于波导结构中覆盖层载流子没有被钳制住的影响,有源区这些效应对内量子效率的影响较小。在图 2 中,由于波导层和覆盖层中的载流子浓度与量子阱中的载流子浓度相关,在阈值之上会随着

注入电流的增加而增加,不会被钳制住,从而导致 η_i 降低。同时,波导层和覆盖层中的准费米能级如果没被钳制住,也会导致 η_i 降低。当波导层和覆盖层的准费米能级没有被钳制住时,随着注入电流的增大,这个区域会出现大量的载流子,波导层和覆盖层内电场的强度会导致泄漏漂移载流子的泄漏效应增强,载流子在覆盖层中的泄漏电流增加,从而导致内量子效率降低。运用 PICS3D 软件来分析以上载流子非辐射复合和泄漏电流对激光器内量子效率的影响。模拟的激光器结构和掺杂分布如图 4 所示。

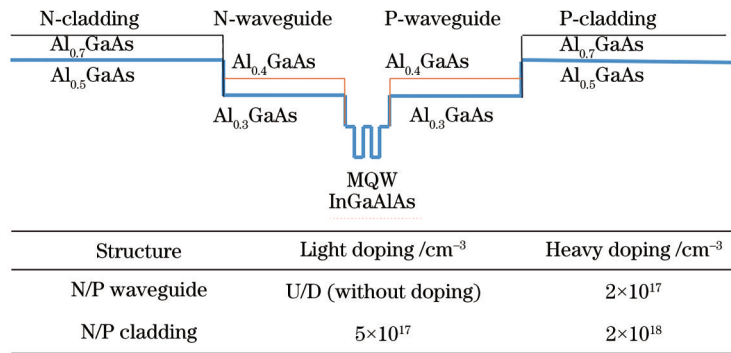


图 4 优化波导结构和激光结构中掺杂浓度的示意图

Fig. 4 Schematic for optimizing doping concentration in waveguide and laser structures

这里需要注意的是,激光器波导层中的载流子浓度随着 Al 组分的变化以及掺杂浓度的变化而变化。当波导层和覆盖层有足够多的载流子时,电子和空穴会发生非辐射复合,从而影响内量子效率。图 5(a)和(b)为不同结构激光器的电子和空穴浓度分布图,实线和虚线分别表示波导层和覆盖层的重掺杂和轻掺杂,不同灰度对应不同 Al 组分。根据图 5(a)可得,在重掺杂的情况下,下波导层(N-

waveguide) 中的电子浓度远大于上波导层(P-waveguide)。在上波导层中,由图中的深灰实线和深灰虚线可得重掺的电子浓度低于轻掺的电子浓度,由深灰虚线和浅灰虚线可知波导层 Al 组分越高,在靠近有源区的地方电子浓度越低,在远离有源区的地方两者电子浓度大小相同,对比右侧 P 覆盖层中的深灰实线和黑色实线,Al 组分为 0.7 对应的载流子浓度远低于 Al 组分为 0.5 时的载流子浓

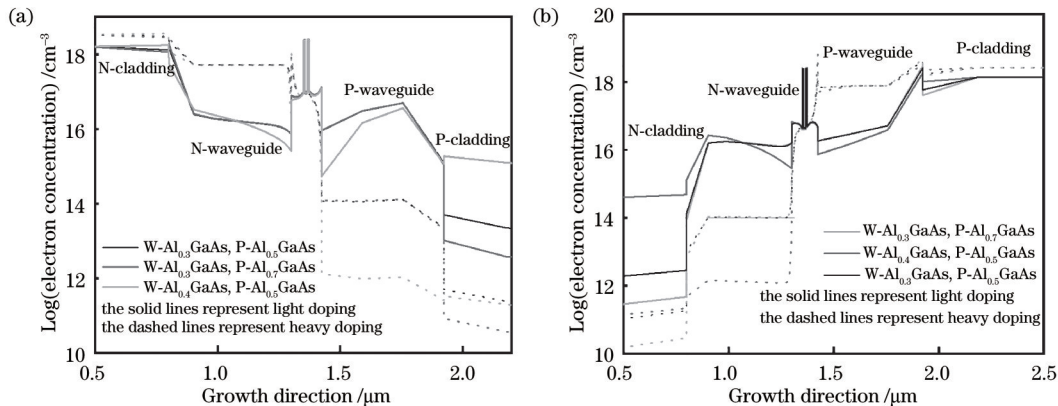


图 5 相同注入电流下不同结构激光器的电子和空穴浓度分布模拟。(a)电子浓度分布;(b)空穴浓度分布

Fig. 5 Simulation of electron and hole concentration distributions of lasers with different structures at same injection current.

(a) Electron concentration distribution; (b) hole concentration distribution

度,即 Al 组分越大电子浓度越低。此外,Al 组分相同时,掺杂浓度越大,载流子浓度越低。在下波导层中,掺杂浓度越高电子浓度越高,Al 组分的变化对于电子浓度的变化影响越小。由浅灰曲线(实线+虚线)可得波导层的 Al 组分较大时,量子阱和波导层界面处的势垒比其他两种情况高,在靠近量子阱的区域对载流子的限制更好,同时,由于波导层与覆盖层界面处的势垒小,对载流子的限制弱,导致覆盖层中的电子浓度高。在图 5(b)中,波导层中 Al 组分越高空穴浓度越低,掺杂浓度越高空穴浓度也越低。同理,由于波导层 $Al_{0.4}$ 和覆盖层 $Al_{0.5}$ 界面处的势垒较低,所以在远离量子阱区域后,深灰曲线对应结构的波导层和覆盖层中载流子浓度开始高于其他两种结构,由于载流子浓度增加,非辐射复合效应就会增强,对内量子效率的影响也就越大,从图 5(a)和(b)都可以看出,波导层和覆盖层的 Al 组分相差只要超过 0.2(带隙差大于 0.45 eV),同时增大掺杂浓度,能够对载流子起到很好的限制作用。

为了验证发生了载流子泄漏,图 6 给出了 500 mA 注入电流下不同激光器在外延方向的电子和空穴电流密度分布图,实线和虚线分别表示波导层、覆盖层重掺杂和轻掺杂。从图 6(a)中可以看出,P 覆盖层中激光器的电子电流密度都相同,但是在 N 波导层和 N 覆盖层中,却有很大的差异,其中对比于掺杂浓度带来的影响,Al 组分对电子(空穴)电流的影响比较小,与图 5 所描述的情况一致。在 N 波导层中,Al 组分越高,电子浓度越大,导致电子电流密度越大。掺杂浓度越高,电子电流越小,电

子电流密度越小。在 P 波导层中,Al 组分和掺杂浓度越高,电子浓度越小,电子电流密度越小。根据理论分析,激光器 P 波导层和覆盖层中的电子电流密度应该为 0,因此,可以近似认为图中 P 波导层中的电子电流为从有源区中泄漏电子泄漏电流。对比图 6(a)和(b)中不同器件 P 波导层和覆盖层中电子空穴电流密度的分布,可以明显看出 P 波导层重掺杂且波导层和限制层 Al 组分大于 0.2 的结构电子泄漏电流最小,而轻掺杂结构且势垒较低的结构电子泄漏电流最大,这与图(5)的结果一致,即通过增大上覆盖层的 Al 的组分和掺杂浓度,保证波导层和覆盖层势垒的高度不小于 0.45 eV,可以有效地抑制载流子泄漏,从而实现足够高的内量子效率。

提高掺杂浓度、选择合适的波导层和覆盖层的 Al 组分都可以确保波导层和覆盖层的势垒足够高,减小泄漏电流,从而保证激光器的内量子效率。然而掺杂浓度过大会导致内部损耗增加从而降低器件的斜率效率,图 7(a)进一步研究了 P 覆盖层掺杂浓度对内部损耗和内量子效率的影响,可以得到随着掺杂浓度的增加,内部损耗增大而内量子效率减小,因此需要综合考虑,选择最优的掺杂浓度。图 7(b)为不同 $Al_xGa_{1-x}As$ 材料的 Al 组分对于激光器的内部损耗和内量子效率的影响,内部损耗和内量子效率均随着 Al 组分的增加先增大后减小,当 $X=0.4$ 时,内部损耗最大,内量子效率最高。 $AlGaAs$ 材料热阻会随着 Al 组分的增加先增大再减小,在 $X=0.4$ 时最高,而该材料的迁移率会随着 Al 组分的增大而减小,因此需要合理地选择波导层和覆盖层的 Al 组分。

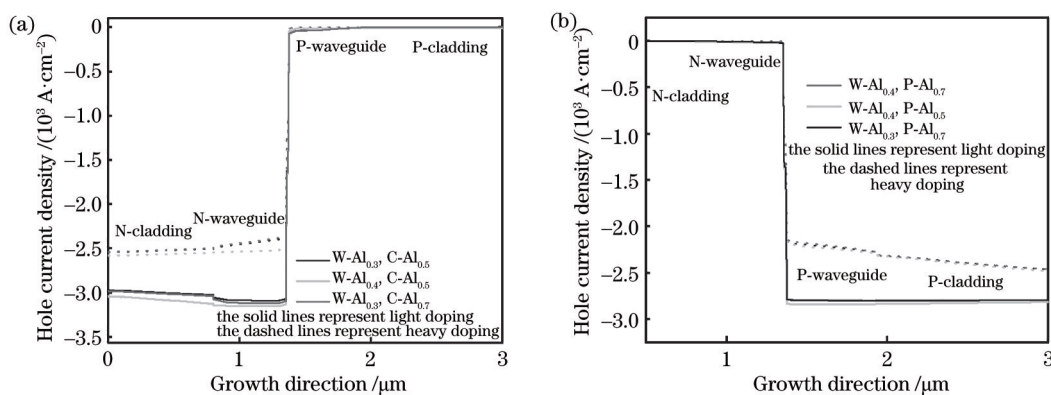


图 6 在垂直方向上的电流密度分布。(a)电子;(b)空穴

Fig. 6 Current density distributions in vertical direction. (a) Electron; (b) hole

综合评估不同参数对于激光器内部损耗和内量子效率的影响,本实验的半导体激光器结构选择 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 作为波导层, $Al_{0.53}Ga_{0.47}As$ 作为覆盖层。

虽然通过增大波导层厚度可以减小内部损耗,但随着波导层厚度的增加,波导中也会支持更多的横向模式。所以采用了非对称波导结构,通过调整有源

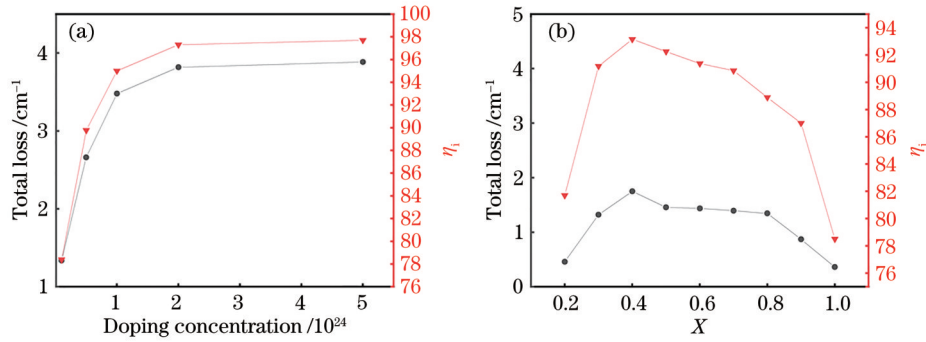


图 7 实验结果。(a)P 覆盖层的内部损耗和内量子效率随掺杂浓度的变化;(b)不同 Al_xGa_{1-x}As 材料的 Al 组分对于激光器的内部损耗和内量子效率的影响

Fig. 7 Experimental results. (a) Internal loss and internal quantum efficiency versus doping concentration of P-cladding layer; (b) internal loss and internal quantum efficiency versus Al composition of different Al_xGa_{1-x}As materials

区在波导层中的位置,降低高阶横向模式的模式增益,达到抑制高阶横向模式激射的目的。同时,为了在串联电阻不增加的情况下,保证较低的内部损耗和较高的内量子效率,对有源区两侧的波导层和覆盖层进行掺杂优化,N/P 波导层不掺杂,P 覆盖层采用渐变掺杂,靠近有源区的地方进行低掺杂,远离有源区的地方采用高掺杂。本文同时对侧向波导结构进行了优化,采用了泄漏双沟脊波导结构,通过引入波导的泄漏损耗来抑制高阶模式的激射,与常见的通过弱折射率差的脊型波导保证激光器侧向模式的稳定相比,双沟脊波导结构提高了激光器基横模的工作范围。

3 器件的制备与结果讨论

在经过数值仿真和理论分析优化后,设计的非对称大光腔结构 FP 激光器首先采用 MOCVD 外延系统进行材料的生长。在 n⁺GaAs 衬底上依次生长如下材料,1800 nm 的 N 限制层,650 nm 的 N 波导层,50 nm 的 AlGaAs 下台阶限制层,应变为 0.65% 的 InGaAlAs/AlGaAs 双量子阱,50 nm 的 AlGaAs 上台阶限制层,P 波导层的厚度为 350 nm,100 nm 的 InGaP 光栅层和 50 nm 的 GaAsP 光栅覆盖层,最后再生长 1800 nm 的 P 型覆盖层和 200 nm 的 GaAs 接触层。综合考虑到掺杂浓度对内部损耗和内量子效率的影响,N 覆盖层的掺杂浓度为 2 × 10¹⁸ cm⁻³,P 覆盖层采用渐变掺杂,掺杂浓度随着距离有源区距离的增大而增大。量子阱的荧光 (PL) 谱如图 8 所示,在 838.4 nm 附近,半峰全宽 (FWHM) 为 16.8 nm,从 PL 谱的峰值和 FWHM 可以看出量子阱的外延质量良好。图 9 为 FP 激光器在注入电流为 300 mA 情况下的光谱图,光谱的 FWHM 为 0.574 nm。两种原因

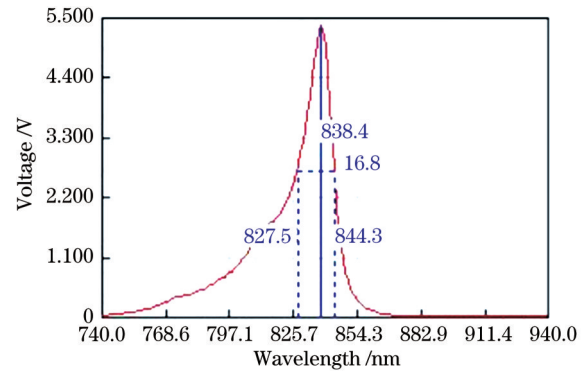


图 8 FP 激光器室温 PL 谱

Fig. 8 Room temperature PL spectrum of FP laser

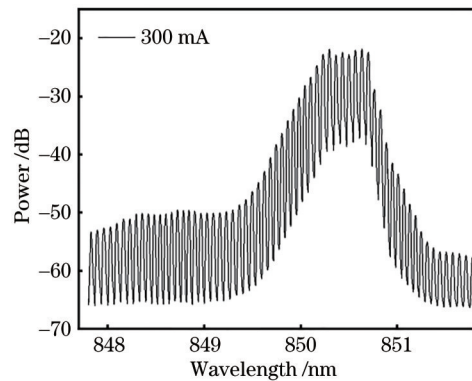


图 9 FP 激光器的光谱图

Fig. 9 Spectrogram of FP laser

导致波长存在偏差,一是实际制备的器件的量子阱材料 InGaAlAs 的组分与理论设计的存在偏差,之后可以微调 InGaAlAs 的组分,使其激射波长对准 852 nm。二是量子阱的厚度与理论设计存在偏差,随着量子阱厚度的增加,波长会向长波方向移动^[4],可以适当地增加量子阱厚度使其波长对准 852 nm。

激光器的脊波导采用干法刻蚀得到。图 10 为

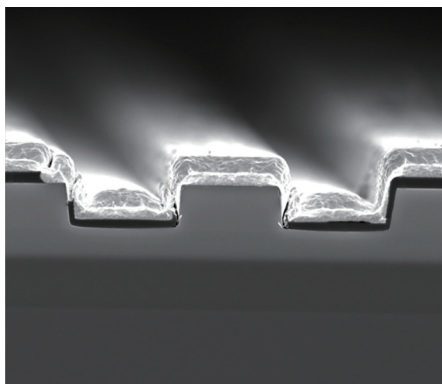


图 10 FP激光器截面图

Fig. 10 Cross section of the FP laser

感应耦合等离子刻蚀(ICP)出的双沟脊波导结构图,台面的宽度和高度基本与设计值一致,有利于对激光器脊波导进行优化。脊波导刻蚀完成之后,用PECVD溅射350 nm的SiO₂之后将脊台上的SiO₂去除,形成电极接触窗口,通过磁控溅射在外延片表面溅射TiPtAu/Au作为P型电极,然后减薄抛光并溅射AuGeNi/Au作为N面电极。对芯片快速热退火形成欧姆接触后解理并进行测试,本文制备

的激光器端面没有进行镀膜和封装处理。

为了研究激光器的基本参数,将FP激光器截成不同腔长的管芯。首先在室温连续波(CW)激发的条件下测量不同腔长的激光器,FP激光器的脊宽为3 μm,沟宽为7 μm。如图11给出了器件的外微分效率η_e的倒数与腔长L的关系,可得内部损耗α_i=0.977 cm⁻¹,内量子效率为η_i=62.1%。内部损耗与理论分析的结果基本符合,但是内量子效率过低。图12是在室温、直流偏置的情况下对腔长为1 mm未镀膜的半导体激光器进行的光电测试结果,阈值电流为42 mA,斜率效率为0.48 mW/mA。与仿真的结果相比,阈值电流大小相近,但是斜率效率较低,电阻偏大。内量子效率过低导致了斜率效率的下降,由图13可以看到,相比于没有加入InGaP光栅层和GaAsP光栅覆盖层的结构,有光栅层的结构的激光器在P光栅区和波导层的位置电子电流密度较高,空穴电流密度较低,泄漏电流增加,内量子效率降低;另一方面,意味着这个区域会出现大量的载流子,发生严重的非辐射复合,导致内

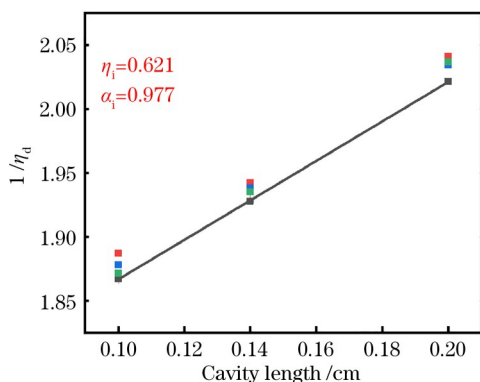


图 11 外微分效率的倒数与腔长的关系

Fig. 11 Relationship between cavity length and inverse external differential efficiency

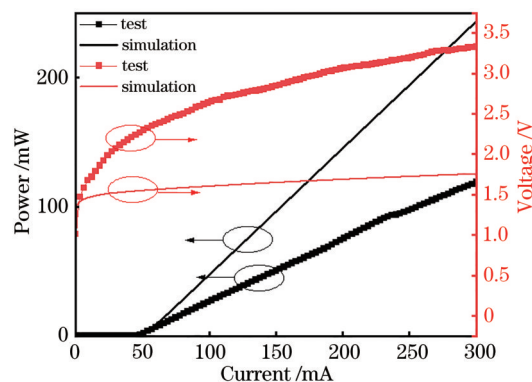


图 12 光电特性实验和理论结果

Fig. 12 Experimental and theoretical results of optical and electrical characteristics

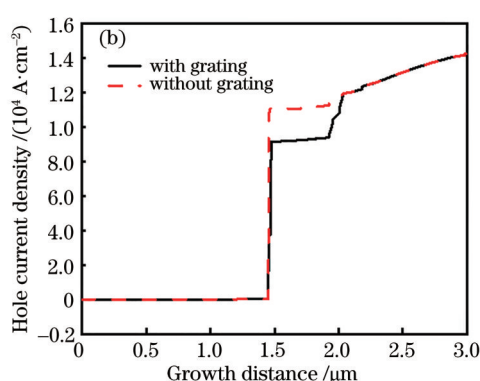
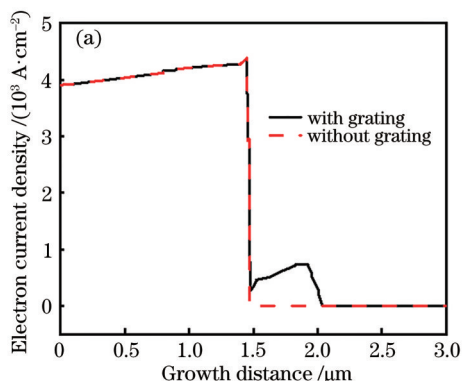


图 13 不同结构激光器在外延方向的电流密度分布图。(a)电子;(b)空穴

Fig. 13 Current density distribution diagrams with different structures in epitaxial direction. (a) Electron; (b) hole

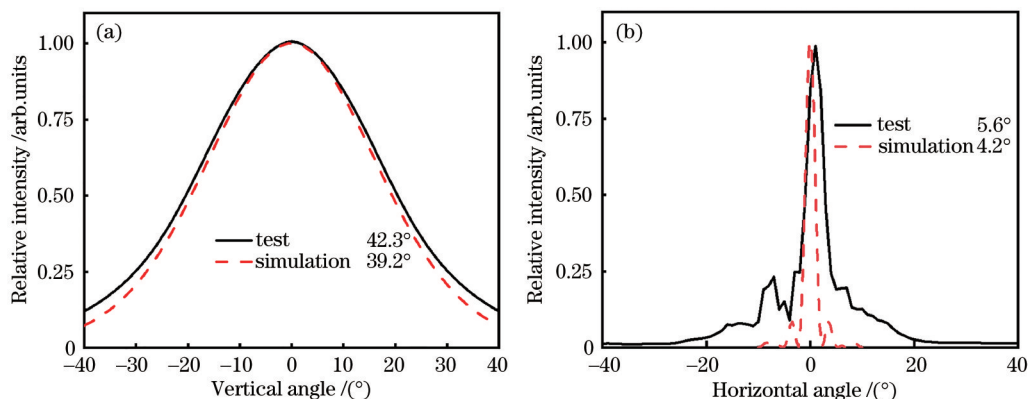


图 14 远场测试结果。(a)快轴发散角方向;(b)慢轴发散角方向

Fig. 14 Far-field test results. (a) Direction of divergence angle of fast axis; (b) direction of divergence angle of slow axis

量子效率降低,从而使激光器输出功率的斜率效率减小。图 14 显示了激光器的远场特性,在注入电流为 200 mA 的情况下,快轴发散角约为 42.3° ,慢轴发散角为 5.6° ,基本与理论模拟的结果相符。

4 结 论

本文对激光器的波导结构、掺杂浓度等参数对激光器特性影响进行研究。理论及仿真分析表明,虽然通过增加波导层的厚度同时采用非掺杂波导层可以减少自由载流子引起的光吸收,减小内部损耗,但随着波导层厚度的增加,波导中也会支持更多的横向模式。所以本文采用非对称波导结构,通过调整有源区在波导层中的位置,降低高阶横向模式的模式增益,达到抑制高阶横向模式激光的目的。通过增大上覆盖层 AlGaAs 材料中的 Al 组分和掺杂浓度,可以实现对载流子的有效抑制,保证内量子效率。同时,为了在串联电阻不增加的情况下,保证较低的内部损耗和较高的内量子效率。N/P 波导层不掺杂,P 覆盖层采用渐变掺杂,靠近有源区的地方进行低掺杂,远离有源区的地方采用高掺杂。并通过合理的外延结构及双沟脊波导结构,实现激光器基模工作。FP 激光器在注入电流为 300 mA 时单边输出功率为 115 mW,快轴发散角和慢轴发散角分别为 42.3° 和 5.6° ,器件的内部损耗为 0.977 cm^{-1} 。器件特性与理论模拟的结果基本吻合,在此基础上可进一步优化器件结构。仿真分析表明,内量子效率过低的原因是光栅层材料的选择不当导致了载流子泄漏。通过优化光栅层材料结构与掺杂,有望进一步提升器件的性能。

参 考 文 献

- [1] Bauch A. Caesium atomic clocks: function, performance and applications[J]. Measurement Science and Technology, 2003, 14(8):1159-1173.
- [2] Chen L H, Yang G W, Liu Y X. Development of semiconductor lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500001.
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.
- [3] Ning Y Q, Chen Y Y, Zhang J, et al. Brief review of development and techniques for high power semiconductor lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0114001.
宁永强, 陈泳屹, 张俊, 等. 大功率半导体激光器发展及相关技术概述[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0114001.
- [4] Ligeret V, Vermersch F J, Bansropun S, et al. High-power Al-free active region ($\lambda=852\text{ nm}$) DFB laser diodes for atomic clocks and interferometry applications[C] //2006 Conference on Lasers and Electro-Optics and 2006 Quantum Electronics and Laser Science Conference, May 21-26, 2006, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE Press, 2006: 1-2.
- [5] Vermersch F J, Ligeret V, Bansropun S, et al. High-power narrow linewidth distributed feedback lasers with an aluminium-free active region emitting at 852 nm[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(13): 1145-1147.
- [6] Xu H W, Ning Y Q, Zeng Y G, et al. Design and epitaxial growth of quantum-well for 852 nm laser diode[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(3): 590-597.
徐华伟, 宁永强, 曾玉刚, 等. 852 nm 半导体激光器

- 量子阱设计与外延生长[J]. 光学 精密工程, 2013, 21 (3): 590-597.
- [7] Liao Y R. The fabrication and analysis of characteristics of a 852 nm semiconductor lasers[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017.
廖翌如. 852 nm 半导体激光器的工艺制备及其特性分析[D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
- [8] Garbuzov D, Xu L, Forrest S R, et al. 1.5 μm wavelength, SCH-MQW InGaAsP/InP broadened-waveguide laser diodes with low internal loss and high output power[J]. Electronics Letters, 1996, 32 (18): 1717-1719.
- [9] Wang Y Z, Li T, Hao E J, et al. Optimization studies of single transverse mode 1.55 μm ridge-waveguide lasers[C] //International Photonics and Optoelectronics Meetings (POEM), May 25-26, 2013, Wuhan, China. Washington, D. C.: OSA, 2013: NSa3A.40.
- [10] Lysevych M, Tan H H, Karouta F, et al. Effect of active region position in Fabry-Perot single transverse mode broad-waveguide InGaAsP/InP lasers[J]. Optics Express, 2014, 22(7): 8156-8164.
- [11] Ke Q, Tan S Y, Liu S T, et al. Fabrication and optimization of 1.55 μm InGaAsP/InP high-power semiconductor diode laser[J]. Journal of Semiconductors, 2015, 36(9): 094010.
- [12] Belenky G, Shterengas L, Trussell W, et al. Effect of heterobarrier leakage on the performance of high power 1.5- μm InGaAsP multiple quantum well lasers [C] //LEOS 2000. 2000 IEEE Annual Meeting Conference Proceedings. 13th Annual Meeting. IEEE Lasers and Electro-Optics Society 2000 Annual Meeting (Cat. No. 00CH37080), November 13-16, 2000, Rio Grande, PR, USA. New York: IEEE Press, 2000: 872-873.
- [13] Lu D, Yang Q L, Wang H, et al. Review of semiconductor distributed feedback lasers in the optical communication band[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0701001.
陆丹, 杨秋露, 王皓, 等. 通信波段半导体分布反馈激光器[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0701001.
- [14] Ke Q, Tan S Y, Zhai T, et al. Characteristic optimization of 1.55- μm InGaAsP/InP high-power diode laser[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9266: 92660Z.
- [15] Pikhtin N A, Slipchenko S O, Sokolova Z N, et al. Internal optical loss in semiconductor lasers[J]. Semiconductors, 2004, 38(3): 360-367.
- [16] Chong F, Wang J, Xiong C, et al. Optimum the thickness of p-waveguide layer for high conversion efficiency diode lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3419-3423.
崇锋, 王俊, 熊聪, 等. 优化 p 型波导层厚度提高半导体激光器电光转换效率[J]. 光学学报, 2009, 29 (12): 3419-3423.