

表面高阶曲线光栅半导体激光器横模特性分析

梁宏进, 邹永刚*, 范杰, 付曦瑶, 史可, 田锐

长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022

摘要 半导体激光器在光通信、生物医疗、激光雷达等领域中得到广泛应用,其单模稳定输出特性一直是国内外的研究热点。制备了一种基于表面高阶曲线光栅的宽脊波导半导体激光器,刻蚀曲线型高阶光栅后高阶横模损耗远大于基横模损耗,同时设置宽脊电流限制注入结构,使得高阶横模激射阈值高于基横模阈值,从而改善器件的横模特性并压窄光谱线宽。利用温控模块将器件的工作温度控制为 18 °C,对腔长为 2 mm、条宽为 500 μm 的器件进行测试,在 0.5 A 电流下测得慢轴发散角为 5.3°,快轴发散角为 29.2°,在 1 A 驱动电流下测得 3 dB 光谱线宽为 0.173 nm,边模抑制比为 22.6 dB。实验结果表明,表面高阶曲线光栅对宽脊波导半导体激光器中的高阶横模起到了抑制作用且能够压窄光谱线宽,有助于实现半导体激光器的单模稳定输出,同时器件采用紫外光刻工艺,大幅降低了器件的制备难度。

关键词 激光器; 半导体激光器; 高阶布拉格光栅; 曲线光栅; 高阶横模; 远场发散角

中图分类号 TN365 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/CJL231481

1 引言

半导体激光器(LD)凭借其小体积、高电光转换效率、长寿命以及可直接电流驱动等优点在工业制造、医疗诊断^[1]、光谱传感^[2]和空间光通信^[3]等领域中得到广泛应用。随着市场需求的不断增加,激光光源面临更高的要求,即在高功率运转下应具有较窄的光谱线宽、较好的横模特性以及较低的生产成本。例如,在光通信领域中,多频激光输出会导致时域脉冲展宽以及串扰等,通信带宽受限^[4]。为获得性能优异的单模输出半导体激光器,科研人员开展了大量研究工作。1996年,Orth等^[5]通过聚焦离子束注入及外延再生长在InGaAs/AlGaAs材料上制备了电泵浦一阶增益耦合分布反馈半导体激光器(DFB-LD),实现了单纵模发射,由于存在高阶横模,谱线向高能量方向展宽。2014年,Gaimard等^[6]在光波导顶部定义了掩埋式二阶折射率耦合光栅,器件能够实现单频发射,边模抑制比(SMSR)为 30 dB,在 15 °C 和 20 °C 温度下器件发射光束分别为基横模和一阶横模,横模控制不稳定。2016年,Matthey等^[7]通过电子束光刻(EBL)在外延的光栅层中定义了二阶布拉格光栅,通过刻蚀 3.5 μm 宽的双沟槽脊波导,获得了单横模发射和腔内侧向约束能力,SMSR 达到 45 dB,光谱线宽 ≤ 1 MHz,器件满足铯(Cs)原子钟的单模工作需求。2021年,中国科学院半导体研究所制备了GaSb基闪耀光栅外

腔激光器(BG-ECL)^[8],采用单横模窄脊波导激光二极管,通过在直脊波导上涂覆增透膜,有效抑制了腔内高阶模式的激射,其远场发散角为 $57.8^\circ \times 13.2^\circ$,最终器件实现了单模高功率输出并具有高光谱纯度,SMSR 达到 56.26 dB。2023年,中国科学院半导体研究所利用标准光刻技术制备了具有嵌入式脊波导结构的GaSb基激光二极管^[9],通过在脊波导中引入折射率微扰,调制腔内不同法布里-珀罗(FP)模式的阈值增益,获得了稳定的单模工作特性,SMSR 为 33 dB,光谱的半峰全宽(FWHM)为 56 MHz。同年,中国科学院半导体研究所通过引入渐变Al组分,结合窄脊型波导结构,制得了 1550 nm 波段的高功率基横模激光器^[10],器件快轴和慢轴远场发散角分别为 32.9°和 11.1°。这些解决方案往往伴随着高成本和复杂的制备过程,如制备掩埋式低阶光栅涉及外延再生长和纳米尺寸光栅制造技术。因此,采用简单高效的新方案实现半导体激光器的单模稳定输出一直是国内外的研究热点。

本文设计并制备了一种含有高阶曲线型布拉格光栅的宽脊波导分布反馈(CG-DFB)半导体激光器,重点分析了其横模抑制能力,利用侧边区域的曲线光栅以及脊波导电流限制注入结构,提升了器件抑制高阶横模的能力。设置电流限制注入结构,使得高阶横模激射阈值大于基横模阈值,而高阶横模增益远小于于基横模增益。同时,边缘区域的曲线光栅增加了波导内

收稿日期: 2023-12-06; 修回日期: 2024-01-02; 录用日期: 2024-01-16; 网络首发日期: 2024-01-26

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20210201030GX)、重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2022NSCQ-MSX0401)

通信作者: *zouyg@cust.edu.cn

高阶横模的损耗,从而进一步提高了器件对基横模与高阶横模的辨别能力。中心线处的高阶直线光栅使基模稳定反馈放大并压窄线宽,便于实现器件的单模稳定输出。器件采用紫外光刻工艺且无需二次外延,大幅降低了制备难度。

2 仿真与实验

2.1 原理与结构设计

对于采用脊型波导结构的激光器,脊波导宽度的选取影响其对高阶横模的限制能力^[11]。横模截止条件^[12]为

$$W_m = \frac{m\lambda}{2\sqrt{n_{\text{eff1}}^2 - n_{\text{eff2}}^2}}, \quad (1)$$

式中: m 为高阶横模的阶数; W_m 为 m 阶横模截止所对应的脊波导宽度; n_{eff1} 和 n_{eff2} 分别为脊波导区域和脊两侧区域的有效折射率; λ 为激光波长。可以看出,脊波导限制的高阶横模的数量越多,对应的脊波导宽度就越窄,基横模时有些波段处的脊波导宽度甚至在 $2\mu\text{m}$ 以下,制备难度也就越大。而为了提升功率,成本较低的办法是采用宽脊波导,这就需要引入高阶横模抑制机制。

为获得宽脊波导器件优异的基横模输出特性,本文设计了表面高阶曲线光栅和脊波导电流限制注入结构,激光器结构如图1所示。曲线光栅结构能够增加高阶横模损耗,对脊波导宽度没有苛刻要求,因此该器件采用宽脊波导结构,一方面降低了加工窄脊的成本以及工艺难度,另一方面提升了器件增益介质的利用率,从而增加了器件输出功率。在脊宽(W_r)为 $400\mu\text{m}$ 的脊波导表面刻蚀弯曲形貌的36阶布拉格光栅,光栅周期(Δ)约为 $5.98\mu\text{m}$,占空比(σ)约为0.667,刻蚀深度约为 $1.2\mu\text{m}$ 。表面光栅中心线区域的光栅视为直线光栅,满足布拉格条件的光反馈振荡进而压窄线宽,边缘处光栅与激光器高反射率后腔面构成非稳定谐振腔,用于增加高阶横模的反馈损耗,致使谐振腔内高阶横模损耗远大于基横模损耗,最终实现器件的单模稳定输出。有研究表明,在传统的法布里-珀罗激光器(FP-LD)中,由自然解理面构成的谐振腔内的光学模式的直接逆向传播会产生光丝效应,与高阶横模的产生不同,这会导致激光输出腔面处产生空间非相关光^[13]。而曲线光栅结构腔内反馈振荡的光束是发散的,因此可以有效地抑制由空间周期性自聚焦引起的光丝效应,进一步提高光束质量。

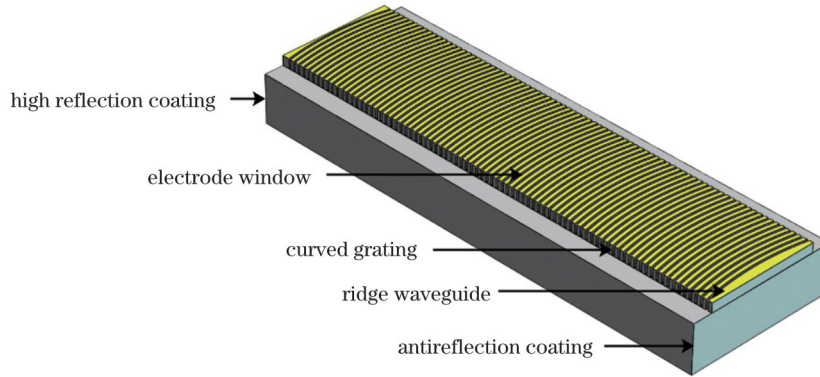


图1 表面高阶曲线光栅激光器模型图

Fig. 1 Model diagram of surface high-order curved grating laser

脊波导表面的曲线光栅结构如图2所示,黑色区域为光栅脊上设置的电流注入窗口,其他区域表面覆盖介质绝缘层,其中光栅曲率(K)根据虚拟点源模型^[14]推导得出:

$$K = \frac{x}{2(L_c^2 - x^2)}, \quad (2)$$

式中: x 为每个曲线光栅中心到器件后腔面的距离; L_c 为激光器的腔长。

为提升器件中高阶模式的激光阈值并降低其增益,进一步调控器件基模输出特性,设置了电流限制注入结构。图3所示为宽脊波导中基横模与高阶横模的光场分布示意图,其中阴影区域为设置的电流注入区域,宽度约为 $100\mu\text{m}$,对于阴影以外的区域,

在表面覆盖介质绝缘层,使得高阶横模在电流注入时有着相对较高的阈值,同时与基模相比仅有较小的增益,从而进一步增强器件整体对高阶横模的抑制能力。

2.2 仿真优化设计

针对 1050nm 波长,利用布拉格条件求解对应的光栅周期,即

$$\Delta = \frac{m'\lambda}{2n_{\text{eff}}}, \quad (3)$$

式中: n_{eff} 为光栅波导结构的有效折射率; m' 为光栅级数。当波长和有效折射率一定时,光栅级数越小所对应的周期就越小,制备难度就越高。设计曲线光栅中心区域的光栅级数为36阶,计算出周期在 $5.98\mu\text{m}$ 左右,可采用标准的紫外光刻工艺进行制备,在保证其对

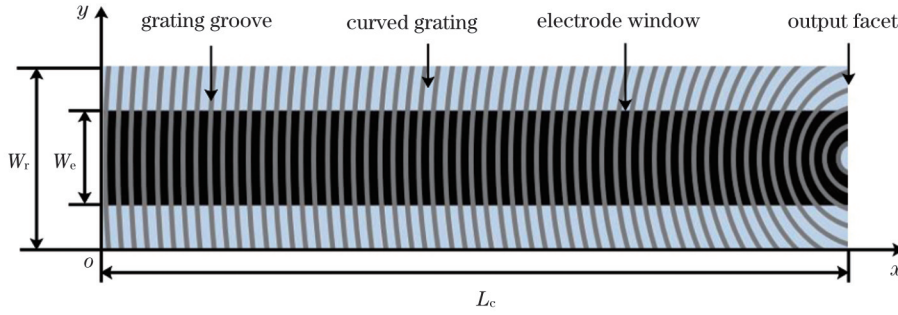


图 2 表面高阶曲线光栅示意图

Fig. 2 Schematic of surface high-order curved grating

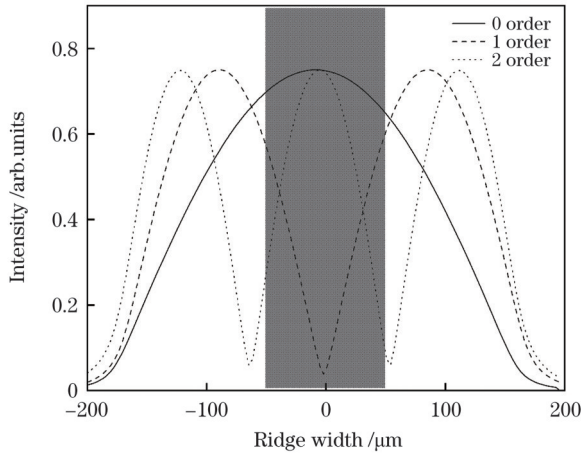


图 3 不同模式下的光场分布

Fig. 3 Optical field distributions under different modes

光的反馈强度的同时大大降低了器件的工艺难度。通过数值软件仿真再次优化光栅结构参数,由于曲线光栅在时域有限差分(FDTD)法中很难实现,仿真过程中采用宽度为 $5\ \mu\text{m}$ 的直线光栅代替曲线光栅结构中心处的光栅,以仿真结果作为参考数据优化设计光栅参数。仿真采用二维仿真模型,其结构长为 $500\ \mu\text{m}$,表面光栅的纵向长度设置为 $480\ \mu\text{m}$,因此设置的 FDTD 仿真区域长度为 $495\ \mu\text{m}$,高度约为 $5.5\ \mu\text{m}$ 。层结构折射率分布如图 4 所示,网格细化区域在长度方向上覆盖整个光栅以及波导层。在仿真过程中,不易实现腔长为 $2\ \text{mm}$ 的模型,模型与实验制备的器件存在一定的差别,又由于采用的二维仿真区域不适用于曲线光栅曲率的仿真优化,故该模型存在局限性。但是通过二维仿真结果可以得到该光栅结构的耦合特性趋势,这对实际工艺流程和光栅结构设置有着参考意义,例如设置的光栅周期使激射波长的需求得到满足。

为增加表面高阶曲线光栅对高阶横模的反馈损耗,需要保证光栅耦合强度。对光栅占空比 σ 和刻蚀深度 (h) 进行仿真优化,图 5 给出了当光栅宽度、周期和刻蚀深度一定时,光栅耦合系数 (κ) 和归一化耦合强度 (α) 随占空比的变化曲线。可以看出,随着占空比的增大,耦合强度的峰值呈现一个递增的

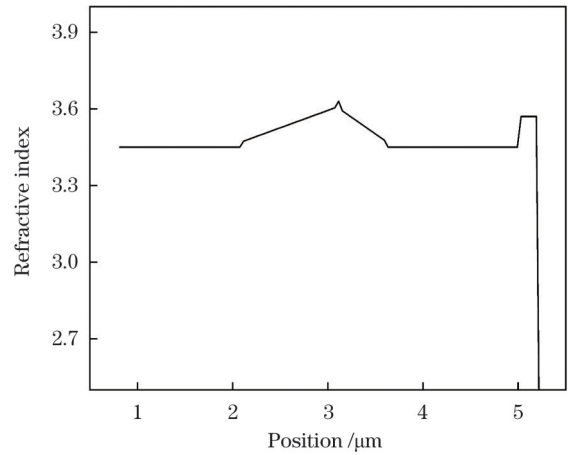


图 4 仿真模型的层折射率分布图

Fig. 4 Layer refractive index distribution of simulation model

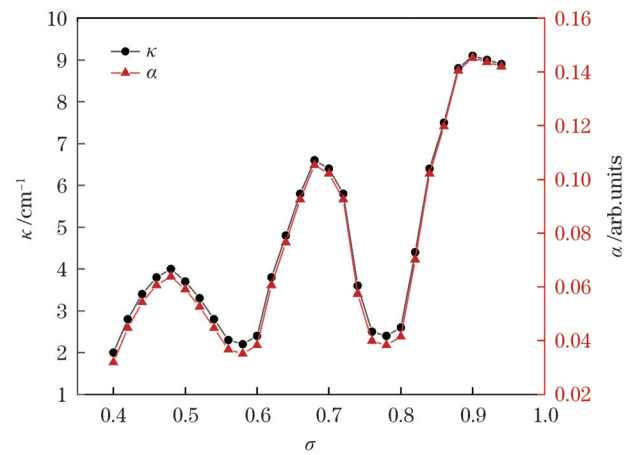


图 5 耦合系数及归一化强度与光栅占空比的关系

Fig. 5 Coupling coefficient and normalized intensity versus grating duty cycle

趋势。原因如下:光栅占空比的增大提高了光栅的等效折射率,使得更多的光场进入脊波导光栅区域,进而提高了光栅限制因子 (Γ) 及耦合系数 κ 。耦合强度越强,曲线光栅结构对高阶横模的抑制能力越强。

当光栅宽度、周期和 σ 一定时, κ 和 α 随刻蚀深度的变化曲线如图 6 所示,可以看出,随着刻蚀深度的增加,光栅耦合系数逐步增加。但深刻蚀存在以下问题:

高阶光栅在刻蚀到上波导层后其衍射损耗会急剧增加,且在刻蚀过程中控制光栅侧壁形貌存在较大难度^[15],同时因为等离子体对深窄槽底部的轰击力度不够,副产物无法及时带走,形成微掩模,出现“长草”现象^[16],所以须结合外延结构,考虑工艺难度,选择合适的刻蚀深度。

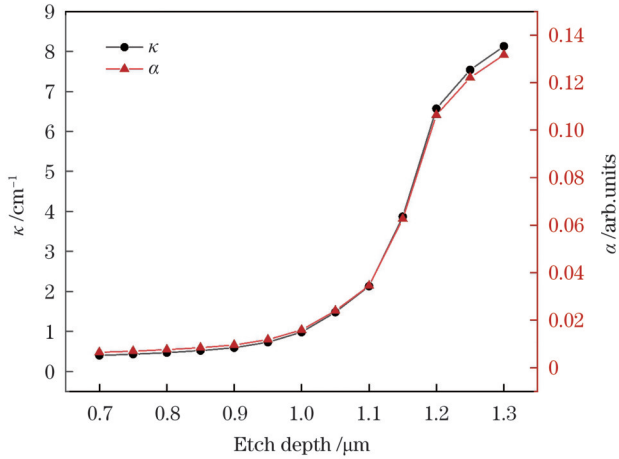


图6 耦合系数及归一化强度与刻蚀深度的关系

Fig. 6 Coupling coefficient and normalized intensity versus etch depth

在光栅制备过程中,需要严格把控工艺流程。综合考虑器件工艺难度以及光栅耦合强度,最终确定光栅周期约为 $5.98 \mu\text{m}$, 占空比在 0.667 左右,刻蚀深度约为 $1.2 \mu\text{m}$,在保证光栅耦合强度相对较高的同时大幅降低工艺难度。

2.3 器件制备与测试

采用的外延片有源区为 InGaAs/GaAsP 单量子阱,光致发光光谱峰值波长为 1048.23 nm ,半峰全宽为 26.1 nm 。半导体激光器芯片的制备流程先从脊的刻蚀开始:采用紫外光刻和电感耦合等离子体(ICP)刻蚀技术在外延片 P 面上制备深为 $1.3 \mu\text{m}$ 、宽为 $400 \mu\text{m}$ 的脊波导;利用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)法在 P 面上沉积 SiO_2 作为硬掩模,利用缓冲氧化物刻蚀(BOE)溶液,通过湿法腐蚀 SiO_2 以打开脊区;利用紫外光刻和 ICP 刻蚀技术在脊表面上制备大面积曲线光栅。图 7 所示为样品表面和截面的扫描电子显微镜(SEM)图。由图 7(a)可见,曲线光栅条纹清晰完整。由图 7(b)可以看出,中心区域光栅周期约为 $6 \mu\text{m}$,边缘区域光栅周期向外逐渐增大。图 7(c)显示,光栅侧壁形貌较好,基本呈陡直状,符合预期效果。

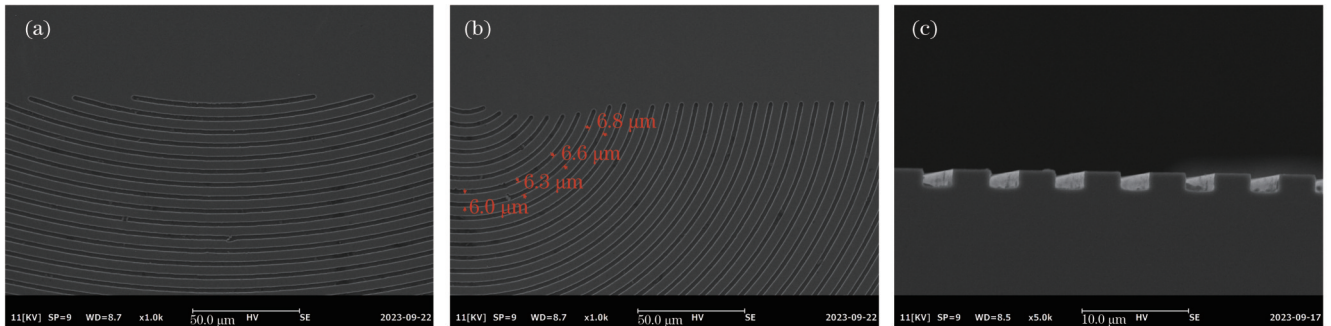


图7 曲线光栅的SEM图。(a)表面图1;(b)表面图2;(c)剖面图

Fig. 7 SEM images of curved grating. (a) Surface view 1; (b) surface view 2; (c) sectional view

随后在 P 面沉积 SiN_x 介质绝缘层,在栅脊电流限制注入区域利用紫外光刻定义电极窗口图案,利用反应离子刻蚀(RIE)法除去电极窗口的 SiN_x 。再利用磁控溅射台在 P 面溅射 40 nm 厚 Ti、 40 nm 厚 Pt、 200 nm 厚 Au,得到 P 面金属电极。然后用光刻胶涂覆 P 面电极结构形成保护膜,对 N 面进行减薄抛光处理,使器件整体厚度约为 $130 \mu\text{m}$ 。接着在减薄抛光后的 N 面溅射 5 nm 厚 Ni、 100 nm 厚 AuGe、 45 nm 厚 Ni、 300 nm 厚 Au,得到 N 面金属电极,并通过合金退火处理获得较好的欧姆接触。最后,利用划片解理机将外延片解理成巴条,在前后腔面分别蒸镀反射率为 5% 和 95% 的腔面膜,再解理成尺寸为 $2 \text{ mm} \times 500 \mu\text{m}$ 的单管,将单管 P 面朝下封装于热沉上并通过金丝引线,完成器件制备,如图 8 所示。

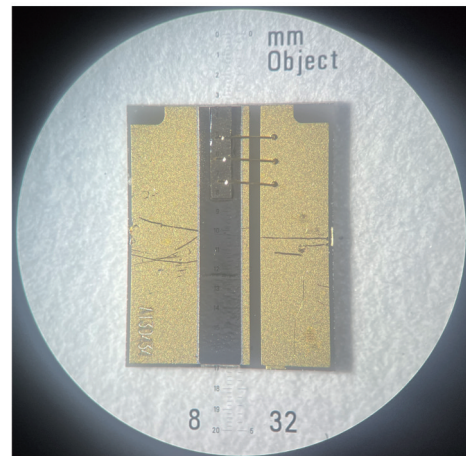


图8 表面高阶曲线光栅半导体激光器

Fig. 8 Surface high order curved grating semiconductor laser

3 分析与讨论

3.1 输出特性分析

在温控模块温度为 18 °C 以及连续电流驱动的条件下,利用手持式功率能量计表头和配套的积分球光电二极管功率探头测量半导体激光器的功率-电流-电压($P-I-V$)特性曲线,结果如图 9(a)所示,器件分别为相同工艺参数下制备的 CG-DFB 激光器和 FP 激光器,由于工艺条件问题后者未进行腔面镀膜处理。由测试结果可以看出,CG-DFB 器件的阈值电流约为 0.49 A,比未镀膜的同脊宽 FP 激光器的阈值电流(0.19 A)要大,这归因于引入的弯曲形貌的高阶布拉格光栅。在其谐振腔内,除中心区域以外,其他区域的光束传播是发散的,同时高阶光栅存在高衍射损耗,导致器件阈值电流增大。由于 FP 激光器未进行腔面镀膜处理,其功率曲线表现出较低的斜率效率,

但镀膜的 CG-DFB 激光器具有低于未镀膜的 FP 激光器的斜率效率,表明该结构较高的损耗对器件输出性能产生了较大的影响,可以在前后腔面上蒸镀更高质量的增透膜和高反膜以及精细优化光栅结构(例如仿真优化光栅侧壁倾角并制备 V 形槽结构等),实现器件性能的提升。曲线光栅器件在 2.2 A 电流注入下输出功率达到 939.8 mW,斜率效率为 0.58 W/A。图 9(b)给出了工作温度为 18 °C 及电流注入为 1 A 时的光谱图,激射中心波长为 1051.93 nm,3 dB 光谱线宽为 0.173 nm,SMSR 约为 22.6 dB,证明了器件单纵模的工作特性,这得益于采用高阶布拉格光栅结构进行选模。图 9(c)给出了器件在 2 A 电流下的光谱图,可观察到多个肩峰,分析可能是由于在大电流注入条件下,温控模块无法高效散热,器件温度过高产生热效应^[17],加上产生了高阶横模,故光谱曲线出现明显肩峰。

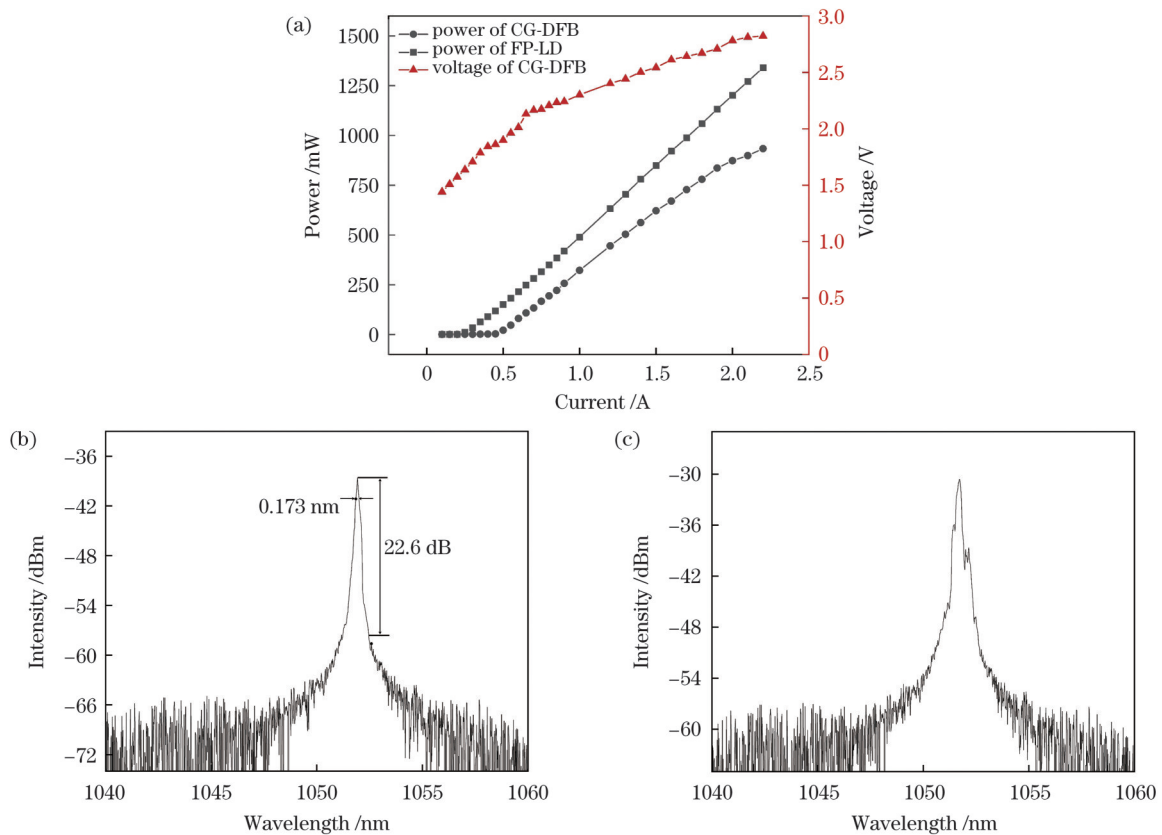


图 9 器件输出特性曲线。(a) $P-I-V$ 曲线;(b) 1 A 电流时的光谱图;(c) 2 A 电流时的光谱图

Fig. 9 Output characteristic curves of device. (a) $P-I-V$ curves; (b) spectrum at 1 A current; (c) spectrum at 2 A current

3.2 横模特性分析

选用电荷耦合器件(CCD)成像法和综合性能测试仪在不同电流下对器件的光斑和远场发散角进行绘制,图 10~12 所示分别为不同电流下 CG-DFB 和 FP 激光器的光斑图及远场发散角,其中远场慢轴发散角用于表征器件的横模特性。如图 10(a)所示,当驱动电流为 0.5 A 时,曲线光栅半导体激光器光斑呈“单瓣”。由图 11(a)可测得其远场慢轴发散角约为 5.3°,

而相同脊宽的 FP 激光器在同一电流下,其光斑出现“多瓣”[图 10(d)]。由图 11(d)测得其远场慢轴发散角约为 17°,这归因于曲线形貌的光栅和电流的限制注入结构能够对高阶横模起到有效的抑制作用,而宽脊 FP 激光器无法对高阶横模进行剪裁,表明曲线光栅和电流限制注入结构具备抑制高阶横模的能力。

随着电流的增加,CG-DFB 器件的光斑尺寸逐渐向两侧展宽,仍能保持较好的基模输出特性。分析原

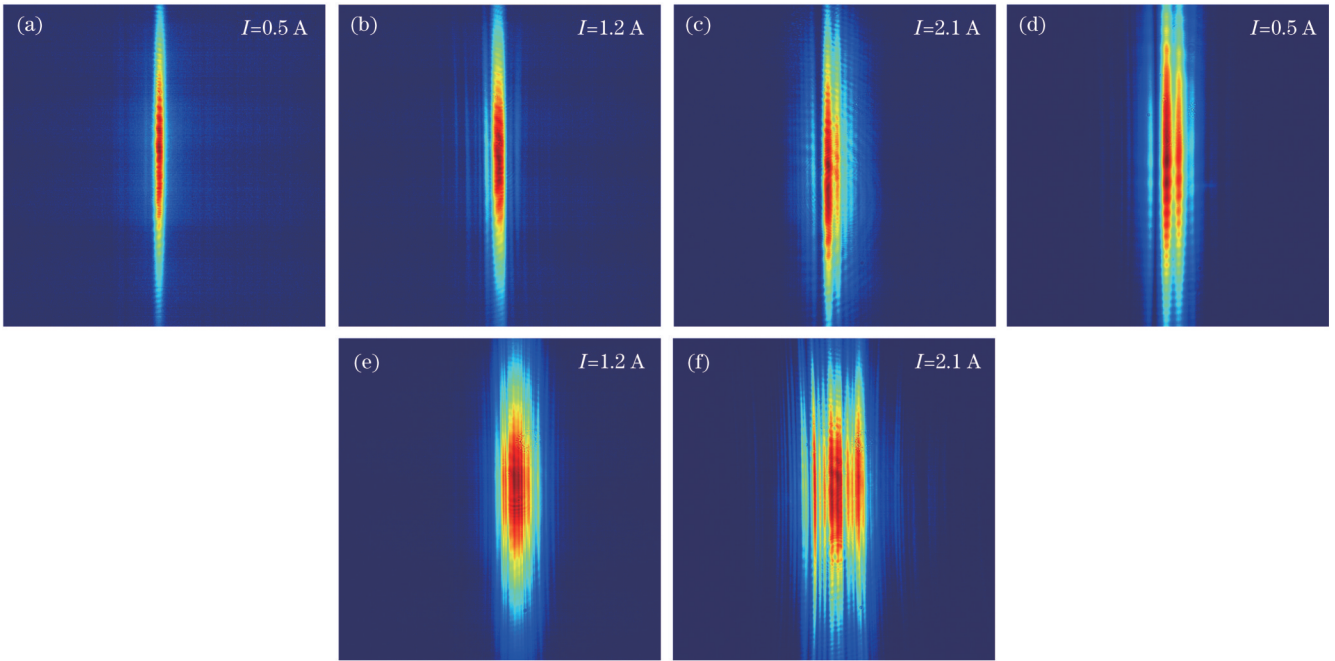


图 10 不同电流下的光斑图。(a)(b)(c)曲线光栅DFB-LD ;(d)(e)(f)FP-LD
 Fig. 10 Spot patterns at different currents. (a)(b)(c) Curved grating DFB-LD; (d)(e)(f) FP-LD

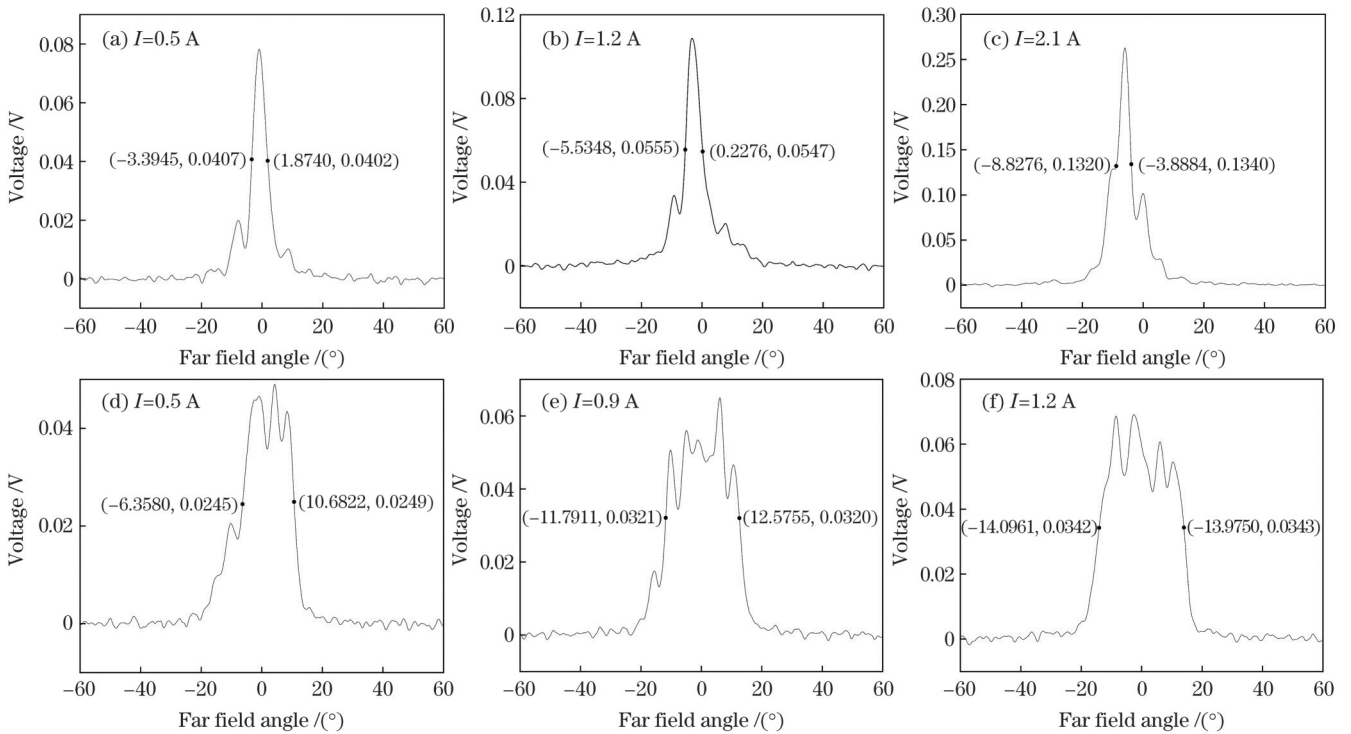


图 11 不同电流下的慢轴发散角。(a)(b)(c)曲线光栅DFB-LD;(d)(e)(f)FP-LD
 Fig. 11 Slow axis divergence angles at different currents. (a)(b)(c) Curved grating DFB-LD; (d)(e)(f) FP-LD

因可能是:由于腔内高阶横模达到阈值条件时形成激射,但曲线光栅结构对高阶横模的反馈会产生较高的传播损耗,高阶横模与基横模之间未形成明显竞争,表明曲线光栅对高阶横模有明显的抑制作用。如图 10(c)所示,当电流达到 2.1 A 时,光斑开始出现旁瓣。分析原因可能是:在大电流注入条件下,电流侧向扩散严重,高阶横模增益不断增加,超出一定耦合强度下曲线

光栅的调控范围,进而导致腔内高阶横模与基横模形成竞争。同时,非辐射复合导致的热积累影响脊波导光栅区域的光场分布,使得曲线光栅的调控能力减弱,可以通过优化光栅占空比提升耦合强度,通过外部搭载高效的温控模块改善性能。图 12 给出了不同电流下 CG-DFB 器件的远场快轴发散角。以上分析结果表明,在宽脊中引入曲线光栅和电流限制注入结构可

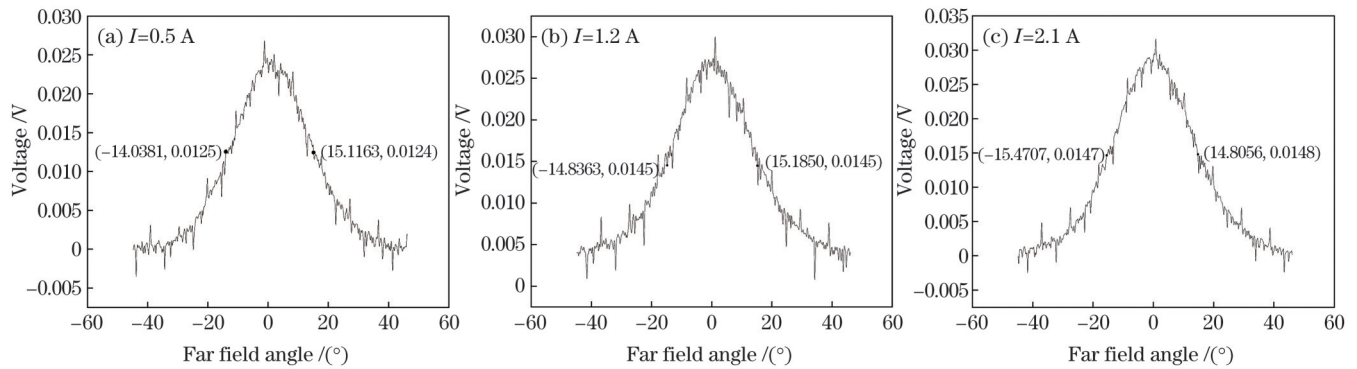


图 12 不同电流下曲线光栅 DFB-LD 的快轴发散角。(a) 0.5 A; (b) 1.2 A; (c) 2.1 A

Fig. 12 Fast axis divergence angles of curved grating DFB-LD at different currents. (a) 0.5 A; (b) 1.2 A; (c) 2.1 A

以有效抑制器件的高阶横模,在较大的工作电流下保证近基横模输出。

4 结 论

制备了含有曲线型高阶光栅的分布反馈半导体激光器,引入弯曲形貌光栅和电流限制注入结构,实现了对高阶横模的抑制。在工作温度为 18 °C 时测得的器件阈值电流为 0.49 A;当电流为 0.5 A 时,器件“单瓣”输出,远场慢轴发散角为 5.3°,快轴发散角为 29.2°;在 1 A 电流下测得发射波长为 1051.93 nm,3 dB 光谱线宽为 0.173 nm,边模抑制比约为 22.6 dB,器件实现了预期的单模输出;2.2 A 电流时的输出功率可达 939.8 mW。此外,该器件采用紫外光刻制备工艺,大幅降低了器件的制造难度,为单模稳定输出的半导体激光器研制提供了一种更为简单有效的方案。但较高的阈值电流使得该器件性能有待提升,后期对曲线光栅侧壁形貌、光栅结构和曲率参数进行进一步优化,以获取更好的器件性能。

参 考 文 献

- [1] Wagner J, Mann C, Rattunde M, et al. Infrared semiconductor lasers for sensing and diagnostics[J]. Applied Physics A, 2004, 78(4): 505-512.
- [2] Vizbaras A, Šimonytė I, Droz S, et al. GaSb swept-wavelength lasers for biomedical sensing applications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019, 25(6): 1501812.
- [3] 宁吉丰, 王彦照, 陈宏泰, 等. 850 nm 窄发散角单模半导体激光器材料研究[J]. 标准科学, 2023(S1): 190-194.
Ning J F, Wang Y Z, Chen H T, et al. Study on epitaxial materials of 850 nm single-mode semiconductor laser diode with small divergence angle[J]. Standard Science, 2023(S1): 190-194.
- [4] 片思杰, UllahSalman, 杨青, 等. 单模半导体纳米线激光器[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0701003.
Pian S J, Ullah S, Yang Q, et al. Single-mode semiconductor nanowire lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0701003.
- [5] Orth A, Reithmaier J P, Zeh R, et al. First order gain-coupled GaInAs/GaAs distributed feedback laser diodes patterned by focused ion beam implantation[J]. Applied Physics Letters, 1996, 69(13): 1906-1908.
- [6] Gaimard Q, Cerutti L, Teissier R, et al. Distributed feedback GaSb based laser diodes with buried grating[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(16): 161111.
- [7] Matthey R, Gruet F, Affolderbach C, et al. Development and spectral characterisation of ridge DFB laser diodes for Cs optical pumping at 894 nm[C]//2016 European Frequency and Time Forum (EFTF), April 4-7, 2016, York, UK. New York: IEEE Press, 2016.
- [8] Wang T F, Yang C G, Zhang Y, et al. High spectral purity GaSb-based blazed grating external cavity laser with tunable single-mode operation around 1940nm[J]. Optics Express, 2021, 29(21): 33864-33873.
- [9] Yu H G, Yang C G, Chen Y H, et al. Robust design of mid-infrared GaSb-based single-mode laser diode fabricated by standard photolithography with socketed ridge-waveguide modulation[J]. Optics Express, 2023, 31(21): 34011-34020.
- [10] 常津源, 熊聪, 祁琼, 等. 1550 nm 高功率基横模半导体激光器及温度特性[J]. 光学学报, 2023, 43(7): 0714003.
Chang J Y, Xiong C, Qi Q, et al. 1550 nm high-power fundamental transverse mode semiconductor laser and its temperature characteristics[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(7): 0714003.
- [11] 陈芬, 崔碧峰, 冯靖宇, 等. 大功率半导体激光器光束质量的研究与进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(21): 2100002.
Chen F, Cui B F, Feng J Y, et al. Research and progress of high-power semiconductor lasers with high beam quality[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(21): 2100002.
- [12] 刘灿. 850nm 分布反馈单模面发射激光器[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021: 44-46.
Liu C. 850 nm distributed feedback single-mode surface emitting lasers[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021: 44-46.
- [13] Yang C, Kaspi R. Design guidelines for on-chip unstable resonator cavity to suppress filamentation in GaSb-based diode lasers[J]. Journal of Applied Physics, 2019, 125(24): 243101.
- [14] Tian K, Zou Y G, Shi L L, et al. High-power distributed feedback lasers with high-order surface curved gratings[J]. Optics Letters, 2022, 47(21): 5626-5629.
- [15] 陈兢. ICP 体硅深刻蚀中侧壁形貌控制的研究[C]//中国微米、纳米技术第七届学术年会论文集. 北京: 中国机械工程学会, 2005: 476-478.
Chen J. Trench profile control of silicon DRIE process on ICP tools [C]//Proceedings of the Chinese Society Micro-Nano Technology. Beijing: Chinese Mechanical Engineering Society, 2005: 476-478.
- [16] 杨晶晶, 范杰, 马晓辉, 等. 基于多层抗蚀剂的 GaAs 基微纳光栅深刻蚀工艺[J]. 中国激光, 2022, 49(3): 0313002.
Yang J J, Fan J, Ma X H, et al. Deep etching process of GaAs-based micro-nano grating based on multilayer resist[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(3): 0313002.
- [17] 王警卫, 袁振邦, 张彦鑫, 等. 大功率半导体激光器阵列光谱展宽机理研究[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 92-99.
Wang J W, Yuan Z B, Zhang Y X, et al. Study of the mechanisms of spectral broadening in high power semiconductor laser arrays[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(1): 92-99.

Transverse Mode Characteristics Analysis of Semiconductor Laser with High-Order Surface Curved Gratings

Liang Hongjin, Zou Yonggang*, Fan Jie, Fu Xiyao, Shi Ke, Tian Kun

State Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China

Abstract

Objective Semiconductor lasers have been widely used in industrial manufacturing, medical diagnosis, lidar, and other fields because of their small size, high electro-optical conversion efficiency, long life, and direct-current drive. With the development of technology, higher requirements have been placed on laser light sources for different applications, such as high output power, narrow spectral linewidth, stable wavelength, and near-fundamental mode output. Researchers have performed a great deal of work in this area, making a series of breakthroughs ranging from broad-area semiconductor lasers to narrow-ridge semiconductor lasers and then to grating coupling. Distributed feedback semiconductor lasers using buried gratings can obtain high spectral purity; however, there are preparation difficulties in their re-growth. Researchers have found that surface gratings for coupling optical fields exhibit good working characteristics. To improve the power, a distributed Bragg reflector laser diode with tapered gratings combined with a master oscillator power amplifier is produced. Increasing the ridge width is a more direct method, which is commonly used; however, additional transverse mode suppression mechanisms need to be introduced, such as transverse coupled gratings and lateral microstructures. The exploration of single-mode stable-output semiconductor lasers has been a popular topic in related fields worldwide. In this study, a wide-ridge waveguide-distributed feedback semiconductor laser based on high-order curved surface gratings is prepared. Curved gratings and current-limited injection structures can suppress the high-order transverse mode in a wide-ridge waveguide and improve the power and spectral purity of the device. In addition, the use of ultraviolet lithography significantly reduces the difficulty of fabrication.

Methods The transverse mode of the device is investigated using curved gratings and a current-limited injection structure, and the experimental results are analyzed. The effect of the ridge waveguide on the transverse mode is analyzed. It has been pointed out that a wide-ridge waveguide requires an additional transverse-mode suppression mechanism. Subsequently, two methods, curved grating and current-limited injection structure, are proposed. First, the gratings in the center of the curved gratings are regarded as linear gratings, which are used to narrow the linewidth. The gratings in the edge area combined with the cavity facet of the resonator form an unstable resonator, which leads to the beam propagation of the high-order transverse mode in the cavity and increases the feedback loss. The formula for calculating the curvature of the curved grating is given. Second, the current-limited injection structure is set such that the high-order transverse mode lasing threshold is greater than the basic mode threshold, whereas the gain is lower than that of the fundamental mode. Subsequently, the grating order is given, the period is determined by the Bragg condition, and the structural parameters of the gratings are optimized by software simulation to determine the duty cycle and etching depth suitable for device fabrication. Subsequently, the designed device structure is prepared experimentally. An electron microscope scan of the experiment is performed, and a device that meets the expected requirements is packaged and tested. Finally, the transverse mode of the curved grating device is analyzed using the spectrum, spot, and far-field divergence angle, which proves the validity of the structure and provides the optimization direction.

Results and Discussions The prepared curved grating device exhibits the expected single-mode output characteristics. Experiments show that the far-field slow axis divergence angle of the device is 5.3° at 0.5 A [Fig. 10(a)], the optical spot presents a single lobe [Fig. 9(a)], the 3 dB spectral linewidth is 0.173 nm, and the side-mode suppression ratio is 22.6 dB (Fig. 8). The results show that the curved grating structure plays a key role in the suppression of the high-order transverse mode in the cavity, and the center is regarded as a high-order linear grating that narrows the linewidth. This provides a new concept for a single-mode stable output device.

Conclusions A distributed feedback semiconductor laser with high-order curved gratings is fabricated. The high-order transverse mode is suppressed using curved gratings and a current-limited injection structure. At room temperature, the measured threshold current of the device is 0.49 A, the optical spot presents a single lobe, the far-field slow axis divergence angle is 5.3° , the fast axis divergence angle is 29.2° , the measured emission wavelength is 1051.93 nm, the 3 dB spectral linewidth is 0.173 nm, and the side mode suppression ratio is about 22.6 dB at 1 A. The output power can reach 939.8 mW at 2.2 A, and the device can achieve the expected single-mode output effect. In addition, the device adopts the ultraviolet-lithography preparation process, which greatly reduces manufacturing difficulty and provides a simpler and more effective solution for semiconductor laser devices with a stable output of a single mode. However, the performance of the device must be improved further because of the high threshold current. In later stages, the sidewall morphology, structure, and curvature parameters of the curved gratings are fully optimized to obtain better performance.

Key words lasers; semiconductor lasers; high order Bragg grating; curved grating; high order transverse mode; far field divergence angle