

850 nm 单模面发射分布反馈式激光器

李南果¹, 刘灿^{2,3*}, 张鹏斐¹, 向敏文¹, 汤宝⁴, 颜伟年⁵, 阚强⁵, 陆巧银^{1**}, 国伟华^{1***}¹华中科技大学武汉国家光电研究中心, 湖北 武汉 430074;²宁波元芯光电子科技有限公司, 浙江 宁波 315000;³浙江大学信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310058;⁴武汉光迅科技股份有限公司, 湖北 武汉 430074;⁵中国科学院半导体研究所, 北京 100083

摘要 介绍一种新型的 850 nm 单模面发射分布反馈激光器(SEDFF)。采用浅脊波导表面光栅结构提供足够的光反馈,采用含 $\lambda/4$ 相移的二阶光栅在实现面发射的同时获得单纵模特性。采用方形氧化孔径构成无源分布布拉格反射镜(DBR)—有源分布式反馈区(DFB)—无源 DBR 三段结构,从而减小电流注入的有源区体积,获得了与垂直腔面发射激光器(VCSEL)类似的低阈值特性。对于 50 μm 有源区长度的 SEDFF,其阈值电流为 1.8 mA,当注入电流为 6.5 mA 时,SEDFF 的边模抑制比(SMSR)高达 47 dB。同时,该激光器在注入电流为 9 mA 的情况下获得了 17 GHz 的弛豫振荡频率。SEDFF 实现了准圆形光斑的面发射输出,其远场光斑发散角的半峰全宽约为 $21^\circ \times 26^\circ$ 。

关键词 激光器; 半导体激光器; 面发射激光器; 分布反馈激光器; 表面光栅; 阈值电流; 单模

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1201006

1 引言

随着物联网技术的飞速发展、数据的爆发式增长,大数据时代到来了。光通信和光传感在大数据时代的信息传输与获取中扮演着至关重要的角色。半导体激光器具有体积小、成本低、采用电泵浦、可高速调制、波长覆盖通信波段等优点^[1-2],被广泛应用于光通信和光传感中。半导体激光器可以根据出光方向不同大致分为水平出光的边发射激光器和垂直表面出光的面发射激光器。最具代表性的面发射半导体激光器为垂直腔面发射激光器(VCSEL),具有低阈值电流、可阵列集成、低测试成本、可出射圆形光斑、高可靠性等优点,被广泛应用于面向数据中心的短距通信和手机面部识别等场合。随着数据中心规模的增大,对传输距离的要求也逐渐变高;数据交互频繁,也要求传输的速率增高或者采用波分复

用系统来提高传输速率。目前主要的商用 VCSEL 都是多横模的,传输距离受到模式色散和光谱色散的限制。此外,高阶模对电流的吸收影响了注入效率,导致 VCSEL 的弛豫振荡频率降低,传输速率的提升受到限制。同时,VCSEL 由于其多横模性质,很难被应用到波分复用系统中。可以看出,单模的面发射激光器对于数据中心等应用的发展具有重要研究意义。

国内外学者提出了多种方案实现单横模 VCSEL^[3-4]。研究表明,缩小 VCSEL 的氧化孔径可以减小光场区域,从而抑制高阶横模^[5]。2007 年,加州大学圣塔芭芭拉分校(UCSB)的 Chang 等^[6]设计出直径为 3 μm 的氧化孔径 VCSEL,实现了在 993 nm 的 3.1 mW 最大输出功率和 40 dB 边模抑制比(SMSR)。2017 年,台湾大学和台湾交通大学的研究表明:VCSEL 氧化孔径的减小,能够使高阶

收稿日期: 2022-01-27; 修回日期: 2022-02-22; 录用日期: 2022-03-30

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2800500)、国家自然科学基金(61875066)、集成光电子学国家重点实验室开放课题(IOSKL2020KF18)

通信作者: *liuc@ori-chip.com; **luqy@hust.edu.cn; ***guow@hust.edu.cn

横模数量变少;在氧化孔径为 $3\ \mu\text{m}$ 的情况下,实现了 38 dB 的 SMSR, 3 dB 带宽为 21.5 GHz^[7]。同年,中国电子科技集团公司的张岩等^[8]报道了应用于铷原子传感器的 795 nm VCSEL,当氧化孔径的直径从 $6\ \mu\text{m}$ 减小到 $3\ \mu\text{m}$ 时,激光器的 SMSR 从 8.76 dB 增加到 34.05 dB。除了减小 VCSEL 氧化孔径,研究人员发现在 VCSEL 表面刻蚀浮雕可以增加高阶横模的损耗,从而实现单基横模激射,获得 30 dB 以上的 SMSR^[9-12],但是这种方案对刻蚀工艺的精度要求较高,同时阈值电流相较于传统 VCSEL 也较大。另一种实现单模 VCSEL 的方式是在 VCSEL 表面的分布布拉格反射镜 (DBR) 上刻蚀缺陷孔,形成周期性电介质结构,该结构类似于光子晶体光纤^[13-16]。光子晶体缺陷区增加了高阶模的损耗,使得 VCSEL 能够实现单基横模激射,并获得 30 dB~40 dB 的 SMSR。但是这种激光器的阈值通常比普通 VCSEL 大,这是因为光子晶体结构带来了更高的散射损耗,同时这种光子晶体结构对刻蚀精度的要求也较高。加州大学伯克利分校 (UCB) 的常瑞华课题组采用高折射率差的亚波长光栅代替 VCSEL 的顶端 DBR,这种亚波长光栅可以只对基横模提供足够的反馈,在 $13\ \mu\text{m}$ 氧化孔径下获得的 SMSR 大于 40 dB^[17],但这种高折射率差光栅需要用到掏空工艺,结构稳定性面临挑战。

相较于 VCSEL,DFB 激光器的外延片制作较为简单。由于波导的限制作用,DFB 激光器通常具有很好的单模特性。DFB 激光器的波长也可以通过改变光栅的周期来改变。面发射 DFB 激光器通常需要在激光器内部集成散射体,目前常见的散射体有 45° 反射镜和二阶光栅两种。2018 年,日本奥

兰若公司的 Adachi 等^[18]在常规 DFB 激光器后面刻蚀一个 45° 反射镜,由于它本质上还是一个 DFB 激光器,因此拥有与 DFB 激光器相似的性能参数,该激光器的 SMSR 约为 50 dB,阈值电流约为 10 mA。由于集成了非球面透镜,该激光器的远场发散角非常小(约 2°),但是该反射镜刻蚀精度要求较高,导致良品率下降。目前利用二阶光栅的垂直衍射来制备的面发射 DFB 激光器,耦合系数较小且有源区体积较大,导致 SMSR 不高且阈值电流很大(通常在 20 mA 以上)。目前对这类面发射激光器的研究主要集中在大功率半导体激光器应用方面^[19-20]。

本文介绍了一种新型的 GaAs 基 850 nm 单模面发射 DFB 激光器^[21]。该激光器采用浅脊波导表面光栅结构,通过两端的一阶光栅提供足够的光反馈,中心的二阶光栅垂直衍射出光实现面发射,具有高光栅耦合系数和类似于 DFB 激光器的优良单模特性。采用方形氧化孔径将激光器分为无源 DBR、有源分布式反馈区 (DFB)、无源 DBR 三段式结构,并减小有源区体积,使其具有类似于 VCSEL 的低阈值特点。本文将从激光器的理论设计、器件的制作、器件的性能测试三个方面对单模面发射分布反馈 (SEDFB) 激光器进行介绍。

2 SEDFB 激光器理论设计

2.1 SEDFB 激光器的整体结构

SEDFB 激光器的整体三维结构如图 1 所示。采用长方形氧化孔径作为限制,沿谐振腔方向将结构分为无源 DBR、有源 DFB、和无源 DBR 三段。从波导和各层材料来看,无源 DBR 区和有源 DFB 区

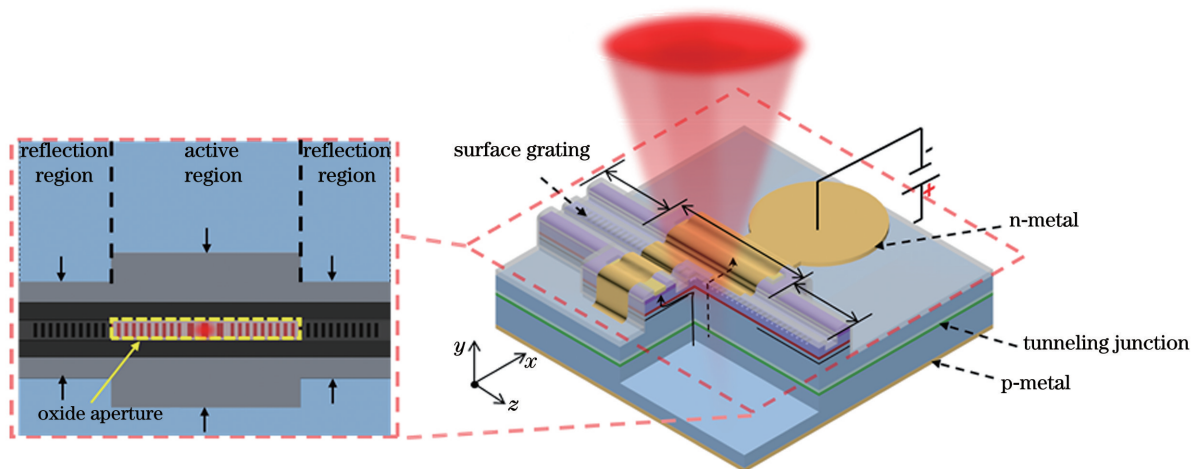


图 1 SEDFB 激光器三维结构图

Fig. 1 Three-dimensional structure of SEDFB laser

的唯一区别在于无源 DBR 区受到氧化孔径的限制, 没有电流注入。在器件运行时, 无源反射区中的多量子阱结构将被激光器自身出射光泵浦至透明状态, 所以无源反射区能够在不引入额外损耗的情况下提供一定的光反馈。

SEDFB 激光器上下层的结构如图 2 所示, 从上到下依次为 n 型电极、欧姆接触层、上波导层、有源区、下波导层、隧道结、衬底、p 型电极。由于 SEDFB 激光器采用二阶光栅衍射出光实现面发射, 因此将电极置于波导两侧。n 型半导体的电子迁移率比 p 型半导体的空穴迁移率高 20 倍以上, 且 n 型半导体的载流子吸收损耗比 p 型半导体的更小^[22]。为了减小电阻和光子的吸收损耗, 有源区

以上采用 n 型掺杂, 有源区以下采用 p 型掺杂, 整体结构为 n-i-p 结构, 详细外延结构参数如表 1 所示。该激光器有源区采用 InGaAs 应变量子阱。量子阱材料为 $\text{In}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{As}$, 厚度为 4 nm; 垒的材料为 $\text{Al}_{0.37}\text{Ga}_{0.63}\text{As}$, 厚度为 6 nm, 量子阱的数量为 5 个。外延片实际测量得到量子阱光致发光(PL)光谱的峰值波长为 836.3 nm, 峰值增益波长在 850 nm 左右(PL 峰值波长比增益峰值波长小 14~20 nm)。由于电极在波导两侧, 为了提高电流注入效率, 本结构采用氧化孔径的方案增加电流的横向限制。为了使该 n-i-p 结构能在外延工艺比较成熟的传统 n 型掺杂 GaAs 衬底上外延生长, 在衬底上引入 $\text{p}^{++}\text{-n}^{++}$ 隧道结来实现电流注入。

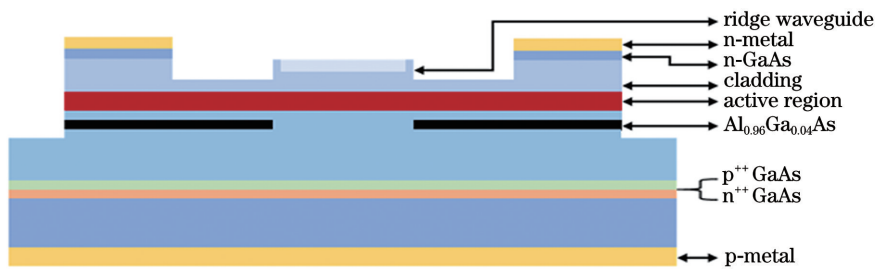


图 2 SEDFB 激光器横截面示意图

Fig. 2 Cross-sectional sketch of SEDFB laser

表 1 SEDFB 激光器外延结构参数

Table 1 Parameters of SEDFB laser epitaxy structure

Layer No.	Layer name	Material	Thickness / μm	Doping concentration / cm^{-3}	Dopant
15	Top contact layer	n-GaAs	0.150	1×10^{19}	Si
14	Upper cladding layer	n- $\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$	0.200	1×10^{18}	Si
13	Upper cladding layer	n- $\text{Al}_{0.30}\text{Ga}_{0.70}\text{As}$	0.050	3×10^{18}	Si
12	Upper cladding layer	n- $\text{Al}_{0.34}\text{Ga}_{0.66}\text{As}$	0.050	5×10^{17}	Si
11	Optical confinement layer	$\text{Al}_{0.37}\text{Ga}_{0.63}\text{As}$	0.040		
10	Barriers ($\times 4$)	$\text{Al}_{0.37}\text{Ga}_{0.63}\text{As}$	0.006		
9	Quantum wells ($\times 5$)	$\text{In}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{As}$	0.004		
8	Optical confinement layer	$\text{Al}_{0.37}\text{Ga}_{0.63}\text{As}$	0.040		
7	Lower cladding layer	p- $\text{Al}_{0.70}\text{Ga}_{0.30}\text{As}$	0.050	2×10^{17}	C
6	Lower cladding layer	p- $\text{Al}_{0.70}\text{Ga}_{0.30}\text{As}$	0.050	5×10^{17}	C
5	Oxide layer	$\text{Al}_{0.96}\text{Ga}_{0.04}\text{As}$	0.060	1×10^{18}	C
4	Lower cladding layer	p- $\text{Al}_{0.70}\text{Ga}_{0.30}\text{As}$	2.000	1×10^{18}	C
3	p-doped tunnel junction layer	p-GaAs	0.250	$>1 \times 10^{19}$	C
2	n-doped tunnel junction layer	n-GaAs	0.250	$>1 \times 10^{19}$	Si
1	Buffer layer	n-GaAs	0.500	3×10^{18}	Si
0	n-doped substrate	n-GaAs			

2.2 SEDFB 激光器的单纵模设计

SEDFB 激光器采用一阶光栅提供光反馈,二阶光栅提供光反馈的同时向垂直方向衍射出光。SEDFB 激光器中的二阶光栅长度相对于整个谐振腔非常短,对光提供反馈和纵模筛选主要由一阶布拉格光栅实现。对 DFB 激光器而言,耦合波理论是分析其周期性波导结构分布反馈的常用理论^[23]。由耦合波理论可以得到 DFB 激光器的谐振波长 λ_0 为

$$\lambda_0 = \lambda_B \pm \left[\left(q + \frac{1}{2} + \frac{\phi}{\pi} \right) \frac{\lambda_B^2}{2\tilde{n}L} \right], \quad (1)$$

式中: λ_B 为布拉格波长; L 为激光器的腔长; \tilde{n} 为有效折射率; ϕ 为端面反射或光栅周期改变引起的行波场相位变化; q 为整数。从式(1)可以看出:对于均匀光栅波导 DFB 激光器,不存在使得谐振波长 λ_0 等于布拉格波长 λ_B 的整数 q ;最接近 λ_B 的两个

波长由于反射率最高,所对应的模式增益阈值最低。这两个波长将随机竞争成为激射波长,导致激光器无法稳定形成单纵模输出。

如式(1)所示,要使 λ_0 稳定地等于 λ_B ,需要引入一个相位变化 ϕ 。当 $\phi = \pi/2$ 时, q 取 -1 即可获得 $\lambda_0 = \lambda_B$ 的模式振荡,此时对应于 $\lambda/4$ 相移,即在光栅中插入半个周期的一阶光栅。本结构选择在中心二阶光栅处插入半个周期的一阶光栅来引入 $\lambda/4$ 相移,如图 3(a)所示。采用时域有限差分法(FDTD)分别对有、无 $\lambda/4$ 相移的结构进行仿真模拟,分别监测二阶光栅上方的透射谱,结果如图 3(b)所示。在不含 $\lambda/4$ 相移的情况下,二阶光栅上方的透射谱含有两个关于布拉格波长 λ_B 对称的纵模,无法形成稳定的单纵模激射;对于含有 $\lambda/4$ 相移的结构,其二阶光栅上方的透射谱只有一个峰值,该峰值波长对应于 λ_B ,激光器可以实现稳定的单纵模激射。

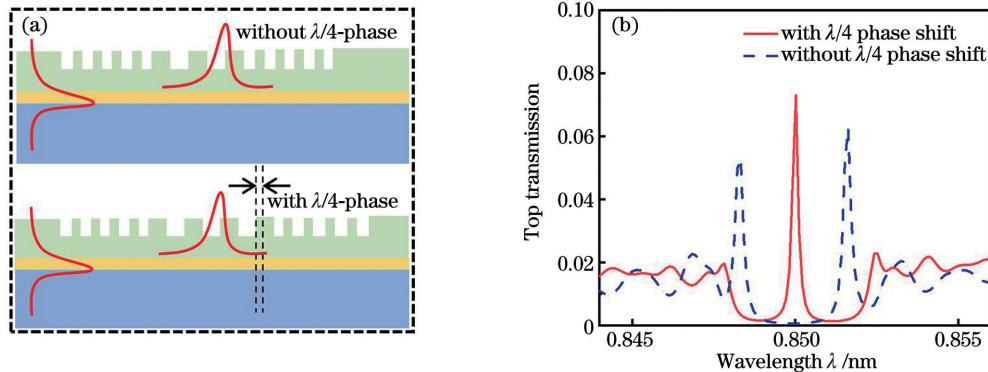


图 3 有无 $\lambda/4$ 相移情况下光栅结构示意图和二阶光栅顶部透射谱。(a)光栅结构示意图;(b)二阶光栅顶部透射谱
Fig. 3 Schematic of grating structure and top transmission spectra of the second-order grating with or without $\lambda/4$ phase shift. (a) Schematic of grating structure; (b) top transmission spectra of the second-order grating

2.3 脊波导和表面光栅结构优化

采用浅脊波导结构来实现对光场横模的限制。相较于深脊波导和掩埋波导结构,浅脊波导结构的最大优势在于制作工艺简单。该浅脊波导结构的截面如图 4 所示,其中 H_r 为脊波导厚度, H_s 为波导间隔层厚度,脊波导和间隔层统称为上波导层。 W 为脊波导宽度, H_g 为光栅刻蚀深度。

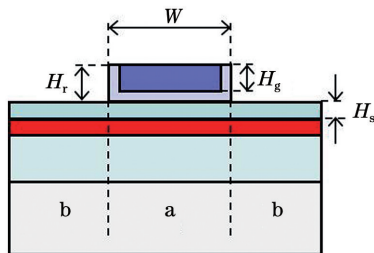


图 4 浅脊波导横截面示意图
Fig. 4 Cross-sectional sketch of shallow ridge waveguide

所使用的浅脊波导结构可以简化为三层平板波导结构,其横向折射率差可定义为

$$\Delta n = n_a - n_b, \quad (2)$$

式中: n_a 、 n_b 分别为 a 和 b 区域的等效有效折射率。计算分析了不同间隔层厚度 H_s 对波导限制能力的影响,结果如图 5(a)所示。随着间隔层厚度增加,波导结构横向折射率差急剧降低。为了提供足够的光场横向限制,需要间隔层厚度 H_s 比较小。但是,由于电极位于波导两侧,间隔层厚度过小会导致电阻偏大,因此本结构采用的间隔层厚度为 100 nm。脊波导的宽度 W 同样是对模场限制非常关键的参数。采用等效折射率法,可以得到单模截止波导宽度^[24] W_c 为

$$W_c = \lambda / (2 \sqrt{n_a^2 - n_b^2}), \quad (3)$$

式中: λ 为波长。图 5(b)所示为不同间隔层厚度

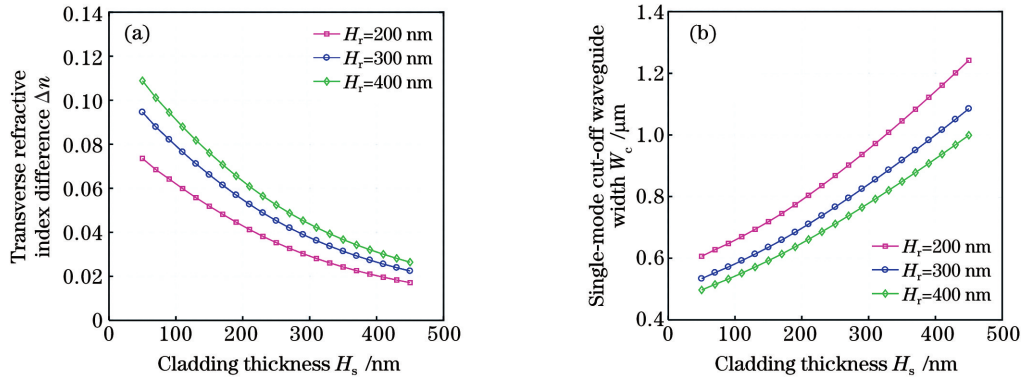


图 5 横向折射率差和单模截止波导宽度随脊波导深度 H_r 和间隔层厚度 H_s 的变化曲线。(a) 横向折射率差; (b) 单模截止波导宽度

Fig. 5 Variation curves of transverse refractive index difference and single-mode cut-off waveguide width with ridge waveguide depth H_r and spacer thickness H_s . (a) Transverse refractive index difference; (b) single-mode cut-off waveguide width

H_s 和脊波导深度 H_r 下的单模截止波导宽度 W_c 的变化。可以看出, 要想实现单横模波导限制, 需要波导宽度小于 $1.3 \mu\text{m}$ 。为了满足光刻工艺, 该浅脊波导结构采用 $2 \mu\text{m}$ 的波导宽度。为了保证波导边缘刻蚀光滑, 光栅宽度选为 $1.5 \mu\text{m}$ 。此时高阶模还未截止, 因此 SEDFB 激光器通过调整氧化孔径来限制横向电流注入, 使得高阶模阈值增益远大于基模, 通过模式竞争实现单横模激光。

衡量表面光栅性能的指标主要有耦合系数 κ 和有源区光限制因子 Γ 。耦合系数反映了光栅的反射能力, 而光限制因子反映了光场限制在有源区的占比。对于本实验中的矩形光栅结构, 耦合系数 κ 可表示为

$$\kappa = 2 \frac{(n_{\text{eff}1} - n_{\text{eff}2})}{\lambda_0}, \quad (4)$$

式中: $n_{\text{eff}1}$ 、 $n_{\text{eff}2}$ 分别为光栅刻蚀前、后的有效折射率; λ_0 为布拉格波长。利用式(4)算出的耦合系数通常偏大, 但是不影响整体变化的趋势。

如图 6(a)、(b)所示, 在相同的脊波导刻蚀深度下, 随着光栅刻蚀深度 H_g 的增加, 耦合系数和光限制因子逐渐增加。同时, 对于相同的光栅刻蚀深度, 脊波导深度 H_r 越小, 得到的耦合系数和光限制因子越大。过深的光栅会增大刻蚀的难度、增强横向模式的泄漏, 因此该脊波导结构深度 H_r 和光栅深度 H_g 分别选择为 200 nm 和 100 nm 。

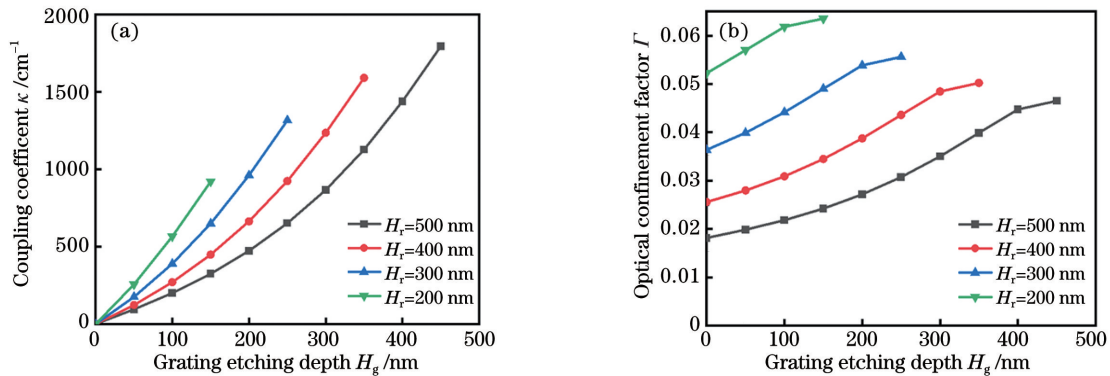


图 6 耦合系数和光限制因子随脊波导深度 H_r 和光栅刻蚀深度 H_g 的变化曲线。(a) 耦合系数; (b) 光限制因子

Fig. 6 Variation curves of coupling coefficient and optical confinement factor with ridge waveguide depth H_r and grating etching depth H_g . (a) Coupling coefficient; (b) optical confinement factor

除了波导和光栅的几何结构尺寸外, SEDFB 激光器的折射率设计也至关重要。通常情况下, 上波导层的折射率越高, 光场在光栅中分布的光强越大, 光栅的反馈能力越强, 但是这会导致有源区光限制因子降低。为了在保持光限制因子的情况下尽可能

地提高光栅的耦合系数, 本实验采用渐变折射率上波导结构, 如图 7 所示。将 400 nm 厚的上波导层均匀分成 8 层, 折射率逐渐变化, 最上层折射率为 n_8 , 最底层折射率为 n_1 。

本实验通过光栅的耦合系数和量子阱的光限制

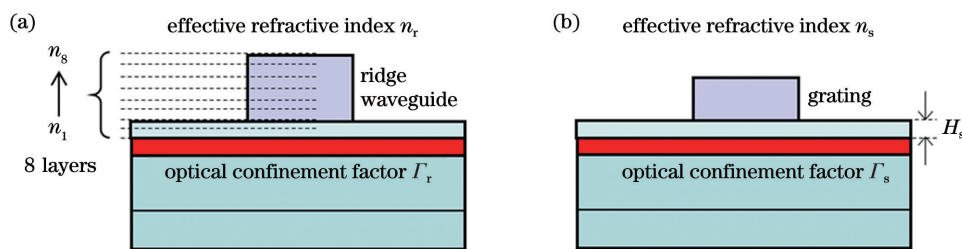


图 7 脊波导结构示意图。(a)未刻蚀光栅部分；(b)刻蚀光栅部分

Fig. 7 Schematic of the ridge waveguide structure. (a) Part of unetched grating; (b) part of etched grating

因子来衡量激光器的结构性能。耦合系数和光限制因子随折射率变化的等高线分别如图 8(a)、(b)所示。可以看到,折射率越高,耦合系数越高,光限制因子越低。需要权衡考量耦合系数和光限制因子来选取一个折中的折射率值。对于图 8(a)中位于光限制因子等高线上的 A、B 两点,从图 8(b)可以看到, B 点的耦合系数远大于 A 点的耦合系数。通过

这种方法,可以在保持光限制因子的情况下优化提升光栅的耦合系数。上波导层同时也是湿法刻蚀欧姆接触层时的停止层。由于湿法刻蚀的停止对 Al 的组分有要求,因此不能将 Al 组分降得过低以追求高的折射率。综上,上波导层的结构从上到下依次为:0.2 μm 厚的 Al_{0.26}Ga_{0.74}As、0.05 μm 厚的 Al_{0.3}Ga_{0.7}As 和 0.05 μm 厚的 Al_{0.34}Ga_{0.66}As。

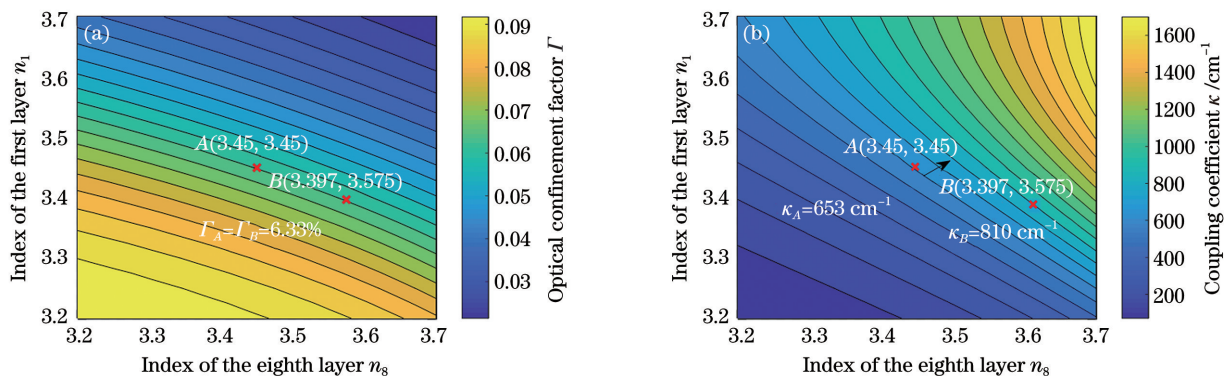


图 8 限制因子和耦合系数的等高线图。(a)光限制因子；(b)耦合系数

Fig. 8 Contour plots of optical confinement factor and coupling coefficient. (a) Optical confinement factor;

(b) coupling coefficient

3 单模面发射分布反馈激光器的制作

除了理论设计外,芯片的制作会直接影响器件的性能和可靠性。所设计的 SEDFB 激光器芯片采用金属有机物化学气相沉积(MOCVD)方法外延生长。与 VCSEL 相比,SEDFB 激光器芯片结构简单,对外延设备精度的依赖性较弱。SEDFB 激光器的制作工艺流程如图 9 所示。

本实验中芯片制作采用的是刻蚀标记法,在光刻之后使用反应耦合等离子体(ICP)干法刻蚀标记,刻蚀气体为 BCl₃、Cl₂、Ar 混合气体。去除欧姆接触层 GaAs 是该器件制作的关键步骤。首先利用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)技术生长 SiO₂ 作为掩模;然后利用 ICP 干法刻蚀 SiO₂,气体选用 CF₄、O₂ 混合气体。为了避免对上波导层表面造成损伤,采用柠檬酸-过氧化氢溶液腐蚀表面

GaAs。利用过氧化氢溶液氧化 Al_xGa_{1-x}As 生成不易溶解的 Al₂O₃ 实现反应的接触停止。表面光栅的制作同样是本器件工艺流程的关键步骤。由于 SEDFB 激光器的目标波长为 850 nm,一阶光栅的周期在 130 nm 左右,本结构光栅图形制作使用电子束曝光设备。在电子束曝光之前,先使用 PECVD 方法生长 50 nm 厚的 SiO₂ 作为掩模。使用匀胶机通过旋转使光刻胶等均匀地分布在芯片上,电子束曝光将图案转移至电子束胶上,采用 CF₄、O₂ 混合气体刻蚀 SiO₂;再采用 Cl₂、BCl₃、CH₄ 的混合气体干法刻蚀 Al_xGa_{1-x}As 材料,刻蚀深度为 100 nm。刻蚀后光栅的扫描电子显微镜(SEM)图像如图 10(b)所示。浅脊波导的刻蚀结果会直接影响激光器的性能。波导刻蚀同样采用 SiO₂ 作为掩模,厚度为 100 nm。CF₄、O₂ 混合气体刻蚀将图案转移到 SiO₂ 上,然后用 Cl₂、BCl₃、CH₄ 的混合气

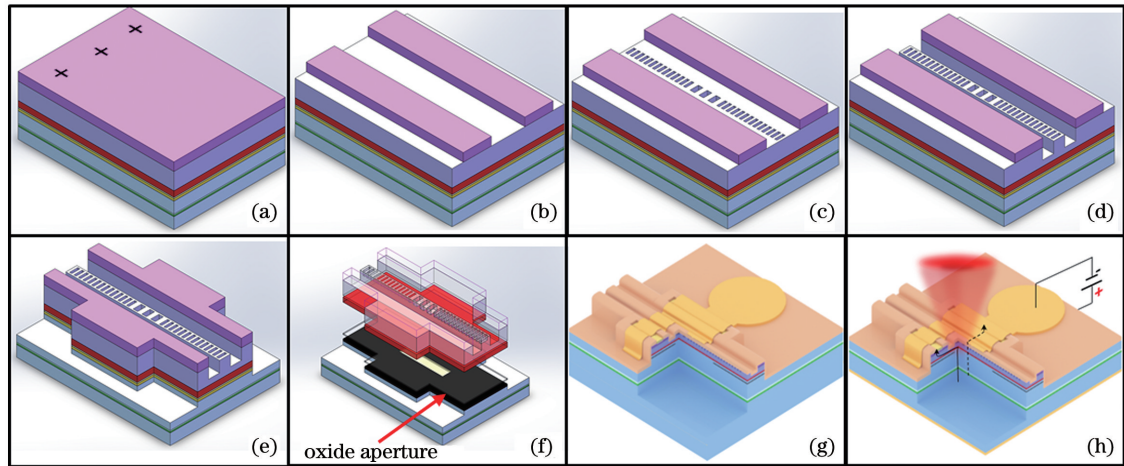


图 9 SEDFB 激光器的制作工艺流程。(a) 制作刻蚀标记;(b)湿法腐蚀欧姆接触层;(c) 制作表面光栅;(d)浅脊波导的制作;(e) 制作氧化台;(f) 湿法氧化制作氧化孔径;(g) 制作正面电极;(h)减薄和蒸镀背面电极

Fig. 9 Production process of SEDFB laser. (a) Fabrication of etching marks; (b) etching contact layer fabricated by wet method; (c) fabrication of surface grating; (d) fabrication of ridge waveguide structure; (e) fabrication of oxidation table; (f) oxidized aperture fabricated by wet oxidation method; (g) fabrication of upper electrode; (h) thinning and fabricating lower electrode

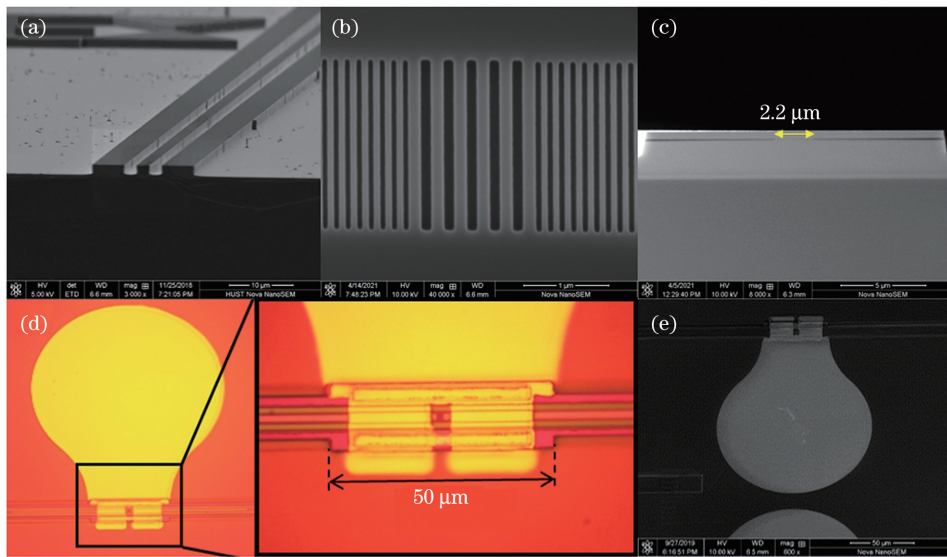


图 10 SEDFB 激光器制作结果图。(a)深刻蚀脊波导 SEM 图;(b)表面光栅 SEM 图;(c)氧化孔径横截面 SEM 图;(d)SEDFB 激光器显微结构图;(e)SEDFB 激光器 SEM 图

Fig. 10 SEDFB laser fabrication result diagrams. (a) SEM image of deeply etched ridge waveguide; (b) surface grating SEM image; (c) cross-sectional SEM image of oxidized aperture; (d) optical micrograph of SEDFB laser; (e) SEM image of SEDFB laser

体干法刻蚀 $Al_xGa_{1-x}As$ 材料,刻蚀深度为 200 nm。由于浅脊波导在 SEM 图像中无法很好地聚焦,图 10(a)给出了深刻蚀情况下的波导 SEM 图像。可以看到,波导表面和侧壁都非常光滑,且对于浅脊波导的效果会更好。SEDFB 激光器根据氧化孔径分为无源 DBR、有源 DFB、无源 DBR 三段,对应氧化台的宽度设计为“窄(10 μm)、宽(16 μm)、窄(10 μm)”三段。湿法氧化的典型工艺是向氧化炉

中通含有水蒸气的氮气。在 350~500 $^{\circ}C$ 的真空高温环境下,高 Al 组分的 AlGaAs 材料被水蒸气逐渐氧化为绝缘性能良好的 Al_2O_3 。本结构氧化层材料选用 $Al_{0.96}Ga_{0.04}As$,控制氧化时间使得氧化深度为 7 μm ,此时氧化孔径的宽度为 2 μm 。无源反射区全被氧化后,实现了电流注入的限制。氧化孔径横截面 SEM 图像如图 10(c)所示。氧化完成后,采用 PECVD 方法生长 400 nm 厚的 SiO_2 作为

隔离层。光刻后过量刻蚀的 SiO_2 露出欧姆接触层, 此时利用电子束蒸发 (EBE) 技术蒸镀 $\text{Ge}/\text{Au}/\text{Ni}/\text{Au}$ 电极。确定测试结构导通之后, 光刻 Pad 电极图形, 并利用 EBE 技术蒸镀金属 Ti/Au 。之后对芯片进行减薄, 蒸镀 p 电极金属 $\text{Ge}/\text{Au}/\text{Ni}/\text{Au}$, 解理后即可进行测试。图 10(d)、(e) 分别为有源区长度为 $50 \mu\text{m}$ 的 SEDFB 激光器的显微结构图和 SEM 图。

4 SEDFB 激光器的性能测试

对制作完成的 SEDFB 激光器进行性能测试。首先将 SEDFB 激光器置于半导体制冷器 (TEC) 上, 温度设置为 20°C , 使用大面积硅 PIN 探测器在 SEDFB 激光器上方测量光功率, 测得 L (有源区长度)- I (电流) 和 V (电压)- I 曲线。测量过程中有源区长度分别取为 $50, 100, 150 \mu\text{m}$, 对应无源反射区的长度为 $75, 25, 0 \mu\text{m}$ 。如图 11(a) 所示, 有源区长度为 $50 \mu\text{m}$ 的激光器拥有最低 1.8 mA 的阈值电流, 有源区长度为 $100 \mu\text{m}$ 和 $150 \mu\text{m}$ 的器件对应的阈值电流为 3.7 mA 和 5.3 mA 。3 个激光器的阈值电流密度均为 $1.8 \text{ kA}/\text{cm}^2$ 左右, 这是因为氧化

孔径对电流注入起到很好的限制作用, 表面复合对阈值电流的影响很小^[25]。3 个 SEDFB 激光器的斜率效率都在 $0.084 \text{ mW}/\text{mA}$ 左右。由于二阶光栅会向上和向下衍射出光, 向下出光部分未得到合理的利用, 因此斜率效率较低。在 14 mA 的注入电流情况下, 有源区长度为 $150, 100, 50 \mu\text{m}$ 的 3 个 SEDFB 激光器的微分电阻分别为 $25, 34, 46 \Omega$ 。具有相同面积的氧化孔径的 VCSEL 微分电阻通常在 $80 \sim 150 \Omega$ 范围内^[26], 这是因为 VCSEL 的多层 DBR 结构会带来额外的电阻。

把平头多模光纤 (OM4) 的裸纤直接放置在二阶光栅正上方, 以将光耦合到光谱仪进行光谱测试, 耦合效率约为 30% 。测试使用的激光器为有源区长度为 $50 \mu\text{m}$ 的器件。SEDFB 在注入电流为 5.5 mA 时, 得到了约 47 dB 的 SMSR, 如图 11(b) 所示。不难发现, 激光器实际的激光波长在 856.3 nm 左右, 与 850 nm 的目标波长偏差了 6.3 nm , 造成这种偏差的原因是实际结构的有效折射率和仿真所用数据存在约 0.012 的微小差别。同时, 随着电流的增大, 激光波长产生线性红移, 变化率为 $0.114 \text{ nm}/\text{mA}$ 。

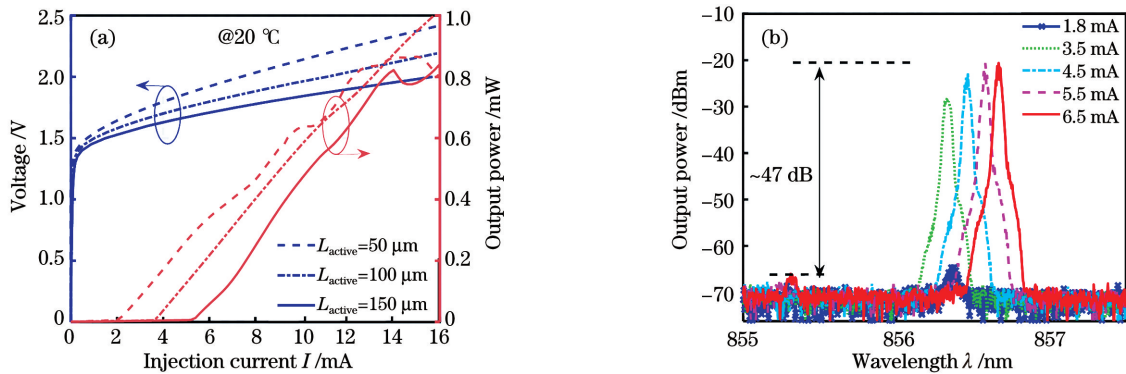


图 11 SEDFB 激光器静态特性曲线。(a) 不同有源区长度下 SEDFB 激光器的 L - I - V 曲线; (b) 不同注入电流下 SEDFB 激光器的光谱图

Fig. 11 SEDFB laser static characteristic curves. (a) L - I - V curves of SEDFB lasers with different active region lengths; (b) spectra of SEDFB lasers under different injection currents

对于有源区长度为 $50 \mu\text{m}$ 的 SEDFB 激光器, 本实验还分析了其激光光谱随温度的变化关系。注入电流设定为 5 mA 不变, 控制 TEC 温度从 20°C 变化到 60°C 。从图 12(a) 可以看出, 虽然随着温度的升高, SMSR 有所下降, 但是均保持在 40 dB 以上。激光波长随着温度的升高以 $0.0636 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 的斜率线性增加。

激光器除了输出激光外, 大部分的能量以热能的形式流失。这些热能在激光器内部累积会对激光器的可靠性造成很大影响。通常, 激光器需要通过

缩减有源区体积来降低阈值, 但是器件尺寸减小的同时, 激光器的热阻抗一般会升高, 这也给器件的散热带来了挑战。激光器的热阻^[26]满足

$$R_{\text{th}} = \frac{\Delta T}{\Delta P_{\text{d}}} = \frac{\partial \lambda / \partial P_{\text{d}}}{\partial \lambda / \partial T}, \quad (5)$$

式中: $P_{\text{d}} = P_{\text{IV}} - P_{\text{out}}$ 为热功率, P_{IV} 和 P_{out} 分别为注入的电功率和输出的光功率; T 为温度。可以计算得到, 有源区长度为 $50 \mu\text{m}$ 的 SEDFB 激光器的热阻约为 $0.74^\circ\text{C}/\text{mW}$, 而具有相同氧化孔径面积的 VCSEL 的热阻为约 $1.1^\circ\text{C}/\text{mW}$, 这

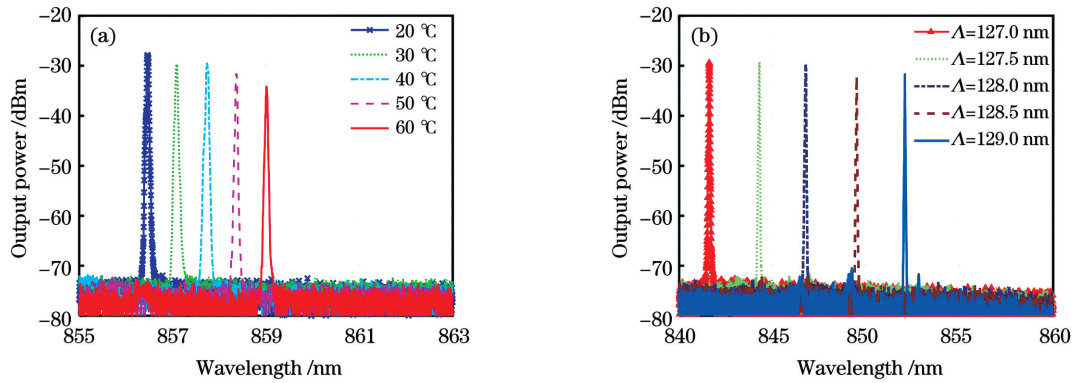


图 12 激光器光谱图。(a)不同 TEC 温度下 SEDFB 激光器的光谱图;(b)不同一阶光栅周期的激光器光谱图

Fig. 12 Laser spectra. (a) Spectra of SEDFB laser at different TEC temperatures; (b) laser spectra with different first-order grating periods

说明所设计的 SEDFB 具有更好的散热性能,主要是因为 SEDFB 激光器的结构是扁长型的,使得器件与衬底的接触面积增大,有利于激光器散热。

同时,通过改变一阶光栅的周期实现了不同激光波长的激光器阵列,其光谱如图 12(b)所示。通过微调一阶光栅周期,可以在保证高 SMSR 的同时

实现精准的激光波长控制。

采用三维 FDTD 软件仿真了 SEDFB 激光器的输出光斑形状。二阶光栅的宽度和长度分别为 $1.5 \mu\text{m}$ 和 $2 \mu\text{m}$,仿真得到的基模输出近场光斑如图 13(a)所示,图 13(b)为近场光斑沿纵向的光场强度图,该近场呈对称模式。如图 13(c)所示,其远场分布为圆形光斑,对应的半峰全宽约为 $20^\circ \times 20^\circ$ 。

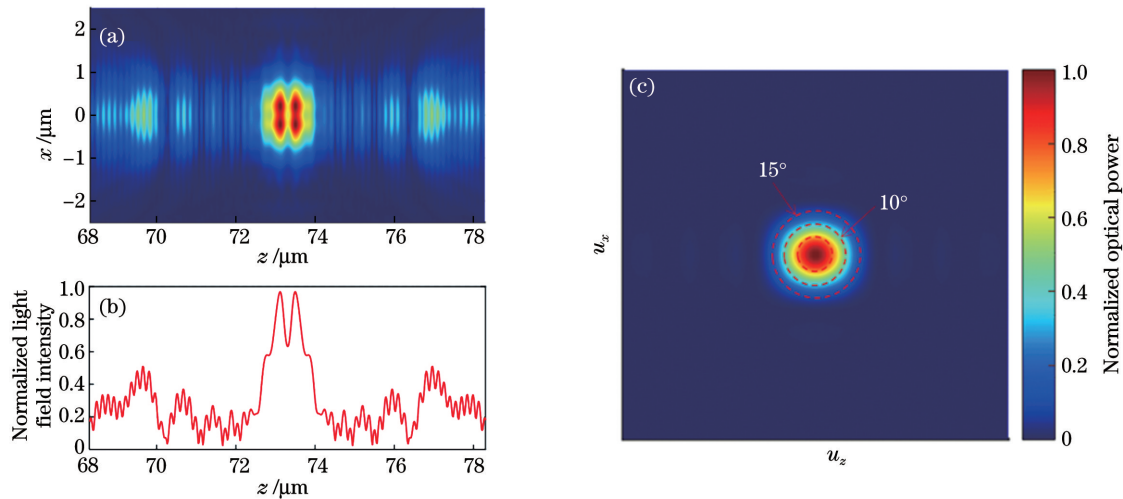


图 13 SEDFB 激光器光场仿真结果。(a)近场光斑图;(b)近场光斑沿纵向的光场强度分布;(c)远场光斑图

Fig. 13 Simulation results of SEDFB laser light field. (a) Near-field pattern; (b) light field intensity along the longitudinal direction of the near field pattern; (c) far-field pattern

采用 CCD 相机测试激光器输出近场,如图 14(a)所示。可以看出,二阶光栅区域输出为准圆形光斑。采用 Thorlabs 公司生产的 BP209 光束分析仪测量 SEDFB 激光器的远场特性,采用高斯拟合测试结果得到 SEDFB 激光器的远场发散角半峰全宽约为 $21^\circ \times 26^\circ$,实现了准圆形光斑输出,如图 14(b)所示。

对 SEDFB 激光器的小信号响应进行测试。对于有源区长度为 $150 \mu\text{m}$ 的 SEDFB 激光器,在 35 mA

($7I_{\text{th}}$) 的偏置电流下,3 dB 带宽达到 15 GHz,如图 15(a)所示。对于有源区长度为 $50 \mu\text{m}$ 的 SEDFB 激光器,在 10 mA ($5I_{\text{th}}$) 的偏置电流下,其弛豫振荡频率约为 17 GHz,如图 15(b)所示。此外,该器件的电光响应在低频部分存在一个明显的滚降,这是因为器件的外部寄生电阻电容(RC)限制了激光器的调制带宽。在后面的工作中可以考虑采用低介电常数材料 BCB (Benzocyclobutene)来降低 SEDFB 激光器的寄生电容。

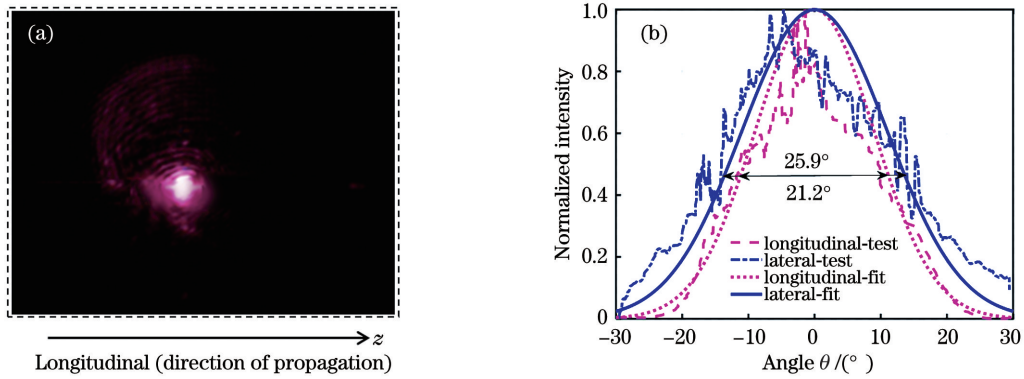


图 14 SEDFB 激光器光场测试结果。(a)SEDFB 激光器输出光斑；(b) SEDFB 激光器远场发散角的测试和拟合结果
Fig. 14 Test results of SEDFB laser light field. (a) SEDFB laser output pattern; (b) test and fitting results of far-field divergence angle of SEDFB laser

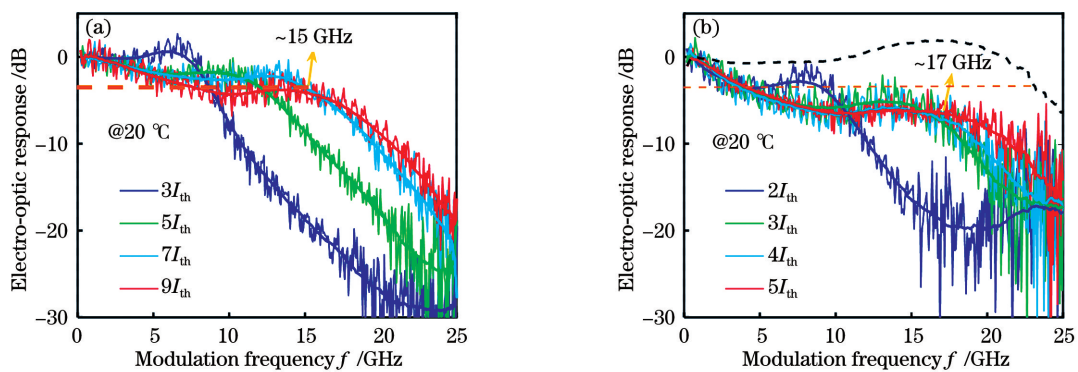


图 15 不同有源区长度的 SEDFB 激光器在不同偏置电流下的小信号响应。(a) $150\ \mu\text{m}$; (b) $50\ \mu\text{m}$
Fig. 15 Measured small signal modulation responses of SEDFB lasers with different active section lengths.
(a) $150\ \mu\text{m}$; (b) $50\ \mu\text{m}$

5 结 论

详细介绍了一种 $850\ \text{nm}$ 的 SEDFB 激光器，通过一阶光栅实现光反馈，二阶光栅实现面发射。通过大面积矩形氧化孔径限制电流注入，在实现 $1.8\ \text{mA}$ 的低阈值电流的同时得到了较小的串联电阻，展现了 SEDFB 激光器在低功耗应用场景的潜力。该激光器通过脊波导对光场的限制和氧化孔径对电流注入的限制实现了单横模激励，同时通过一阶布拉格光栅对纵模进行筛选，实现了单纵模激励，获得高达 $47\ \text{dB}$ 的 SMSR。激光器的远场发散角半峰全宽约为 $21^\circ \times 26^\circ$ ，实现了准圆形光斑输出，在与光纤进行耦合方面具有优势。此外，验证了通过微调一阶光栅周期，在芯片上实现不同波长的激光器阵列，可应用到波分复用等技术方面。同时，该激光器在 5 倍阈值电流下具有 $17\ \text{GHz}$ 的弛豫振荡频率。对于 $150\ \mu\text{m}$ 有源区长度的激光器，其 $3\ \text{dB}$ 调制带宽达到 $15\ \text{GHz}$ 。

参 考 文 献

- [1] Buus J. Single frequency semiconductor lasers [M]. Singapore: Springer, 1991.
- [2] 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.
- [3] 刘安金. 单模直调垂直腔面发射激光器研究进展 [J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0701005.
Liu A J. Progress in single-mode and directly modulated vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0701005.
- [4] 王翔媛, 崔碧峰, 李彩芳, 等. 垂直腔面发射激光器横模控制方法的研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7): 0700008.
Wang X Y, Cui B F, Li C F, et al. Research progress of transverse mode control for vertical cavity surface emitting lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7): 0700008.
- [5] Feng M, Wu C H, Holonyak N. Oxide-confined

- VCSELs for high-speed optical interconnects [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2018, 54(3): 2400115.
- [6] Chang Y C, Wang C S, Coldren L A. High-efficiency, high-speed VCSELs with 35 Gbit/s error-free operation [J]. *Electronics Letters*, 2007, 43(19): 1022-1023.
- [7] Kao H Y, Tsai C T, Leong S F, et al. Comparison of single-/ few-/ multi-mode 850 nm VCSELs for optical OFDM transmission [J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 16347-16363.
- [8] 张岩, 王彦照, 宁吉丰, 等. 795 nm 单模垂直腔面发射激光器[J]. *半导体技术*, 2017, 42(1): 17-22.
Zhang Y, Wang Y Z, Ning J F, et al. 795 nm single-mode vertical-cavity surface-emitting laser [J]. *Semiconductor Technology*, 2017, 42(1): 17-22.
- [9] Martinsson H, Vukusic J A, Grubberr M, et al. Transverse mode selection in large-area oxide-confined vertical-cavity surface-emitting lasers using a shallow surface relief [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, 11(12): 1536-1538.
- [10] Unold H J, Mahmoud S W Z, Jager R, et al. Large-area single-mode VCSELs and the self-aligned surface relief [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2001, 7(2): 386-392.
- [11] Haglund E, Jahed M, Gustavsson J S, et al. High-power single transverse and polarization mode VCSEL for silicon photonics integration [J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 18892-18899.
- [12] Wei S M, Xu C, Deng J, et al. Single-fundamental-mode 850 nm surface relief VCSEL [J]. *Chinese Physics Letters*, 2012, 29(8): 084208.
- [13] Yokouchi N, Danner A J, Choquette K D. Two-dimensional photonic crystal confined vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2003, 9(5): 1439-1445.
- [14] Unold H J, Golling M, Michalzik R, et al. Photonic crystal surface-emitting lasers: tailoring waveguiding for single-mode emission [C] // *Proceedings 27th European Conference on Optical Communication (Cat. No. 01TH8551)*, September 30-October 4, 2001, Amsterdam, Netherlands. New York: IEEE Press, 2001: 520-521.
- [15] Fryslie S T M, Denardo N, Choquette K D. Single mode photonic crystal vertical cavity lasers for improved modulation bandwidth distance product [C] // *Conference on Lasers and Electro-Optics*, June 5-10, 2016, San Jose, California. Washington, D. C.: OSA, 2016: SF1L.8.
- [16] 袁凌, 张正平, 解意洋. 新型正方晶格基横模光子晶体面发射激光器 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(6): 0606005.
Yuan J, Zhang Z P, Xie Y Y. Study of single-fundamental-mode square-lattice photonic crystal vertical cavity surface emitting laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(6): 0606005.
- [17] Chang-Hasnain C. High-contrast gratings for integrated optoelectronics [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2012, 4(3): 379-440.
- [18] Adachi K, Suzuki T, Tanaka S. A lens-integrated surface-emitting DFB laser and its application to cost-effective single-mode optical sub assembly [J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2018, E101.C(7): 566-573.
- [19] Dan B. High-power monolithic single-mode diode lasers employing active photonic lattices [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4993: 20-27.
- [20] Macomber S H, Mott J S, Noll R J, et al. Surface-emitting distributed feedback semiconductor laser [J]. *Applied Physics Letters*, 1987, 17(7): 472-475.
- [21] Liu C, Zhang P F, Xiang M W, et al. Single-mode surface-emitting DFB lasers with a large-area oxidized aperture based on the surface grating [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(13): 3573-3576.
- [22] Casey H C, Jr. *Heterostructure lasers, Part A: fundamental principles* [M]. New York: Academic Press, 1978.
- [23] Kogelnik H, Shank C V. Coupled-wave theory of distributed feedback lasers [J]. *Journal of Applied Physics*, 1972, 43(5): 2327-2335.
- [24] Buus J, Amann M C, Blumenthal D J. *Tunable laser diodes and related optical sources* [M]. New York: IEEE Press, 2005.
- [25] Hayashi Y, Mukaihara T, Hatori N, et al. Lasing characteristics of low-threshold oxide confinement InGaAs-GaAlAs vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1995, 7(11): 1234-1236.
- [26] Baveja P P, Kogel B, Westbergh P, et al. Impact of device parameters on thermal performance of high-speed oxide-confined 850-nm VCSELs [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(1): 17-26.

850 nm Single-Mode Surface-Emitting Distributed Feedback Lasers

Li Nanguo¹, Liu Can^{2,3*}, Zhang Pengfei¹, Xiang Minwen¹, Tang Bao⁴, Yan Weinian⁵,
Kan Qiang⁵, Lu Qiaoyin^{1**}, Guo Weihua^{1***}

¹ Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China;

² Ori-Chip Optoelectronics Technology Co., Ltd., Ningbo 315000, Zhejiang, China;

³ College of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;

⁴ Accelink Technologies Co., Ltd., Wuhan 430074, Hubei, China;

⁵ Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

Abstract

Objective Currently, the growing bandwidth demands of cloud services are accelerating the hyperscale expansion of data centers. 850 nm vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) are widely used in data centers owing to their high-cost performance and high power. However, current commercial VCSELs operate in the multitransverse mode, and their applications are limited to the short connections of a few hundred meters. Owing to reduced mode partition noise and modal dispersion, single transverse-mode VCSELs can transmit over long distances in multimode fiber. Furthermore, in multitransverse-mode VCSELs, high-order modes consume a large fraction of the injection current, resulting in low relaxation oscillation frequencies. Therefore, 850 nm single-mode surface-emitting lasers are an urgent requirement in emerging hyperscale data centers to provide cost-effective, high-bandwidth, and long-distance optical communication systems. This paper presents an 850 nm single-mode surface-emission distributed feedback (SEDFB) laser with a rectangular oxide aperture and a shallow etched surface grating. A threshold current of 1.8 mA and a side-mode rejection ratio (SMSR) of 47 dB are achieved.

Methods A first-order grating is used to provide adequate optical feedback for the laser. A second-order grating is used to achieve upward diffracted light. A $\lambda/4$ phase-shift structure is used to achieve stable single longitudinal mode lasing. Moreover, the simulation calculation is used to optimize the material and thickness of each layer of the waveguide structure and the coupling coefficient of the grating while ensuring the light confinement factor in the active region. Large-area rectangular oxide apertures are designed to confine current injection. Furthermore, the laser chip is epitaxially grown using metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD). Wet etching with a citric acid-hydrogen peroxide solution is used to etch surface GaAs. The reactive coupled plasma (ICP) is used to etch the waveguides and gratings. Using a high-temperature wet oxidation method, a rectangular oxidation aperture is formed.

Results and Discussions A low threshold current of 1.8 mA is obtained for the SEDFB laser with an active region length of 50 μm (Fig. 11). Its differential resistance is 46 Ω , which is smaller than that of VCSELs with the same oxidized aperture area. The laser exhibits good single-mode characteristics, resulting in an SMSR of approximately 47 dB (Fig. 11). The laser temperature increases from 20 $^{\circ}\text{C}$ to 60 $^{\circ}\text{C}$, and the SMSR remains above 40 dB (Fig. 12). The laser's calculated thermal resistance is approximately 0.74 $^{\circ}\text{C}/\text{mW}$, which is smaller than the thermal resistance of a VCSEL with the same oxidized aperture area. The full width at half maximum of far-field pattern divergence angle is approximately $21^{\circ} \times 26^{\circ}$ (Fig. 13), and the quasicircular spot output is achieved. Simultaneously, the laser exhibits a relaxation oscillation frequency of 17 GHz at five times the threshold current (Fig. 14). An SEDFB laser with an active region length of 150 μm exhibits a 3 dB modulation bandwidth of 15 GHz.

Conclusions In summary, this paper presents an 850 nm single-mode surface-emitting distributed feedback laser. It exhibits a threshold current of 1.8 mA, and the low threshold current shows our device's application potential in energy-saving systems. To considerably reduce series resistance, we use a large-area rectangular oxide aperture. The SEDFB laser has a single transverse mode that is confined by the ridge waveguide structure and a single longitudinal mode that is selected by the surface grating. Therefore, the SEDFB laser exhibits a high SMSR of 47 dB. The relaxation oscillation frequency of the SEDFB laser is approximately 17 GHz.

Key words lasers; semiconductor lasers; surface emitting lasers; distributed feedback lasers; surface grating; threshold current; single-mode