

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.240095.

光电器件研究与应用

欧阳越华,黄龙鑫,朱政龙,等. 1 060 nm小发散角准直半导体激光器的设计与仿真[J]. 光通信研究, 2025(5):240095.

Ouyang Y H, Huang L X, Zhu Z L, et al. Design and Simulation of a 1 060 nm Small Divergence Angle Collimated Semiconductor Laser[J]. Study on Optical Communications, 2025(5): 240095.

1 060 nm 小发散角准直半导体激光器的设计与仿真

欧阳越华¹,黄龙鑫¹,朱政龙¹,叶楠¹,宋英雄¹,潘教青²,张冶金²

(1. 上海大学 特种光纤与光接入网重点实验室,上海 200444; 2. 中国科学院 半导体研究所,北京 100085)

摘要:【目的】对于1 060 nm波段高功率激光器,边发射半导体激光器(LD)相比常用的固体激光器有着效率高、成本低、可靠性高和体积小等优点,但其输出光的远场不对称且光束发散角较大。文章的研究目的是在1 060 nm波段基于边发射LD远场理论模型对激光器的波导结构进行优化设计,以改善其远场光斑对称性并降低发散角,实现其近准直出射。【方法】在研究方法上,文章首先根据3层平板波导理论分析了边发射LD的远场发散角与其近场光斑的关系,然后利用Lumerical有限时域差分(FDTD)仿真软件仿真设计边发射LD的波导结构及其近场光斑,尤其是对特殊微结构的设计,从而改善远场特性。【结果】文章利用Lumerical FDTD软件仿真设计了一种带有倾斜侧壁槽的微结构LD。LD工作波长为1 060 nm,结构具有薄渐变折射率层、单量子阱(SQW)有源层以及非对称宽波导层,近出射端的脊波导处均匀分布了特殊结构的倾斜侧壁开槽。仿真结果显示,该设计的脊波导LD获得了2.7°的垂直远场发散角;而且达到了近准直水平出射,发射角度低至约1°。【结论】文章的工作从模拟仿真的角度验证了通过开槽激光器槽侧壁倾斜角度进行光束控制的可行性。通过设计边发射LD垂直波导结构以及槽结构参数,实现了边发射LD的低远场发散角以及近准直出射。

关键词:垂直发散角;准直;非对称波导;倾斜侧壁槽

中图分类号:TN248

文献标志码:A

Design and Simulation of a 1 060 nm Small Divergence Angle Collimated Semiconductor Laser

OUYANG Yuehua¹, HUANG Longxin¹, ZHU Zhenglong¹, YE Nan¹, SONG Yingxiong¹, PAN Jiaoqing², ZHANG Yejin²

(1. Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: 【Objective】For high-power lasers operating at the 1,060 nm band, edge-emitting semiconductor Laser Diode (LD) offer higher efficiency, lower cost, greater reliability, and smaller size compared with conventional solid-state lasers. However, their output exhibits an asymmetric far-field profile and a relatively large beam divergence angle. The objective of this study is to optimize the waveguide structure of edge-emitting LDs at 1 060 nm using a far-field theoretical model, aiming to improve the far-field beam symmetry, reduce the divergence angle, and achieve quasi-collimated emission. 【Methods】In terms of research methods, this article first analyzes the relationship between the far-field divergence angle of edge-emitting LD and its near-field spots based on the theory of three-layer planar waveguides. Then using Lumerical's Finite-Difference Time-Domain (FDTD) simulation software, the waveguide structure of an edge-emitting LD and its near-field intensity profile are designed, with particular emphasis on specialized microstructures, to improve the far-field characteristics. 【Results】In this paper, a microstructure edge-emitting LD with inclined sidewall slots is designed by using Lumerical FDTD software. The laser operates at 1 060 nm. The structure has a thin graded refractive index layer, a Single Quantum Well (SQW) active layer, and an asymmetric wide waveguide layer. The ridge waveguide near the output facet is uniformly patterned with specially designed oblique sidewall grooves. The simulation results show that the designed ridge waveguide edge-emitting LD obtains a vertical far-field divergence angle of 2.7° and emits near collimation at an angle of ~1°. 【Conclusion】This work demonstrates, through simulation, the feasibility of beam control by tuning the sidewall tilt angle of laser grooves. By optimizing the vertical waveguide structure of the edge-emitting LD and carefully designing the groove parameters, a low far-field divergence angle and quasi-collimated output have been achieved.

Key words: vertical divergence angle; collimation; asymmetric waveguide; inclined sidewall micro-slot

0 引言

在1 060 nm波段,高功率激光器在激光制导、激光雷达和工业激光系统^[1]等领域有着广泛的应

用。该波段的高功率激光器多采用掺钕的铝酸钇晶体(Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet, Nd:YAG)为代表的固体激光器,尽管固体激光器的光束质量较理想,但是转换效率低、系统复杂。相

收稿日期:2024-05-16; 修回日期:2024-05-21; 纸质出版日期:2025-10-10

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(61771024);科技部重点研发资助项目(2022YFB2804502);国家自然科学基金面上资助项目(62175143)

作者简介:欧阳越华(1999-),男,上海人。硕士,主要研究方向为硅基光子器件。

通信作者:叶楠,副教授。E-mail: aslanye@shu.edu.cn

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

较之下,半导体激光器(Laser Diode, LD)具有效率高、成本低、可靠性高和体积小等优点^[2-3],使得研究 1 060 nm 波段的 LD 来取代固体激光器成为可能。常规边发射 LD 的输出远场不对称且光束发散角较大,导致其在与单模光纤直接耦合时损耗极高。尽管目前已经有许多降低发散角的技术被提出,但仍然难以使垂直发散角达到 10°以下。中国科学院半导体研究所张冶金研究员课题组^[4]开创性地设计并制备出了一种微结构 LD,在特定光束方向上实现了最低 0.88°垂直发散角的光束输出。该结构对垂直发散角的聚拢效果极为显著,而且具有结构简洁、利于与脊波导型 III-V 族 LD 单片集成的优势,便于批量化制备。但由于基于光栅衍射理论来设计,这种微结构 LD 出射光束的方向仍然偏离水平方向而影响后续的耦合封装。

本文主要针对基于微结构 LD 的激光光束发散角及发射方向进行研究,采用新型倾斜侧壁微槽结构,通过对均匀微结构的周期、深度以及侧壁倾斜角度等参量进行优化仿真,使 1 060 nm 微结构 LD 的激光光束在拥有小发散角的同时保持近水平准直出射。

1 远场理论分析

边发射脊波导 LD 的波导结构可用 3 层平板波导模型简化。其结构及其输出的椭圆光斑如图 1 所示,图中, x 为垂直结平面方向坐标,该方向发散角为垂直发散角 θ_{vert} ; y 为平行结平面方向坐标,该方向发散角为水平发散角 θ_{hor} ; z 为光束传播方向坐标。只考虑横电(Transverse Electric, TE)模式,并假设 y 方向波导尺寸远远大于 x 方向波导尺寸,则归一化电场强度 $E_y(x, z, t)$ 可表示为^[5]

$$E_y(x, z, t) = E_y(x) \exp[i(\omega t - \beta z)], \quad (1)$$

$$E_y(x) = \begin{cases} A \exp(-px) & x \in (\frac{d}{2}, \infty) \\ \cos qx & |x| \leq \frac{d}{2} \\ A \exp(px) & x \in (-\infty, -\frac{d}{2}) \end{cases}, \quad (2)$$

式中: t 为时间; i 为虚数符号; ω 为光场频率; β 为复传播常数的相位常数; d 为波导层的厚度; p 、 q 和 A 分别为任意常数,由本征方程边界条件确定。有源层出射端面外远场强度分布是其近场分布的傅里叶变换,则远场强度分布 $I(\theta)$ 可表示为^[6]

$$I(\theta) = |E(\theta)|^2 = \frac{\cos^2 \theta}{r \lambda_0}.$$

$$\left| \int_{-\infty}^{+\infty} E(x) \exp(ik_0 x \sin \theta) dx \right|^2, \quad (3)$$

式中: θ 为远场一点与有源层波导中心轴的夹角; λ_0 为光真空中的波长; r 为远场一点相对于出射端面中心的距离; $E(x)$ 为有源层出射端面光场分布。由公式可知远场角与近场光斑成反比,因此可以通过设计 LD 波导结构扩大近场光斑,实现较小的远场发散角。

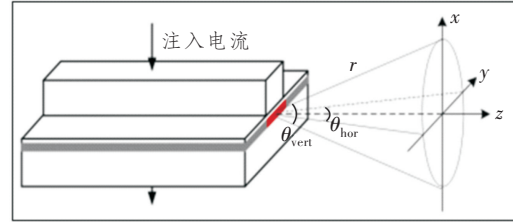


图 1 边发射脊波导 LD 及其输出的椭圆光斑

Figure 1 Edge emitting ridge waveguide laser and its output elliptical spot

2 结构设计及参数分析

2.1 外延结构设计

1 060 nm InGaAs 单量子阱(Single Quantum Well, SQW) LD 的外延结构如表 1 所示。该激光器的组成和性能优化,包括缩小垂直发散角 θ_{vert} 、高功率单模工作和准直出射。

表 1 1 060 nm InGaAs SQW LD 的外延结构

Table 1 Epitaxial structure of 1 060 nm InGaAs SQW laser

结构	材料	厚度/ μm
P-接触层	GaAs	0.08
上限制层	GaAs	0.07
上包层	$\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$	1.0
上梯度层	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.16 \sim 0.35$)	0.05
上波导层	$\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}$	0.4
量子阱	$\text{In}_{0.26}\text{Ga}_{0.24}\text{As}$	0.009
下波导层	$\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}$	0.8
下梯度层	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.30 \sim 0.16$)	0.05
下包层	$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$	2.2
下限制层	GaAs	0.4
衬底	GaAs	400~600

首先,使用减薄有源层结构(厚度为 9 nm 的 $\text{In}_{0.26}\text{Ga}_{0.24}\text{As}$ SQW 的激射波长为 1 060 nm),使基模扩散到包层中从而增加模式的垂直尺寸;其次,选择非对称波导结构,如表 1 所示,其中 n 型(下波导层)和 p 型(上波导层)波导层分别为 0.8 和 0.4 μm ,以此减少注入载流子的泄漏,降低阈值电流的劣化。为了减少高阶模传播,将波导嵌入不同铝组分 x 的

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 中(n 型包层 $x = 0.30$, p 型包层 $x = 0.35$), n 型包层和 p 型包层的厚度分别为 2.2 和 $1.0 \mu\text{m}$ 。在包层与波导层之间插入厚度为 $0.05 \mu\text{m}$ 的薄梯度层,以进一步减小折射率差,该结构采用不同 x 来控制其折射率。对于 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $n(x) = 3.59 - 0.7x + 0.091x^2$, 当 $x = 0.16$ 时, $n \approx 3.48$; 当 $x = 0.30$ 时, $n \approx 3.39$; $x = 0.35$ 时, $n \approx 3.36$ 。构成的脊波导 LD 外延结构如图 2 所示,图 3 所示为该外延结构对应的垂直折射率分布及其扩展基模。

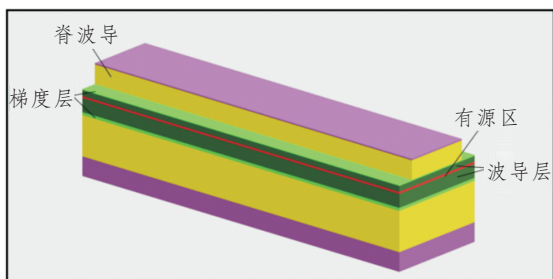
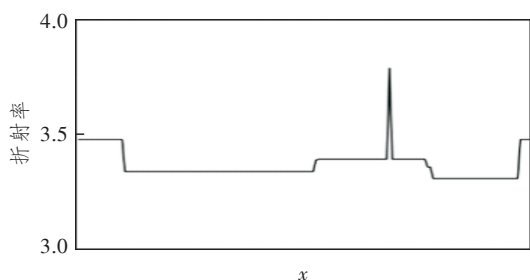


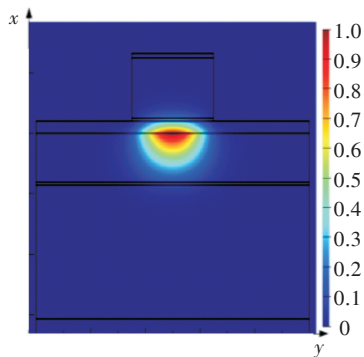
图 2 脊波导 LD 外延结构三维示意图

Figure 2 Three dimensional schematic diagram of epitaxial structure of ridge waveguide semiconductor laser



(a) 垂直折射率分布

(a) Vertical refractive index distribution



(b) 扩展基模

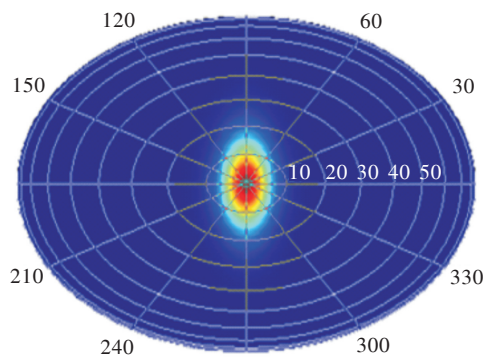
(b) Extended fundamental mode

图 3 脊波导 LD 外延结构的垂直折射率分布与扩展基模

Figure 3 Vertical refractive index distribution and extended fundamental mode of the epitaxial structure of ridge waveguide LD

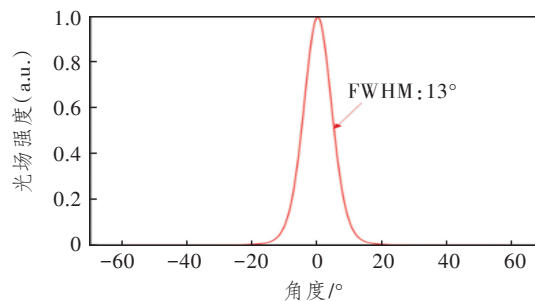
图 4 所示为本文所提脊波导 LD 外延结构输出

的远场光斑图样以及其对应的半高全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)垂直发散角。由图可知,激光器基模扩展的设计通过减薄有源层以及加入非对称波导与梯度层波导结构,能够有效减小 LD 的垂直发散角,但角度改善仍有限,且输出的远场光斑呈椭圆状,即垂直发散角与水平发散角相差较大。



(a) 远场光斑图样

(a) The far-field spot pattern



(b) FWHM 垂直远场发散角

(b) The FWHM vertical far-field divergence angle

图 4 脊波导 LD 的远场光斑及 FWHM 垂直远场发散角

Figure 4 Far-field spot and FWHM vertical far-field divergence angle of ridge waveguide LD

为了使边发射 LD 的远场光斑接近圆形,且进一步减小其远场发散角,文献[7]提出了一种特殊分布的微槽结构,通过控制微槽的位置、周期以及深度,用以控制 LD 的纵模、光束发射方向和垂直发散角。本文采用的微槽 LD 结构如图 5 所示。在 LD 的输出端,有均匀分布的 8 个微槽,槽的周期为 $5.7 \mu\text{m}$,宽度为 $1.8 \mu\text{m}$,采用了 $1.3 \mu\text{m}$ 的槽深度。考虑到微米级加工的最小加工尺寸,这些槽可以通过标准的 i 线光刻(工艺名称,i 线代表光刻使用的波长,即 365 nm)。该结构对应的远场光斑以及垂直远场发散角如图 6 所示,LD 的发射角约为 11° 。

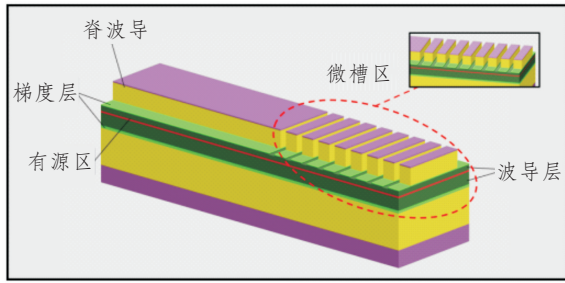


图5 具有开槽结构的脊波导 LD 三维结构示意图
Figure 5 Three dimensional schematic diagram of ridge waveguide LD with slotted structure

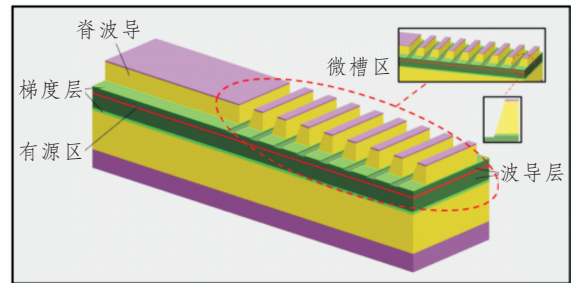
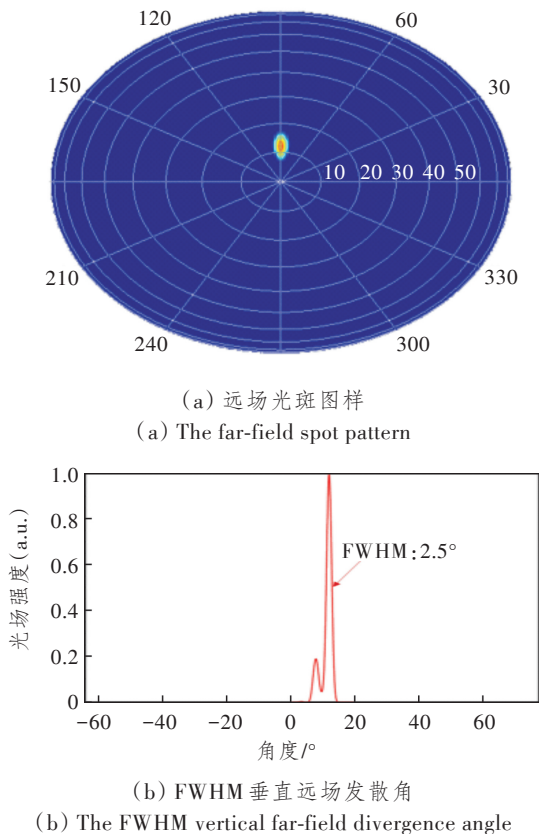


图7 侧壁倾斜微槽结构的脊波导 LD 三维结构示意图

Figure 7 Three dimensional schematic diagram of a ridge waveguide LD with a tilted sidewall micro-slot structure



(a) 远场光斑图样
(a) The far-field spot pattern
(b) FWHM 垂直远场发散角
(b) The FWHM vertical far-field divergence angle

图6 刻蚀微槽的脊波导 LD 的远场光斑以及垂直远场发散角
Figure 6 Far-field spot and vertical far-field divergence angle of ridge waveguide LD with etched micro-slots

2.2 侧壁倾斜的开槽结构

如图6所示,刻蚀了周期性微槽结构的脊波导 LD 能够极大程度地减小远场发散角,但这种类光栅结构不可避免会导致 LD 出射光束偏离水平方向,限制了其在许多领域的应用。因此,本文采用单侧壁倾斜的开槽结构,调控出射光场,使 LD 在拥有小发散角的同时能够保持接近水平方向的出射效果,其结构如图7所示。

本文使用 Lumerical 有限时域差分(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)进行三维建模仿真,若仿真几百微米的腔长结构,所花费的时间过长。由于 LD 稳定激发后有源区中间段模场分布较为稳定,主要是微槽区域影响出射光发射角。因此,本文的仿真区域设置为 LD 出射端含有微槽的部分,同时采用 Lumerical FDTD 完全吸收边界条件,其中衬底默认为无穷厚,以确保衬底底面边缘处没有反射光进入仿真区域。基于 2.1 节中周期为 $5.7\ \mu\text{m}$ 、宽度为 $1.8\ \mu\text{m}$ 、深度为 $1.3\ \mu\text{m}$ 的垂直侧壁微槽结构,以步长 $0.1\ \mu\text{m}$ 增加微槽上端的宽度,从而调控微槽侧壁的倾斜角度。图8所示为本文的 FDTD 仿真区域以及结构参数。

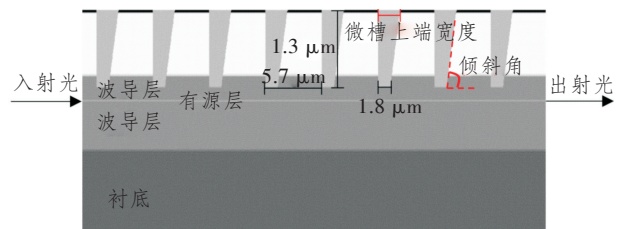


图8 FDTD 仿真区域以及结构参数

Figure 8 The FDTD simulation area and structural parameters

图9所示为垂直侧壁微槽与倾斜侧壁微槽结构的激光器波导传输光路图。由图可见,通过对微槽结构侧壁的倾斜角度设计,能够调控激光器的出射光场方向。

当微槽上端宽度从 $1.8\ \mu\text{m}$ (垂直侧壁)到 $2.3\ \mu\text{m}$,即微槽侧壁倾斜角度从 90° 到 69° 时,激光器发射角的仿真结果如图10所示。当微槽上端宽度为 $2.1\ \mu\text{m}$ 时,激光器的发射角低至约 1° ,此时微槽侧壁的倾斜角度约为 77° ,图11所示为此时对应的远场光斑以及垂直远场发散角。

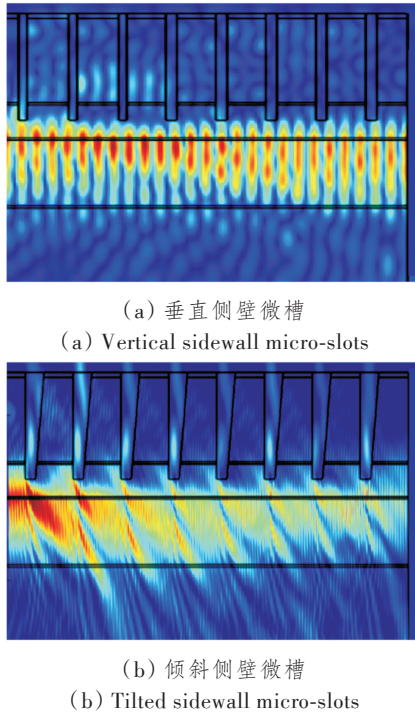


图 9 激光器波导传输光路图

Figure 9 Laser waveguide transmission optical path diagram

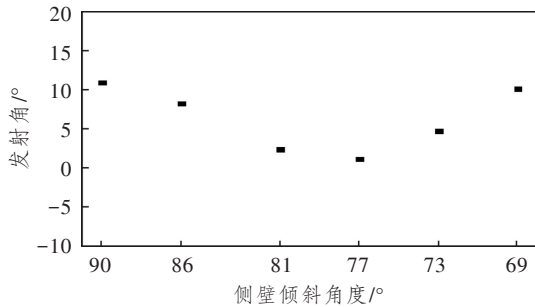
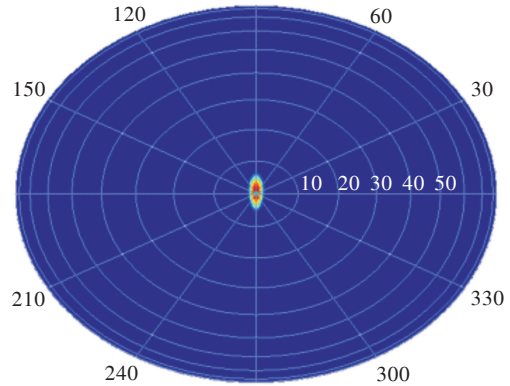


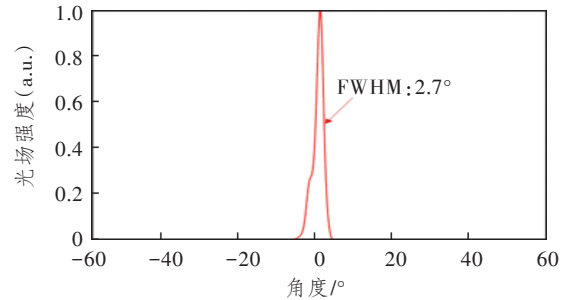
图 10 微槽侧壁倾斜角度与 LD 发射角仿真结果的关系

Figure 10 The relationship between the tilting angle of the micro-slot sidewall and the simulation results of the LD emission angle

图 12 为本文涉及的非对称波导结构、垂直侧壁微槽结构以及倾斜侧壁微槽结构的垂直远场发散角对照图,其中 3 种结构的光场强度都分别经过归一化处理。由图可知,通过减薄有源层以及加入非对称波导与梯度层波导的激光器垂直方向波导设计,能够有效减小 LD 的垂直发散角,但其角度改善有限;在近激光器输出端的脊波导部分刻蚀微槽结构,能够通过控制微槽的周期以及深度来控制激光器的光束发射方向和垂直发散角,但基于光栅衍射的原理,会导致激光器出射光束偏离水平方向;通过设计微槽结构激光器的槽结构使其侧壁倾斜,可进一步调控激光器的激光出射方向,使其达到近准直出射。



(a) 远场光斑图样
(a) The far-field spot pattern



(b) FWHM 垂直远场发散角

(b) The FWHM vertical far-field divergence angle

图 11 倾斜侧壁微槽的脊波导 LD 的远场光斑以及垂直远场发散角

Figure 11 Far-field spot and vertical far-field divergence angle of ridge waveguide LD with tilted sidewall etched micro-slots

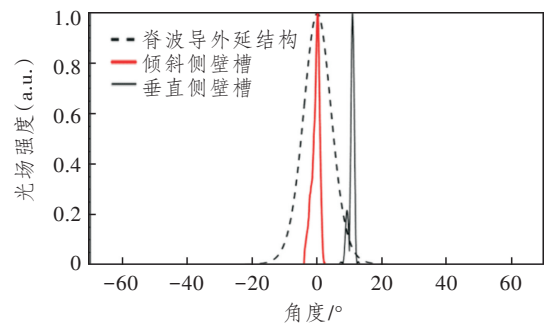


图 12 3 种结构的 FWHM 垂直发散角

Figure 12 The FWHM vertical far-field divergence angle of three structures

3 结束语

本文设计了一种工作在 1 060 nm 波段的倾斜侧壁微槽结构脊波导 LD。通过在接近激光器输出端的脊波导部分设置均匀分布且侧壁倾斜的特殊结构槽,可调控激光器垂直方向的光束发射方向以及垂直发散角,通过 FDTD 仿真设计,实现了 2.7° 的 FWHM 垂直发散角,同时激光近准直出射,发射角

低至 1° 左右。由于实验条件及项目时间的限制,本文仅针对激光器出射端含有微槽的一段区域进行了仿真优化。未来我们会探索在水平方向引入渐变结构来进一步压缩水平方向的发散角,并考虑激光器有源区的结构及材料设计。

参考文献:

- [1] Lammert R M, Hu W, Oh S W, et al. High Brightness Semiconductor Lasers from 780–1 064-nm[C]// Laser Source Technology for Defense and Security III. Orlando, Florida, USA: SPIE, 2007: 655212.
- [2] 田琦, 韩宇, 张瑞罡, 等. 高速直接调制半导体激光器研究进展[J]. 光通信研究, 2023(2): 55–62.
Tian Q, Han Y, Zhang R G, et al. Research Progress on High-Speed Directly Modulated Semiconductor Lasers[J]. Study on Optical Communications, 2023(2): 55–62.
- [3] 高晓梅, 舒玉婷, 梁静远, 等. 通信激光器及其调制技术研究进展[J]. 光通信研究, 2024(2): 220048.
Gao X M, Shu Y T, Liang J Y, et al. Research Progress of Communication Laser and Its Modulation Technology[J]. Study on Optical Communications, 2024(2): 220048.
- [4] Yang Y, Wang Z, Sun J, et al. A Microstructured Laser with Modulated Period for Beam Control[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(4): 1536206.
- [5] 李丽娜, 吴金辉, 宋俊峰. 大功率半导体激光器远场特性研究[J]. 发光学报, 2004, 25(1): 95–97.
Li L N, Wu J H, Song J F. Far-Field Characteristics of High Power Laser Diode[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2004, 25(1): 95–97.
- [6] 李雅静, 安振峰, 陈国鹰, 等. 小发散角量子阱激光器研究[J]. 微纳电子技术, 2008, 45(11): 635–638.
Li Y J, An Z F, Chen G Y, et al. Study of Quantum-Well Laser with Small Far-Field Divergence Angle [J]. Micronanoelectronic Technology, 2008, 45(11): 635–638.
- [7] Zhang Y, Su Y, Bi Y, et al. Inclined Emitting Slotted Single-Mode Laser with 1.7° Vertical Divergence Angle for PIC Applications[J]. Optics Letters, 2018, 43(1): 86–89.