

文章编号: 1000-7032(2023)12-2231-11

1 μm 波段高功率超辐射发光二极管

伏丁阳, 高欣, 赵仁泽, 张悦, 苏鹏, 薄报学*

(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: 为提高 1 μm 波段超辐射发光二极管的输出特性, 对外延结构及 J 型波导结构参数进行研究, 基于研究结果确定外延结构及波导结构参数并对电极窗口制备工艺及单层氧化铪薄膜成膜条件进行了优化。研究表明, 缩小波导与限制层 AlGaAs 材料中 Al 组分差值利于改善器件光束特性。此外, 增加刻蚀深度、脊宽及曲率半径均会使损耗系数减小以提高器件输出功率。基于仿真结果制备出非均匀阱宽大阱深的三量子阱结构器件, 前腔面镀制反射率约为 0.5% 的单层氧化铪薄膜, 后腔面蒸镀高反膜, 腔长约 2 mm, 波导曲率半径为 21.8 mm, 在 500 mA 连续电流注入下, 实现了 118.1 mW 输出功率和 32.5 nm 光谱半宽。单层增透膜的设计抑制了器件激射并简化了工艺复杂度, 避免了多层增透膜不同材料间的应力问题。

关键词: 超辐射发光二极管; 弯曲波导; 曲率半径; 损耗系数; 输出特性

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20230216

1 μm High Power Superluminescent Diodes

FU Dingyang, GAO Xin, ZHAO Renze, ZHANG Yue, SU Peng, BO Baoxue*

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

* Corresponding Author, E-mail: bbx@cust.edu.cn

Abstract: In order to improve the output characteristics of 1 μm -band superluminescent diodes, this article studies the epitaxial structure and J-type waveguide structure. Based on the research results, the parameters of the epitaxial structure and waveguide structure are determined, and the electrode window preparation process and single-layer hafnium oxide film formation conditions are optimized. The research has shown that reducing the difference in Al composition between the waveguide and the limiting layer AlGaAs material is beneficial for improving the beam characteristics of the device. In addition, increasing the etching depth, ridge width, and curvature radius will reduce the loss coefficient and improve the output power of the device. Based on simulation results, a three quantum well structure device with non-uniform well width and large well depth was prepared. A single-layer hafnium oxide film with a reflectivity of about 0.5% was deposited on the front cavity surface, and a high reflection film was evaporated on the back cavity surface. The cavity length was about 2 mm, and the waveguide curvature radius was 21.8 mm. Under 500 mA continuous current injection, an output power of 118.1 mW and a spectral half width of 32.5 nm were achieved. The horizontal and vertical far-field divergence angles of the device are 13.2° and 21.1°, respectively. In addition, the design of a single-layer anti-reflective film effectively suppresses the lasing of devices with high gain, simplifies process complexity, and avoids stress issues between different materials of the multi-layer anti-reflective film.

Key words: superluminescent diodes; curved waveguide; curvature radius; loss coefficient; output characteristic

收稿日期: 2023-09-19; 修订日期: 2023-10-07

基金项目: 国家自然科学基金(61774024); 吉林省科技发展计划(20190302007GX, 20200501008GS)

Supported by National Natural Science Foundation of China(61774024); Science and Technology Development Plan of Jilin Province(20190302007GX, 20200501008GS)

1 引 言

超辐射发光二极管(Superluminescent diodes, SLD)作为一种高功率、宽光谱发射的光源,具有相干长度短和远场发散角小等优点,广泛应用于波分复用(Wavelength division multiplexing, WDM)、光时域反射仪(Optical time domain reflectometer, OTDR)以及光纤陀螺仪(Fiber-optic gyroscope, FOG)等领域。同时,水汽对 $1.06 \mu\text{m}$ 的吸收较低,并且水在 $1 \mu\text{m}$ 附近存在零色散的情况,因此 $1 \mu\text{m}$ 波段的 SLD 可以在含水分气氛条件下测量目标,根据光谱中各频率的干涉信号来获得深度相关的信息,使其方便用于医学诊断领域中的光学相干层析成像(Optical coherence tomography, OCT)^[1-2]。目前, $1 \mu\text{m}$ 波段 OCT 系统光源的光谱半宽应不低于 75 nm 。对 SLD 的需求正在朝着高输出功率和宽光谱半宽的目标迈进。SLD 的高功率输出特性,既可以在光纤中更长距离的信息传输、降低噪声对测量结果的影响,又可以提高 FOG 系统的精度和灵敏度,也可以提升 OCT 系统的成像速率,还可以增加 OTDR 系统的动态范围与测量距离。而 SLD 宽光谱特性则可以实现 OCT 系统轴向分辨率的提高。

自从 1971 年 Kurbatov 等^[3]首次制备出 SLD 之后,如何提高 SLD 的输出性能成为研究热点。Ohgoh 等^[4]制备了中心波长为 $1.05 \mu\text{m}$ 的倾斜波导结构的 InGaAs/GaAs 非对称双量子阱结构 SLD,获得了 33.4 mW 的连续波输出功率和 77.5 nm 光谱半宽。2015 年,段利华等^[5]制备了中心波长为 1053 nm 的弯曲波导吸收区结构的 InGaAs/GaAs 双量子阱 SLD,在 100 mA 注入电流下,SLD 模块尾纤输出功率达到 2.5 mW ,相应的光谱半宽为 24 nm 。2018 年, Kwon 等^[6]制备出中心波长 $1.08 \mu\text{m}$ 的 InGaAs/GaAs 非对称双量子阱结构的 SLD,在 250 mA 注入电流下获得 20 mW 的输出功率和 122 nm 的光谱半宽。由于 J 型波导后端面的反射作用使得这种结构的 SLD 可以实现更高的输出功率, Kafar 等^[7]制备了 J 型波导结构的蓝紫色 SLD,在 450 mA 注入电流下获得了大于 200 mW 的输出功率。可以看出,现阶段 $1 \mu\text{m}$ 波段 SLD 的输出功率还有待提高。

为了改善 $1 \mu\text{m}$ 波段 SLD 的输出特性,本文设计了非均匀阱宽大阱深的三量子阱结构作为有源

区以提高增益、改善谱宽、减小高注入下的载流子泄露并通过缩小波导层和限制层 AlGaAs 材料中 Al 组分的差值,降低器件的远场发散角,改善器件光束特性。另外,采用时域有限差分法结合光束传输法仿真模拟了 J 形波导不同结构参数与损耗系数之间的关系。基于仿真结果,确定器件结构参数,并对制备工艺进行了优化。

2 器件设计

J 型波导结构的 SLD 结构示意图如图 1 所示,芯片前腔面镀制增透膜,后腔面镀制高反膜。弯曲波导腔面作为输出腔面配合前腔面镀制的增透膜可以使光在纵向上的振荡得到有效抑制,只有极少部分光反射回波导内,从而达到抑制 F-P 振荡的目的,使器件稳定工作在超辐射状态,抑制激光引起的光谱变窄。后腔面的高反膜设计提供了波导内的双程增益,有效增加腔内的光增益长度,有利于器件输出功率的提高。

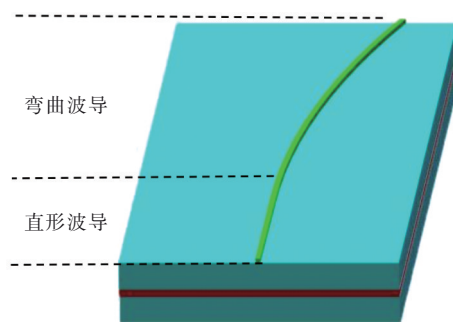


图 1 J 型波导结构 SLD 示意图

Fig.1 Schematic diagram of J-shaped waveguide structure SLD

波导弯曲会不可避免地产生辐射损耗。如果损耗过大,可能导致器件输出功率较低或器件发热严重而无法正常工作。对弯曲损耗进行定量分析意义重大。损耗系数 α 由下列公式联立给出:

$$I = A^2, \quad (1)$$

$$I = I_0 \exp(-\alpha L), \quad (2)$$

其中, A 代表振幅, I 是输出功率, I_0 是输入功率, L 是波导长度。

在器件设计过程中,首先仿真了不同刻蚀深度对脊形波导基模模场尺寸的影响,并采用光束传输法仿真了不同波导结构参数(刻蚀深度、脊宽、曲率半径)情况下,光在波导中的传输情况,得到了不同波导结构参数对损耗系数的影响。

仿真过程采用的器件的外延结构参数如表 1

表 1 器件外延结构参数

Tab. 1 Device epitaxial structure parameters

Material	Epitaxial layer	Thickness	Doping/cm ⁻³
P-GaAs	Buffer	150 nm	Zn, 1×10 ¹⁹
P-Al _{0.3} Ga _{0.7} As	Cladding	1.1 μm	Zn, 5×10 ¹⁷
Al _{0.2} Ga _{0.8} As	Waveguide	0.56 μm	
GaAs _{0.83} P _{0.17}	Barrier	6 nm	
In _{0.3} Ga _{0.7} As	QW1	5 nm	
GaAs _{0.83} P _{0.17}	Barrier	6 nm	
In _{0.3} Ga _{0.7} As	QW2	6 nm	
GaAs _{0.83} P _{0.17}	Barrier	6 nm	
In _{0.3} Ga _{0.7} As	QW3	7 nm	
GaAs _{0.83} P _{0.17}	Barrier	6 nm	
Al _{0.2} Ga _{0.8} As	Waveguide	0.76 μm	
N-Al _{0.3} Ga _{0.7} As	Cladding	2.5 μm	Si, 8×10 ¹⁷
N-GaAs	Buffer	1 μm	Si, 1×10 ¹⁸

所示。采用相同 In 组分不同阱宽的三量子阱结构作为有源区达到扩展器件光谱半峰宽的目的。此外,考虑到单量子阱对非平衡载流子的收集能力较弱^[8],本文利用 GaAsP 替代传统的 GaAs 作为垒层材料增大阱深并结合多量子阱结构以获得高增益和高注入下的低载流子泄露,提高载流子的注入效率。其次,电导率大、热阻小的 AlGaAs 被作为波导层与限制层材料。研究了波导层和限制层 Al_xGa_{1-x}As 材料中 Al 组分的差值 Δx 对远场发散角的影响,如图 2 所示。结果表明,Δx=0.1 时的垂直远场发散角较 Δx=0.3 时下降了 6.5°,即缩小波导与限制层材料中 Al 组分的差值有利于降低基模光限制因子,进而达到降低器件远场发散角以改善光束特性的目的。

本文首先进行模型建立,将如图 1 所示的单

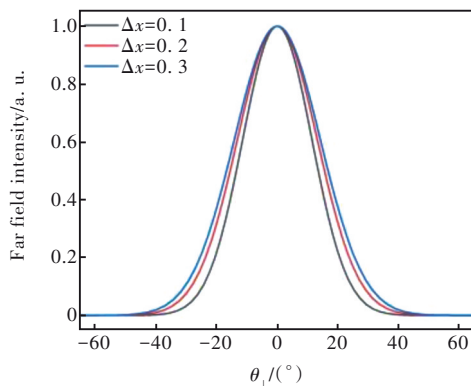


图 2 归一化的垂直远场发散角随波导层和限制层 Al 组分差值 Δx 的变化趋势

Fig.2 The trend of normalized vertical far-field divergence angle as a function of the difference in Al composition Δx between the waveguide layer and the limiting layer

管划分为脊波导区域和脊波导两侧被刻蚀区域。其等效图形如图 3 所示。脊波导两侧被刻蚀区域的外延结构相同且刻蚀深度也相同,因此它们的等效折射率相同。设脊型波导两侧被刻蚀区域的等效折射率为 n₁,脊波导区域的等效折射率为 n。

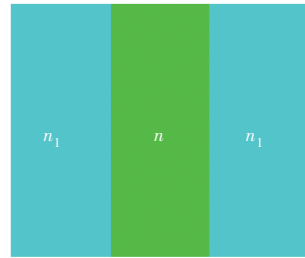


图 3 等效图形

Fig.3 Equivalent figure

其次,利用 Mode Solutions 仿真 n₁ 与 Δn=n-n₁ 随刻蚀深度的变化情况,如图 4(a)、(b)所示。从图中可以看出,刻蚀深度小于 1.1 μm 时 n₁ 几乎保持不变。当刻蚀深度达到一定值后,n₁ 对刻蚀深度的变化变得很敏感,刻蚀深度的少量增加会导致 n₁ 的急剧下降。刻蚀深度大于 1.1 μm 时 n₁ 开始下降,Δn 随着刻蚀深度的增加而增加。这表明随着刻蚀深度的增加,波导对光场的限制能力逐渐增强。

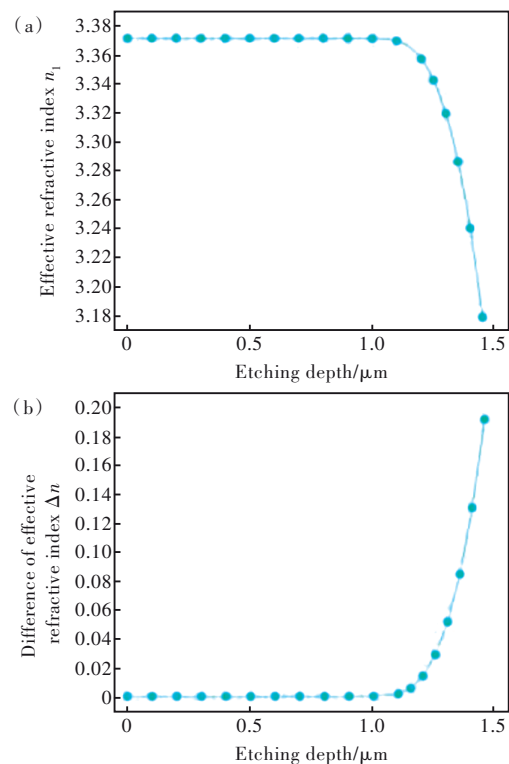


图 4 刻蚀深度与 n₁(a)和 Δn(b)之间的关系

Fig.4 The relationship between etching depth and n₁(a) and Δn(b)

再次,为了初步确定刻蚀深度,本文仿真了基模场尺寸随刻蚀深度 H 的变化趋势,如图5所示。仿真采用的脊波导宽度为 $3\ \mu\text{m}$ 。从图中可以看出,随着刻蚀深度的增加,分布在 $\pm 1.5\ \mu\text{m}$ 范围外的光场强度随之下降。这表明基模场分布范围逐渐收缩到脊波导中,光场的侧向尺寸逐渐减小。当刻蚀深度 $< 1.1\ \mu\text{m}$ 时,光场模式可扩展到脊型区两侧较大距离,载流子的侧向扩展会导致器件的增益减小^[9]。当刻蚀深度 $> 1.1\ \mu\text{m}$ 时,分布在脊波导外侧的光场强度近似为零。因此,刻蚀深度应该大于 $1.1\ \mu\text{m}$ 。

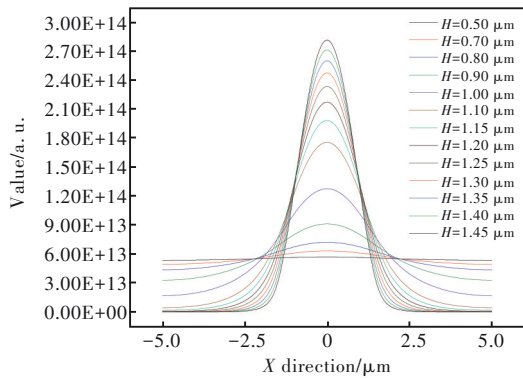


图5 基模场尺寸随刻蚀深度的变化趋势

Fig.5 The variation trend of fundamental mode field size with etching depth

随后,对脊宽为 $3\ \mu\text{m}$ 、曲率半径为 $13.6\ \text{mm}$ 的器件在不同刻蚀深度下波导中光场传输情况进行仿真,如图6所示。从图6(a)可以看出,刻蚀深度为 $1\ \mu\text{m}$ 时,由于脊波导与脊波导两侧被刻蚀区域等效折射率差较小,光场完全脱离波导限制^[10];图6(b)中输出端面电场振幅为 0.331 ,此时波导损耗较大,可能导致器件输出功率较低;图6(c)中输出端面电场振幅为 0.996 。刻蚀深度增加导致波导对光场的限制能力增强,波导损耗下降。另外,随着刻蚀深度的增加,分布在弯曲波导外侧的光场减少,这也定性证明了弯曲波导损耗随着刻蚀深度的增加而降低。

最后,根据以上仿真结果,联立公式(1)、(2),得到损耗系数与刻蚀深度之间的关系并最终确定了刻蚀深度,仿真结果如图7所示。需要注意的是,由于刻蚀深度为 $1\ \mu\text{m}$ 及以下时,波导完全丧失对光场的限制能力,因此并没有计算此时的损耗系数。从图中可以看出,损耗系数随着刻蚀深度的增加而减小。当刻蚀深度大于 $1.15\ \mu\text{m}$ 时,损耗系数变化很小。考虑到波导损耗过低容易导

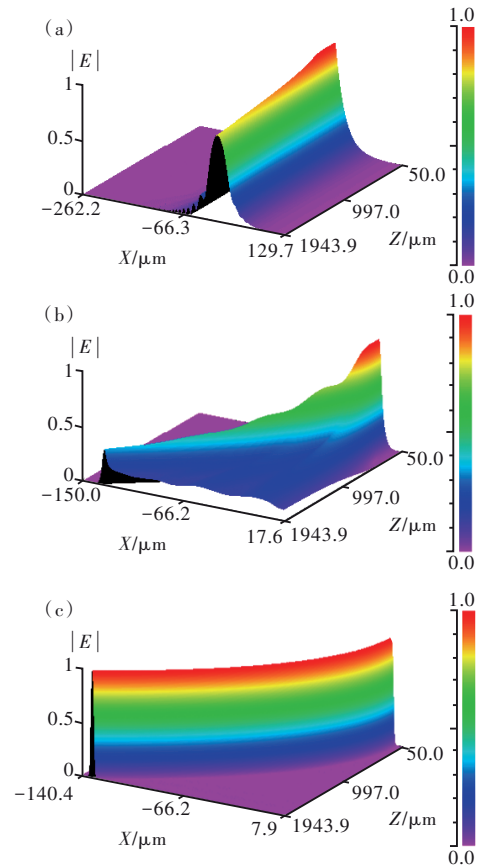


图6 不同刻蚀深度情况下光场传输情况。(a) $1\ \mu\text{m}$;(b) $1.1\ \mu\text{m}$;(c) $1.25\ \mu\text{m}$ 。

Fig.6 Light field transmission under different etching depths. (a) $1\ \mu\text{m}$. (b) $1.1\ \mu\text{m}$. (c) $1.25\ \mu\text{m}$.

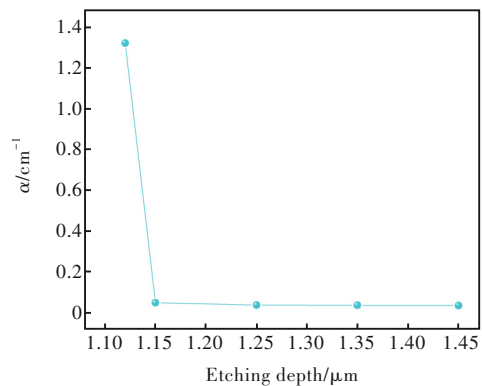


图7 损耗系数与刻蚀深度之间的关系

Fig.7 The relationship between loss coefficient and etching depth

致器件在相对较低的电流下产生较大的光谱调制甚至激射,刻蚀深度被定为 $1.12\ \mu\text{m}$ 。

基于以上的仿真结果,我们对刻蚀深度为 $1.12\ \mu\text{m}$ 、曲率半径为 $13.6\ \text{mm}$ 的器件在不同脊宽下波导中光场传输情况进行仿真,如图8所示。图8(a)中输出端面电场振幅为 0.37 ,此时脊宽较窄,波导对光场的约束较弱^[11]。图8(b)中输出端

面电场振幅为 0.882;图 8(c)中输出端面电场振幅为 0.958。随着脊宽的增加,分布在弯曲波导外侧的光场随之减少,这定性证明了弯曲波导损耗随着脊宽的增加而降低。

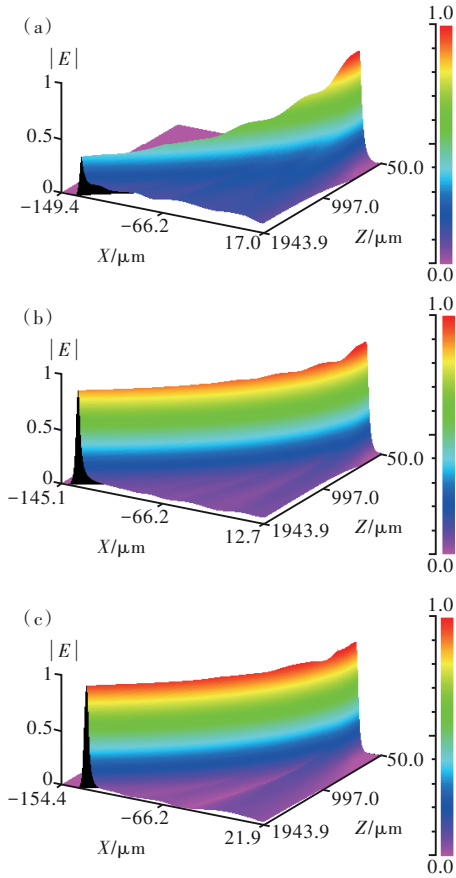


图 8 不同脊宽情况下光场传输情况。(a)1.5 μm;(b)3 μm;(c)4.5 μm。

Fig.8 Light field transmission under different ridge widths. (a)1.5 μm. (b)3 μm. (c)4.5 μm.

文中同样得到了损耗系数随波导宽度的变化情况,并确定了器件波导的宽度,结果如图 9 所示。图中 Δn 的不同数值代表不同的刻蚀深度。损耗系数随脊宽的增加而减小。在刻蚀深度相对较浅($\Delta n=0.003$ 对应 1.12 μm 刻蚀深度)时,脊宽对损耗系数的影响较大;随着刻蚀深度增加($\Delta n=0.005$ 时),脊宽对损耗系数的影响减弱。为了尽可能降低波导弯曲损耗并且满足基模条件,最终将脊宽定为 3 μm。

综上,我们对刻蚀深度为 1.12 μm、脊宽为 3 μm 的器件在不同曲率半径下波导中光场传输情况进行仿真,如图 10 所示。图 10(a)中输出端面电场振幅为 0.454;图 10(b)中输出端面电场振幅为 0.753;图 10(c)中输出端面电场振幅为 0.914;

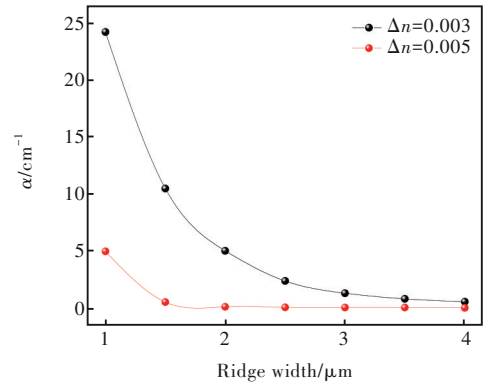


图 9 损耗系数与脊宽之间的关系

Fig.9 The relationship between loss coefficient and ridge width

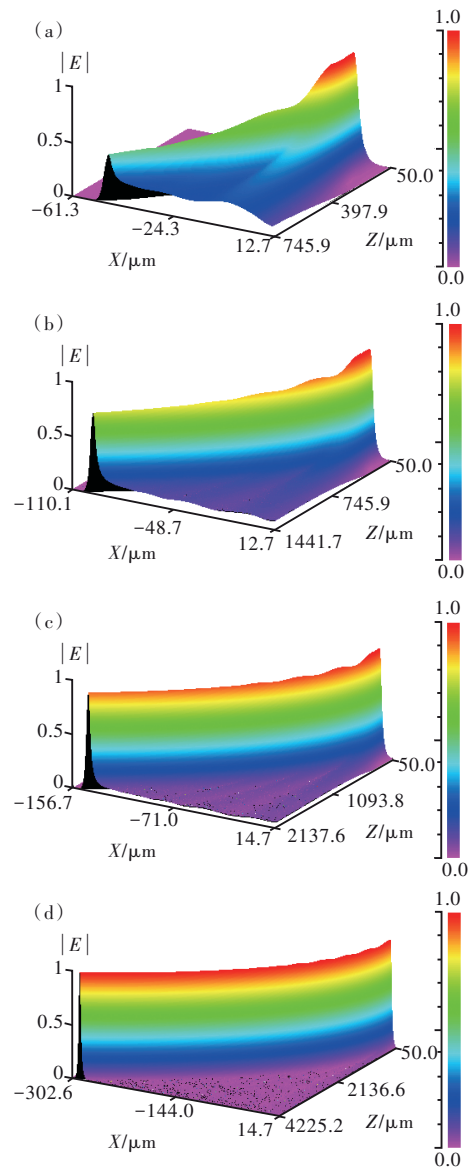


图 10 不同曲率半径情况下光场传输情况。(a)5 mm;(b)10 mm;(c)15 mm;(d)30 mm。

Fig.10 Light field transmission under different curvature radii. (a)5 mm. (b)10 mm. (c)15 mm. (d)30 mm.

图 10(d)中输出端面电场振幅为 0.992。随着曲率半径的增加,弯曲波导的曲率减小即弯曲程度减小,分布在弯曲波导外侧的光场随之减少,弯曲波导损耗随之下降。

对仿真结果进行处理,可以得到损耗系数随曲率半径的变化趋势,如图 11 所示。

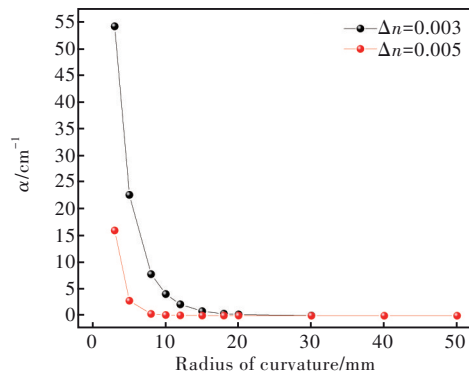


图 11 损耗系数与曲率半径之间的关系

Fig11 The relationship between loss coefficient and curvature radii

不同曲率半径下的损耗系数对刻蚀深度有较大的依赖性。当曲率半径 $R < 20$ mm 时,浅刻蚀 ($\Delta n=0.003$) 时的损耗系数与深刻蚀 ($\Delta n=0.005$) 时相差较大。损耗系数随刻蚀深度的增加而降低。当 $R > 20$ mm 时,不同刻蚀深度的情况下损耗系数趋于一致。最终制备了曲率半径分别为 13.6 mm 和 21.8 mm 的两种器件。

除此之外,考虑到器件热阻变化受芯片宽度和长度影响较大,可以达到两个数量级^[12],芯片尺寸被设计为 $1\ 994\ \mu\text{m} \times 971\ \mu\text{m}$,以提高芯片散热能力。

3 器件制备及性能测试

基于仿真结果确定 SLD 波导结构参数,并对电极窗口制备工艺以及单层氧化铟增透膜的成膜条件进行优化。最终制备出不同曲率半径的器件,并对其输出特性进行了测试分析。

3.1 器件制备

考虑到脊宽 ($3\ \mu\text{m}$) 较窄,采用套刻工艺结合 BOE 腐蚀 SiO_2 的方法制备电极窗口时可能产生较大的套刻误差,严重影响器件的成品率。因此,我们选择利用 Lift-Off 工艺制备电极窗口。在镀制绝缘介质膜时,我们选择磁控溅射设备而不是等离子体增强化学气相沉积 (Plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD)。这是由于 PECVD 腔室

温度相对较高,易导致光刻胶碳化,影响器件制备。另外,磁控溅射设备中等离子体的方向性相对较差。如果用于掩膜的负性光刻胶形貌为“倒梯形”,将会导致 SiO_2 直接镀制在脊波导上方的外延材料上,无法通过 Lift-Off 工艺去除。因此通过优化光刻、显影条件,最终获得了形貌相对“陡直”的光刻胶掩膜。Lift-Off 工艺制备电极窗口的结果如图 12 所示,可以看出剥离效果较好,脊上无 SiO_2 残留。

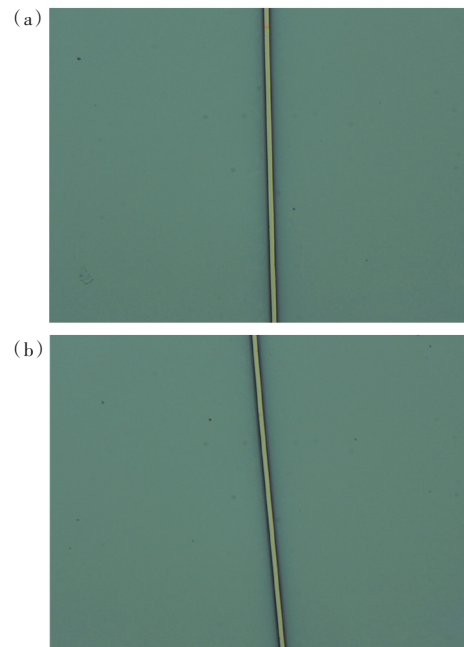


图 12 Lift-Off 工艺制备电极窗口。(a)直波导区;(b)弯曲波导区。

Fig.12 Effect diagram of electrode window prepared by Lift-Off process. (a)Straight waveguide region. (b)Curved waveguide region.

器件制备工艺流程如下:(1)脊波导图形光刻;(2)ICP 刻蚀,制备出脊宽为 $3\ \mu\text{m}$ 、刻蚀深度为 $1.12\ \mu\text{m}$ 的 J 型波导;(3)利用磁控溅射镀膜机制备 SiO_2 绝缘层;(4)采用 Lift-Off 工艺制备电极窗口;(5)磁控溅射制备 Ti/Pt/Au 作为 P 面电极;(6)N 面减薄抛光;(7)磁控溅射制备 Ni/AuGe/Ni/Au 作为 N 面电极;(8)合金退火,形成欧姆接触;(9)解理成巴条;(10)腔面膜制备;(11)将巴条解理成单管并置于钢皮上测试。

GaAs 基材料的折射率约为 3.5 左右,制得器件自然解理面的反射率接近 30%。然而,对于 SLD 而言,大幅降低其输出端面的反射率对于抑制器件激射至关重要。

对于 $\lambda/4$ 膜,满足下式时其反射率为零:

$$n_2 = \sqrt{n_3 n_4}, \quad (3)$$

其中, n_2 为所镀制薄膜材料的折射率, n_3 为入射介质的折射率, n_4 为基底的折射率。

不难看出, 对于 GaAs 基 SLD, 当单层腔面膜材料满足 $n_2 \approx 1.87$ 时, $\lambda/4$ 膜厚可以实现 1 μm 波段的器件前腔面反射率近似为零。

HfO₂ 薄膜在可见光至近红外波段具有较好光学特性, 吸收小、性能稳定, 折射率约 1.8~1.9, 依赖于制备工艺参数。实验基于高真空射频磁控溅射方法, 通过溅射功率、基片台温度、腔压及气体流量的优化得到了稳定的折射率约 1.87 的 HfO₂ 薄膜成膜条件。采用 $\lambda/4$ HfO₂ 膜作为 SLD 前腔面的增透膜, 简化了常规多层增透膜工艺的复杂度, 并且避免了由于不同材料间的应力问题而导致的薄膜质量较差或薄膜脱落的现象。器件后腔面采用三对 Si/SiO₂ 作为高反膜, 以提高 SLD 的腔内增益长度, 实现器件的高功率输出。溅射的典型 HR、AR 薄膜的反射率曲线如图 13 所示。

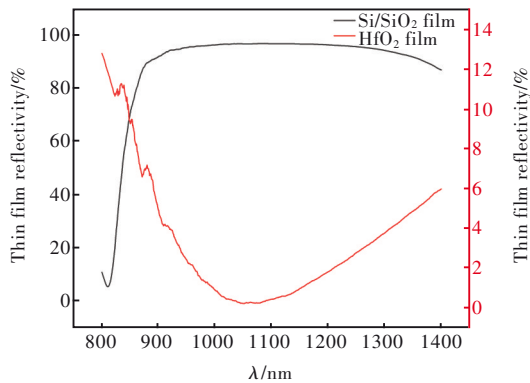


图 13 薄膜反射率曲线

Fig.13 Thin film reflectance curve

利用上述器件制备工艺, 最终制备了曲率半径不同的器件。器件结构参数总结在表 2 中。其中器件后腔面镀制薄膜的反射率以及器件直波导长度分别用 R 和 L_1 表示。需要注意的是, SLD 1、3

表 2 器件结构参数

Tab. 2 Device structure parameters

Name	Etching depth/μm	Ridge width/μm	Curvature radius/mm	R/%	$L_1/\mu\text{m}$
SLD 1	1.12	3	21.8	31	50
SLD 2	1.12	3	21.8	97	50
SLD 3	1.12	3	13.6	31	50

前腔面未镀增透膜; SLD 2 的前腔面镀制了 0.5% 的增透膜。

3.2 性能测试分析

首先, 在脉冲宽度为 150 μs、占空比为 1.5% 的脉冲电流下, 对所制备的器件进行了测试。

不同注入电流下各器件光谱如图 14 所示, 光谱半宽在图 15 中给出。SLD 的光谱半宽由自发发射谱与光学增益谱共同决定^[13]。低注入电流下, 自发辐射占主导地位, 光谱半宽较宽。随着注入电流的增加, 材料增益增加导致器件总增益增加。与此同时, 由于带隙填充效应以及不同量子阱发射光谱叠加, 导致材料增益谱半宽变宽。

不同电流注入下, SLD 光谱半宽的变化趋势

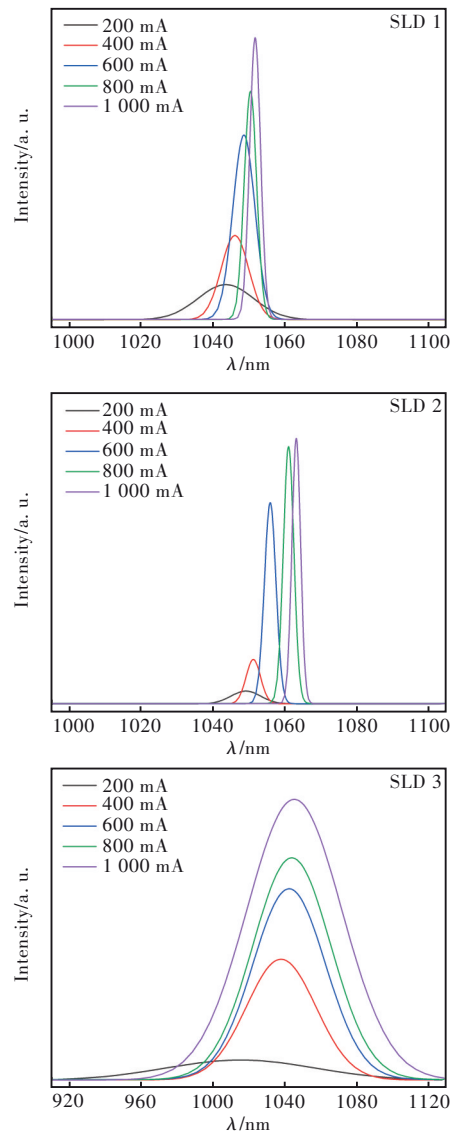


图 14 不同脉冲电流下各器件光谱

Fig.14 Spectra of various devices under different pulse currents

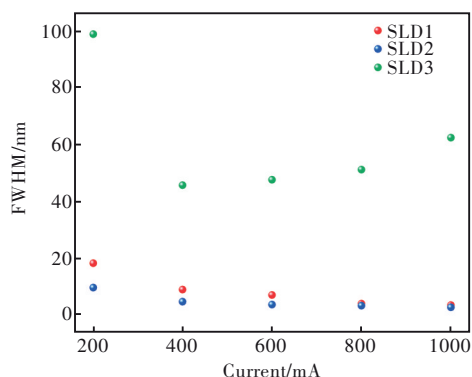


图 15 光谱半宽与脉冲电流的关系

Fig.15 The relationship between spectral half width and pulse current

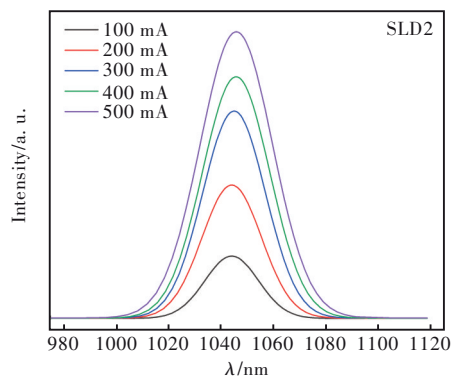
可以由下式进行解释^[14]:

$$\Delta\lambda_{\text{FWHM}} \propto \frac{\lambda(N)}{\sqrt{G(N)}}, \quad (4)$$

其中, $\lambda(N)$ 为材料增益谱半宽, $G(N)$ 为器件总增益。

SLD 1~2 的损耗系数较小, 增益较大。由公式(4)可知, 在脉冲电流注入下, 器件总增益 $G(N)$ 的平方根比材料增益谱半宽 $\lambda(N)$ 增加得更快, 从而导致器件光谱半宽随注入电流的增加而减少。SLD 3 则与之相反。

SLD 2 后腔面镀制了反射率为 97% 的高反膜, 导致其光谱半宽比 SLD 1 更窄。这是由于光在 SLD 腔体内传输时, 经历了光增益过程, 这种增益过程对不同波长的光是不同的。发射光谱中心波长经历的增益最大, 远离中心波长的光获得的增益呈现抛物线型递减^[15]。SLD 2 的后腔面有更多的光反射回腔内, 使光谱中心波长获得的增益更大, 光谱半宽变窄, 但较低反射率的单层 HfO_2 增透膜的镀制保证了器件并没有在如此高的增益下激



射。SLD 3 的损耗较大, 根据公式(4)可知, 器件增益较小, 导致其光谱宽度宽于 SLD 1~2。

SLD 的 P - I 特性曲线如图 16 所示。可以看出, 器件具有“软阈值”特性。在软阈值以下以自发辐射为主, 软阈值以上以超辐射为主^[15]。由于 SLD 3 的损耗较大, 其在较大的软阈值后开始超辐射输出。器件输出功率均随注入电流的增加而增大, 这是由于随着注入电流的增加, 材料增益增加, 输出功率增大。

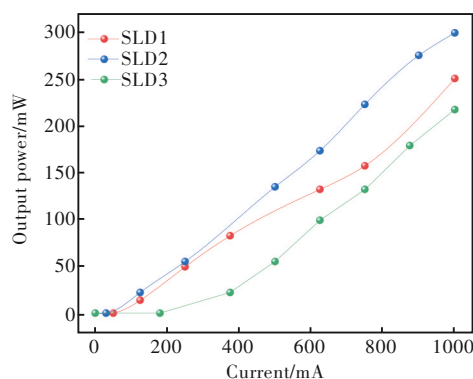


图 16 输出功率与脉冲电流的关系

Fig.16 The relationship between output power and pulse current

在脉冲电流注入下, SLD 1~2 的输出功率明显大于 SLD 3 的输出功率, 这是由于 SLD 3 的曲率半径较小, 损耗系数相对较大, 导致器件输出功率较低。SLD 2 的后腔面镀制了高反膜, 传输到后腔面的光更多地被反射回波导内。这部分光在波导内经历双程增益放大, 导致器件输出功率增加。这是 SLD 2 的输出功率大于 SLD 1 的原因。

其次, 对 SLD 2~3 在直流条件下进行了测试。不同连续电流注入下的器件光谱如图 17 所示, 光谱半宽在图 18 中给出。

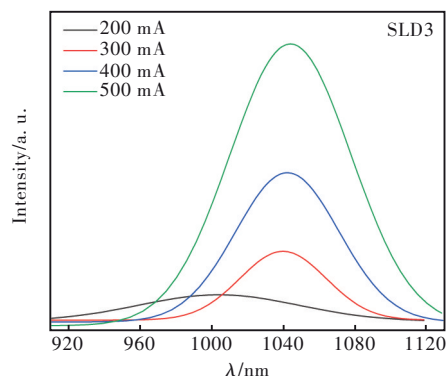


图 17 不同连续电流下各器件光谱

Fig.17 Spectra of various devices under different continuous currents

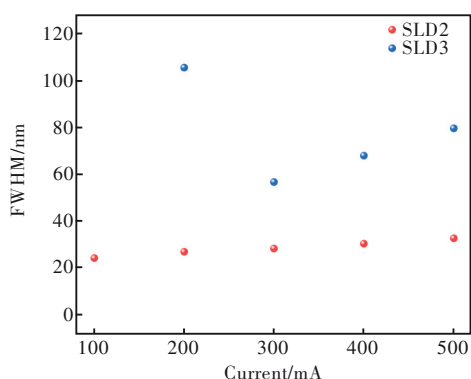


图 18 光谱半宽与连续电流的关系

Fig.18 The relationship between spectral half width and continuous current

器件在连续电流注入下,获得的增益相对较小。因此在整个测试电流范围内,SLD 2 光谱半峰宽随注入电流的增加而增加且 SLD 2~3 的光谱半峰宽均明显宽于脉冲电流下测试的结果。SLD 3 在 500 mA 连续电流注入下实现了 79.6 nm 的光谱半峰宽。

连续电流注入下的 SLD 的 P - I 特性曲线如图 19 所示。与脉冲电流注入的情况相比,器件在连续电流注入下会产生更多的热量,增益相对较小,导致连续电流注入下的输出功率明显小于脉冲电流注入的情况。SLD 2 在 500 mA 连续电流下,实现了 118.1 mW 的输出功率和 32.5 nm 的光谱半宽。

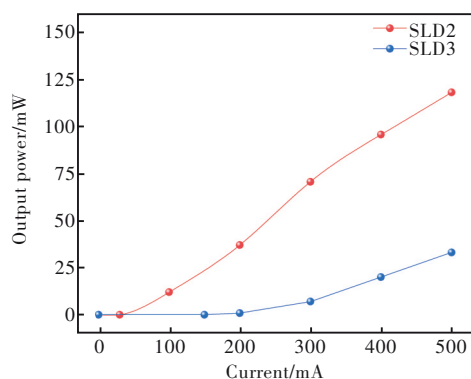


图 19 输出功率与连续电流的关系

Fig.19 The relationship between output power and continuous current

SLD 的谱宽功率积 (PBW) K_{PBW} 可以由下式给出^[4]:

$$K_{\text{PBW}} = P_{\text{out}} \times \Delta\lambda_{\text{FWHM}}, \quad (5)$$

其中, P_{out} 为输出功率, $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$ 为光谱半宽。图 20 给出了制备的 SLD 的谱宽功率积随注入电流

的变化情况。由于输出功率是外加入电流的指数函数,在脉冲电流注入下,即使 SLD 2 的光谱半峰宽随注入电流的增加而减小,其谱宽功率积仍随注入电流的增加而增大。而在连续电流注入下,SLD 2~3 的光谱半峰宽与输出功率均随注入电流的增加而增加,因此其谱宽功率积也随注入电流的增加而增大。在连续电流注入下,小曲率 ($R=21.8 \text{ mm}$) 的器件可以产生更宽的光谱半宽,导致脉冲电流注入下 SLD 2 的谱宽功率积比连续电流注入时小。而曲率半径较小 ($R=13.6 \text{ mm}$) 的器件在脉冲电流下可以实现更高的输出功率,其在脉冲电流下的谱宽功率积大于连续电流注入条件。制备的曲率半径为 13.6 mm 的器件在脉冲电流注入下实现了 13 603.2 mW·nm 的谱宽功率积,在连续电流注入下谱宽功率积达到 2 634.8 mW·nm。曲率半径为 21.8 mm 的器件在连续电流注入下获得了 3 838.3 mW·nm 的谱宽功率积。该结果优于 Ohgoh 等^[4]的报道水平。

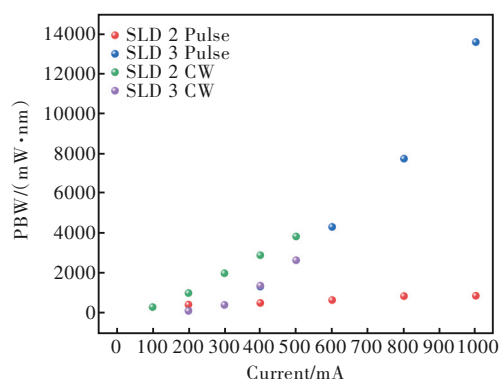


图 20 器件在不同电流注入下的谱宽功率积

Fig.20 Spectral width and power product of devices under different current injections

器件的远场发散角如图 21 所示,图 22 为其在 1 A 脉冲电流注入下的光斑形貌。从图中可以看出,SLD 1、3 在 1 A 脉冲电流注入下均保持基模工作。

SLD 1 的水平垂直远场发散角分别为 13.2° 和 21.1° 。由于其曲率半径较大,远场光斑呈现出类似于激光器的“椭圆”状;SLD 3 的水平垂直远场发散角分别为 15.1° 和 30.4° 。由于其曲率半径较小,远场光斑略成“弯月”状。较小的垂直远场发散角以及良好的光束方向性可以使器件与单模光纤耦合效率显著提高。

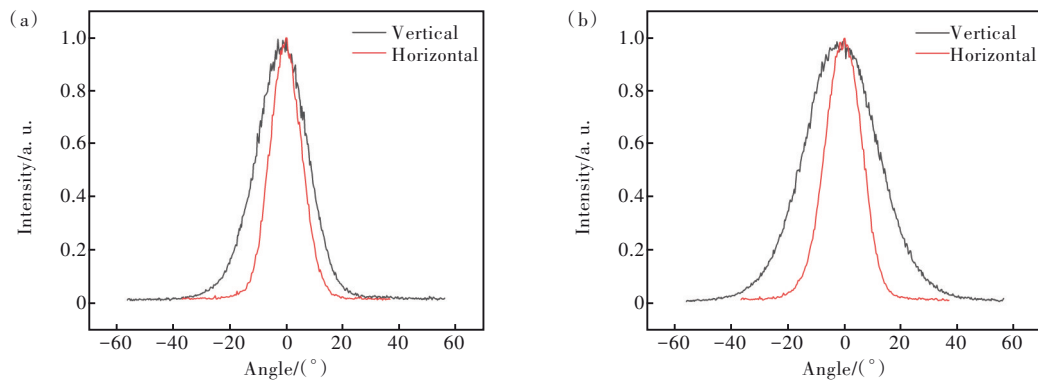


图 21 器件远场发散角。(a)SLD 1;(b)SLD 3。

Fig.21 Far-field divergence angle of different devices. (a)SLD 1. (b)SLD 3.

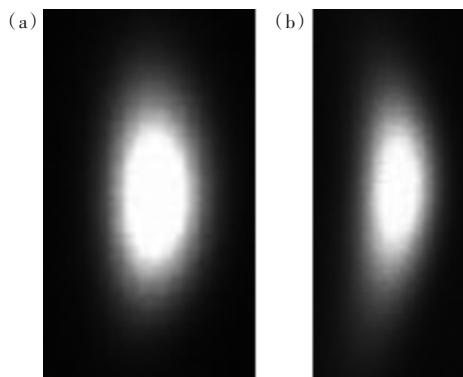


图 22 器件光斑形貌。(a)SLD 1;(b)SLD 3。

Fig.22 Spot morphology of different devices. (a)SLD 1. (b)SLD 3.

4 结 论

本文对外延结构进行设计并仿真了J型波导不同结构参数对损耗系数的影响。基于仿真结果,确定器件结构参数并对电极窗口制备工艺以及单层氧化铪增透膜的成膜条件进行优化,制备出了非均匀阱宽大阱深的三量子阱结构的不同曲

率半径的SLD。研究表明,缩小波导层和限制层AlGaAs材料中Al组分差值有利于降低器件远场发散角。此外,增加刻蚀深度、脊宽及曲率半径都会使损耗系数减小以提高器件输出功率。通过对氧化铪薄膜成膜条件的摸索,制备出反射率接近0.5%的增透膜,单层增透膜的设计及应用极大地简化了工艺复杂度并避免由于不同材料间的应力问题而导致的薄膜质量较差或易脱落的现象。根据研究结果,研制出波导曲率半径为21.8 mm、腔长约2 mm的器件,器件前腔面镀制单层氧化铪增透膜,后腔面镀制高反膜,在500 mA连续电流下,实现了118.1 mW的输出功率和32.5 nm光谱半宽。制备的SLD 1的水平和垂直远场发散角分别为13.2°和21.1°,有利于提高其与单模光纤的耦合效率。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20230216>.

参 考 文 献:

- [1] HALE G M, QUERRY M R. Optical constants of water in the 200-nm to 200- μ m wavelength region [J]. *Appl. Opt.*, 1973, 12(3): 555-563.
 - [2] WANG Y M, NELSON J S, CHEN Z P, *et al.* Optimal wavelength for ultrahigh-resolution optical coherence tomography [J]. *Opt. Express*, 2003, 11(12): 1411-1417.
 - [3] KURBATOV L N, SHAKHIDZHANOV S S, BYSTROVA L V, *et al.* Investigation of superluminescence emitted by a gallium arsenide diode [J]. *Sov. Phys. Semicond.*, 1971, 5(4): 1739-1744.
 - [4] OHGOH T, MUKAI A, YAGUCHI J, *et al.* Demonstration of 1.0 μ m InGaAs high-power and broad spectral bandwidth superluminescent diodes by using dual quantum well structure [J]. *Appl. Phys. Express*, 2013, 6(1): 014101.
 - [5] 段利华, 张淑芳, 周勇, 等. 1 053 nm 高速超辐射发光二极管的研制及其光电特性 [J]. *红外与毫米波学报*, 2015, 34(2): 218-223.
- DUAN L H, ZHANG S F, ZHOU Y, *et al.* Preparation and photoelectric characteristics of high speed superluminescent diode emitting at 1 053 nm [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2015, 34(2): 218-223. (in Chinese)

- [6] KWON O K, LEE C W. Asymmetric double QW superluminescent diodes for broadband and high-power use [J]. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 2018, 60(2): 494-498.
- [7] KAFAR A, STANCZYK S, TARGOWSKI G, *et al.* High-optical-power InGaN superluminescent diodes with “j-shape” waveguide [J]. *Appl. Phys. Express*, 2013, 6(9): 092102.
- [8] 杨静航, 晏长岭, 刘云, 等. 红外波段超辐射发光二极管研究进展 [J]. *发光学报*, 2023, 44(9): 1621-1635.
YANG J H, YAN C L, LIU Y, *et al.* Research progresses on infrared superluminescent diodes [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(9): 1621-1635. (in Chinese)
- [9] 刘帅男, 王芝浩, 王警辉, 等. 970 nm 超辐射发光二极管弯曲脊形波导数值分析 [J]. *光电子·激光*, 2023, 34(6): 628-635.
LIU S N, WANG Z H, WANG J H, *et al.* Numerical analysis of curved ridge waveguide for 970 nm superluminescent light emitting diodes [J]. *J. Optoelectron. · Laser*, 2023, 34(6): 628-635. (in Chinese)
- [10] 王拓, 陈红梅, 贾慧民, 等. 1 310 nm 高功率超辐射发光二极管的制备及性能研究 [J]. *光子学报*, 2021, 50(6): 0623002.
WANG T, CHEN H M, JIA H M, *et al.* Performance research and fabrication of 1 310 nm superluminescent diodes with high power [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2021, 50(6): 0623002. (in Chinese)
- [11] AN Q, JIN P, WU J, *et al.* Optical loss in bent-waveguide superluminescent diodes [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2012, 27(5): 055003.
- [12] 李岚, 傅丽伟, 张纳, 等. 多量子阱超辐射发光二极管(SLD)热分布计算 [J]. *发光学报*, 2005, 26(5): 607-610.
LI L, FU L W, ZHANG N, *et al.* Calculation of thermal distribution for multi-quantum well superluminescent diode [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2005, 26(5): 607-610. (in Chinese)
- [13] SONG J H, KIM K, LEEM Y A, *et al.* High-power broadband superluminescent diode using selective area growth at 1.5- μm wavelength [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2007, 19(19): 1415-1417.
- [14] PARK J, LI X. Theoretical and numerical analysis of superluminescent diodes [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, 24(6): 2473-2480.
- [15] 祝子翔, 张晶, 孙春明, 等. 增益钳制式 850 nm 波长超辐射发光二极管设计研究 [J]. *兵工学报*, 2018, 39(2): 325-330.
ZHU Z X, ZHANG J, SUN C M, *et al.* Development of gain-clamped 850 nm superluminescent diode [J]. *Acta Armament.*, 2018, 39(2): 325-330. (in Chinese)



伏丁阳(1999-),男,辽宁盖州人,硕士研究生,2021年于长春电子科技学院获得学士学位,主要从事高功率半导体激光器方面的研究。

E-mail: 1179623112@qq.com



薄报学(1964-),男,河南淇县人,博士,教授,2002年于吉林大学获得博士学位,主要从事高功率半导体激光器技术与应用的研究。

E-mail: bbx@cust.edu.cn