

引用格式: WANG Tuo, CHEN Hongmei, JIA Huimin, et al. Performance Research and Fabrication of 1 310 nm Superluminescent Diodes with High Power[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(6):0623002

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

# 1 310 nm 高功率超辐射发光二极管的制备及性能研究

王拓<sup>1,2</sup>, 陈红梅<sup>2</sup>, 贾慧民<sup>1</sup>, 姚中辉<sup>2</sup>, 房丹<sup>1</sup>, 蒋成<sup>2</sup>, 张子旻<sup>2</sup>, 李科学<sup>1</sup>,  
唐吉龙<sup>1</sup>, 魏志鹏<sup>1</sup>

(1 长春理工大学 理学院 高功率半导体激光国家重点实验室, 长春 130022)

(2 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 江苏 苏州 215123)

**摘要:**为优化 1 310 nm 超辐射发光二极管输出性能, 提高器件输出功率, 针对 J 型波导结构的 1 310 nm 超辐射发光二极管的波导结构参数及器件散热能力进行研究。结果表明波导刻蚀深度、弯曲角度和绝缘层厚度是影响器件实现高功率输出的重要因素。基于研究结果对超辐射发光二极管器件结构及工艺进行优化, 制备出脊宽 5  $\mu\text{m}$ 、弯曲角度 8°、刻蚀深度 1.7  $\mu\text{m}$ 、绝缘层厚 300 nm 的 J 型超辐射发光二极管。该器件在室温及 500 mA 连续注入电流条件下, 直波导长度 1.5 mm 时实现 10 nm 宽的输出光谱, 输出功率达到 42.2 mW。

**关键词:**超辐射发光二极管; J 型波导; 波导损耗; 模拟分析; 输出性能

中图分类号: TN312.8

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215006.0623002

## Performance Research and Fabrication of 1 310 nm Superluminescent Diodes with High Power

WANG Tuo<sup>1,2</sup>, CHEN Hongmei<sup>2</sup>, JIA Huimin<sup>1</sup>, YAO Zhonghui<sup>2</sup>, FANG Dan<sup>1</sup>,  
JIANG Cheng<sup>2</sup>, ZHANG Ziyang<sup>2</sup>, LI Kexue<sup>1</sup>, TANG Jilong<sup>1</sup>, WEI Zhipeng<sup>1</sup>

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

(2 Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Science, Suzhou, Jiangsu 215123, China)

**Abstract:** In order to optimize the performance of the 1 310 nm superluminescent diode, such as increase the output power of the device. In this simulation, the parameters of waveguide structure, and the heat dissipation for 1 310 nm superluminescent diode with the J-type waveguide have been investigated. The research results show that the waveguide etching depth, bending angle and thickness of the insulating layer were important for achieve high power output. Based on the research results, the superluminescent diode device structure and fabrication process were optimized, and J-type superluminescent diode with a ridge width of 5  $\mu\text{m}$ , a bending angle of 8°, an etching depth of 1.7  $\mu\text{m}$  and an insulating layer thickness of 300 nm was prepared. The superluminescent diode with 1.5 mm straight waveguide length has realized a high output power (42.2 mW) and wide bandwidth (10 nm) under 500 mA continuous-wave operation at room temperature.

基金项目: 国家自然科学基金(Nos.61674021, 11674038, 11804335, 61875222), 吉林省科技发展计划(No.20200301052RQ)

第一作者: 王拓(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为半导体光电子器件及物理与技术。Email: twang2019@sinano.ac.cn

导师(通讯作者): 贾慧民(1986—), 男, 实验师, 博士, 主要研究方向为半导体光电子材料与器件。Email: huiminjia01@163.com

收稿日期: 2021-02-04; 录用日期: 2021-03-30

<http://www.photon.ac.cn>

**Key words:** Superluminescent diode; J-type waveguide; Waveguide loss; Simulation analysis; Output performance

**OCIS Codes:** 230.5590; 230.3670; 230.7400

## 0 引言

超辐射发光二极管(Superluminescent Diodes, SLD)是一种以自发辐射放大占主导地位的半导体发光器件,兼有半导体激光器高功率和发光二极管宽光谱的输出特性,是光学相干层析成像(Optical Coherence Tomography, OCT)、波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)、光纤陀螺仪(Fiber Optic Gyroscope, FOG)等低相干光学系统的理想光源。当前,SLD受到材料属性、器件结构设计及制备工艺的限制,器件输出性能存在输出光谱宽度与输出功率强度相互制约的问题。SLD应用在WDM和FOG系统时,要求器件具有高功率的输出特性,而对输出光谱宽度不做严格要求<sup>[1-2]</sup>。因此,如何优化SLD的输出性能,提高器件输出功率成为一项重要的研究工作。

自1971年KURBATOV L N等<sup>[3]</sup>研制出超辐射发光管以来,如何提高SLD输出功率和拓宽输出光谱成为研究热点。1996年TAKAYAMA T等<sup>[4]</sup>制备了830 nm波段的SLD,实现了105 mW的输出功率和10.5 nm宽的输出光谱,尽管输出功率较高,但是很难在1 310 nm波长实现。2004年MA H等<sup>[5]</sup>制备了1 310 nm波段的多量子阱(Multiple Quantum Well, MQW) SLD,在脉冲电流注入下且腔面蒸镀增透膜,实现了16.9 mW的输出功率和55 nm宽的输出光谱,但是脉冲电流的使用限制了器件的应用,并且腔面镀膜需要更高的实验成本。2005年ROSSETTI M等<sup>[6]</sup>制备了1 310 nm量子点SLD,实现了10 mW的输出功率和26 nm宽的输出光谱。同年LIL H等<sup>[7]</sup>制备了1 310 nm波段的量子点SLD,虽然实现了121 nm宽的输出光谱,但是1.5 mW的输出功率仍然需要在脉冲电流注入下实现。2010年YOO Y C等<sup>[8]</sup>制备了1 291 nm波段的量子点SLD,实现25 mW的输出功率。2015年CHEN S M等<sup>[9]</sup>制备出1 200 nm波段的量子点SLD,实现290 nm宽的光谱宽度和2.4 mW的输出功率。2018年HOU C C等<sup>[10]</sup>制备出1 200 nm波段的量子点SLD,实现21 mW的输出功率和134 nm宽的输出光谱。2019年ANIKEEV A S等<sup>[11]</sup>制备出780 nm波段的SLD,实现100 mW的输出功率和8 nm宽的输出光谱。可以看出,现阶段SLD研究工作多针对提高输出光谱宽度而忽视器件的输出功率,为了提高输出光谱宽度将量子点材料应用在SLD中,但是量子点的点发光属性,导致量子点SLD较难实现高功率输出,另一方面,1 310 nm SLD的研究工作重点同样是拓宽输出光谱,在高功率方面的研究却少有报道,在实际应用中,实现1 310 nm波段器件高功率输出,在WDM和FOG等领域的应用具有重要意义。本文采用量子阱材料通过器件结构设计、改善器件制备工艺,使1 310 nm SLD的输出光谱宽度适当降低而获得输出功率的提高,均衡SLD的输出性能对推进SLD在医疗、通信、军事等方面的应用意义重大。

为优化1 310 nm SLD输出性能,提高器件输出功率,本文通过器件结构模拟设计了J型波导结构的刻蚀深度、弯曲角度和器件绝缘层厚度,同时,改善了刻蚀工艺,制备了一系列直波导长度不同的SLD器件。通过对器件输出光谱宽度和输出功率进行测试分析,研究了直波导长度对SLD输出性能的影响;根据研究结果所制备器件在室温500 mA连续电流注入的条件下,实现了10 nm宽的输出光谱,42.2 mW的光输出功率。

## 1 理论分析

实现高功率超辐射光输出,其关键在于通过设计波导结构,引入合理的波导损耗来抑制器件激射。J型波导在几何结构上是由弯曲波导和直波导两部分组成,弯曲波导结构可以有效避免器件光学谐振的形成,直波导结构可以有效提升器件输出功率,所以J型波导结构有利于器件实现高功率超辐射光输出。基于J型波导的超辐射发光二极管的器件结构如图1(a)所示,图1(b)为器件截面示意图。波导弯曲是造成J型结构产生波导损耗的主要原因之一,因此通过计算分布在弯曲波导区域外侧的光场 $E$ 可作为表征波导损耗的一种方式,表达式为<sup>[12]</sup>

$$E = B \sqrt{\frac{2}{\pi k_0 N \rho}} e^{i k_0 N \rho} e^{-i(2m+1)\frac{\pi}{4}} e^{i \beta R \theta} \quad (1)$$

式中, $B$ 为场振幅系数, $N$ 为有效折射率, $\rho$ 为径向半径, $m$ 为柱函数阶数, $\beta$ 为传播常数, $R$ 为圆弧半径, $\theta$ 为圆心角, $k_0$ 为发光中心波数。由式(1)可知, $N$ 与 $\theta$ 对 $E$ 之间有内在联系,通过研究波导结构参数与 $N$ 和 $\theta$ 的内在关系,获得 $N$ 与 $\theta$ 对 $E$ 的影响,确定波导结构参数,实现器件超辐射输出性能的优化。

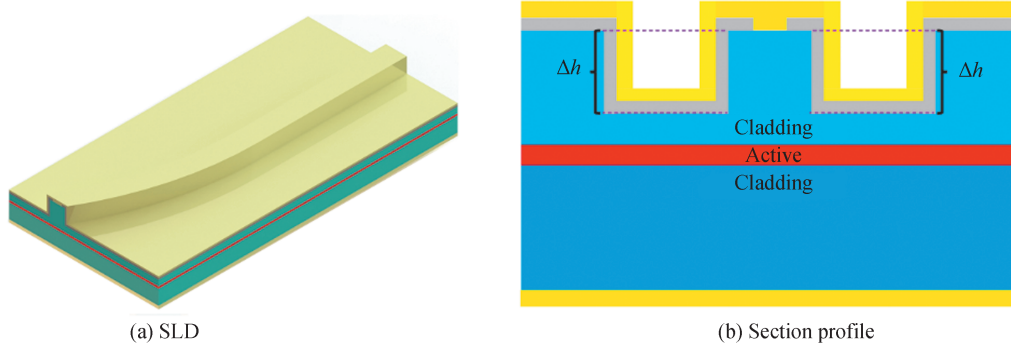


图1 示意图  
Fig. 1 Schematic diagram

## 2 器件设计及制备

为了优化SLD输出性能,提高器件输出功率,获取合理的波导损耗,本文从器件结构和制备工艺两方面进行研究。器件结构设计部分采用递进式模拟,综合分析波导结构参数(波导刻蚀深度 $\Delta h$ 、波导弯曲角度 $\theta$ )对波导损耗的影响:首先模拟波导刻蚀深度 $\Delta h$ 对波导损耗的影响,得出本文刻蚀深度数值;其次基于前一步结果,模拟弯曲角度 $\theta$ 对波导损耗的影响;最后模拟绝缘层厚度 $H$ 对器件热稳定性的影响。制备工艺部分对刻蚀工艺进行了改善,并对多项工艺参数进行优化。器件设计及制备研究流程如下:利用MODE solutions分析 $\Delta h$ 对 $N$ 和腔面光场分布的影响,结合Synopsys RSoft仿真波导光场分布完成 $\Delta h$ 和 $\theta$ 值的确定;同时利用Comsol仿真 $H$ 对器件有源区温度变化趋势的影响,结合制备工艺完成 $H$ 值的确定;基于研究结果确定的器件结构参数,采用干法刻蚀与湿法腐蚀结合的刻蚀工艺,对MQW外延材料进行器件制备,将所制备器件通过钢焊料焊于无氧铜上等待测试。

### 2.1 器件设计

首先建立如图1(b)所示的外延层简化模型;随后构建脊波导等效模型,脊区、左沟道区与右沟道区,每一部分都可以等效为有效折射率不同且介质均匀的平板波导,左沟道区和右沟道区的外延材料和结构参数完全相同,得到如图2所示的三层平板波导等效模型<sup>[13-14]</sup>;最后计算 $\Delta h$ 与 $N$ 的关系<sup>[15-16]</sup>,如图3(a)所示,当 $\Delta h$ 超过 $1.6 \mu\text{m}$ 后, $N$ 值开始下降。基于图3(a)中的计算结果,其中 $N_0$ 为沟道区域的有效折射率, $N_1$ 为脊区域的有效折射率, $n_0$ 为沟道填充材料折射率(本文为空气), $n_1$ 为Cladding材料折射率, $n_2$ 为Active材料折射率,基于图3(a)可得 $\Delta h$ 与 $\Delta n$ 的变化关系如图3(b)<sup>[17-18]</sup>, $\Delta n$ 为沟道区域与脊区域之间的有效折射率差,当 $\Delta h$ 超过 $1.6 \mu\text{m}$ 后, $\Delta n$ 的值明显增加,此时波导损耗将大幅度降低,波导开始发挥对光场的限制作用,器件将有超辐射发光趋势。上述计算结果所使用的Cladding材料折射率为3.21,Active材料折射率为3.5,发光波长为 $1 310 \text{ nm}$ ,Cladding厚度为 $2 \mu\text{m}$ 。

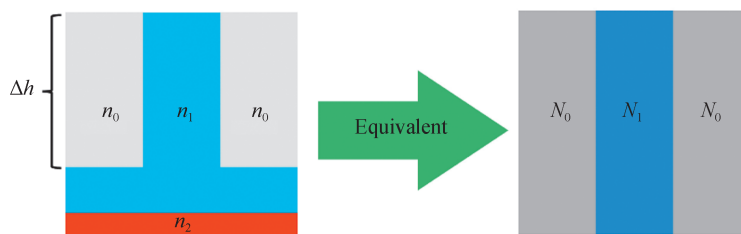


图2 脊波导等效为三层平板波导模型示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of ridge waveguide structure that is equivalent to three-layer planar waveguide model

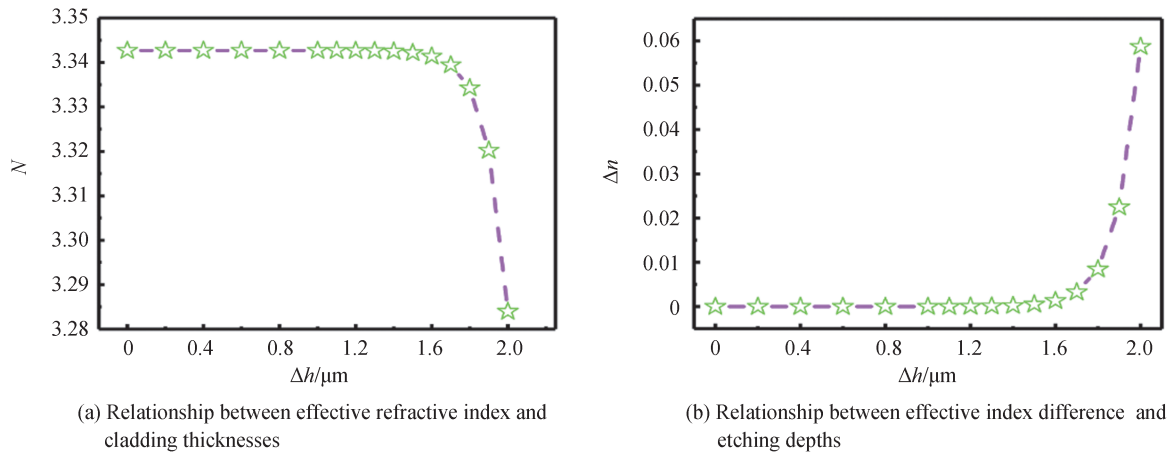


图3 有效折射率计算

Fig. 3 The calculation of effective refractive index

模拟不同  $\Delta h$  时的腔面光场分布, 进一步明确  $\Delta h$  范围, 如图 4 所示。基于图 3(b) 的计算结果分别模拟了  $\Delta h$  为  $1 \mu\text{m}$ 、 $1.7 \mu\text{m}$ 、 $2 \mu\text{m}$ 、 $2.4 \mu\text{m}$  时器件输出腔面光场分布。图 4(a) 中腔面光场分布范围大于波导宽度表明波导对光场的限制能力差, 损耗大, 不利于器件实现超辐射输出。图 4(b) 中光场分布范围明显小于波导宽度, 波导限制能力增强, 满足器件实现超辐射输出条件。图 4(c)、4(d) 中光场分布相比于图 4(b) 有所改善, 但因刻蚀深度过深导致波导侧壁大量表面态被引入<sup>[19]</sup>, 因此  $\Delta h$  的范围应控制在  $1.7 \mu\text{m}$  至  $2 \mu\text{m}$  之间。

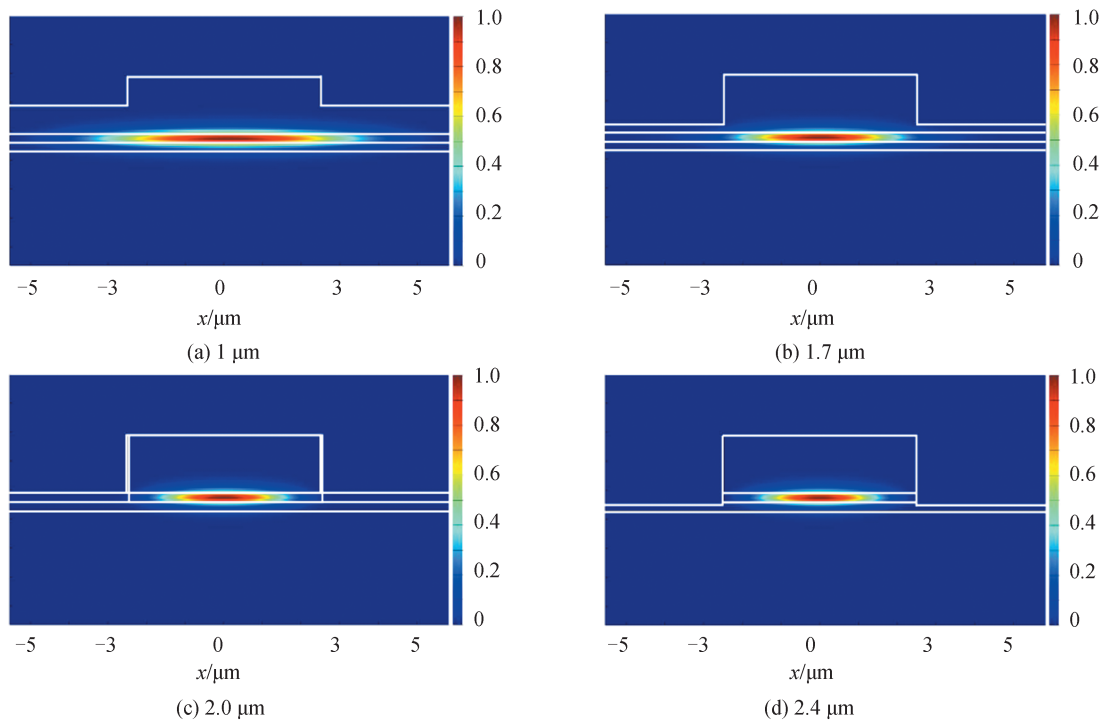


图4 不同刻蚀深度时器件腔面光场分布模拟结果

Fig. 4 The simulation of the optical field on the device cavity surface with different etching depths

对不同  $\Delta h$  下波导光场分布进行模拟可以确定  $\Delta h$  的值。基于图 4 结果模拟了  $\Delta h$  分别为  $1 \mu\text{m}$ 、 $1.7 \mu\text{m}$  和  $2 \mu\text{m}$  时的光场分布如图 5 所示。图 5(a) 中光场完全脱离波导限制, 导致波导损耗过高器件不能实现超辐射输出。图 5(b) 中波导的限制作用明显, 有且仅有少量光场损耗到波导外, 轻度的波导损耗有利于抑制器件激射, 实现良好的超辐射输出。图 5(c) 中光场被完全限制在波导中, 导致波导损耗太小器件容易激射, 不利于器件实现超辐射输出条件。综合上述模拟计算结果, 确定  $\Delta h$  的值为  $1.7 \mu\text{m}$ 。



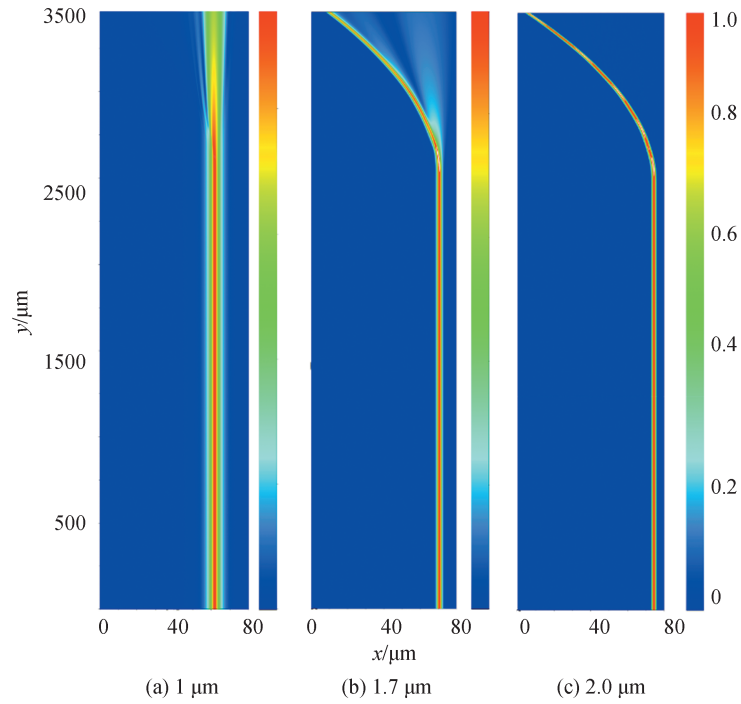


图5 不同刻蚀深度时波导光场分布模拟结果

Fig. 5 The simulation of the optical field in waveguide with different etching depths

SLD工作时,一方面需要合理的波导损耗抑制激励,另一方面波导损耗过高会导致器件发热严重影响工作,基于 $\Delta h$ 为 $1.7 \mu\text{m}$ 的条件对不同弯曲角度 $\theta$ 下器件波导光场分布情况仿真结果,如图6所示,分别模拟了 $\theta$ 为 $7^\circ$ 、 $8^\circ$ 和 $10^\circ$ 时的光场分布,图6(a)~(c)中分布在波导外侧的光场随着 $\theta$ 的增加而增强,表明波导损耗也在随着 $\theta$ 增加而增强。因此,在本文的器件结构中弯曲角度 $\theta$ 等于 $8^\circ$ 时有利于器件实现良好的超辐射

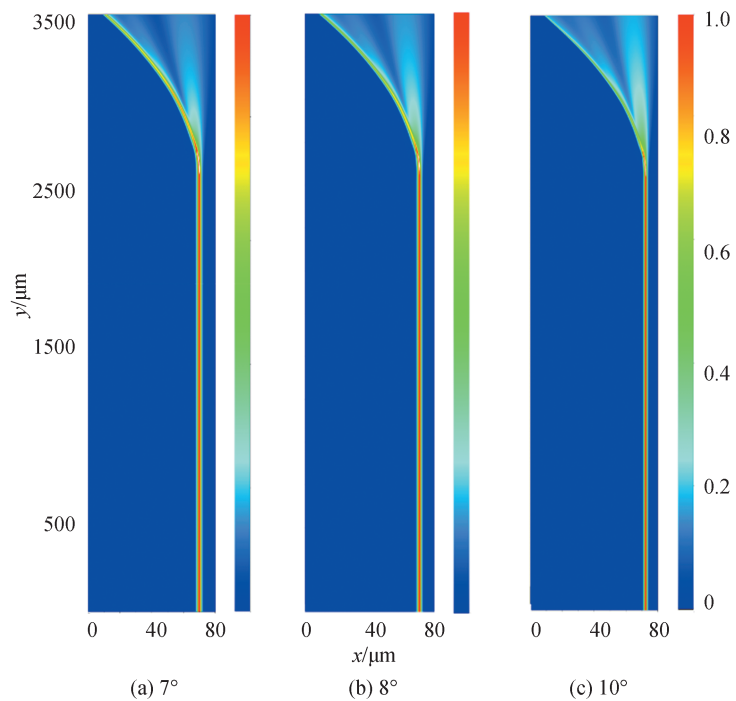


图6 不同弯曲角度时波导光场分布模拟结果

Fig. 6 The simulation of the optical field in waveguide with different bending angles

输出。

降低有源区工作温度,优化器件热稳定性是提高器件超辐射输出功率的重要方法之一,在确保绝缘性能的前提下研究绝缘层厚度对器件有源区温度变化趋势的影响具有重要意义。结合器件制备工艺分别模拟了绝缘层(本文为 $\text{SiO}_2$ 材料)厚度为100 nm、200 nm、300 nm和400 nm时器件有源区的热场分布,该仿真中假设器件有源区发热功率恒定,结果如图7所示。图7(a)~(d)中有源区温度变化趋势呈现出随着 $\text{SiO}_2$ 厚度增加而上升, $\text{SiO}_2$ 厚度对有源区温度的影响明显,因此在制备绝缘层时应在确保绝缘性能的前提下,尽可能减小绝缘层厚度以便提高器件散热能力。兼顾器件制备工艺中波导侧壁绝缘覆盖能力和器件散热性能<sup>[20-21]</sup>,优先选择300 nm作为绝缘层厚度。

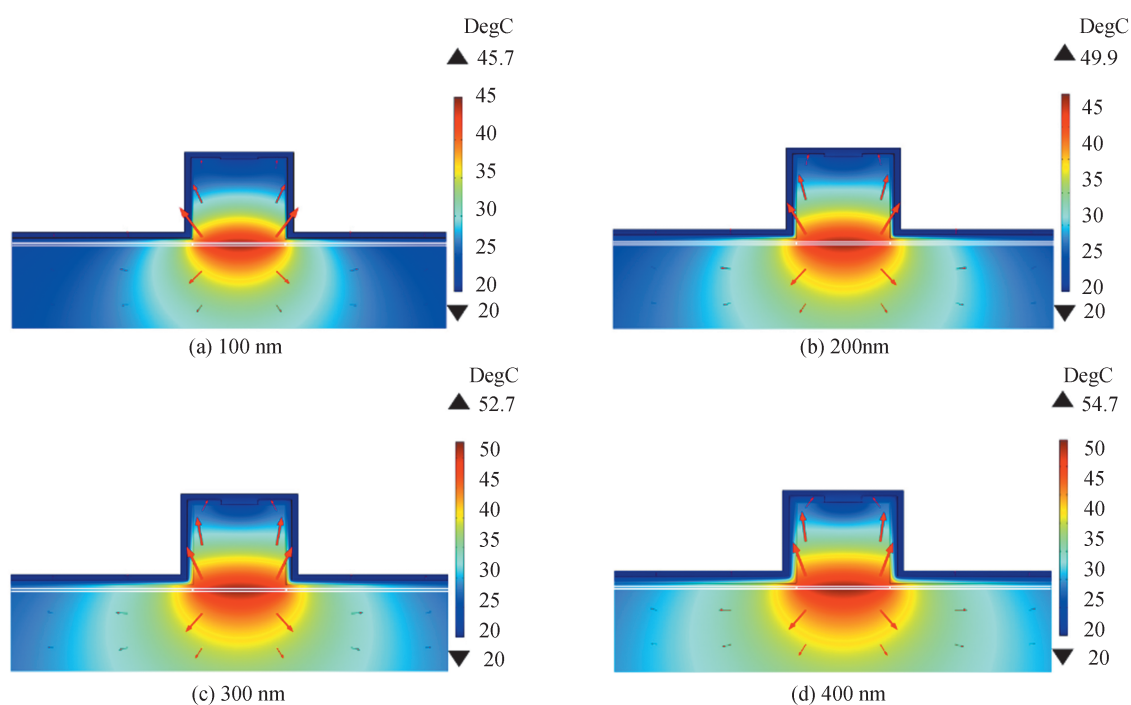


图7 不同 $\text{SiO}_2$ 厚度时器件热场分布模拟结果

Fig. 7 The simulation of the thermal field of devices with different  $\text{SiO}_2$  thicknesses

## 2.2 器件制备

为获得形貌良好且满足模拟设计要求的波导,本文对刻蚀工艺进行了改善。刻蚀工艺采用干法刻蚀与湿法腐蚀两步刻蚀法,第一步使用电感耦合等离子体刻蚀(Inductively Coupled Plasma, ICP)完成光刻图形转移和去除重掺杂层,第二步利用InP腐蚀液的各向异性制备出陡直且光滑波导结构,得到形貌良好的波导。本文采用的刻蚀工艺,仅在去除重掺杂层时采用干法刻蚀工艺,有效降低干法刻蚀中刻蚀选择比和刻蚀形貌粗糙问题的影响,降低了实验成本和工艺复杂度,得到陡直性良好的波导,避免由于干法刻蚀设备不稳定造成随着刻蚀深度增加,波导陡直性逐渐下降的问题。

器件制备工艺过程为:1)利用光刻工艺完成波导图形转移。2)采用干法刻蚀与湿法腐蚀结合的波导制备方法,得到脊宽为 $5\ \mu\text{m}$ 的J型波导。3)利用等离子体增强化学气相沉积(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)生长了300 nm厚的 $\text{SiO}_2$ 绝缘层,再利用光刻工艺和反应离子刻蚀技术(Reactive Ion Etching, RIE)制备出电极注入窗口。4)利用磁控溅射制备Ti/Au系列p面电极。5)将衬底进行减薄抛光至 $110\ \mu\text{m}$ ,利用电子束蒸发制备AuGeNi系列n面电极。6)采用快速热退火完成电极合金化形成欧姆接触。7)解理获取器件并焊于无氧铜上等待测试。器件显微镜图片如图8所示。至此根据模拟结果结合器件制备工艺完成对刻蚀深度 $1.7\ \mu\text{m}$ ,弯曲角度 $8^\circ$ ,绝缘层厚度300 nm且直波导长度不同的1310 nm J型结构超辐射发光二极管器件的制备。

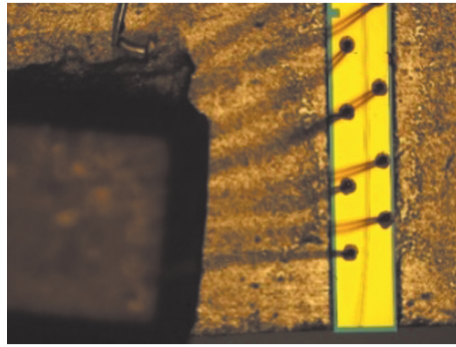


图8 器件显微镜图片

Fig. 8 Microscope picture of the fabricated device

### 3 器件性能测试

在室温连续电流注入条件下,测试了当弯曲角度为 $8^\circ$ 、弯曲波导长度为1 mm时,直波导长度分别为2.5 mm (SLD-1)、2 mm (SLD-2)、1.5 mm (SLD-3)的1 310 nm J型结构超辐射发光二极管器件,所得输出光谱和功率曲线如图9所示。根据图9中的器件测试结果,器件SLD-1、SLD-2和SLD-3的最大输出功率分别为36.5 mW、24.9 mW、42.2 mW,最大输出光谱宽度分别为7.6 nm,4 nm,10 nm,斜率效率分别为0.058 W/A、0.06 W/A和0.1 W/A,器件测试结果汇总于表1。

由表1可知,三组器件的斜率效率呈现随直波导长度减小而增加的趋势,SLD-3输出光谱宽度、斜率效率和输出功率均为三组最优,超辐射性能最好,SLD-1可承受的注入电流最高,在测试设备工作范围内均保

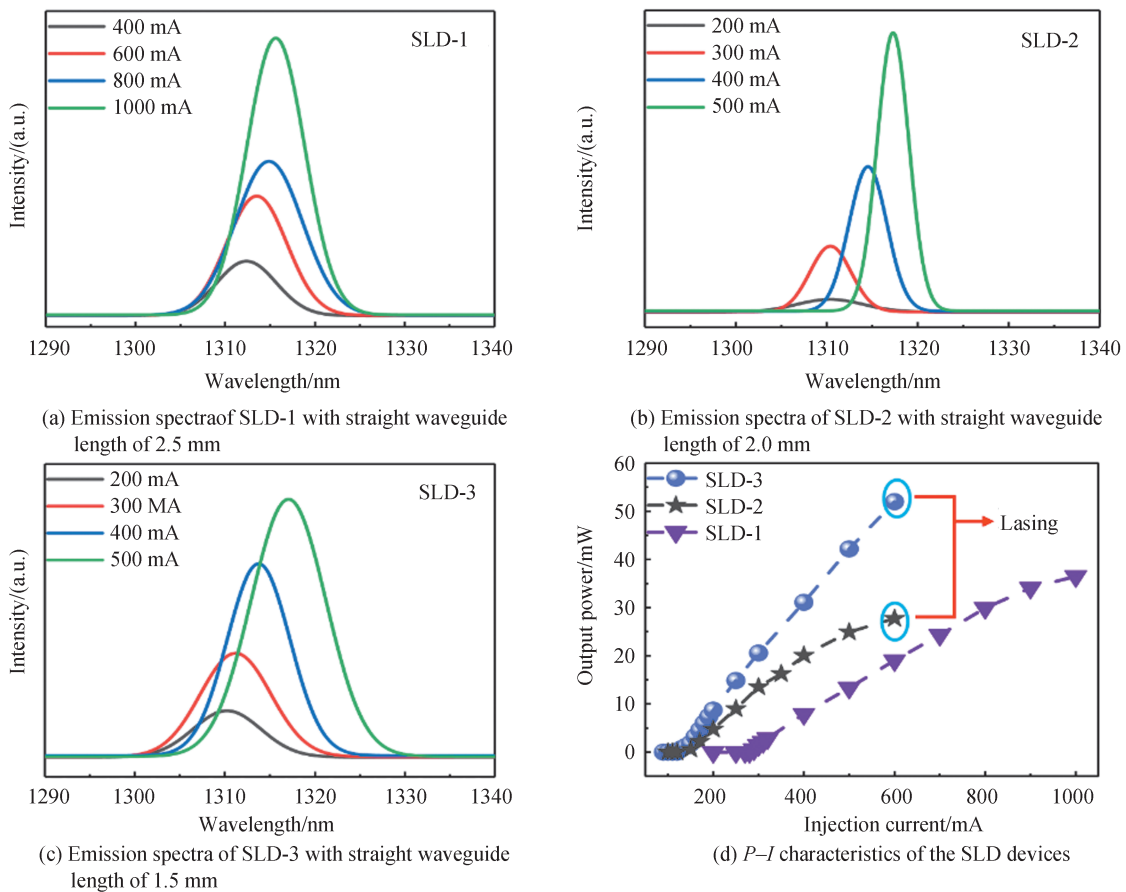


图9 器件测试结果

Fig. 9 The testing results of the devices

表1 弯曲角度8°器件的测试结果

Table 1 The testing results of the device with 8° bending angle

Name	Straight waveguide length/mm	Maximum injection current/mA	Slope efficiency/(W·A <sup>-1</sup> )	Spectral width/nm	Outputpower/mW
SLD-1	2.5	1 000	0.058	7.6	36.5
SLD-2	2.0	500	0.06	4	24.9
SLD-3	1.5	500	0.1	10	42.2

持超辐射,SLD-2与SLD-3可承受的最大注入电流均为500 mA,当注入电流超过500 mA时,两组器件均发生激射。器件腔长的减小,导致外微分量子效率升高,所以三者的斜率效率随着直波导长度的减小而增加<sup>[22]</sup>,SLD-3的腔长最小,斜率效率最高,SLD-1的腔长最大,斜率效率最低,另外,SLD-3弯曲波导与直波导长度比例最大,弯曲波导部分在器件波导结构中比重最高,抑制激射作用最为明显,所以SLD-3输出性能最优,SLD-2的直波导长度小于SLD-1,其弯曲波导与直波导长度比例大于SLD-1,SLD-2的斜率效率高于SLD-1,然而在测试范围内SLD-1的光谱更宽,这可能是由于受到测试设备的限制,导致SLD-1的注入电流无法进一步增加,可以预测当SLD-1的注入电流进一步加大时,其光谱将会急剧减小;随着注入电流密度的增加,器件增益得到提高,SLD-1的腔长最大,注入电流相同时,SLD-1的电流密度是三者中最小的,在测试范围内SLD-1的器件增益未能超过损耗,始终保持超辐射状态,SLD-2与SLD-3的电流密度更高,器件增益更大,所以能够在测试范围内观察到器件激射。MA H工作中<sup>[5]</sup>1 310 nm SLD需要进行腔面镀膜,且在脉冲电流注入时输出功率实现16.5 mW的输出功率,ROSSETTI M工作中<sup>[6]</sup>1 310 nm SLD输出功率实现10 mW,与以往工作相比,本文制备的器件可以在1 310 nm处,连续电流注入且未镀膜,实现42.2 mW的输出功率,实现了超辐射输出性能的优化,输出功率得到提高,这要归功于干法刻蚀与湿法腐蚀相结合的波导制备方法和波导结构参数的模拟分析。

## 4 结论

模拟了器件波导结构和绝缘层厚度对SLD输出性能的影响,并对刻蚀工艺进行改善,制备出直波导长度不同的一系列SLD器件,研究表明:波导刻蚀深度和波导弯曲角度的取值应适中,过大或过小均会造成SLD输出性能的下降;绝缘层厚度越薄,越有利于提高SLD的超辐射性能;适当减小直波导长度,有利于提高器件超辐射输出性能。根据研究结果,弯曲角度8°,刻蚀深度1.7 μm,绝缘层厚度300 nm,直波导长度为1.5 mm时,该器件在室温500 mA连续电流注入下,实现了10 nm宽的输出光谱和42.2 mW的高输出功率且未进行腔面镀膜。该研究为提高1 310 nm超辐射发光二极管输出功率奠定了基础。

### 参考文献

- [1] BAYLEYEGN M D, MAKHLOUF H, CROTTI C, et al. Ultrahigh resolution spectral-domain optical coherence tomography at 1.3 μm using a broadband superluminescent diode light source[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(24): 5564-5569.
- [2] KHAN M Z M, ALHASHIM H H, NG T K, et al. High-power and high-efficiency 1.3-μm superluminescent diode with flat-top and ultrawide emission bandwidth[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(1): 1-8.
- [3] KURBATOV L N, SHAKHIDZHANOV S S, BYSTROVA L V, et al. Investigation of superluminescence emitted by a gallium arsenide diode[J]. *Soviet Physics Semiconductors-Ussr*: 1971, 4: 1739
- [4] TAKAYAMA T, IMAFUJI O, KOUCHI Y, et al. 100-mW high-power angled-stripe superluminescent diodes with a new real refractive-index-guided self-aligned structure[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1996, 32(11): 1981-1987.
- [5] MA H, CHEN S H, YI Xinjian, et al. MOVPE Growth and Fabrication of 1.3μm High-Power InGaAsP-InP polarization-insensitive superluminescent diodes with complex strained quantum wells[J]. *Optical & Quantum Electronics*, 2004, 36(6): 551-558.
- [6] ROSSETTI M, MARKUS A, FIORE A, et al. Quantum dot superluminescent diodes emitting at 1.3 μm[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(3): 540-542.
- [7] LI L H, ROSSETTI M, FIORE A, et al. Wide emission spectrum from superluminescent diodes with chirped quantum dot multilayers[J]. *Electronics Letters*, 2005, 41(1): 41-43.
- [8] YOO Y C, KIM L H, HAN I K. InAs quantum dot superluminescent diodes with trench structure[J]. *Journal of Materials*



- Science Materials in Electronics, 2010, 21(5):445-449.
- [9] CHEN S M, LI W, ZHANG Z Y, et al. GaAs-Based superluminescent light emitting diodes with 290-nm emission bandwidth by using hybrid quantum well/quantum dot structures[J]. Nanoscale Research Letters, 2015, 12(1): 1049
- [10] HOU C C, CHEN H M, ZHANG J C, et al. Near-infrared and mid-infrared semiconductor broadband light emitters[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7(3): 17170.
- [11] ANIKEEV A S, BAGAEVT A, II'CHENKO S N, et al. Superluminescent diodes of the 770-790-nm range based on semiconductor nanostructures with narrow quantum wells[J]. Quantum Electronics, 2019, 49(9): 810-813.
- [12] MARCUSE D. Bending losses of asymmetric slab waveguide[J]. Bell System Technical Journal, 1971, 50(8): 2551.
- [13] NAGAI H, NOGUCHI Y, SUDO S. High-power, high-efficiency 1.3  $\mu\text{m}$  superluminescent diode with a buried bent absorbing guide structure[J]. Applied Physics Letters, 1989, 54(18): 1719-1721.
- [14] AN Q, JIN P, WU J, et al. Optical loss in bent waveguide superluminescent diodes [J]. Semiconductorence & Technology, 2012, 27(5): 68-69.
- [15] CHEN C, BERINI P, FENG D, et al. Efficient and accurate numerical analysis of multilayer planar optical waveguides in lossy anisotropic media[J]. Optics Express, 2000, 7(8): 260-272.
- [16] LU J, HE S, ROMANOV V G. A Simple and effective method for calculating the bending loss and phase enhancement of a bent planar waveguide[J]. Fiber & Integrated Optics, 2005, 24(1): 25-36.
- [17] AN Q, JIN P, WANG Z G. Estimation of the optical loss in bent-waveguide superluminescent diodes by an analytical method[J]. Journal of Semiconductors, 2015(6): 72-75.
- [18] HOCKER G B, BURNS W K. Mode dispersion in diffused channel waveguides by the effective index method[J]. Applied Optics, 1977, 16(1): 113-118.
- [19] LIU C Y, QU Y, YUAN S, et al. Optimization of ridge height for the fabrication of high performance InGaAsN ridge waveguide lasers with pulsed anodic oxidation[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(20): 4594-4596.
- [20] LEVIN M R, EVANS-LUTTERODTET K. The step coverage of CVD SiO<sub>2</sub> glass films[J]. Materials Letters, 1982, 1(1): 29-32.
- [21] LAN J K, WANG Y, CHAO C G, et al. Effect of substrate on the step coverage of plasma-enhanced chemical-vapor deposited tetraethylorthosilicate films[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2003, 21(4): 1224- 1229.
- [22] 江建平. 半导体激光器[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000:86-88.