第 34 卷 第 6 期 2023 年 6 月

Vol. 34 No. 6 June 2023

DOI:10.16136/j.joel.2023.06.0358

# 970 nm 超辐射发光二极管弯曲脊形波导数值分析

刘帅男,王芝浩,王警辉,张 悦,薄报学,高 欣\*

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

摘要:本文基于光束传播法(beam propagation method, BPM)和时域有限差分法(finite difference time domain method, FDTD)建立了分析模型,模拟并分析了弯曲脊形波导超辐射发光二极管(superluminescent light emitting diode, SLD)不同结构参数(刻蚀深度、曲率半径、脊形宽度)对波导损耗的影响和倾斜脊形波导不同结构参数(刻蚀深度、脊形宽度、倾斜角度、发射波长)对模式反射率的影响。计算表明,弯曲脊形波导的刻蚀深度和曲率半径是影响波导损耗的重要因素。刻蚀深度较浅使波导对光场的限制作用较弱,过小的曲率半径会使模式传输泄露严重,损耗大大增加。脊形宽度越大,波导损耗越小,其对波导损耗影响较小。脊形波导的端面倾斜角度是抑制模式反射率的重要因素,脊形宽度增加,模式反射率逐渐减小,并在特定的几个角度形成的奇点达到最小值。刻蚀深度对于模式反射率的影响作用较小,但随着刻蚀深度的增加,奇点发生的角度产生了向小角度偏移。在特定的倾斜角度范围内,随着波长减小,奇点的数目会逐渐增加。研究结果可对设计具有优越性能的 SLD 器件提供参考。

关键词:超辐射发光二极管(SLD);弯曲脊形波导损耗;倾斜脊形波导模式反射率;光束传播法(BPM);时域有限差分法(FDTD)

中图分类号::TN248.4 文献标识码:A 文章编号:1005-0086(2023)06-0628-08

# Numerical analysis of curved ridge waveguide for 970 nm superluminescent light emitting diodes

LIU Shuainan, WANG Zhihao, WANG Jinghui, ZHANG Yue, BO Baoxue, GAO Xin\* (State Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract: In this paper, an analysis model is established based on the beam propagation method (BPM) and the finite difference time domain method (FDTD). The effects of different structural parameters (etching depth, curvature radius, ridge width) of the curved ridge waveguide superluminescent light emitting diode (SLD) on the waveguide loss and the effects of different structural parameters (etching depth, ridge width, tilt angle, emission wavelength) of the inclined ridge waveguide on the mode reflectivity are simulated and analyzed. Calculations show that the etching depth and curvature radius of the curved ridge waveguide are important factors affecting the waveguide loss. The shallow etching depth makes the waveguide's confinement effect on the optical field weaker, and the too small curvature radius will cause serious mode transmission leakage and greatly increase the loss. The larger the width of the ridge, the smaller the waveguide loss, which has less influence on the waveguide loss. The inclination angle of the end face of the ridge waveguide is an important factor for suppressing the mode reflectivity. With the increase of the ridge width, the mode reflectivity gradually decreases, and a singularity is formed at certain angles to reach a minimum value. The effect of the etching depth on the mode reflectivity is

<sup>\*</sup> E-mail:gaoxin@cust. edu. cn

small, but with the increase of the etching depth, the angle at which the singularity occurs shifts to a small angle. Within a specific tilt angle range, the number of singularities increases gradually as the wavelength decreases. The research results can provide a reference for the design of SLD devices with superior performance.

**Key words:** superluminescent light emitting diode (SLD); curved ridge waveguide loss; tilted ridge waveguide mode reflectivity; beam propagation method (BPM); finite difference time domain method (FDTD)

## 0 引 盲

超辐射发光二极管(superluminescent light emitting diode, SLD)是一种新型的半导体光电发光 器件,其发光特性介于半导体激光器(LD)和发光 二极管(LED)二者之间。它是一种具有光波导的 边发射半导体光电器件,该波导提供了高质量的 光束和高空间相干性,并抑制光反馈,从而抑制了 器件的激射。最早的 SLD 是双异质结构类型,于 20世纪70年代初首次引入砷化物材料系统,其 应用和研究得到了迅速发展,并在多种半导体化 合物发光材料中得以实现,目的是作为一种能高 效耦合到光纤的理想光源。SLD的高功率宽带光 源被应用于各种仪器中,包括光纤陀螺仪 (FOG)[1]、光纤电流传感器(FOC)[2]、光学相干断 层扫描(OCT)[3]、带光纤传感器[4]结构的健康监 测、无斑点照明[5]、用于光纤网络的计量系统或光 学测试设备。

自 1971 年 KURBATOV 等[6] 首次研制出了 SLD 之后,多数研究热点集中在提高输出功率和 拓宽光谱等方面。2012年, TSUBAKI等[7]研制 的弯曲脊形 SLD器件,光谱半峰全宽达到 122 nm, 发射波长为 1 104 nm, 功率为 0.7 μW。 2017年,北京邮电大学王龙[8]采用弯曲脊形波导 结构 制 备 了 1. 3 μm 波 段 的 InAs/GaAs 量 子 点 SLD,其腔长为 2 mm、脊宽为 10 μm、弯曲角度为 10°,未镀腔面膜的器件在脉冲电流为600 mA时, 输出功率达到28.9 mW,光谱半峰全宽达到 28 nm。2021年,长春理工大学王拓等[9]制备了J 型 SLD,该器件在室温、连续注入电流 500 mA 条 件下,实现激射波长 1310 nm, FWHM 为 10 nm 宽的输出光谱,输出功率达到 42.2 mW。可以看 出,目前研究尚缺乏对 SLD 结构中典型弯曲脊形 波导的模式损耗特性的优化和倾斜端面模式有效 反射率的全面分析。

为此,本文基于 MARCUSE<sup>[10,11]</sup>提出的理论方法,通过模拟仿真,系统分析了弯曲脊形 SLD 不同波导结构对器件波导损耗、抑制 F-P 振荡以

及倾斜脊形波导在不同倾斜角度下对端面模式反射率的影响。

## 1 模型理论

为了抑制激射并获得超辐射发光,SLD(出射)端面的模式反射率应低于 10<sup>-6</sup>,而后端面需蒸镀高反射膜,其反射率通常大于 95%,前端面需蒸镀抗反射膜来减小自然解理面的剩余模式反射率。抗反射膜的反射率通常小于1%,理想状态下反射率小于0.1%。通过改变器件波导结构、腔面蒸镀抗反射膜二者结合的方法可使输出端面的模式反射率达到低于 10<sup>-6</sup>的水平,可使器件的激射得到有效抑制、光谱调制得到有效改善。

弯曲脊形波导结构 SLD 是由弯曲波导和直形波导构成。弯曲波导结构可以有效地避免器件 F-P 振荡的形成,直形波导结构可以有效提升器件的输出功率,因此,弯曲脊波导结构有利于实现器件的高功率超辐射光输出。其示意图如图 1 所示。其中弯曲波导端和直条波导端分别为出射端面和后端面,当产生光子后,一些光子进入直形区域并受到后端面反射,因此,光在波导中的双向增益有益于提高输出功率,进入到弯曲区域内的光子会在波导侧壁上发生反射,只有少数光子返回到腔中,来降低出射端面的模式反射率并抑制受激辐射。

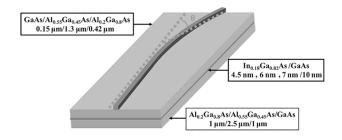


图 1 弯曲脊形波导结构超辐射发光二极管示意图 Fig. 1 Schematic diagram of the curved ridge waveguide structure superluminescent light-emitting diode

#### 1.1 脊形波导基模选择

SLD 基模特性主要与脊宽、脊高有关,理想的结构参数对器件性能至关重要。脊形波导结构的一阶侧模截止条件[12]为:

$$W = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{n_{\rm eff}^2 - n_L^2}} \,, \tag{1}$$

式中,W 为脊宽, $n_{\text{eff}}$  和  $n_L$  分别为脊波导等效折射率 和脊形两侧的等效折射率, $\lambda_0$  为波长。即当脊形区 宽度小于截止宽度时,一阶模式截止,即得到基模模 式的输出。

#### 1.2 弯曲脊形波导损耗

在弯曲脊形波导结构中,由于光束在波导中传播方向的改变和光束传输轴移位,导致波导的弯曲会引起波导中光场的额外损耗,因此,在设计这些弯曲脊形波导器件时,必须考虑弯曲波导的损耗特性。对于弯曲脊形波导,其损耗可用损耗系数 $\alpha^{[13]}$ 表示为:

$$\alpha = C_1 \exp(-C_2 R) , \qquad (2)$$

式中, $\alpha$  为损耗系数,R 为波导弯曲的曲率半径, $C_1$  和  $C_2$  为与 R 无关的常数。

#### 1.3 倾斜脊形波导端面的模式反射率

倾斜脊形波导的TE模式反射率[10]可以表达为:

$$R_g = R_f(\theta)x \times$$

$$\left[\frac{WU^{2}\{[W^{2}-(\beta d)^{2}]\frac{\sin(2\beta d)}{2\beta d}+W\cos(2\beta d)\}}{(1+W)[U^{2}-(\beta d)^{2}][W^{2}+(\beta d)^{2}]}\right]^{2},$$
(3)

式中,参数U和W分别是波在宽度为2d的面芯中的归一化横向传播常数以及归一化横向衰减参数:

$$U = \sqrt{n_1^2 k^2 - \beta^2 d} , \qquad (4)$$

$$W = \sqrt{\beta^2 - n_2^2 k^2 d} , \qquad (5)$$

另一个参数是定义的平板波导的 V 数:

$$V = \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} , \qquad (6)$$

 $R_f(\theta)$  为模式光从材料与空气之间倾斜的介质界面反射的平面波的菲涅耳反射系数, k 是自由空间波数  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为自由空间波长,  $\beta$  为 TE 模的传播常数, d 是脊形区宽度的一半,  $n_1$  和  $n_2$  分别为脊形区和脊形两侧的有效折射率。

# 2 计算结果与分析

在脊形基模波导模拟的基础上,首先对 SLD 在不同脊形宽度、曲率半径、刻蚀深度条件下的弯曲脊

形波导模式损耗进行了计算分析,然后模拟了倾斜 脊形波导在不同脊形宽度、刻蚀深度、倾斜角度条件 下的有效端面模式反射特性。表1给出的 SLD 的外 延结构参数,采用相同 In 组分、非均匀阱宽的三量子 阱结构有效增加器件的增益谱宽。

#### 表 1 超辐射发光二极管外延结构参数

Tab. 1 Epitaxial structure parameters of superluminescent light emitting diodes

Material	Eqitaxial layer	Thickness	$\begin{array}{c} \text{Doping} \\ /\text{cm}^{-3} \end{array}$
P-GaAs	Buffer	150 nm	$Zn,1 \times 10^{19}$
$P\text{-}Al_{0.55}Ga_{0.45}As$	Cladding	$1.3~\mu\mathrm{m}$	$Zn,1 \times 10^{18}$
$Al_{0.2}Ga_{0.8}As$	Waveguide	e 0.42 μm	
GaAs	Barrier	10 nm	
$In_{0.18}Ga_{0.82}As$	QW1	4.5 nm	
GaAs	Barrier	10 nm	
$In_{0.18}Ga_{0.8}2As$	QW2	6 nm	
GaAs	Barrier	10 nm	
$In_{0.18}G_{0.82}As$	QW3	7 nm	
GaAs	Barrier	10 nm	
$Al_{0.2}Ga_{0.8}As$	Waveguide	e 1 μm	
$N\text{-}Al_{\scriptscriptstyle 0.55}Ga_{\scriptscriptstyle 0.45}As$	Cladding	$2.5~\mu\mathrm{m}$	$\mathrm{Si}$ , $5 \times 10^{17}$
N-GaAs	Buffer	$1.0~\mu\mathrm{m}$	$\mathrm{Si}$ , $5 \times 10^{19}$

#### 2.1 脊形波导基模仿真

脊形波导可通过脊形高度、宽度设计,产生合适的侧向有效折射率差值,从而实现波导的基模传输。根据波导理论的分析,高阶模截止条件由条宽、有效折射率差共同决定,脊形波导深度能够控制侧向导引机制,依靠折射率差值的控制作用,可以有效地将载流子和光子限制在发光区,从而得到良好的输出功率和模式特性,但其往往会带来侧向模式选择性方面的困难。所以,脊形波导刻蚀深度、脊形宽度是影响模式稳定性的决定性因素,刻蚀截止到上波导层,形成一个脊形结构,其有效折射率差由脊形两侧的刻蚀深度决定。

图 2 给出了脊形宽度 4 µm 下,刻蚀深度分别为 0.75 µm、0.95 µm、1.15 µm、1.4 µm 时的基模光场 分布图。从图 2 中可以看出,当刻蚀深度的逐渐增加,波导对光场的限制逐渐增强,光场的侧向尺寸也在逐渐减小<sup>[14]</sup>。当刻蚀深度较浅时,由于脊形区与两侧的折射率差值较小,对光场的限制作用较弱,光场模式可扩展到脊形区的两侧较大距离处,而载流子的侧向扩散则会导致器件的增益减小。刻蚀的深度越大,脊形区所需提供的有效折射率差就越大,因此,脊形波导的刻蚀深度应在 1.15—1.4 µm 之间。

这可以更好地将光场限制在波导层的中心位置,达到基模模式稳定,降低光场损耗的作用。

较深的刻蚀深度有利于较好限制脊形条注人电流的侧向扩展,避免大注人电流条件下脊形条外侧的载流子堆积,从而改善器件波导的注入电流稳定性。当刻蚀深度为 1.4 μm 时,由于较大的侧向波导等效折射率差使得脊形波导的一阶模截止宽度较

小。图 3 给出了刻蚀深度  $1.4 \mu m$ 下,脊形宽度为  $5 \mu m$ 时,波导存在的模场分布。可以看出,当脊形宽度为  $5 \mu m$ 时,脊形波导存在基模、一阶模两个侧向模式,在较大的注入电流下一阶模可获得足够的增益产生激射,导致器件的光束质量降低。因此,为了获得稳定的脊形波导基模工作,在刻蚀深度  $1.4 \mu m$  以内,脊形条宽度应不大于  $4 \mu m$ 。

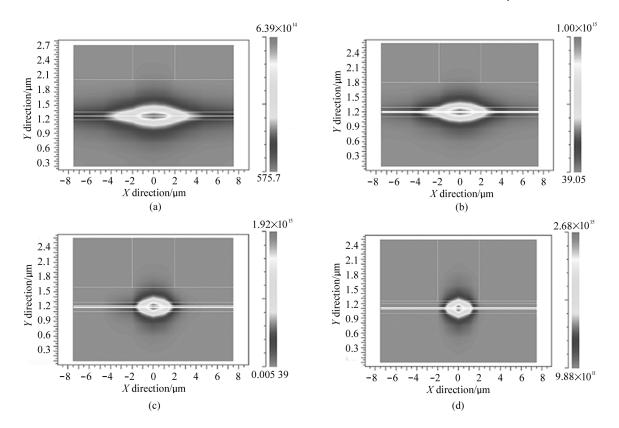


图 2 不同刻蚀深度下的基模光场分布:(a) 0.65 μm;(b) 0.95 μm; (c) 1.15 μm; (d) 1.4 μm Fig. 2 Optical field distribution of fundamental mode under different etching depths:

(a)  $0.65 \mu m$ ; (b)  $0.95 \mu m$ ; (c)  $1.15 \mu m$ ; (d)  $1.4 \mu m$ 

 $1.79 \times 10^{15}$  $1.67 \times 10^{15}$ 2.7 2.4 2.4 2.1 2.1 Y direction/µm Y direction/µm 1.8 1.8 1.5 1.5 1.2 1.2 0.9 0.9 0.6 0.6 0.3 0.3 8 6.96×10<sup>-10</sup> 8 9.15×10<sup>-11</sup> -2 0 2 -6 -4 6 0 -2 2 -8 -6 -4 4 6 X direction/um X direction/um (b) (a)

> 图 3 相同刻蚀深度下的光场分布:(a) 基模;(b) 一阶模 Fig. 3 Optical field distribution at the same etching depth: (a) Fundamental mode; (b) First-order mode

#### 2.2 弯曲脊形波导损耗模拟分析

#### 2.2.1 刻蚀深度对波导损耗的影响

首先,模拟了不同刻蚀深度下的弯曲脊形波导的损耗。弯曲波导曲率半径 R 设为  $14~330~\mu m$ ,脊宽 W 为  $4~\mu m$ 。

图 4 为弯曲波导损耗系数 α 与刻蚀深度的变化 关系。随着刻蚀深度的逐渐增加,损耗系数大幅度 减小。这是由于当刻蚀深度较浅时,脊形区与脊形 区两侧的折射率差值较小,对光场的限制作用较弱。 而深刻蚀达 1.4 μm 时,大部分光被完全限制在波导 内,具有较小的损耗系数,因此波导损耗也最小,所 以深刻蚀有利于减小波导损耗,提高器件的性能。

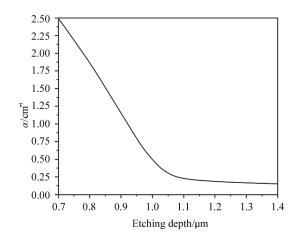


图 4 损耗系数随刻蚀深度的变化关系

Fig. 4 Variation of loss coefficient with etching depth

#### 2.2.2 曲率半径对波导损耗的影响

给定刻蚀深度 1.4 μm, 脊形宽度 4 μm 下, 曲率 半径 R 对波导损耗产生的影响如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 当曲率半径逐渐增加时, 损耗系数在逐渐减小。这是由于在弯曲波导中, 光从弯曲部分就开始从波导弯曲侧面逃逸从而造成波导弯曲损耗。为了保持光波波形的完整性, 波导中的光波以曲率中心为起点形成一系列辐射状平面, 这样在波导中心轴外侧, 随着曲率半径的减小, 离中心轴的距离增加, 波导的有效折射率越来越小, 波导对光场的限制越来越弱<sup>[13]</sup>。可见, 在设计弯曲波导时要尽量使用大曲率半径, 这样才能尽可能地减少弯曲带来的模式损耗。

#### 2.2.3 脊形宽度对波导损耗的影响

为了进一步探究脊形宽度对波导损耗的影响,设置刻蚀深度为  $1.4~\mu m$ 、曲率半径 R 为  $14~330~\mu m$ ,损耗系数  $\alpha$  随脊形宽度的变化关系如图 6~ 所示。从图

6 中可以看出,随着脊形宽度的逐渐增加,损耗系数 α 呈现逐渐减小的趋势。脊形宽度相对比刻蚀深度、曲率半径对波导损耗产生的影响更小。由此可见,造成波导损耗主要因素是刻蚀深度和曲率半径。

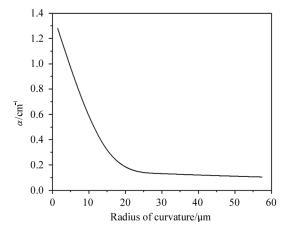


图 5 损耗系数随曲率半径的变化关系

Fig. 5 Variation of loss coefficient with curvature radius

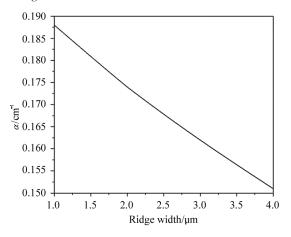


图 6 损耗系数随脊形宽度的变化关系 Fig. 6 Variation relationship of loss coefficient with ridge width

#### 2.3 倾斜脊形波导端面模式有效反射率分析

#### 2.3.1 不同脊宽下倾斜角度对模式反射率的影响

首先针对不同的脊形宽度,在不同的倾斜角度下模拟了模式反射率,如图 7 所示。入射波长设定为970 nm,脊形宽度分别为 2  $\mu$ m、4  $\mu$ m、6  $\mu$ m和 8  $\mu$ m。

可以看出,当倾斜角度为零时,模式反射率均小于1,这是由模式光在垂直入射时脊形端面和空气之间的菲涅耳反射造成的。当脊形宽度为 2μm、倾斜角度为 6.6°时,模式反射率出现了奇点,此处的反射率达到了最小值,该反射率极小值应是脊形端面入射光与反射光的干涉造成的。从图7中的对比可以看出,随着脊形宽度的增大,奇点和波峰数目也逐渐

2.3.2 单一波长与宽谱光对模式反射率的影响

一般来说,SLD具有一定二极管的发光特性,它

不是发射单个波长,而是发射较宽谱宽的受激辐射

增加,奇点处的模式反射率的值也在逐渐减小。表明,随着倾斜角度的增加,脊形宽度越大,模式反射率也在逐渐减小,这说明了波导的几何结构对模式反射率的影响比减反射膜的影响更大。

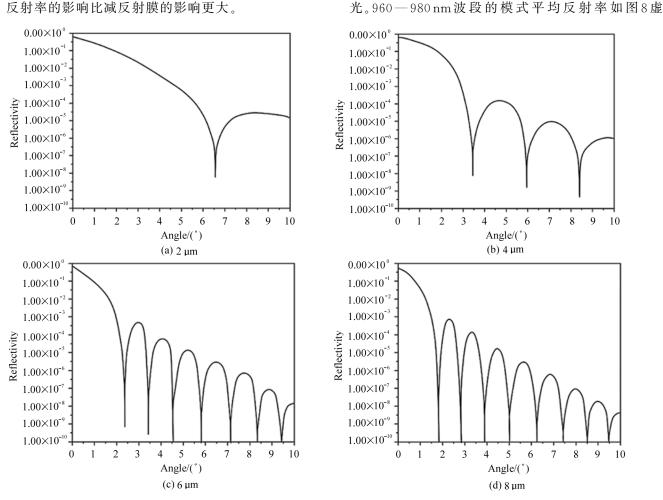


图 7 不同脊形宽度下倾斜角度随模式反射率的变化关系

Fig. 7 Variation of tilt angle with mode reflectivity for different ridge widths

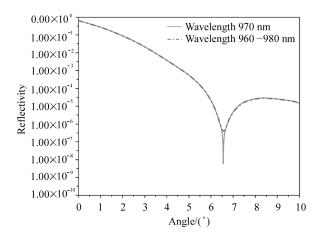


图 8 宽谱光与单波长光的模式反射率对比
Fig. 8 Mode reflectivity comparison of broad-spectrum light and single-wavelength light

线所示,单一波长970 nm的模式光如图8实线所示。可见,宽谱光填补了模式反射率的最小值。由此分析可知,当发射单一波长(970 nm)和合成波(960—980 nm)在倾斜角度为 6.6°时,模式反射率均达到了最小值,单一波长出现奇点,而合成波填充了模式反射率的最小值,这是由于在倾斜面上入射和剩余反射波导模式的破坏性干涉的结果[15]。

为了进一步分析不同波长的模式反射率,设定 脊形 宽度  $6 \mu m$ ,波长分别为 1370 nm、970 nm、570 nm,计算结果如图 9 所示。由图 9 可知,随着模式波长的逐渐减小,模式反射率逐渐减小,在一定倾斜角度范围内产生奇点数目较多。

#### 2.3.3 不同脊形刻蚀深度对模式反射率的影响

由式(5)可以看出,脊形参数直接影响横向衰减参数 W。进一步分析不同脊形刻蚀深度对模式反射率的影响,模拟结果如图10所示。当刻蚀深度从1.2 μm增加到1.4 μm时,第一个奇点产生的角度由4.1°偏移到3°,而模式反射率则增大了一个数量级。可见,随着脊形刻蚀深度的增加,反射率曲线上的奇点向小角度方向偏移[16]。由此可知,随着刻蚀深度的增加,脊形波导侧向的有效折射率差值也明显增加,当刻蚀到波导层附近时,脊形侧的有效折射率更是迅速降低[17],导致横向衰减参数的明显变小。刻蚀深度越大,模式反射率也会增大。

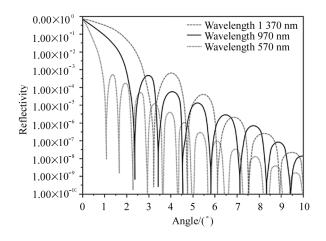


图 9 不同波长的模式反射率随倾斜角度的变化

Fig. 9 Variation of mode reflectivity with tilt angle for different wavelengths

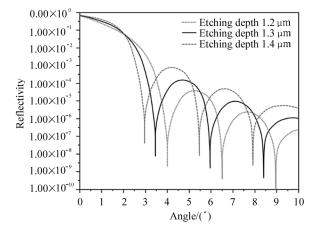


图 10 不同刻蚀深度下,模式反射率随倾斜角度的变化 Fig. 10 Variation of mode reflectivity with tilt angle at different etching depths

# 3 结 论

本文主要对弯曲脊形 SLD 的波导损耗和倾斜脊 形波导的模式反射率进行模拟分析。结果表明,对

于弯曲脊形波导结构 SLD 来说,刻蚀深度和曲率半 径直接影响波导损耗,刻蚀深度越深对光场的限制 作用效果越好,波导损耗也随之减小,越大的曲率半 径波导损耗越低。当脊形宽度为4μm、刻蚀深度 1.4 μm、曲率半径 R 为 14 330 μm 时,保证了基模模 式输出的同时,使脊形波导的弯曲损耗得到有效控 制。脊形波导的倾斜角度降低了出射端面的模式反 射率,从而抑制 F-P 振荡的重要器件参数。计算表 明,增加倾斜角度和脊形宽度可以有效降低端面的 模式反射率,并在特定的几个角度形成的奇点达到 最小值。刻蚀深度对于模式反射率的影响作用较 小,但随着刻蚀深度的增加,奇点发生的角度产生了 向小角度偏移的现象。综上所述,脊形波导的几何 结构是影响器件性能的重要因素,可以通过对波导 结构等合理设计,实现弯曲脊形波导 SLD 的低损耗 和低光谱调制工作。

#### 参考文献:

- [1] WILLIAM, BURNS C L, CHEN R, et al. Fiber-optic gyroscopes with broad-band sources[J]. Journal of Lightwave Technology, 1983, 1(1):98-105.
- [2] BOHNERT K, GABUS P, NEHRING J, et al. Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor [J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 20(2): 267-276.
- [3] NOBUHIKO O, DAVID T D, JAYANTA S, et al. Superluminescent diode with a broadband gain based on self-assembled InAs quantum dots and segmented contacts for an optical coherence tomography light source[J]. Journal of Applied Physics, 2016, 119(8):083107.
- [4] WILD G,HINCKLEY S. Distributed optical fibre smart sensors for structural health monitoring: A smart transducer interface module[C]//Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP), 2009 5th International Conference on, December 7-10, 2019, Melbourne, VIC, Australia. New York: IEEE, 2010; 373378.
- [5] ROSSETTI M, NAPIERALA J, MATUSCHEK N, et al. Superluminescent light emitting diodes; the best out of two worlds[C]//International Society for Optics and Photonics, Proceedings of SPIE, MOEMS and Miniaturized System XI, February 15,2012, San Francisco, California, United States. Belingham, WA, USA: SPIE, 2012, 8252: 825208.
- [6] KURBATOV L N, SHAKHIDZHANOV S S, BYSTROVA L V, et al. Investigation of superluminescence emitted by a gallium arsenide diode[J]. Soviet Physics Semiconductors, 1971, 4:1739.

- [7] TSUBAKI I, HARADA Y, KITA T. High-resolution optical coherence tomography using broadband light source with strain-controlled InAs/GaAs quantum dots [J]. Physica Status Solidi, 2012, 9(12): 2473-2476.
- [8] WANG L. Fabrication and key properties of 1.3 µm band superluminescent light-emitting diodes[D]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019. 王龙.1.3 µm 波段超辐射发光二极管的制备和关键性能
- [9] WANG T, CHEN H M, JIA H M, et al. Performance research and fabrication of 1 310 nm superluminescent diode with high power [J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50 (6): 0623002.

研究[D]. 北京:北京邮电大学,2019.

- 王拓,陈红梅,贾慧民,等.1310 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.
- [10] MARCUSE D. Reflection loss of laser mode from tilted end mirror[J]. Journal of Lightwave Technology, 1989, 7(2): 336-339.
- [11] MARCUSE D. Bending losses of the asymmetric slab waveguide[J]. Bell System Technical Journal, 1971, 50: 2551-2563.
- [12] ZHAO J Y, CHEN X, ZHOU N, et al. Reliability study of DEB laser fabricated by nanoimprint technology [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2):0206003. 赵建宜,陈鑫,周宁,等.纳米压印工艺制作 DFB 激光器的可靠性研究[J].光学学报, 2014, 34(2):0206003.
- [13] LI H T,HE D Y,CHEN X. Method for analyzing graded-in-dex bend waveguides[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2004, 41(6): 29-32, 37.

- 李洪涛,何对燕,陈轩.弯曲波导损耗的一种分析方法[J].激光与光电子学进展,2004,41(6):29-32,37.
- [14] WANG Z H, WANG J H, LIU S N, et al. Numerical simulation of output characteristics of 980 nm tapered semiconductor laser[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2022, 43(2):275-284.

  王芝浩,王警辉,刘帅男,等.数值模拟 980 nm 锥形半导体激光器输出特性[J].发光学报, 2022, 43(2):275-
- [15] KOPP F, EICHLER C, LELL A, et al. Blue superluminescent light-emitting diodes with output power above 100 mW for picoprojection [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2013, 52(8s):08JH078S.
- [16] KAFAR A.STANCZYK S.SCHIAVON D.et al. Review-review on optimization and current status of (AI,In)GaN superluminescent diodes [J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2020, 9(1):015010.
- [17] ZHANG Q, ZHAO Y H, DONG Z, et al. 980 nm high-power fundamental mode distributed-feedback laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(2):0202004. 张奇,赵懿昊,董振,等. 980 nm 大功率基横模分布反馈激光器[J]. 中国激光, 2016, 43(2):0202004.

#### 作者简介:

284.

高 欣 (1965一),女,博士,研究员,博士生导师,主要从事半导体光电子器件物理与技术方面的研究.