

窄脊型波导半导体激光器偏振与横模关系研究

宋梁^{1,2}, 贺钰雯^{1,2}, 王浩淼^{1,2}, 周坤^{1,2*}, 杜维川^{1,2}, 李弋^{1,2}, 何林安^{1,2},
胡耀^{1,2}, 张亮^{1,2}, 高平宽^{1,2}, 王欣阳^{1,2}, 高松信^{1,2}, 唐淳^{1,2}

(1. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川绵阳 621900;
2. 中国工程物理研究院高能激光重点实验室, 四川绵阳 621900)

摘要: 基于有效折射率法建立了窄脊型波导数值计算模型, 通过实验研究了 InGaAs 量子阱窄脊型波导半导体激光器偏振特性与横模之间的关系。根据理论计算, 脊型波导中类 TM 模式在慢轴方向的有效折射率差更大, 类 TM 模式的限制因子比类 TE 模式的限制因子更大、更容易出现慢轴高阶模式; 而随着脊型波导的高度增加, 快轴高阶模式被截断, 类 TE₀₀ 模式的限制因子逐渐增加至与类 TM₀₀ 模式相近, 慢轴高阶模式因其大的散射损耗被抑制, 理论上可实现高偏振度、高光束质量激光输出。在实验方面, 利用量子阱材料的增益偏振特性, 通过脊型高度与宽度的设计, 制备了高偏振度、基横模的窄脊型波导半导体激光器。

关键词: 半导体激光器; 光束质量; 偏振度; 有效折射率法; 波导模式分析

中图分类号: O436 文献标识码: A

Study on the relationship between polarization and transverse modes of narrow ridge waveguide semiconductor lasers

SONG Liang^{1,2}, HE Yu-Wen^{1,2}, WANG Hao-Miao^{1,2}, ZHOU Kun^{1,2*}, DU Wei-Chuan^{1,2}, LI Yi^{1,2},
HE Lin-An^{1,2}, HU Yao^{1,2}, ZHANG Liang^{1,2}, GAO Ping-Kuan^{1,2}, WANG Xin-Yang^{1,2},
GAO Song-Xin^{1,2}, TANG Chun^{1,2}

(1. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China;
2. The Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: A numerical calculation model of the narrow ridge waveguide was established based on the effective refractive index method. The relationship between the polarization characteristics and the transverse mode of the InGaAs quantum well narrow ridge waveguide semiconductor laser was studied experimentally. According to theoretical calculations, the effective refractive index difference of the TM-like mode in the ridge waveguide is larger in the direction of the slow axis. The confinement factors of the TM-like mode are larger than those of the TE-like mode, and the slow-axis high-order mode is more likely to appear. As the height of the ridge waveguide increases, the fast-axis high-order modes are truncated, and the confinement factor of the TE₀₀-like mode gradually increases to be similar to that of the TM₀₀-like mode. The slow-axis high-order mode is suppressed due to its large scattering loss, theoretically achieving high polarization, and near diffraction limit beam-quality laser output. In terms of experiments, a narrow ridge waveguide semiconductor laser with a high polarization extinction ratio and a fundamental transverse mode was fabricated by the gain polarization characteristics of quantum well materials and by designing the height and width of the ridge.

Key words: semiconductor lasers, beam quality, polarization extinction ratio, effective refractive index method, waveguide mode analysis

引言

窄脊型波导半导体激光器具有高光束质量、低

阈值电流、制备工艺简单和寿命长的优点, 是工艺复杂的掩埋式半导体激光器的替代方案之一^[1-2]。高亮度和高偏振度半导体激光器是人们不懈追求

的目标,亮度反映了激光器单位面积的功率密度,偏振度反映了激光器的功率效率,是提升激光器性能的重要指标。与大多数激光器相同,InGaAs 压应变量子阱窄脊型波导半导体激光器输出激光偏振是类 TE 占主导地位^[3],但输出激光仍然存在一部分类 TM 偏振,两种偏振横模共存恶化激光器偏振度与光束质量。

1987 年,Amann M C 通过改变脊型波导宽度和有效折射率差实现 $\lambda=1.3 \mu\text{m}$ 的 InGaAsP-InP 脊型波导激光器的偏振态控制^[4]。次年,Hartl E 等在此基础上实现了 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 的 InGaAsP-InP 脊型波导激光器偏振态控制,得出增益引导和强折射率引导激光器偏振态为类 TE,而弱折射率引导下偏振态为类 TM 的结论^[5]。2008 年,Laakso A 等通过分析横模限制因子在不同未刻蚀包层厚度和脊型宽度情形下的变化来预测激光器的横向模态行为,提出 980 nm 脊型波导半导体激光器的单横模设计方案^[6]。2016 年,Chu L 等通过实验研究了窄脊结构和非对称波导设计对 852 nm 半导体激光器单侧模稳定性的影响,认定脊型台面刻蚀深度和脊型宽度是影响横向模式的主要因素^[7]。

本文的目的是通过有效折射率法对脊型波导数值建模,分析窄脊型波导中的模式,研究影响脊型波导模式分布的关键因素,并给出提升脊型波导光束质量和偏振度的方法。

1 理论分析

脊型波导结构如图 1 所示,图中 W 为脊型宽度, d 为刻蚀深度。上限制层、波导层和下限制层构成脊型部分波导结构,脊型两侧经过刻蚀后快轴方向上限制层被折射率更低的二氧化硅替代,二氧化硅、波导层和下限制层构成脊型两侧波导结构。两种波导结构具备不同模式有效折射率,在慢轴方向形成有效折射率差,等效成对称波导结构。脊型刻蚀深度影响脊型两侧波导模式的有效折射率,是决定慢轴光场限制强弱的关键因素。

脊型波导的模式包括类横电模(TE)和类横磁模(TM),两种模式代表着不同的光场振动方向。近衍射极限光束质量与高偏振度要求脊型波导中一种偏振模式的基模占主导。增益材料对于类 TE 和类 TM 两种模式的增益并不一致,在 InGaAs 量子阱增益材料中类 TE 模式增益源于重空穴复合,类 TM 模式增益源于轻空穴复合。激光器使用 InGaAs 压应变量子阱作为有源区,因此高偏振度窄脊型波导

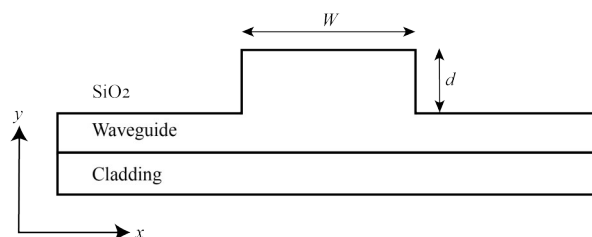


图 1 脊型波导结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the ridge waveguide structure

单横模工作的模式是类 TE 基模,类 TM 模式降低偏振度,高阶模式恶化光束质量。

脊型波导中传输的模式是模式净增益和限制因子(Γ)共同作用的结果。限制因子是表征光场与增益区重叠多少的参数,其标准定义是光传播方向的增益区功率流与总功率流之比^[8-9],利用电磁场关系推导后等效为电场平方在增益区的积分与整个截面积分的比值,即

$$\Gamma = \frac{\iint_S E^2(x,y) dx dy}{\iint_{-\infty}^{+\infty} E^2(x,y) dx dy}, \quad (1)$$

式(1)中 S 代表增益区,是量子阱层与脊型波导注电区的重叠区域, $E(x,y)$ 为电场分布。在增益相同的情形下,模式的限制因子越大,越容易激射,限制因子越小,模式越难激射。

外延波导结构采用非对称大光腔设计,总波导厚度 $1.7 \mu\text{m}$,有效折射率法数值模型参数见表 1。模型中上波导层 AlGaAs 厚度 $0.7 \mu\text{m}$,下波导层 AlGaAs 厚度 $1.0 \mu\text{m}$,两波导层中间为纳米级 InGaAs 量子阱层。在波导层之外为 AlGaAs 上下限制层,厚度分别为 $0.8 \mu\text{m}$ 和 $2.0 \mu\text{m}$,限制层之外为 GaAs 材料,具体材料与参数见文献[10]。

表 1 有效折射率法数值模型参数

Table 1 Parameters of a numerical model of the effective refractive index method

Material	Refractive index	Thickness/ μm
$\text{Al}_{0.40}\text{Ga}_{0.60}\text{As}$	3.314 479 45	0.8
$\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}$	3.426 353 90	0.7
$\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}$	3.426 353 90	1.0
$\text{Al}_{0.27}\text{Ga}_{0.73}\text{As}$	3.387 308 75	2.0

基于上述脊型波导结构与有效折射率法进行数值建模,脊型宽度为 $3.0 \mu\text{m}$,刻蚀深度从 $1.0 \mu\text{m}$ 增加到 $2.2 \mu\text{m}$,计算得到类 TE 和类 TM 两种模式的有效折射率差随脊型刻蚀深度的变化关系,如图 2

所示。结果表明,类TM模式的有效折射率差大于类TE模式,且两者的有效折射率差都随着刻蚀深度的增加而增加,慢轴方向的限制逐渐增强。

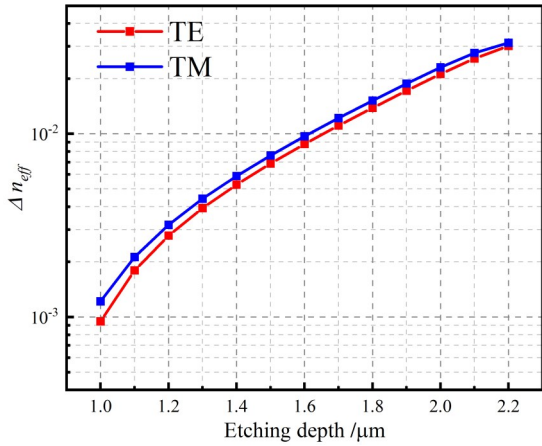


图2 类TE和类TM模式有效折射率差随刻蚀深度的变化
Fig. 2 The effective refractive index difference between TE-like and TM-like modes as a function of etching depth

从数值计算结果中发现,刻蚀深度较浅时,窄脊型波导结构中快轴方向存在高阶模式,如图3所示。对于类TE模式,当刻蚀深度为1.0~1.3 μm时,TE₁₀模式限制因子不为零,对于类TM模式,TM₁₀和TM₁₁两种模式在刻蚀深度1.0~1.2 μm时,拥有不为零的限制因子,上述三种模式经过材料增益后将激射并恶化快轴光束质量。但从图中不难发现,增加刻蚀深度到1.4 μm及以上时,快轴高阶模式都将截止,因此增加刻蚀深度是解决快轴高阶模式的有效途径。

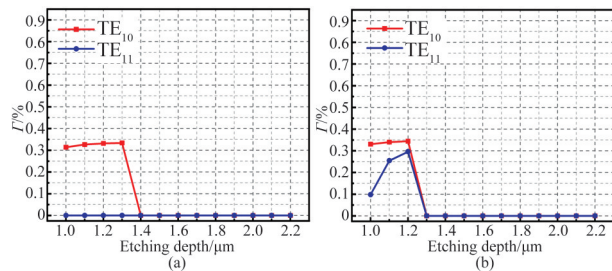


图3 TE_{1x}和TM_{1x}高阶模式限制因子随刻蚀深度的变化:
(a)类TE模式;(b)类TM模式
Fig. 3 Variation of TE_{1x} and TM_{1x} higher-order mode confinement factors with etching depth: (a) TE-like mode; (b) TM-like mode

增加刻蚀深度不仅能截断快轴高阶模式,还能减小TE₀₀和TM₀₀模式限制因子差异,增大TE₀₀模式比例。图4是两种模式限制因子随刻蚀深度变化的

曲线,由图可知,在任何刻蚀深度下TM₀₀限制因子都大于TE₀₀,在浅刻蚀深度时TM₀₀与TE₀₀限制因子差异较大,造成一定比例的TM₀₀模式激射,可能降低偏振度。随着刻蚀深度的增大,两模式限制因子差逐渐减小,TM₀₀模式激射比例降低,TE₀₀模式的激射比例提高,偏振度得到提升。

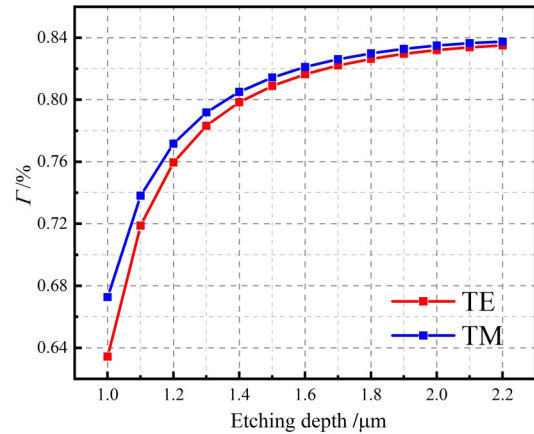


图4 TE₀₀和TM₀₀模式限制因子随刻蚀深度的变化
Fig. 4 Variation of TE₀₀ and TM₀₀ mode confinement factors with etching depth

随着刻蚀深度的增加,慢轴方向类TE和类TM模式有效折射率差逐渐增大,当有效折射率差增大到一定程度,脊型波导慢轴方向将激射高阶模式,如图5所示。类TM模式有效折射率差大于类TE模式,因此TM₀₁模式的出现早于TE₀₁模式,TM₀₁和TE₀₁激射后,两者限制因子都随着刻蚀深度增大而增大,一阶模与基模限制因子之差逐渐减小,一阶模激射比例增大,可能恶化光束质量。

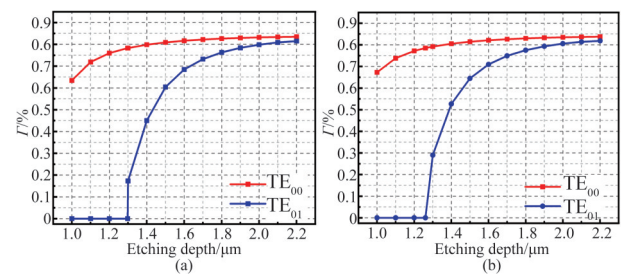


图5 TE_{0x}和TM_{0x}模式限制因子随刻蚀深度的变化:(a)类TE模式;(b)类TM模式
Fig. 5 Confinement factors of TE_{0x} and TM_{0x} modes vary with etching depth: (a) TE-like mode; (b) TM-like mode

从计算结果得知,增加刻蚀深度会抑制快轴高阶模式,提高TE₀₀模式激射比例,但同时也可能造成慢轴高阶模式激射,恶化光束质量。但实际波导中

决定模式是否激射的是模式净增益与限制因子,基于有效折射率法的数值模型只能从限制因子角度反映波导中能否存在慢轴高阶模式,并不能结合模式净增益实际模拟窄脊型波导结构中光场的传输。在实际脊型波导中一阶模式与脊型波导侧壁交叠度高,造成一阶模式散射损耗较基模更大^[11],因此窄脊型波导结构在很大程度上抑制了一阶模式。故在深刻蚀情形下,一阶模式因较大的散射损耗被抑制,增加刻蚀深度可以提升激光器偏振度与光束质量。计算得到 $3\ \mu\text{m}$ 脊型宽度下 $1.05\ \mu\text{m}$ 和 $2.2\ \mu\text{m}$ 刻蚀深度类TE模式光场分布,如图6所示。

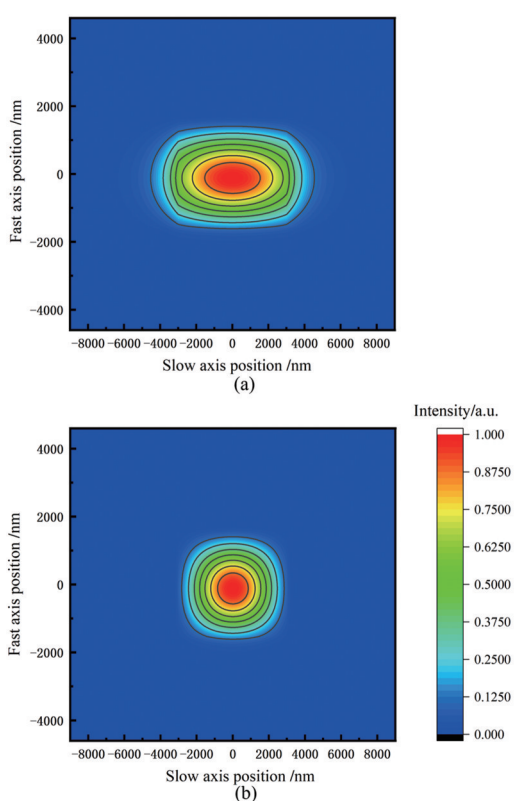


图6 类TE模式光场分布:(a) $1.05\ \mu\text{m}$ 刻蚀深度;(b) $2.2\ \mu\text{m}$ 刻蚀深度

Fig. 6 Optical field distribution of TE-like mode: (a) $1.05\ \mu\text{m}$ etching depth; (b) $2.2\ \mu\text{m}$ etching depth

慢轴模式控制的另一个方法是控制脊型宽度,当脊型宽度足够窄时,慢轴方向高阶模式将被截断,只存在基模^[12]。针对 $1014\ \text{nm}$ 工作波长,通过分析论证得知通过增加刻蚀深度, $3.0\ \mu\text{m}$ 波导宽度能实现基横模工作,但脊型宽度越窄,模式损耗越大,激光器功率越低。为进一步提升激光器亮度,在保持高偏振度与近衍射极限光束质量的前提下,尝试通过增加脊型宽度来尽可能地提升半导体

激光器的功率。在之前工作的基础上改变脊型宽度,得到仿真结果如图7所示。图7表明随着刻蚀深度和脊型宽度的增加,TE₀₀和TM₀₀限制因子差异减小,但TE₀₁与TM₀₁限制因子也随之增大,一阶模式也将激射,恶化光束质量。随着脊型宽度的增加,一阶模式与脊型侧壁重叠减小,散射损耗降低,导致一阶模式与基模损耗差异缩小,当损耗差异缩小到一定的值后将无法抑制高阶模式。

综上所述,增加刻蚀深度可以提升器件偏振度与光束质量,随着脊型宽度增加,高阶模式损耗逐渐降低,激射后降低光束质量。理论上 $3.0\ \mu\text{m}$ 脊型宽度可以兼顾脊型半导体激光器的功率、光束质量和偏振度,但适当增加脊型宽度是否能保持高偏振、高光束质量还需设计实验论证。

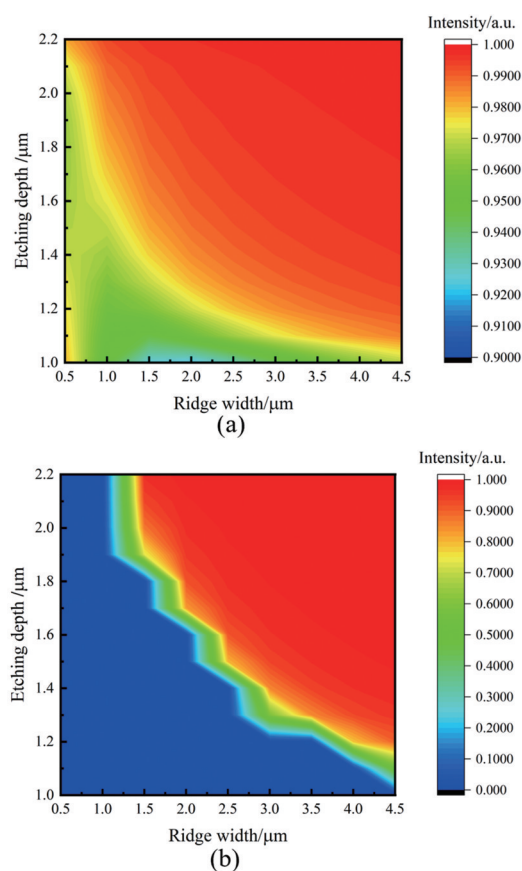


图7 类TE和类TM限制因子随刻蚀深度与脊型宽度的变化:(a)TE/TM基模限制因子比值;(b)TE/TM一阶模限制因子比值

Fig. 7 Variation of TE-like and TM-like confinement factors with etching depth and ridge width: (a) TE/TM fundamental mode confinement factor ratio; (b) TE/TM first order mode confinement factor ratio

2 器件制备及测试

外延材料采用金属有机物化学气相沉积法(MOCVD)生长,结构参数与前述模型一致。外延片生长后通过生长掩膜和光刻定义脊型区;ICP刻蚀构造脊型波导结构;生长SiO₂介质膜实现慢轴光场限制以及电绝缘;ICP刻蚀脊型上介质膜形成P电极窗口;采用电子束蒸发制备P面Ti/Pt/Au电极;经减薄抛光,电子束蒸发制备N面Ni/Ge/Au电极。制作出的3.0 μm宽脊型波导截面结构如图8所示。

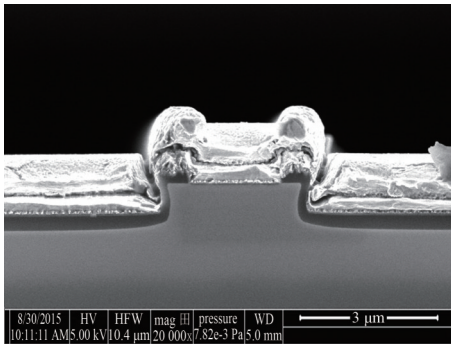


图8 脊型波导横截面扫描电子显微镜(SEM)测试图
Fig. 8 Scanning electron microscope (SEM) test image of the ridge waveguide cross section

为验证理论部分的结论,改变刻蚀深度与脊型宽度制备窄脊型波导半导体激光器,解理成前后腔反射率30%腔长6.7 mm的bar条进行测试。偏振度 K 的测量依据公式(2)。

$$K = \frac{P_{max} - P_{min}}{P_{max} + P_{min}}, \quad (2)$$

其中, P_{max} 和 P_{min} 分别为激光器偏振最大功率与偏振最小功率。

在验证刻蚀深度对窄脊型波导半导体激光器偏振度与光束质量的影响时,制备了3.0 μm脊型宽度、刻蚀深度为1.05 μm与2.2 μm的两种激光器。图9为测试获得的两种激光器的偏振度与光束质量,其中不同颜色的点代表着相同结构激光器不同单管的测试结果。图9(a)表明刻蚀深度为1.05 μm激光器的偏振度在85%~97%之间,而刻蚀深度2.2 μm激光器的偏振度在99%以上,比刻蚀深度1.05 μm激光器的偏振度更高更稳定。图9(b)表明刻蚀深度1.05 μm激光器二阶矩光束质量 M^2 在1.3~2.1之间,但刻蚀深度2.2 μm激光器二阶矩光束质量在1.1~1.2之间,2.2 μm刻蚀深度激光器比1.05 μm刻蚀深度激光器光束质量更好且更稳定。由此可见,增大刻蚀深度能优化激光器偏振度与光

束质量,提升器件稳定性。

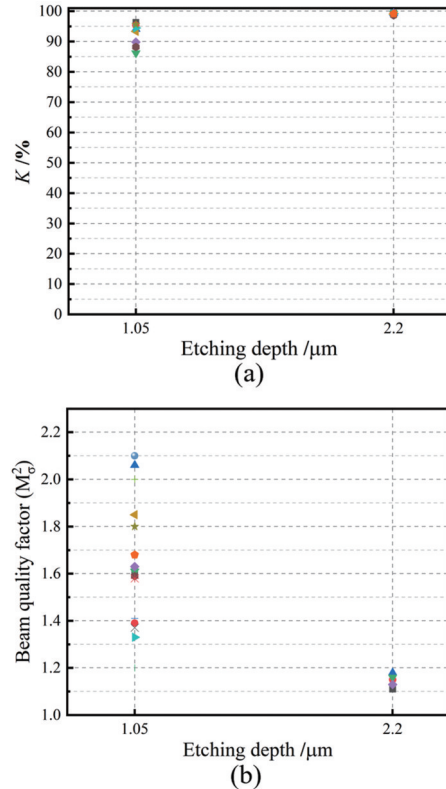


图9 不同刻蚀深度下的偏振度与光束质量:(a)偏振度;(b)二阶矩光束质量

Fig. 9 Polarization extinction ratio and beam quality at different etching depths: (a) polarization extinction ratio; (b) second moment beam quality

在测量偏振度与光束质量的同时,还测量了两种刻蚀深度激光器不同偏振态模式的近场分布,如图10所示。测试结果是在脉冲条件下通过搭建4F光学系统将腔面近场呈现在CCD上获得,其中4F系统的放大倍数约为161。图10(a)表明刻蚀深度1.05 μm激光器类TE模式为基模,而类TM模式是基模与一阶模同时存在。对于图10(b),刻蚀深度2.2 μm激光器两种偏振模式都为基模,与前述光束质量实验结果一致。与理论存在区别的是刻蚀深度1.05 μm激光器类TM模式出现一阶模式。通过测试两种刻蚀深度下的荧光分布发现,1.05 μm刻蚀深度激光器荧光束腰更宽,表明载流子扩散距离更远,因此在脊型两侧具备较高载流子浓度。脊型区因为增益被提取造成载流子浓度较低,载流子浓度差形成反波导效应^[13],增大有效折射率差,进而导致类TM一阶模式激励。

为研究不同刻蚀深度半导体激光器模式随载

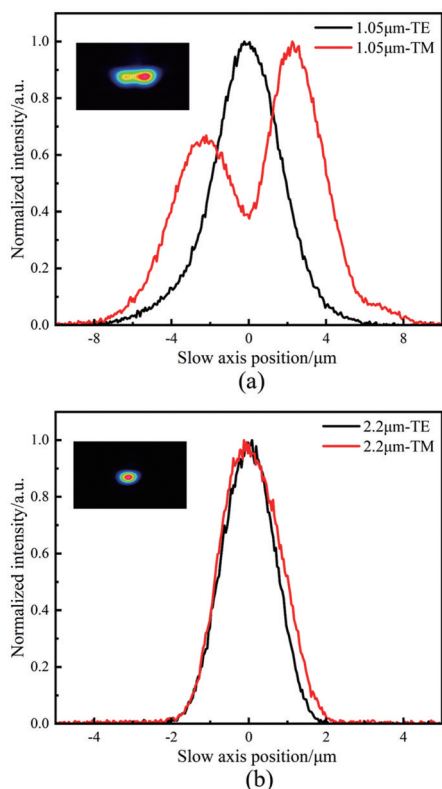


图 10 不同刻蚀深度近场模式分布:(a)1.05 μm 刻蚀深度;
 (b)2.2 μm 刻蚀深度
 Fig. 10 Distribution of near-field modes at different etching depths: (a) 1.05 μm etching depth; (b) 2.2 μm etching depth

流子浓度与结温的变化关系,测试得到不同电流下

激光器的模式分布,如图 11 所示。图 11(a)和(c)分别为刻蚀 1.05 μm 下的类 TE 和类 TM 模式在不同电流下的近场分布,图 11(b)和(d)为刻蚀 2.2 μm 情形下的近场分布。图中 0.4 A 电流下脊型电流密度为 2 000 A/cm²,1.5 A 电流下脊型电流密度为 7 500 A/cm²。对比两种刻蚀深度的结果可知,刻蚀 1.05 μm 半导体激光器随电流的变化两种偏振态模式都不稳定,而刻蚀 2.2 μm 半导体激光器类 TE 模式较稳定,类 TM 模式因反波导效应而表现出一阶模式的增强。图 12 为不同脉宽下激光器模式分布,(a)和(c)分别为刻蚀 1.05 μm 下的类 TE 和类 TM 模式在不同脉宽(结温)下的近场分布,(b)和(d)为刻蚀 2.2 μm 情形下的近场分布。脉宽越长,激光器产热越多,热量无法全部导出后将导致结温升高^[14]。由于测试激光器没有进行封装,激光器散热能力有限,0.3 μs 脉宽情形下激光器产热全被导出,结温与室温一致,而 10 μs 脉宽下激光器产热无法全部导出,结温较室温升高约 15 °C。图 12 反映出刻蚀 1.05 μm 半导体激光器随着脉冲宽度(结温)的变化两种偏振态模式都不稳定,而 2.2 μm 半导体激光器类 TE 模式稳定,类 TM 模式因结温升高、增大有效折射率差表现出一阶模式增强。变电流与脉宽实验表明,增大刻蚀深度能提升脊型波导的模式稳定性。

基于上述增大刻蚀深度对激光器性能提升的

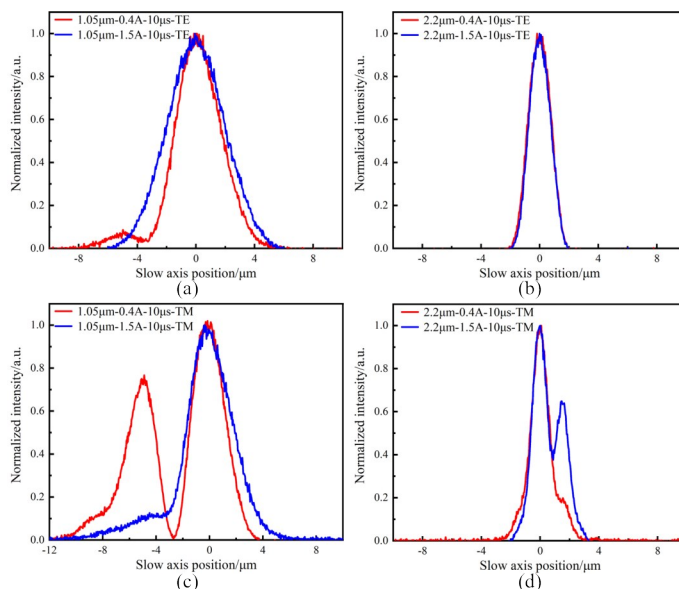


图 11 不同刻蚀深度下模式随电流(载流子浓度)的变化:(a),(c)1.05 μm 刻蚀深度类 TE、类 TM 模式近场;(b),(d)2.2 μm 刻蚀深度类 TE、类 TM 模式近场
 Fig. 11 Variation of modes with current (carrier density) at different etching depths: (a), (c) TE-like, TM-like near-field at 1.05 μm etching depth; (b), (d) TE-like, TM-like near-field at 2.2 μm etching depth

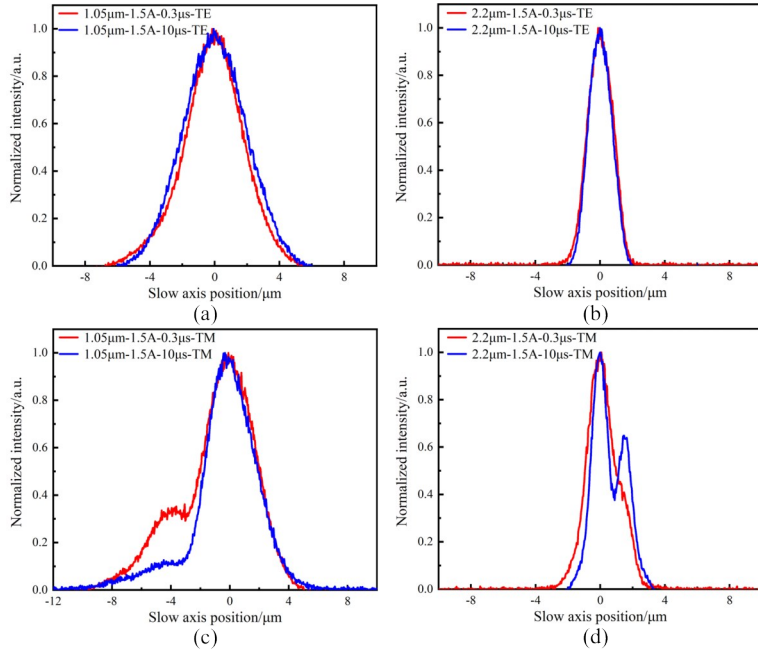


图 12 不同刻蚀深度下模式随脉宽(结温)的变化:(a),(c)1.05 μm刻蚀深度类TE、类TM模式近场;(b),(d)2.2 μm刻蚀深度类TE、类TM模式近场

Fig. 12 Variation of modes with pulse width (junction temperature) at different etching depths: (a), (c) TE-like, TM-like near-field at 1.05 μm etching depth; (b), (d) TE-like, TM-like near-field at 2.2 μm etching depth

结论,制备了刻蚀深度 2.2 μm、脊型宽度分别为 3.0 μm、3.5 μm、4.0 μm、4.5 μm 和 5.0 μm 脊型波导半导体激光器,测量得到的偏振度与光束质量数据,如图 13 所示,其中不同颜色的点代表着相同结构激光器不同单管的测试结果。图 13 (a)表明偏振度随脊型宽度的增加而降低,且脊型宽度越宽,激光器偏振度起伏越大,稳定性越差。图 13 (b)表明二阶矩光束质量随脊型宽度增加而增加,脊型宽度越宽,光束质量恶化越严重,激光器稳定性越差。偏振度与光束质量数据表明脊型宽度大于 3.0 μm 的激光器无法保持高偏振度与高光束质量激光输出,3.0 μm 脊型宽度是同时具备高偏振度、高光束质量与高功率的最优选择。

为进一步确认激光器在增大脊型宽度时性能下降的原因,测试得到 3.0 μm 和 4.0 μm 脊宽下不同偏振态模式分布,如图 14 所示。从图 14 (a)可知 3.0 μm 脊型宽度器件的两种偏振模式都为基模,而图 14 (b)中 4.0 μm 器件的两种偏振模式都存在高阶模式,且类TM模式一阶模占主导。一方面因为增大脊型宽度会降低一阶模式散射损耗,另一方面剩余载流子在脊型边缘堆积,载流子浓度过高,导致类TM模式增益显著增大^[15],加上一阶模式与剩余载流子轮廓重叠度更大,所以类TM一阶模式相

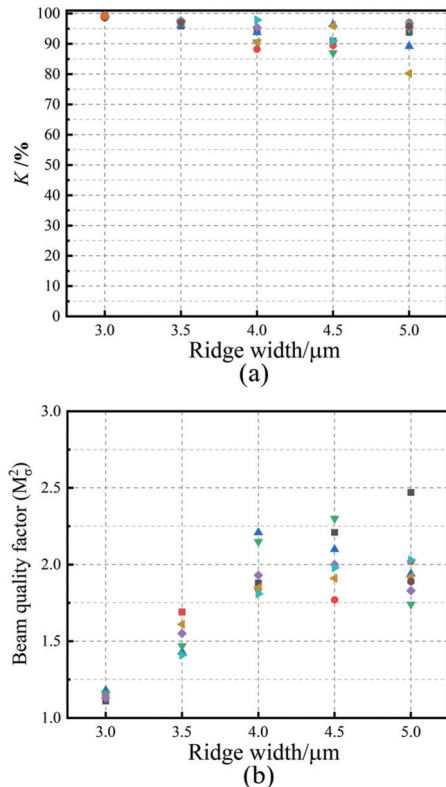


图 13 不同脊型宽度下的偏振度与光束质量:(a)偏振度;(b)二阶矩光束质量

Fig. 13 Polarization extinction ratio and beam quality under different ridge widths: (a) polarization extinction ratio; (b) second moment beam quality

比于基模增益更大,更易激射并占据主导地位。

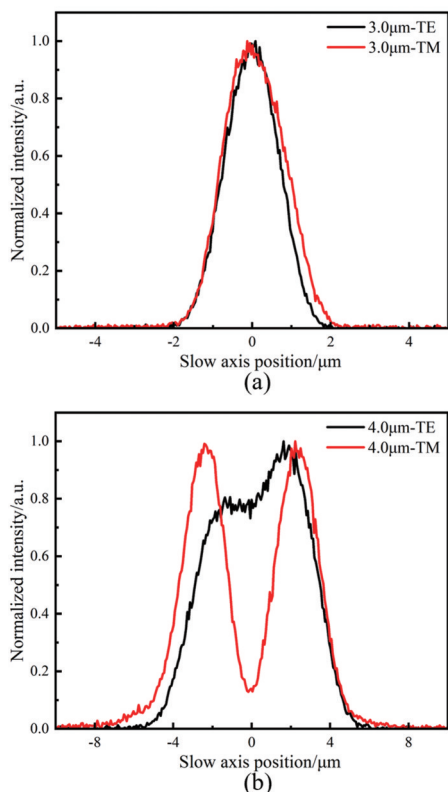


图 14 不同脊型宽度的近场模式分布:(a)3.0 μm 脊型宽度;(b)4.0 μm 脊型宽度

Fig. 14 Distribution of near-field modes with different ridge widths: (a) 3.0 μm ridge width; (b) 4.0 μm ridge width

3 结论

本文采用有效折射率法分析了窄脊型波导横向模式控制方法,从理论和实验研究了脊型波导偏振和模式之间的关系。增加刻蚀深度可以截断快轴高阶模式,减小类 TE_{00} 与类 TM_{00} 限制因子差异进而提高类 TE_{00} 激射比例,其带来的慢轴高阶模式激射会被脊型结构造成的高散射损耗抑制。因此增加刻蚀深度能使脊型波导半导体激光器工作在基横模状态下,有效提升脊型波导半导体激光器偏振度和光束质量。增加脊型宽度虽然会增大激光器功率,但也会降低高阶模散射损耗,导致高阶模式激射,降低偏振度与恶化光束质量。制备出腔长 6.7 mm、脊型宽度 3.0 μm 、刻蚀深度 2.2 μm 的窄脊型半导体激光器,通过脉冲测试得到激光器偏振度大于 99%,光束质量 M^2 因子为 1.1~1.2,且模式稳定性较好。

References

[1] Dittmar F, Sumpf B, Fricke J, et al. High-power 808-nm

tapered diode lasers with nearly diffraction-limited beam quality of $M^2=1.9$ at $P=4.4$ W [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, **18**(4):601-603.

- [2] Amann M C, Stegmüller B. Narrow-stripe metal-clad ridge-waveguide laser for 1.3 μm wavelength [J]. *Applied physics letters*, 1986, **48**(16): 1027-1029.
- [3] Levy M, Berk Y, Karni Y. Effect of compressive and tensile strain on the performance of 808-nm QW high power laser diodes [J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2006, **6104**:93-104.
- [4] Amann M C. Polarization control in ridge-waveguide-laser diodes [J]. *Applied Physics Letters*, 1987, **50**:1038-1040.
- [5] Hartl E, Amann M C. Polarization of $\lambda=1.55$ μm InGaAsP Ridge-Waveguide Lasers [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1988, **27**(Part 2, No. 1):L104-L106.
- [6] Laakso A, Dumitrescu M, Pietilä P, et al. Optimization Studies of Single-Transverse-Mode 980-nm Ridge-Waveguide Lasers [J]. *Optical & Quantum Electronics*, 2008, **40**(11-12):853-861.
- [7] Chu L, Guan B, Mi G X, et al. Investigation of single lateral mode for 852 nm diode lasers with ridge waveguide design [C]. *Semiconductor Lasers and Applications VII*, 2016.
- [8] Botez D. Analytical approximation of the radiation confinement factor for the TE_{00} mode of a double heterojunction laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1978, **14**(4):230-232.
- [9] Huang Y Z, Pan Z, Wu R H. Analysis of the optical confinement factor in semiconductor lasers [J]. *Journal of Applied Physics*, 1996, **79**(8):3827-3830.
- [10] ZHOU Kun, HE Lin-An, LI Yi, et al. Design considerations to increase the power-efficiency of a super-large-optical-cavity waveguide structure diode laser [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (周坤, 何林安, 李弋, 等. 提高超大光腔波导结构半导体激光器功率效率的设计考虑 [J]. *红外与毫米波学报*), 2022, **41**(6):958-964.
- [11] Payne F P, Lacey J P R. A theoretical analysis of scattering loss from planar optical waveguides [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1994, **26**(10):977-986.
- [12] WANG Li-Jie, TONG Cun-Zhu, WANG Yan-Jing, et al. Recent advances in lateral mode control technology of diode lasers [J]. *Chinese Optics* (汪丽杰, 佟存柱, 王延靖, 等. 半导体激光器侧向模式控制技术的研究进展 [J]. *中国光学(中英文)*), 2022, **15**(5):895-911.
- [13] Beermink K J, Alwan J J, Coleman J J. Antiguidding in narrow stripe gain-guided InGaAs-GaAs strained-layer lasers [J]. *Journal of Applied Physics*, 1991, **69**(1):56-60.
- [14] TIAN Zhen-Hua, CAO Jun-Sheng, GAO Feng-Li, et al. Junction temperature measurement of high power diode lasers [J]. *Optics and Precision Engineering* (田振华, 曹军胜, 邵峰利, 等. 准连续输出大功率半导体激光器的结温测试 [J]. *光学精密工程*), 2011, **19**(6):1244-1249.
- [15] MA Ming-Lei, WU Jian, YANG Mu, et al. Experimental characterization of polarization gain properties of 808 nm semiconductor laser and analysis of energy band based on amplified spontaneous emissions from double facets [J]. *Acta Phys. Sin* (马明磊, 吴坚, 杨沐, 等. 基于两端自发荧光辐射的 808 nm 半导体激光器增益偏振特性实验表征和能带分析 [J]. *物理学报*), 2013, **62**(17):273-278.