

引用格式: LIU Shuaicheng, LIU Hao, JIANG Chen, et al. Optimized Design of Buried Grating for InAs Quantum Dot Distributed Feedback Lasers[J]. Acta Photonica Sinica, 2026, 55(7):0714003

刘帅呈,刘昊,江晨,等. InAs 量子点分布反馈激光器的掩埋光栅优化设计[J]. 光子学报, 2026, 55(7):0714003

InAs 量子点分布反馈激光器的掩埋光栅优化设计

刘帅呈,刘昊,江晨,漆旋亮,王博建,曹帅,王俊,王琦,任晓敏

(北京邮电大学 电子工程学院 信息光子学与光通信全国重点实验室, 北京 100876)

摘 要:分布反馈激光器中光栅耦合系数 κ 的稳定性对器件单模输出和工艺可实现性具有重要影响。针对传统掩埋光栅结构中 κ 对刻蚀深度高度敏感的问题,本文提出了一种用于InAs量子点分布反馈激光器的侧向掩埋光栅结构,该结构通过将光栅置于脊型波导两侧,使侧向光栅与有源区光场产生横向耦合,从而使 κ 主要由侧向结构参数决定,可降低其对刻蚀深度及外延结构波动的敏感性。系统分析了脊波导宽度、光栅尺寸、刻蚀深度、套刻误差以及外延结构等参数对 κ 的影响规律。仿真结果表明,该侧向掩埋光栅结构在较宽工艺参数范围内能够实现稳定、可控的 κ ,并具有良好的工艺容忍性。激光器模拟结果进一步表明,基于该结构的分布反馈激光器可实现稳定的单纵模激射,整体性能与常规掩埋光栅结构相当。

关键词:量子点;分布反馈激光器;有限差分特征模式法;侧向掩埋光栅;光栅耦合系数;刻蚀容忍度

中图分类号: TN365

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20265507.0714003

0 引言

在光接入与光子集成领域,激光光源的性能和成本至关重要。受数据中心、人工智能等新兴应用驱动,高速光互联引擎亟需向微型化与低功耗演进,这对作为核心光源的半导体激光器的温度稳定性、输出功率及光谱噪声等特性提出了更为严苛的要求^[1-5]。

量子点分布反馈(distributed feedback, DFB)激光器凭借其诸多优势^[6-9],已成为高性能、低成本光芯片研发的一个重要研究方向,有潜力在未来光通信、光互连领域发挥更大的价值。目前已报道的InAs量子点DFB激光器主要采用掩埋光栅和表面光栅两类方法进行制备。掩埋光栅方案采用二次或多次外延工艺将光栅层嵌入激光器的限制层或波导层中,其优势在于光场限制能力强、耦合强度高,是实现高性能、高可靠性器件的成熟方案,且已广泛应用于InP基DFB激光器;表面光栅(如侧向光栅与脊表面光栅)方案则是制备于脊波导侧壁或表面,通常仅需一次外延,但光栅特性与工艺关联性高,高质量的器件依赖合适的工艺参数。在DFB激光器中,通常需要将光栅耦合系数(κ)与腔长(L)的乘积控制在约1-3的合理区间内,以兼顾纵模抑制能力与腔内光场分布的均匀性^[10-12]。 κL 过小会削弱光栅反馈强度,导致纵模抑制能力不足;而 κL 过大则会引起纵向光场分布不均,增强空间烧孔效应,从而诱发多模振荡和光谱性能退化。因此,合理控制 κ 的取值范围是实现稳定单模输出的关键。近年来,不少研究者就InAs量子点DFB激光器开展了研究,并取得了一系列重要进展。

在掩埋光栅型DFB激光器方面,2009年,日本东京大学团队采用GaInP/GaAs作为光栅材料结构,制备

基金项目:国家自然科学基金(62204021)、国家重点研发计划课题(2018YFB2200104)、国家创新研究群体科学基金(62021005)、信息光子学与光通信全国重点实验室(北京邮电大学)基金(IPOC2022ZT05)、高校学科创新引智计划(BP0719012)

第一作者:刘帅呈(1998—),男,博士研究生在读,主要研究方向为半导体激光器. Email: liusc@bupt.edu.cn

通讯作者:刘昊(1992—),男,讲师,博士,主要研究方向为硅基光电集成. Email: hliu@bupt.edu.cn

收稿日期: 2026-02-14; **录用日期:** 2026-04-23

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

了脊宽为 2 μm , 腔长为 400 μm 的 DFB 激光器^[13], $\kappa L=2$, 室温连续工作条件下阈值电流密度为 1875 A/cm², 斜率效率为 0.26 W/A, 边模抑制比 (side-mode suppression ratio, SMSR) 大于 45 dB, 最大输出功率为 12 mW, 但最高工作温度仅为 70°C。2011 年, 美国纽约大学团队采用 AlGaAs/GaAs 作为光栅材料结构, 制备的脊波导宽为 3 μm , 腔长为 1500 μm 的 DFB 激光器 $\kappa L=1$, 阈值电流密度为 1000 A/cm², 斜率效率为 0.24 W/A, SMSR 大于 40 dB, 最大输出功率为 8 mW, 最高工作温度仅有 40°C^[14]。2014 年, 德国柏林工业大学团队采用 GaInP/GaAs/GaInP 作为光栅材料结构, 激光器的 $\kappa L=2$, 阈值电流密度为 1830 A/cm², 最大输出功率为 34 mW, SMSR 大于 58 dB, 最高工作温度为 55°C^[15]。在表面光栅型量子点 DFB 激光器方面, 2022 年, 中山大学团队在脊波导侧壁采用非晶硅/SiO₂ 光栅结构, 最终制备得到的激光器 $\kappa L=3$, 阈值电流密度为 571 A/cm², 最大输出功率为 26.6 mW^[16]。2023 年, 中国科学院半导体研究所团队在脊波导侧壁进行浅刻蚀后沉积 SiO₂, 形成 AlGaAs/SiO₂ 侧向光栅, 并且通过对工艺参数进行系统优化, 最终制备得到腔长 1500 μm , 脊波导宽 2.1 μm 的 DFB 激光器 $\kappa L=1.5$, 阈值电流密度为 1243 A/cm², 最大输出功率超过 100 mW, SMSR 最大可达 62.6 dB, 最高工作温度超过 85°C^[17]。

鉴于商用 InP 量子阱 DFB 激光器普遍采用掩埋光栅结构, 开发基于掩埋光栅的 InAs 量子点 DFB 激光器在工艺兼容性与实用化方面具有优势。然而, 为了实现对 κ 的精确控制, 传统的掩埋光栅需要在波导或限制层中引入刻蚀停止层以严格控制光栅的厚度。这一过程对于 InP 基量子阱激光器而言可以通过 InGaAsP 轻松实现, 但是对于 GaAs 基或硅基 InAs 量子点激光器而言, 其波导和限制层结构为 GaAs、AlGaAs 等材料, 若要实现刻蚀停止, 则需引入 GaInP 等含 P 材料, 即需要额外的生长步骤, 并且对分子束外延设备有严格要求, 增加了器件的制造难度和成本。如果无刻蚀停止, 光栅厚度则由刻蚀深度决定, 刻蚀深度误差会影响 κ 值的大小。为了在无刻蚀停止层的前提下, 使得 κ 不受刻蚀深度的影响, 本研究提出了一种新型的光栅结构 (称其为侧向掩埋光栅), 将侧向光栅掩埋于脊波导两侧并靠近有源层, 利用侧向光栅与有源层光场的横向耦合机制, 使得 κ 主要取决于侧向距离而非刻蚀深度, 从而降低了 κ 对刻蚀深度的敏感度, 显著提高了 κ 的性能稳定性。同时, 该结构在制备过程中无需引入额外的刻蚀停止层, 不仅简化了外延生长与刻蚀工艺, 还避免了因刻蚀停止层可能引入的界面缺陷及额外的光吸收损耗, 有望提升激光器的输出功率与长期可靠性。

本文采用了有限差分特征模式法 (finite difference eigenmode, FDE) 和模式卷积法, 系统分析了脊波导宽度、光栅宽度、刻蚀深度、套刻误差及量子点层数等关键结构参数对 κ 的影响规律。仿真结果表明, 该结构可以显著降低 κ 对刻蚀深度和外延结构波动的敏感性, 为实现高性能、高稳定性的 InAs 量子点 DFB 激光器提供了一种有效的技术方案。需要指出的是, 本文所提出的侧向掩埋光栅结构通过横向耦合机制实现 κ 的稳定控制, 其基本原理不依赖于有源区材料的具体类型, 因此同样适用于量子阱激光器。对于量子阱激光器, 由于光场分布特性与量子点激光器相似, 该结构在降低刻蚀深度敏感性方面的优势依然存在, 具有一定的普适性。

1 实验仿真

脊波导结构可等效为三层平板波导模型^[18], 根据高阶横模的截止条件, 脊波导一阶横模的截止关系可表示为:

$$w_m = \frac{\lambda}{2\sqrt{n_{\text{eff}1}^2 - n_{\text{eff}2}^2}}$$

其中, w_m 为脊波导宽度, λ 为工作波长, $n_{\text{eff}1}$ 与 $n_{\text{eff}2}$ 分别表示脊波导区域与脊波导两侧区域的有效折射率, 上述有效折射率可基于多层平板波导理论进行计算。以图 1(a) 所示的 InAs 量子点激光器结构为例, 在激光器外延结构已确定的情况下, 其具体数值主要由脊波导的刻蚀深度所决定。根据上述理论可计算一阶横模临界条件下的脊波导宽度和刻蚀深度的关系, 如图 1(b) 所示。

从图 1(b) 中可以看出, 当脊宽较大时, 实现一阶横模截止所需的脊波导两侧有效折射率差较小, 对应的刻蚀深度较浅, 因而难以有效抑制高阶模的产生, 且刻蚀深度过浅会导致电流扩散速度加快, 降低器件的内量子效率^[19-20]。相反, 当脊宽较小时, 实现一阶模截止所需的有效折射率差显著增大, 需要更深的刻蚀深

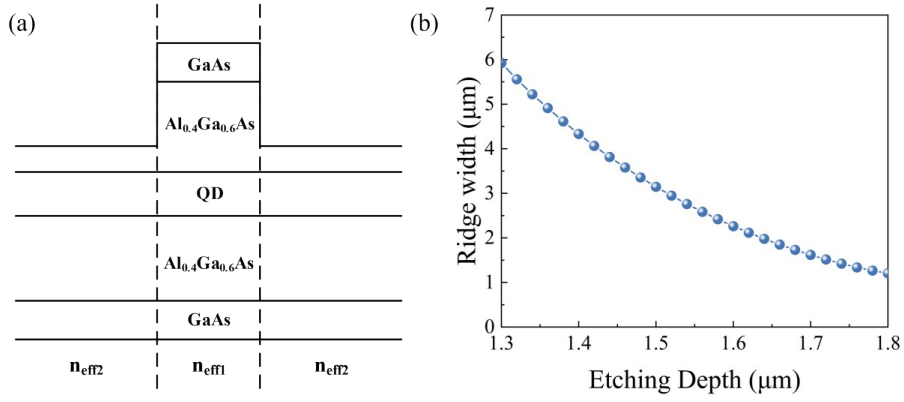


图1 (a)等效平板波导模型结构;(b)脊波导宽度和刻蚀深度的关系

Fig. 1 (a) Equivalent slab waveguide model structure; (b) Relationship between ridge width and etching depth

度,从而能够实现更强的横向模式约束,有利于获得稳定的基模激射。然而,过窄的脊宽和过深的刻蚀深度会显著增加器件制备难度并降低工艺容差。综合模式控制性能与制备工艺可行性等因素,本研究选取脊宽为2.5~5 μm的结构,用于光栅耦合特性的研究。

基于本课题组在量子点激光器方面的实验基础,本研究采用了如图2(a)所示的激光器材料结构,侧向掩埋光栅的截面如图2(b)所示,光栅位于脊波导底部两侧的灰色区域。三维结构示意图如图2(c)所示,可以看到光栅分布于脊波导两侧的沟道下方,表面被上限制层材料所掩埋。首先采用FDE仿真工具计算了不同量子点激光器结构参数下的特征模式分布,当脊波导宽度为3 μm时,激光器的光场分布如图2(d)所示。进一步地,基于模式卷积法^[21],研究了不同光栅结构参数对侧向掩埋光栅的耦合系数 κ 的影响。其中, m 是光栅阶数, γ 是光栅的占空比, n_{low} 和 n_{high} 分别代表光栅区域低、高折射率材料区域的有效折射率。

$$\kappa = \frac{2 \cdot (n_{high} - n_{low})}{\lambda} \cdot \frac{\sin(\pi m \gamma)}{m} \quad (1)$$

接下来的计算中,除研究对象外,其它的结构参数均一致:脊波导刻蚀停止于光栅层上方50 nm处,光栅占空比为0.5,背景介质为空气(折射率为1.0),网格精度为1 nm,模式数选取10个以确保基模与高阶模的准确捕获,边界条件采用金属边界层(Metal)。基本激光器结构参数如表1所列。

2 分析与讨论

首先,研究了脊波导宽度(Ridge width)对于 κ 的影响。如图3(a)所示,随着脊波导宽度从2.5 μm增加至5 μm, κ 从1.60 mm⁻¹逐渐下降至0.25 mm⁻¹,这是由于侧向掩埋光栅分布在脊波导底部两侧,随着脊波导宽度增加,光场逐渐集中在脊波导正下方,其在光栅区域分布的光场强度更少,光栅对光的反馈作用更弱。其次,研究了不同的光栅宽度(Grating width)对于 κ 的影响,结果如图3(b)所示,在侧向掩埋光栅其它参数保持不变的情况下,由于基横模光场主要分布在脊波导附近, κ 随着光栅宽度的增加逐渐达到饱和,当光栅区域宽度达到1 μm时, κ 达到饱和值0.99 mm⁻¹。

在固定光栅宽度的情况下,继续研究了不同光栅刻蚀深度(Grating depth)下 κ 的变化,如图3(c)所示。随着刻蚀深度从0逐渐增加至50 nm,各脊宽下的 κ 均呈现出先快速上升后趋于饱和的变化态势。以脊波导宽度为3 μm的结构为例,当刻蚀深度由0增加至50 nm时, κ 由0提升至1.17 mm⁻¹,这种增长源于光栅向波导核心区域的纵向延伸,使得光栅与光场的重叠部分增加。当刻蚀深度继续增加, κ 的增长速率明显放缓并进入饱和区。进一步对比不同脊波导宽度的仿真结果可以发现,脊波导宽度越大, κ 随刻蚀深度增加而进入饱和区的趋势越为明显,即达到饱和所需的刻蚀深度相对更小。

在实际制备掩埋光栅DFB激光器的过程中,通常首先采用电子束曝光(electron beam lithography, EBL)工艺制作光栅结构,随后进行二次外延;在后续的激光器制备阶段,需要通过紫外光刻机与EBL对准标记进行套刻,以确保脊波导位于光栅的几何中心。然而,受制于紫外光刻与的刻工艺精度,在该过程中不可避免地会引入一定的套刻误差(Overlay error)。由于本文提出的侧向掩埋光栅主要依靠光栅与光场的横

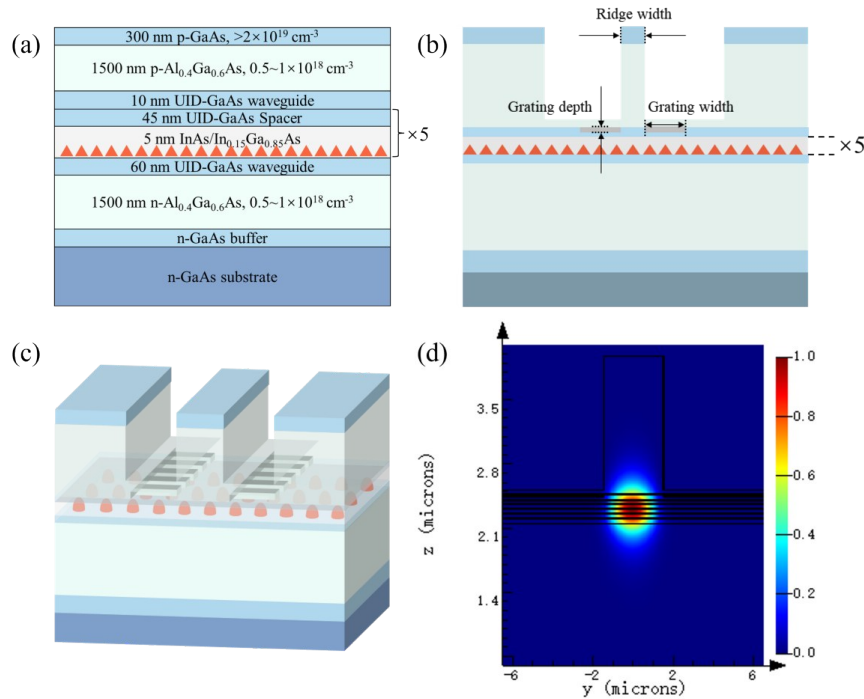


图2 (a)激光器材料结构示意图;(b)侧向掩埋光栅截面示意图;(c)侧向掩埋光栅三维结构示意图;(d)光场分布图
Fig. 2 (a) Schematic diagram of the laser epitaxial structure; (b) Cross-sectional schematic of the lateral buried grating; (c) Three-dimensional schematic of the lateral buried grating structure; (d) Optical field distribution

表1 计算采用的基本激光器光栅结构参数

Table 1 Basic laser grating structure parameters used in calculations

Parameter	Default value
Ridge width	3 μm
Remain up cladding	50 nm
Grating depth	30 nm
Grating width	5 μm
GaAs refractive index	3.41
$\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ refractive index	3.25
InAs refractive index	3.51
$\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ refractive index	3.37

向耦合来调节 κ ,必然受到套刻误差的影响,因此有必要对该类套刻误差进行仿真分析,以评估其对 κ 的影响。

在光栅刻蚀深度固定为30 nm的条件下,研究了脊波导与光栅之间套刻误差对 κ 的影响。套刻误差的结构示意如图4(a)所示,相应的仿真结果见图4(b)。结果表明,随着套刻误差的增大, κ 整体呈现单调递增的变化趋势。其物理机制可归因于:当套刻误差增大时,侧向掩埋光栅与光场的横向重叠积分不断增强,从而提升了光栅的反馈强度。当套刻误差进一步增大时,该结构逐渐逼近传统的完全掩埋光栅的情形,使得 κ 显著增大。以脊波导宽度为3 μm 的结构为例,当套刻误差由0增加至1 μm 时, κ 由0.99 mm^{-1} 提升至6.02 mm^{-1} ,表明该类结构受套刻误差影响较大。此外,对比不同脊波导的结果可知,脊波导宽度越小, κ 对套刻误差越敏感。对于脊波导宽度4 μm 以上的结构,其 κ 受套刻误差的影响明显变小在实际制备工艺中,常用紫外接触式曝光工艺的套刻精度通常可控制在约0.5 μm 以内^[22-24]。在该工艺容差范围内,对于脊波导宽度不小于3 μm 的结构,其 κ 随套刻误差的变化幅度较小。

接下来,在波导层厚度固定为60 nm的量子点有源区结构中,进一步研究了不同类型光栅的刻蚀深度对 κ 的影响。图5(a)展示了传统掩埋光栅结构中 κ 随光栅刻蚀深度变化的曲线,光栅位置与侧向掩埋光栅位置

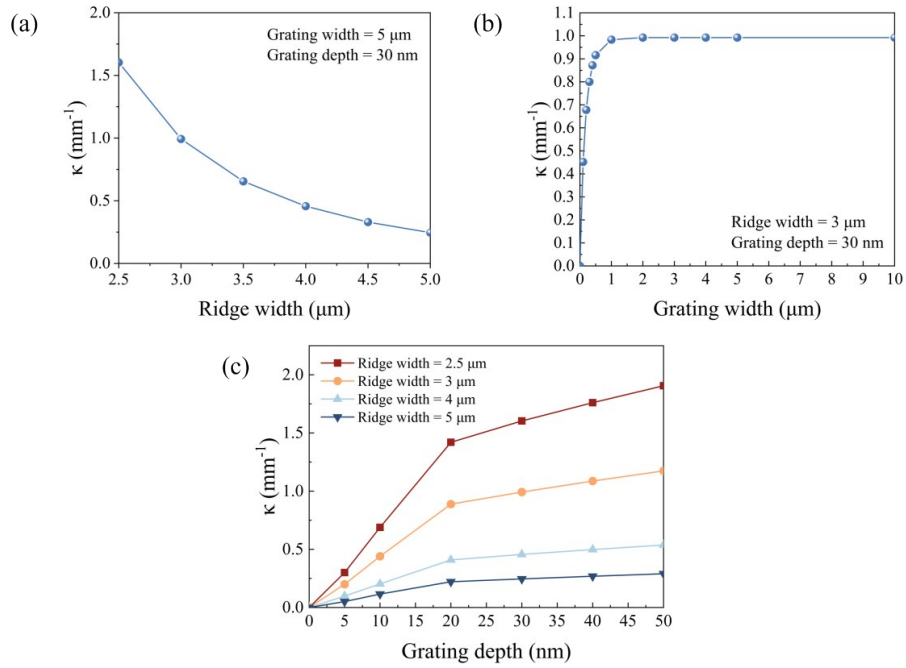


图3 不同侧向掩埋光栅的参数对 κ 的影响。(a)脊波导宽度;(b)光栅区域宽度;(c)光栅刻蚀深度
Fig. 3 Influence of different lateral buried grating parameters on κ . (a) Ridge width; (b) Grating width; (c) Grating depth

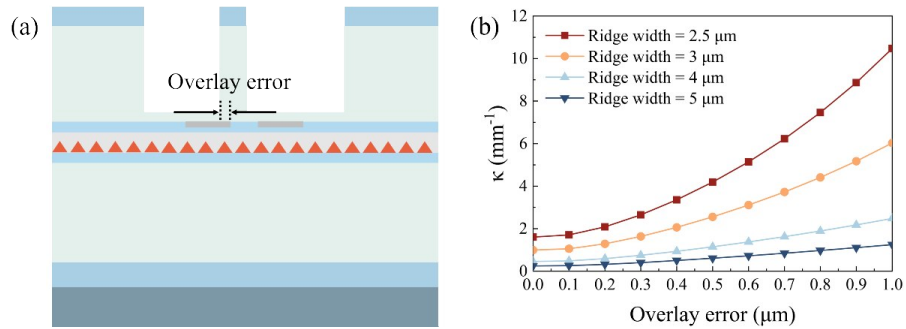


图4 (a)脊波导和侧向掩埋光栅存在套刻误差的示意图;(b)套刻误差对 κ 的影响
Fig. 4 (a) Schematic diagram of overlay error between ridge waveguide and lateral buried grating; (b) Influence of overlay error on κ

一致,均位于波导层处。可以看出,随着光栅刻蚀深度由0增加至50 nm,传统掩埋光栅的 κ 由0快速增大至18.02 mm⁻¹,表现出该类型光栅对刻蚀深度变化的高度敏感性,在实际器件的制备过程中,受刻蚀工艺波动影响较大。图5(b)红色曲线则展示了侧向掩埋光栅结构中 κ 随光栅刻蚀深度的变化关系,在相同的刻蚀深度变化范围内(0~50 nm),其 κ 仅由0单调递增至1.17 mm⁻¹,变化幅度仅为传统掩埋光栅的约6%。这一结果表明,侧向掩埋光栅受光栅刻蚀深度变化的影响远小于传统掩埋光栅结构。本研究进一步计算了不同波导层厚度(60, 100, 200 nm)条件下 κ 的变化规律。结果表明,在不同波导层厚度条件下, κ 随光栅刻蚀深度的变化趋势基本一致,均呈现出单调递增的特性。随着波导层厚度的增加, κ 的绝对值略有提高,但整体变化幅度始终较小。此外,还研究了量子点有源区层数变化对 κ 的影响,结果如图5(c)所示。当量子点层数由5层增加至8层时,不同脊波导宽度条件下器件的 κ 均仅发生缓慢变化,未表现出显著的突变特征;且随着脊波导宽度的增大, κ 对量子点层数变化的敏感性进一步降低。以脊波导宽度为3 μm的结构为例,量子点层数由5层增加至8层时, κ 仅由0.99增加至1.18 mm⁻¹。上述结果表明,无论是波导层厚度还是量子点层数的变化,侧向掩埋光栅的 κ 均表现出变化平缓、可控性良好的特征,从而验证了该结构在面对外延结构波动和刻蚀工艺偏差时所具有的稳定性的。

基于上述仿真分析,本研究给出侧向掩埋光栅结构的推荐参数组合:脊宽3~5 μm,光栅宽度5 μm,光栅

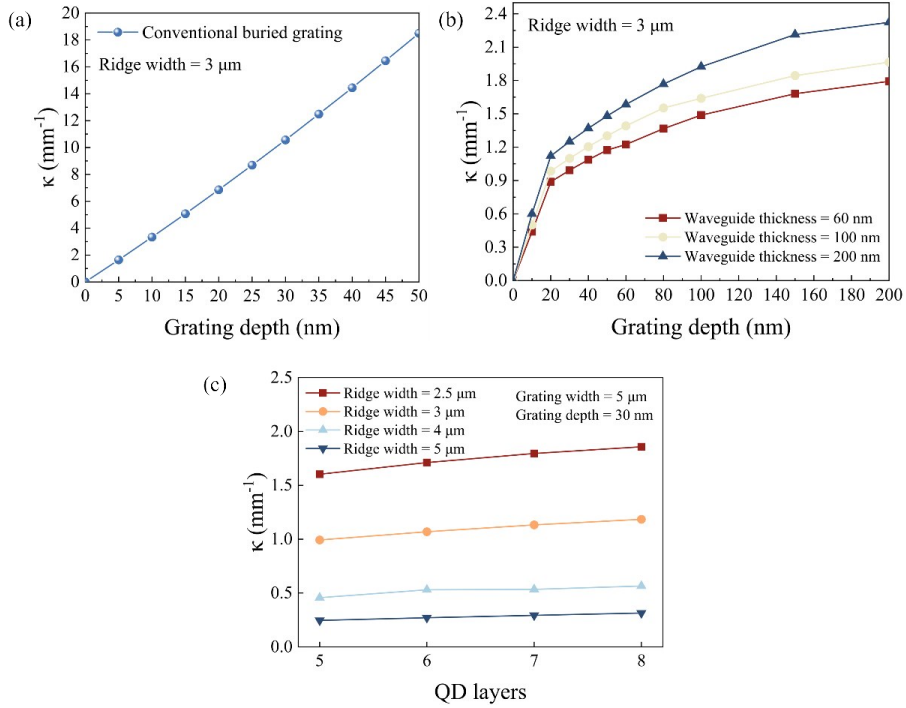


图5 (a)传统掩埋光栅厚度对 κ 的影响;(b)侧向掩埋光栅厚度对 κ 的影响;(c)量子点层数对 κ 的影响

Fig. 5 (a) Influence of conventional buried grating depth on κ ; (b) Influence of lateral buried grating depth on κ ; (c) Influence of QD layers on κ

刻蚀深度 30 nm,使得 κ 可以控制在 $1\sim 3\text{ mm}^{-1}$ 之间。该组合兼顾了耦合系数控制、工艺容差与制备可行性,可作为后续实验制备的参考依据。

最后,为探究该侧向掩埋光栅结构在保证结构与工艺容忍度优势的同时是否会对器件工作性能产生不利影响,本研究对基于该结构的DFB激光器进行了器件级的光电特性模拟。电学仿真采用漂移-扩散模型描述载流子输运过程,自洽求解泊松方程、电子与空穴的连续性方程等。腔长 1 mm、脊宽 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的DFB激光器的光功率-电流-电压(power-current-voltage, P-I-V)特性及激光光谱如图6所示,仿真结果表明,该结构能够实现稳定的激光振荡行为,并表现出良好的单纵模输出特性和较高的SMSR。且其整体性能水平与常规掩埋光栅DFB激光器相当,表明所提出的侧向掩埋光栅结构在提升工艺容忍性的同时,并未牺牲器件的基本光电性能。

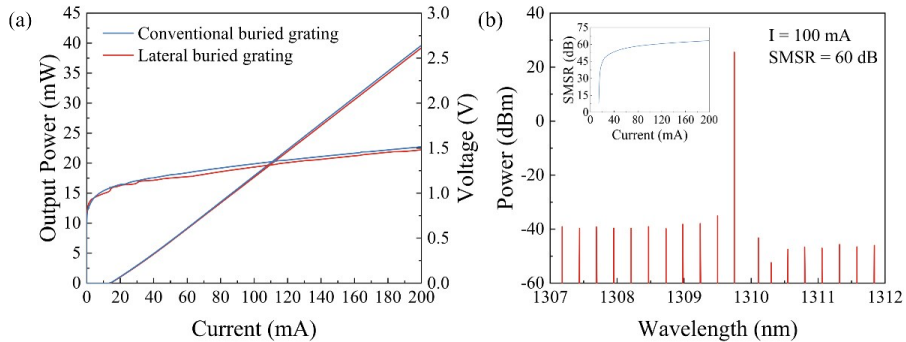


图6 (a)仿真模拟的器件P-I-V特性曲线;(b)注入电流为100 mA下的光谱,插图为SMSR随注入电流的变化曲线

Fig. 6 (a) Simulated P-I-V characteristic curves of the device; (b) Lasing spectrum at injection current of 100 mA, inset shows SMSR as a function of injection current

3 结论

综上所述,本文提出了一种InAs量子点分布反馈激光器的侧向掩埋光栅结构。仿真结果表明,该结构

通过侧向光栅与有源层光场的横向耦合机制,使 κ 主要取决于侧向距离而非刻蚀深度,显著降低了器件对刻蚀工艺波动的敏感性,即在相同的光栅深度变化范围内, κ 变化幅度仅为传统掩埋光栅的约6%。同时, κ 随脊波导宽度增加而减小,且在光栅宽度达到1 μm 时趋于饱和。尽管该结构对套刻误差具有一定敏感性,但在常规紫外曝光工艺的精度范围内,其性能较为稳定,且对波导层厚度和量子点层数的变化表现出良好的结构容忍性。这种无需额外刻蚀停止层的结构不仅简化了外延结构,还避免了刻蚀工艺的波动对器件关键参数的影响,为实现高性能、高稳定性的GaAs基或硅基InAs量子点DFB激光器提供了一种具有实用价值的技术方案。

参考文献

- [1] SHEKHAR S, BOGAERTS W, CHROSTOWSKI L, et al. Roadmapping the next generation of silicon photonics[J]. Nat. Commun., 2024, 15(1): 751.
- [2] LU Dan, YANG Qiulu, WANG Hao, et al. Review of semiconductor distributed feedback lasers in the optical communication band[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0701001.
陆丹, 杨秋露, 王皓, 等. 通信波段半导体分布反馈激光器[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0701001.
- [3] CHEN SiMing, LI Wei, WU Jiang, et al. Electrically pumped continuous-wave III-V quantum dot laser on silicon[J]. Nature Photonics, 2016, 10(5): 307-311.
- [4] LIU Shuaicheng, WANG Jun, LIU Hao, et al. Ultralow-threshold 1.3 μm InAs/GaAs quantum dot distributed feedback lasers with uniform buried grating[J]. Physica Scripta, 2026, 101(2): 025509.
- [5] WANG Jun, LIU Zhuoliang, LIU Hao, et al. High slope-efficiency quantum-dot lasers grown on planar exact silicon (001) with asymmetric waveguide structures[J]. Optics Express, 2022, 30(7): 11563-11571.
- [6] AZOUGUI S, CONG D Y, MARTINEZ A, et al. Temperature dependence of dynamic properties and tolerance to optical feedback of high-speed 1.3 μm DFB quantum-dot lasers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(9): 582-584.
- [7] DEPPE D G, SHAVRITRANURUK K, OZGUR G, et al. Quantum dot laser diode with low threshold and low internal loss[J]. Electronics Letters, 2009, 45(1): 54-56.
- [8] FATHFOUR S, MI Z T, BHATTACHARYA P, et al. The role of Auger recombination in the temperature-dependent output characteristics ($T_0 = +\infty$) of p-doped 1.3 μm quantum dot lasers[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(22): 5164-5166.
- [9] KAGEYAMA T, NISHI K, YAMAGUCHI M, et al. Extremely high temperature (220°C) continuous-wave operation of 1300-nm-range quantum-dot lasers[C]. 2011 Conference on Lasers and Electro Optics Europe and 12th European Quantum Electronics Conference (CLEO EUROPE/EQEC), May 22-26, 2011, Munich, Germany. New York IEEE, 2011: 12248755.
- [10] SODA H, KOTAKI Y, SUDO H, et al. Stability in single longitudinal mode operation in GaInAsP/InP phase-adjusted DFB lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1987, 23(6): 804-814.
- [11] WHITEAWAY J E A, THOMPSON G H B, COLLAR A J, et al. The design assessment of $\lambda/4$ phase-shifted DFB laser structures[J]. IEEE journal of quantum electronics, 1989, 25(6): 1261-1279.
- [12] CHEN T R, HSIN W. Very high power DFB CW light source at 1550 nm for high-performance supertrunking[C]. Semiconductor Lasers III. SPIE, 1998, 3547: 24-36.
- [13] TAKADA K, TANAKA Y, MATSUMOTO T, et al. Temperature-stable 10.3-Gb/s operation of 1.3- μm quantum-dot DFB lasers with GaInP/GaAs gratings[C]. Optical Fiber Communication Conference. Optica Publishing Group, 2009: JWA28.
- [14] HU Junjie, KLOTZKIN D, HUANG Jiasheng, et al. Index-coupled quantum-dot 1.3 μm distributed-feedback lasers fabricated with a combination MOCVD/MBE process[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(6): 329-331.
- [15] STUBENRAUCH M, STRACKE G, ARSENIJEVIC D, et al. 15 Gb/s index-coupled distributed-feedback lasers based on 1.3 μm InGaAs quantum dots[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(1): 011103-011103-4.
- [16] YANG Zhuohui, DING Zhengqing, LIU Lin, et al. High-performance distributed feedback quantum dot lasers with laterally coupled dielectric gratings[J]. Photonics Research, 2022, 10(5): 1271-1279.
- [17] WANG Shuai, LV Zunren, YANG Qiulu, et al. High-power, narrow-linewidth, and low-noise quantum dot distributed feedback lasers[J]. Laser & Photonics Reviews, 2023, 17(9): 2200979.
- [18] HE Wei, JIANG Zhongjun, CHEN Jingwei, et al. Numerical analysis of multilayer optical waveguide modes based on effective refractive index method[J]. Study On Optical Communications, 2023, 49(3): 60.
何伟, 蒋忠君, 陈经纬, 等. 基于有效折射率法的多层光波导模式数值分析[J]. 光通信研究, 2023, 49(3): 60.
- [19] ZHANG Naling, JING Hongqi, YUAN Qinghe, et al. High Power 1060 nm Tapered Laser[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(5): 0514002.

- 张娜玲, 井红旗, 袁庆贺, 等. 高功率 1060 nm 锥形激光器[J]. 光学学报, 2022, 42(5): 0514002.
- [20] CHANG Jinyuan, XIONG Cong, QI Qiong, et al. 1550 nm high-power fundamental transverse mode semiconductor laser and its temperature characteristics[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(7): 0714003.
- 常津源, 熊聪, 祁琼, 等. 1550 nm 高功率基横模半导体激光器及温度特性[J]. 光学学报, 2023, 43(7): 0714003.
- [21] LAAKSO A, DUMITRESCU M, VIHERIÄLÄ J, et al. Optical modeling of laterally-corrugated ridge-waveguide gratings[J]. Optical and quantum electronics, 2008, 40(11): 907-920.
- [22] HAQ A U, DJURDJANOVIC D. Robust control of overlay errors in photolithography processes[J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2019, 32(3): 320-333.
- [23] JIN Hao, QI Yuejing. Review of overlay error and controlling methods in alignment system for advanced lithography[C]. Thirteenth International Conference on Information Optics and Photonics (CIOP 2022). SPIE, 2022, 12478: 1002-1017.
- [24] LI Yanli, LIU Xianhe, WU Qiang. Evolution and updates of advanced photolithography technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922006.
- 李艳丽, 刘显和, 伍强. 先进光刻技术的发展历程与最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922006.

Optimized Design of Buried Grating for InAs Quantum Dot Distributed Feedback Lasers

LIU Shuaicheng, LIU Hao, JIANG Chen, QI Xuanliang, WANG Bojian, CAO Shuai,
WANG Jun, WANG Qi, REN Xiaomin

(State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: This study aims to design a lateral buried grating structure for InAs quantum dot (QD) distributed feedback (DFB) lasers to resolve the high sensitivity of the coupling coefficient (κ) to etching depth in conventional buried gratings. In typical GaAs-based or silicon-based QD lasers, the precise control of κ is often hindered by the lack of effective etch-stop layers, leading to significant performance instability. By positioning the grating on both sides of the ridge waveguide, this research utilizes a lateral coupling mechanism to make κ primarily dependent on lateral geometric parameters rather than vertical etching precision. The ultimate objective is to provide a fabrication-friendly design that ensures stable single-mode operation with high tolerance to process fluctuations. The investigation utilizes the finite difference eigenmode (FDE) method and the mode convolution method to analyze the impact of various structural parameters on device performance. Initially, a three-layer equivalent slab waveguide model is employed to calculate the single-mode cutoff conditions, helping to select an appropriate ridge width between 2.5 μm and 5 μm . The lateral buried grating is located in the upper waveguide layer on both sides of the ridge bottom, close to the active region. The research quantified how κ is affected by ridge width, grating width (0 to 10 μm), and grating etching depth (0 to 200 nm). Furthermore, the study evaluated the influence of overlay errors (0 to 1 μm) caused by UV lithography alignment between the grating and the ridge waveguide. Structural robustness is also assessed by simulating variations in the waveguide layer thickness (60 to 200 nm) and the number of InAs QD layers (5 to 8 layers). Finally, a device-level simulation is performed for a 1 mm cavity to characterize the optoelectronic performance. The simulation results reveal distinct physical trends and significant advantages of the lateral buried grating structure. As ridge width increases from 2.5 μm to 5 μm , κ decreases monotonically from 1.60 mm^{-1} to 0.25 mm^{-1} because the optical field becomes increasingly concentrated beneath the ridge center, reducing overlap with the lateral gratings. Regarding grating width, κ rapidly increases and saturates at approximately 0.99 mm^{-1} when the grating width reaches 1 μm , indicating that further widening beyond this value yields negligible additional feedback. Most importantly, the lateral buried grating exhibits drastically reduced sensitivity to etching depth variations compared to conventional buried gratings. Over an etching depth range of 0-50 nm, κ for the lateral buried grating increases gradually from 0 to 1.17 mm^{-1} , whereas for a conventional buried grating under identical conditions, κ surges from 0 to 18.02 mm^{-1} . Thus, the variation amplitude of κ in the proposed structure is only about 6% that of the conventional design. Furthermore, when etching depth extends to 200 nm, κ of the lateral buried grating reaches only about 1.9 mm^{-1} , still far below the

values of conventional gratings. The structure also demonstrates reasonable tolerance to overlay errors: within the typical UV lithography alignment accuracy of $0.5\ \mu\text{m}$, κ increases from $0.99\ \text{mm}^{-1}$ to approximately $1.8\ \text{mm}^{-1}$ for a $3\ \mu\text{m}$ ridge width, a moderate change that remains manageable for device design. For ridge widths of $4\ \mu\text{m}$ or larger, the overlay sensitivity is even lower. The lateral buried grating also shows excellent epitaxial robustness: when the waveguide layer thickness varies from $60\ \text{nm}$ to $200\ \text{nm}$, κ increases only slightly (e.g., from $1.17\ \text{mm}^{-1}$ to about $1.35\ \text{mm}^{-1}$ at $30\ \text{nm}$ etching depth). Similarly, increasing the number of QD layers from 5 to 8 causes κ to rise merely from $0.99\ \text{mm}^{-1}$ to $1.18\ \text{mm}^{-1}$ for a $3\ \mu\text{m}$ ridge width. Based on these analyses, a recommended parameter set (ridge width $3\text{--}5\ \mu\text{m}$, grating width $5\ \mu\text{m}$, etching depth $30\ \text{nm}$) yields κ in the range of $1\text{--}3\ \text{mm}^{-1}$, suitable for optimal DFB operation. Device-level simulations confirm that the lateral buried grating DFB laser achieves stable single-longitudinal-mode lasing with high side-mode suppression ratio (SMSR) and power-current-voltage (P-I-V) characteristics comparable to conventional buried grating designs, indicating no performance penalty. The proposed lateral buried grating structure effectively decouples the coupling coefficient κ from vertical etching depth variations, eliminating the need for etch-stop layers in GaAs-based or silicon-based InAs quantum dot DFB lasers. This design intrinsically provides high process stability and controllability, reducing κ variation to only about 6% of that in conventional buried gratings under identical etching fluctuations. The structure exhibits excellent tolerance to variations in ridge width, grating width, waveguide layer thickness, and number of QD layers, while remaining compatible with standard UV lithography overlay accuracy. Importantly, this approach does not compromise device optoelectronic performance, as verified by laser simulations showing stable single-mode operation and high SMSR. Given that the transverse coupling mechanism is independent of the specific active region material, the design is also readily applicable to quantum well lasers. This work offers a practical, high-tolerance, and fabrication-friendly solution for realizing high-performance, stable DFB lasers, facilitating the development of next-generation photonic integrated circuits and optical interconnects.

Key words: quantum dot; distributed feedback lasers; finite difference eigenmode; lateral buried grating; grating coupling coefficient; etching tolerance

OCIS Codes: 140.3490; 140.3570; 140.5960; 230.5590

CSTR: 32255.14.gzxb20265507.0714003