

文章编号 1004-924X(2026)09-1367-12

光子晶体激光器掩埋纳米孔结构自动量取

李龙基¹, 张 燕³, 陈 伟⁴, 杨 阳⁴, 罗 晨³, 肖 垚⁵,
孙正明^{2*}, 王 俊^{3,5,6*}

1. 东南大学-蒙纳士大学苏州联合研究生院, 江苏 苏州 215125;
2. 东南大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 211189;
3. 四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064;
4. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;
5. 长光华芯光电技术股份有限公司, 江苏 苏州 215163;
6. 江苏省半导体激光与传感技术重点实验室, 江苏 苏州 215163)

摘要:为实现对完整光子晶体阵列的一致性监控,单幅截面图像通常需要覆盖较大空间范围,使得单个孔结构在大视场图像中占比极小,截面图像对比度低、边界模糊且形貌复杂,显著增加了自动识别与精确量取的难度。针对该问题,提出一种面向 PCSEL 截面 SEM 图像的孔结构自动识别与几何量取方法。该方法基于语义分割模型实现孔区域的自动识别,可稳定提取不同孔型及成像条件下的孔区域掩模,实现孔结构尺寸的自动量取。实验结果表明,最终选取的语义分割模型在验证集上取得了 93% 的 IoU (F1-score 约为 95%),具备良好的孔结构封闭性与轮廓连续性;在几何量取方面,自动量取结果与人工测量结果保持良好一致,其量取不确定性相对于孔结构本身特征尺寸约为 1%~5%,在不同尺寸区间内均表现出良好的稳定性与重复性。该方法能够有效降低人工标注与逐孔量取带来的不确定性,提高参数统计效率;同时,结合阵列尺度的几何参数统计结果,该方法能够对掩埋纳米孔在横向排布方向上的尺寸一致性与局部非均匀性进行定量表征,为 PCSEL 掩埋型纳米孔结构的尺寸评估与工程化过程监控提供了一种实用的技术手段。

关键词: 半导体激光;光子晶体面发射激光器;掩埋纳米孔结构;图像表征;语义分割

中图分类号: TN248 文献标识码: A

doi:10.37188/OPE.20263409.1367 CSTR:32169.14.OPE.20263409.1367

Automatic measurement for buried nano-hole structures in photonic crystal lasers

LI Longji¹, ZHANG Yan³, CHEN Wei⁴, YANG Yang⁴, LUO Chen³, XIAO Yao⁵,
SUN Zhengming^{2*}, WANG Jun^{3,5,6*}

1. Southeast University-Monash University Joint Graduate School, Suzhou 215125, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China;
3. College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China;
4. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

收稿日期:2026-02-06;修订日期:2026-03-18.

基金项目:江苏省科技成果转化专项资金资助项目(No. BA2023053)

5. Suzhou Everbright Photonics Co., Ltd., Suzhou 215163, China;

6. Jiangsu Key Laboratory of Semiconductor Laser and Sensing Technology, Suzhou 215163, China)

* Corresponding author, E-mail: zmsun@seu.edu.cn; wjdz@scu.edu.cn

Abstract: The geometric morphology of buried nano-hole structures plays a critical role in the optical feedback characteristics and device stability of photonic crystal surface-emitting lasers (PCSELS), in which size and uniformity are key parameters for performance evaluation. In practical characterization, cross-sectional scanning electron microscopy (SEM) is commonly employed by cleaving devices along specific crystallographic directions. However, due to the buried nature of the nano-holes and the large field of view required for array-level inspection, individual holes occupy only a small fraction of the image, leading to low contrast, blurred boundaries, and complex morphologies that hinder automatic identification and accurate measurement. To address these challenges, an automatic hole identification and geometric measurement method for PCSEL cross-sectional SEM images is presented. A semantic segmentation model is employed to automatically extract hole regions under different hole geometries and imaging conditions, based on which hole dimensions are measured in a unified and automated manner. The selected model achieves an Intersection-over-Union (IoU) of approximately 93% on the validation dataset, with an F1-score of about 95%. The automatically measured results show good agreement with manual measurements, with a relative uncertainty of approximately 1%-5% across different size ranges. In addition, the proposed approach enables quantitative evaluation of dimensional uniformity and local non-uniformity of buried nano-hole arrays along the lateral direction, providing useful structural information at the array scale. These results demonstrate that the proposed method improves measurement efficiency and reliability, offering a practical tool for dimensional evaluation and process monitoring of buried nano-hole structures in PCSEL devices.

Key words: semiconductor laser; photonic crystal surface-emitting laser; buried nano-hole structure; image characterization; semantic segmentation

1 引言

光子晶体面发射激光器(Photonic Crystal Surface-Emitting Laser, PCSEL)因其优异的光束质量、高功率单模输出能力以及良好的可扩展性,在高功率半导体激光器领域受到广泛关注^[1-3]。在PCSEL器件中,掩埋光子晶体纳米孔结构的几何形貌特征(包括孔径尺寸、纵向截面形貌、形状对称性及周期一致性等)直接决定了光子晶体的有效折射率分布与能带特性,从而影响腔模的选模机制及激光波长^[3-4]。此外,大面积PCSEL阵列中,纳米孔结构在排布方向上的几何一致性是实现单模输出与稳定光束质量的关键因素。阵列内孔结构尺寸或形貌的不均匀性将引入局域模式扰动与模式竞争,限制器件的单模保持能力与功率扩展性能。因此,在器件制备与工艺优化过程中,对掩埋纳米孔结构进行准

确、稳定的几何形貌表征具有重要的工程意义^[5]。

该类纳米孔结构通常深埋于外延层内部,特征尺寸处于百纳米量级,故需通过特定晶向的解理工艺对空气孔阵列进行截面暴露。然而,在实际获得的截面SEM图像中,孔区域往往呈现对比度低、边界模糊且背景结构复杂等特点,这给传统基于人工判读的尺寸量取带来了较大的不确定性^[6]。在实际器件表征过程中,为实现对整个光子晶体阵列结构的一致性监控,截面SEM成像通常需要覆盖多个周期单元甚至完整阵列区域,以获得具有统计代表性的结构信息,这一需求使得单幅截面图像在空间尺度上显著增大,并且单个孔结构在图像中的相对尺寸与位置信息进一步被压缩,导致目标结构在图像中所占比例极小。因此,孔结构的自动识别与精确量取不仅需要应对低对比度与形貌复杂性,还需在大尺寸图像条件下保持对局部细节的分辨能力,这对

传统基于人工判读或整体图像处理的分析方式提出了更高挑战。在上述情景下,人工量取方式在效率和一致性方面均难以满足工程化统计分析的需求^[7]。

在PCSEL器件结构表征研究中,截面扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)图像已广泛应用于观察掩埋光子晶体孔结构及其外延再生长后的形貌特征。目前,已有研究通过截面SEM图像对孔结构形状、界面形貌及填充行为进行定性分析,或结合局部测量对典型孔结构尺寸进行评估^[8]。然而,这类方法多依赖人工判读或针对少量孔结构的局部分析,难以在阵列尺度上实现对孔结构几何参数的系统性统计。尽管显微图像自动识别与分割方法已在其他领域得到广泛应用^[9],但在PCSEL掩埋纳米孔结构这一特定体系中,受限于低对比度成像特征及周期阵列结构特性,仍缺乏能够直接面向截面SEM图像进行阵列一致性评估的自动量取方法。因此,在截面SEM图像条件下实现掩埋纳米孔结构的稳定自动识别,并开展面向阵列尺度的几何参数统计分析,成为当前PCSEL器件结构表征与工艺评估中亟需解决的关键问题。

本文提出了一种面向截面SEM图像的孔结构自动识别方案。该方案以语义分割模型作为核心识别工具,结合截面图像的局部特征分布特点,对原始图像进行分块处理与孔区域自动提取,从而在无需人工干预的情况下获得稳定的孔结构识别结果^[7,10-11]。基于识别得到的二值掩模,进一步通过图像处理方法提取孔结构的最外侧轮廓,为后续几何尺寸的自动量取提供统一、可重复的输入。在多组具有不同孔型、成像质量及形貌特征的截面样本上对所提出的自动识别流程进行了系统验证。该方法能够在复杂背景与低对比度条件下稳定、准确地提取孔区域,且对孔形态变化与成像质量波动具有良好的稳定性^[11]。将自动量取结果与人工标注结果进行了定量对比分析,结果显示两者在孔结构横向与纵向尺寸统计上高度一致,且系统性误差被有效压制在纳米量级范围内,显著低于孔结构特征尺寸本身,验证了该自动识别与量取流程在工程化统计分析中的可靠性与可行

性。进一步的阵列统计结果表明,该方法能够在单幅截面尺度上稳定表征孔结构沿阵列方向的尺寸一致性与局部波动特征,为工艺均匀性评估提供了有效手段。

2 掩埋纳米孔结构的自动识别

2.1 图像样本与预处理方案

本文采用的截面SEM图像样本来源于实际制备的PCSEL器件。为获得包含掩埋纳米孔结构的有效截面信息,在样品制备过程中,首先依据器件发射窗口的位置对解理区域进行选取,确保解理位置覆盖光子晶体结构所在的功能区域。随后,样品沿器件固有晶向进行解理,选取[011]晶向,以获得晶面完整性良好且包含周期性光子晶体阵列的解理面。

通过上述解理方式,可在器件内部暴露出包含掩埋空气孔结构的截面轮廓,从而形成反映孔结构真实几何形貌的断面。解理完成后,对所得解理面采用SEM进行成像,获取用于后续分析与量测的截面图像数据^[12]。由于完整解理截面的视场范围通常较大,本文在展示与分析过程中重点截取靠近光子晶体层的局部区域,该区域覆盖一个完整的光子晶体周期,作为具有代表性的结构单元,用于后续几何尺寸量取与一致性分析,如图1所示。

由于掩埋孔结构位于外延结构内部,其截面形貌在SEM图像中通常表现为对比度较低、边界模糊且随工艺条件发生变化的特征。基于上述实验数据,本文进一步开展了针对截面图像的自动识别与量取方法研究。

PCSEL截面的SEM图像通常具有较大的空间尺寸(4 092×3 072 pixel),且掩埋纳米孔结构在横向方向上呈现连续分布特征。直接对整幅图像进行自动识别会耗费大量计算资源,同时也容易受到局部对比度变化和背景噪声的影响。为兼顾计算效率与结构连续性,在预处理阶段对原始截面图像进行局部区域划分,并采用分块方式处理图像样本。原始截面SEM图像经预处理被映射为由多个局部图像块 I_k 构成的集合。其中,该映射过程对应的图像分块与尺度归一化算子在本文中统一记为 \mathcal{P} 。

$$I \rightarrow \{I_k\}_{k=1}^K. \quad (1)$$

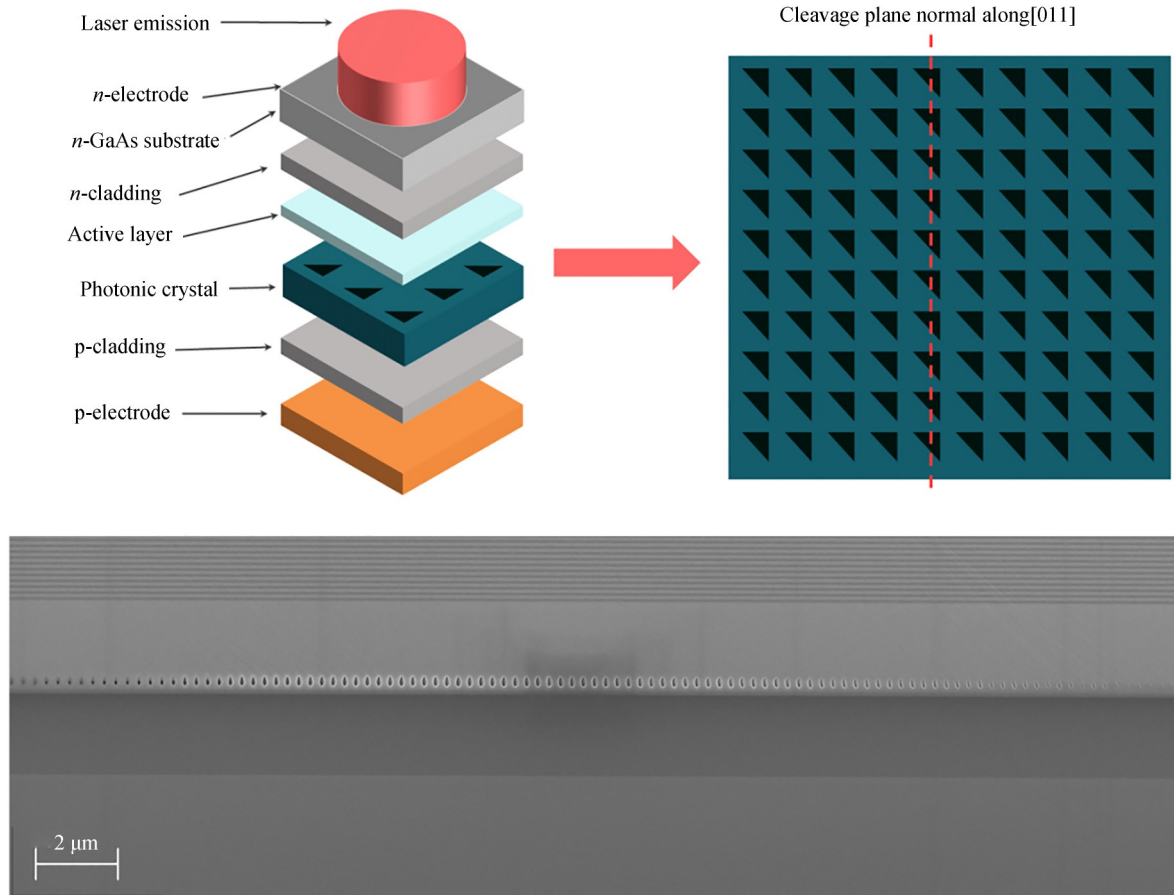


图1 PCSEL 器件结构及光子晶体阵列与截面 SEM 图像

Fig. 1 Schematic illustration of PCSEL device structure, photonic crystal array, and representative cross-sectional SEM image

具体而言,原始图像沿结构延展方向被划分为若干条带状局部区域,每个区域在保证包含完整孔结构信息的前提下,统一调整至固定尺寸范围,作为后续自动识别模块的输入。该预处理方式在降低单次计算负担的同时,有利于保持孔结构在局部窗口内的空间连续性,为后续孔区域的稳定识别与重组提供了基础。为避免局部裁剪过程中孔结构在窗口边界处被截断而导致标注信息缺失,在相邻局部区域选取时引入基于孔设计尺寸尺度的适度重叠,从而保证所有孔结构均能够在至少一个局部窗口中被完整采样。

在完成图像分块与尺度统一后,基于预处理得到的局部图像区域,进一步通过人工标注方式构建用于网络训练的标注数据集。具体而言,结合原始截面 SEM 图像中孔结构的对比度与形貌特征,对每个局部图像区域中的孔区域逐块进行人工标注,生成对应的二值掩模,用于指示孔结构在截面图像中的空间分布。该二值掩模可形

式化表示为:

$$M_x(x, y) = \begin{cases} 1, & (x, y) \in \Omega_k^{\text{hole}} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (2)$$

其中: $M_x(x, y)$ 表示第 k 个局部图像区域对应的标注掩模, Ω_k^{hole} 为该区域内掩埋纳米孔结构在截面图像中的空间投影范围,当像素点 (x, y) 位于孔结构区域内时,掩模取值为1,否则取值为0。标注基于可辨识边界并采用统一准则,以降低人为误差。最终,原始局部图像与其对应的人工标注掩模共同构成分割网络的训练样本集,为后续孔区域自动识别模型的训练与验证提供基础数据支持。

为实现对大尺寸截面 SEM 图像中掩埋纳米孔结构的自动识别,流程中引入基于语义分割的孔区域识别模块。该模块作为自动识别流程的核心组成部分,其基本结构与输入输出关系如图2所示。原始截面 SEM 图像作为网络输入,经由

编码器-解码器结构完成特征提取与重建,其中编码器用于提取不同尺度的图像特征信息,并在瓶颈层对特征进行压缩表示。随后,解码器逐级恢复空间分辨率,并通过跳跃连接融合不同尺度

特征,以增强对细节结构的表征能力。网络最终输出孔区域的二值分割结果,并以红色半透明掩模形式叠加显示在原始图像上,用于实现孔区域的直观标注与后续几何量测。

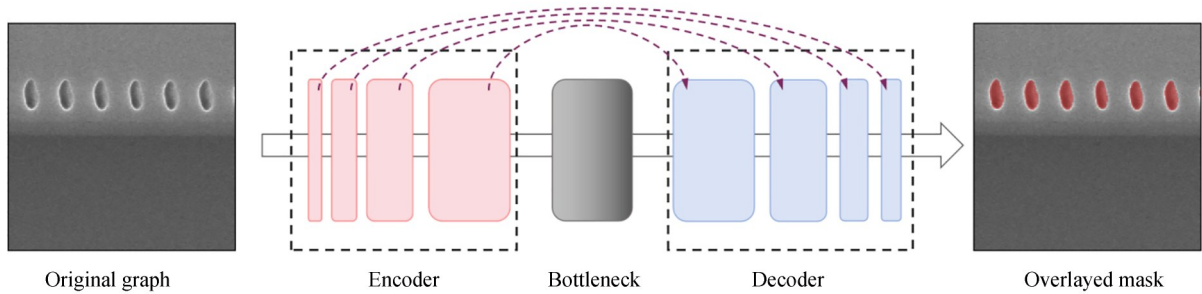


图2 自动识别流程中分割模块的网络结构及输出结果

Fig. 2 Segmentation network architecture and output results in automatic identification workflow

2.2 孔区域自动识别

现有的截面SEM图像的结构识别与尺寸测量方法,多基于人工标注或传统图像处理算法实现孔结构提取,例如借助人工辅助工具进行量取,或采用Canny等边缘检测算子进行边界识别^[13]。随着机器学习方法的发展,一些基于深度学习的分割模型(如全卷积网络、U-Net及其变体、HED等)也逐步被引入显微图像的结构识别任务中,用于提升复杂背景下的分割精度^[14-16]。

然而,上述方法多针对边界清晰或单一结构目标的图像场景,在处理PCSEL掩埋纳米孔截

面SEM图像时仍存在一定局限性。一方面,PCSEL截面SEM图像中孔结构边界对比度较低且存在模糊过渡,使得基于梯度的边缘检测方法易出现断裂或误检;另一方面,单幅图像通常包含大范围周期阵列结构,单个孔结构在图像中为小尺度目标,传统分割模型在缺乏充分上下文信息时,难以在阵列尺度上保持识别结果的连续性与一致性,典型方法在PCSEL截面样本上的识别结果如图3所示。其中,Canny与HED方法主要依赖边缘响应进行结构提取,通常需结合后续区域填充策略以获得完整目标区域。

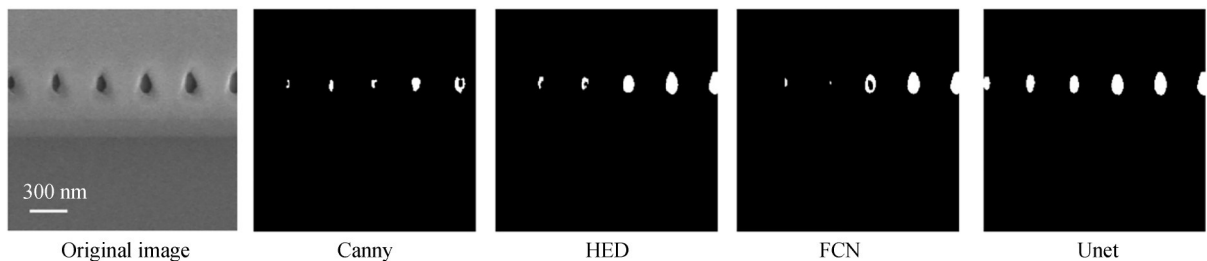


图3 不同分割方法在PCSEL截面SEM图像中的孔结构识别结果对比

Fig. 3 Comparison of different segmentation methods on cross-sectional SEM images of PCSEL buried nanohole arrays

基于上述样本特点,本文选用U-Net结构作为基础分割模型。一方面,U-Net通过编码-解码结构及多尺度特征融合,能够在低对比度与边界模糊条件下有效提升区域分割的完整性;另一方面,其跳跃连接机制有助于在保持全局语义信息的同时保留局部细节特征,适用于掩埋孔结构的精细轮廓提取^[15]。本文进一步结合孔结构在横

向方向上的周期连续性,对输入数据组织方式及网络配置进行了针对性设计(如长条裁剪策略与卷积核结构调整),以增强模型对阵列结构上下文信息的感知能力。

与传统面向单结构目标或小视场图像的识别方法相比,该方法能够在在大视场截面SEM图像中实现对周期阵列结构的稳定提取,并进一步

支持阵列尺度的几何参数批量量取与统计分析。因此,本文方法的主要特点不在于单一分割模型的改进,而在于面向周期性阵列结构的识别任务建模及其在工程量取中的整体应用框架。

在具体配置上,编码器采用逐级递进的通道设置,特征通道数随网络深度由 64 通道逐步倍增至 1 024 通道,解码阶段则对称递减,并通过跳跃连接融合多尺度特征信息。

在模型配置阶段,本文首先以标准 256×256 输入尺寸的 U-Net 作为基线模型,并在相同训练数据规模下,对不同输入裁剪与网络配置方案进行了对比评估。具体而言,针对原始宽幅截面 SEM 图像(宽度约为 4 096 pixel),分别采用小尺度裁剪(256 pixel)与长条裁剪(1 024 pixel)两种输入策略,以考察网络对横向周期结构上下文信息的利用能力。进一步尝试通过调整卷积核形状以增强对横向结构信息的感知能力,包括将部分标准 3×3 卷积核替换为 1×9 的各向异性卷积配置。

为定量评估不同自动识别配置下孔区域分割结果的准确性与稳定性,本文采用交并比(Intersection-over-Union, IoU)、精确率(P)及 F1-score 作为主要评价指标。其中,IoU 定义为预测孔区域与人工标注区域之间的交集与并集之比, P 表征预测为孔区域的像素中实际为孔区域的比例,而 F1-score 为 P 与召回率(R)的调和平均。其数学表达式分别为:

$$IoU = \frac{TP}{TP + FP + FN}, \quad (3)$$

$$P = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (4)$$

$$R = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (5)$$

$$F1 = \frac{2 \times P \times R}{P + R}, \quad (6)$$

其中: TP 、 FP 和 FN 分别表示正确识别的孔区域像素数、误识别为孔区域的像素数以及漏识别的孔区域像素数。不同输入尺度与网络配置方案在验证集上的识别性能以 IoU, Precision 和 F1-score 进行量化评估,训练轮次选取 50。对比结果汇总列于表 1 中。

从表 1 可以看出,在相同输入尺度条件下,将标准 3×3 卷积核替换为 1×9 的各向异性卷积配置,并未在 IoU 与 F1-score 等关键评价指标上带

表 1 不同输入尺度与网络配置下孔区域自动识别性能对比

Tab. 1 Performance comparison of hole-region identification under different input scales and network configurations

配置	IoU	Precision	F1-score
256, U-Net	0.845	0.884	0.898
256, 1×9	0.833	0.912	0.882 7
1 024, U-Net	0.878	0.961	0.929
1 024, 1×9	0.876	0.972	0.927
1 024, VGG16	0.931	0.981	0.958

来显著提升。该结果表明,对于掩埋型纳米孔周期结构,仅通过改变局部卷积核形状以增强横向感受野,对整体识别性能的改善作用有限。相比之下,数据横向分割尺度的调整对识别结果具有更为显著的影响。随着分割长度由 256 pixel 扩展至 1 024 pixel,模型在孔区域封闭性、轮廓连续性以及跨周期一致性方面均表现出更稳定的识别效果。这说明在处理沿横向周期性排布的孔结构时,引入更大范围的上下文信息,有助于提升模型对整体结构规律的理解能力。

在综合考虑识别精度提升效果与计算效率的前提下,本文最终采用通过调整样本分割长度来增强上下文信息利用能力的策略,而非进一步复杂化卷积核配置,以实现掩埋孔结构的稳定自动识别。

为进一步提升模型对复杂孔结构形貌的表达能力,本文在保持 1 024 pixel 输入策略不变的前提下,将 U-Net 的编码器主干网络由基础卷积模块升级为 VGG16 结构,以增强特征提取深度与多尺度语义表达能力。该配置在验证集上表现出更高的识别稳定性与边界一致性,其孔区域分割结果的 IoU 指标可稳定达到约 93% 的水平,满足后续几何尺寸统计与一致性分析对识别精度的工程要求。

本文在后续孔结构自动识别与几何量取分析中,统一采用基于 VGG16 主干、1 024 pixel 输入尺度的 U-Net 模型配置作为最终自动识别模块,其输出的二值掩模结果为孔轮廓提取与几何参数计算提供了稳定、可重复的结构边界描述。

2.3 孔区域自动识别结果

在确定自动识别模块的训练轮次与输出形

式后,有必要对其在不同截面SEM图像样本中的识别效果进行直观展示,以评估其对不同孔结构形态与成像条件的适应性。为此,本文选取多组具有代表性的截面SEM图像样本,对应不同孔形态与对比度条件,对自动识别模块的输出结果进行可视化展示。

图4给出了自动识别模块在不同截面SEM图像样本中的识别结果示例。在不同孔形态及成像条件下,自动分割结果均能够较为完整地识别掩埋孔区域,并保持良好的边界连续性与区域封闭性,从而为后续孔结构几何量取与统计分析提供稳定且一致的输入条件。

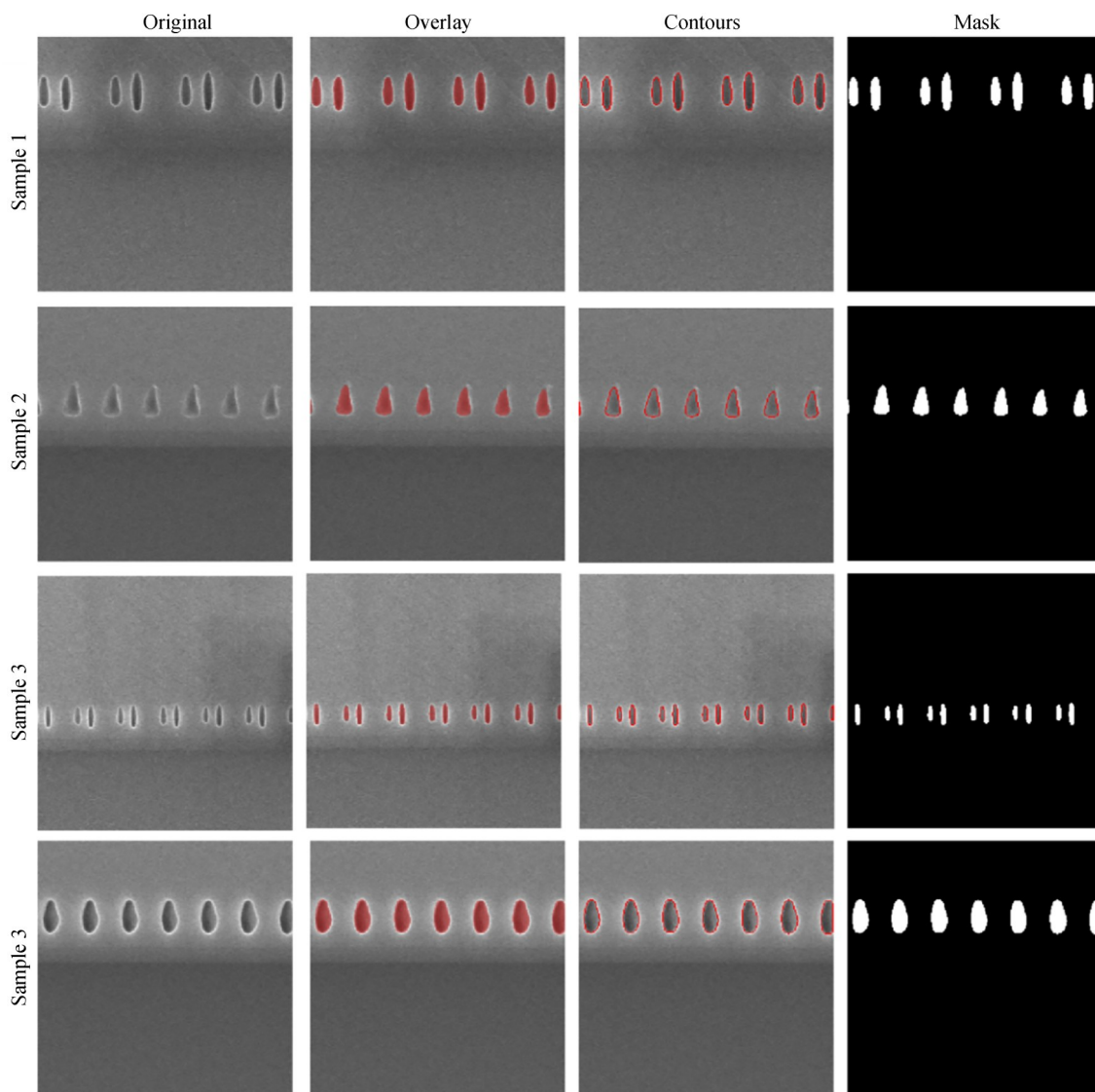


图4 不同样本截面图像的自动分割结果示例

Fig. 4 Examples of automatic segmentation results for cross-sectional images of different samples

3 自动分割结果的可视化验证

在获得稳定的孔区域自动识别结果后,本文进一步基于自动识别掩模实现了孔结构几何尺寸的自动量取。如图5所示,自动识别得到的孔

区域以红色半透明掩模形式叠加于原始截面图像上,其外侧轮廓反映了孔结构在截面中的主要几何边界。本文进一步对每个孔区域提取其外接边界框,并以该边界框在截面平面内的横向与纵向尺寸分别定义孔结构的横向尺寸与纵向尺

寸。对应的自动量取结果以青色矩形框的形式在图中标示(彩图见期刊电子版)。

为评估自动量取结果的可靠性,本文采用人工量取方式对相同孔结构的几何尺寸进行独立测量。人工量取基于 SEM 获取的截面图像完成,并遵循与自动量取一致的几何定义。如图 5 所示,人工量取过程基于原始截面 SEM 图像,结合图像标尺信息对孔结构的几何边界逐一进行人工框选,并以绿色矩形框表示人工量取得到的孔结构外接区域。与此同时,自动量取过程基于自动识别得到的孔区域掩模(红色区域),并以其外侧的青色矩形框标示自动量取得到的外接边界框。需要指出的是,人工量取与自动量取在几何定义上保持一致,均基于孔结构在截面图像中的外接边界进行尺寸定义,从而保证两种量取方式在几何意义上的可比性。

图 5 给出了孔结构横向尺寸与纵向尺寸的自动量取结果与人工测量结果之间的对比散点图,其中虚线表示理想一致性关系。大多数数据点分布于一致性线附近,表明基于自动识别掩模与外接边界框的自动量取结果与人工量取结果在数值层面具有良好一致性。

为进一步定量评估自动量取结果在不同测量方向上的误差分布特性,表 2 统计分析了各样本中横向与纵向尺寸的测量误差,给出了对应的平均误差与最大误差。统计结果表明,在所分析的样本范围内,自动量取在两个方向上均表现出稳定的误差水平,其误差量级与截面 SEM 成像条件下人工量取的不确定性相当,进一步验证了所提出自动量取方法的可靠性。

表 2 自动量取与人工量取结果的一致性误差统计

Tab. 2 Statistical errors between automatic and manual measurements (nm)

Sample	测量方向	平均误差	标准差 σ
1	Width	0.87	1.94
1	Height	3.13	3.2
2	Width	1.17	2.17
2	Height	3.58	2.88
3	Width	1.48	2.77
3	Height	4.11	3.43
4	Width	0.21	0.21
4	Height	3.87	3.15

实验选取具有代表性的 4 组 PCSEL 截面样本进行量取分析,其孔结构横向与纵向尺寸分布范围较宽,同时覆盖了不同的阵列周期参数。具体而言,所涉及样本的光子晶体周期主要集中在约 277, 282 及 287 nm 等典型设计范围内,对应孔结构的横向尺寸覆盖约 40~150 nm,纵向尺寸覆盖约 150~230 nm,代表器件制造过程中常见的不同孔尺寸情形。

上述样本不仅在尺寸尺度与周期参数上具有一定分布跨度,其孔结构形貌亦呈现出明显差异。除常规三角孔结构外,部分样本中孔结构为椭圆-圆构型,其整体尺寸更小、轮廓清晰度下降,给孔区域识别与几何量取带来了更高难度。本文所采用的自动识别与量取方法在上述不同构型及不同周期参数样本上均能够稳定提取孔区域并获得一致的尺寸量取结果,表明该方法不依赖于特定孔型先验假设,对非理想及工艺演化导致的孔形态变化具有良好的适应性。

上述样本在较宽尺寸区间及不同周期条件下的分布,为评估自动量取方法在不同结构参数条件下的适用性与稳定性提供了有效的工程尺度参照。对于全部测量孔结构的横向尺寸,自动量取结果相对于人工测量的平均偏差为 -0.8 nm,标准差为 2.0 nm;对于纵向尺寸,平均偏差为 -2.8 nm,标准差为 4.0 nm。上述偏差量级远小于孔结构本身的特征尺寸范围,且在不同尺寸区间及不同周期条件下未观察到随尺度变化的系统性偏移,表明自动量取方法在不同结构尺度条件下均表现稳定。

在完成单孔几何尺寸量取的一致性验证后,为进一步获得对整列光子晶体阵列具有代表性的结构信息,本文基于长条分割策略得到整列孔区域掩模,对孔结构沿横向的周期一致性与形貌波动进行统计分析。具体而言,首先对掩模中每个孔单元提取其投影面积 A_i 等效孔径 D_i 及质心位置 (x_i, y_i) ,并由相邻质心间距得到局部周期 $p_i = x_{i+1} - x_i$ 。随后按横向位置排序绘制为一维序列,可直观反映阵列在横向方向上的周期一致性。

如图 6(a)和 6(b)所示,选取两组具有代表性的不同放大倍数的 282 nm 周期 PCSEL 截面

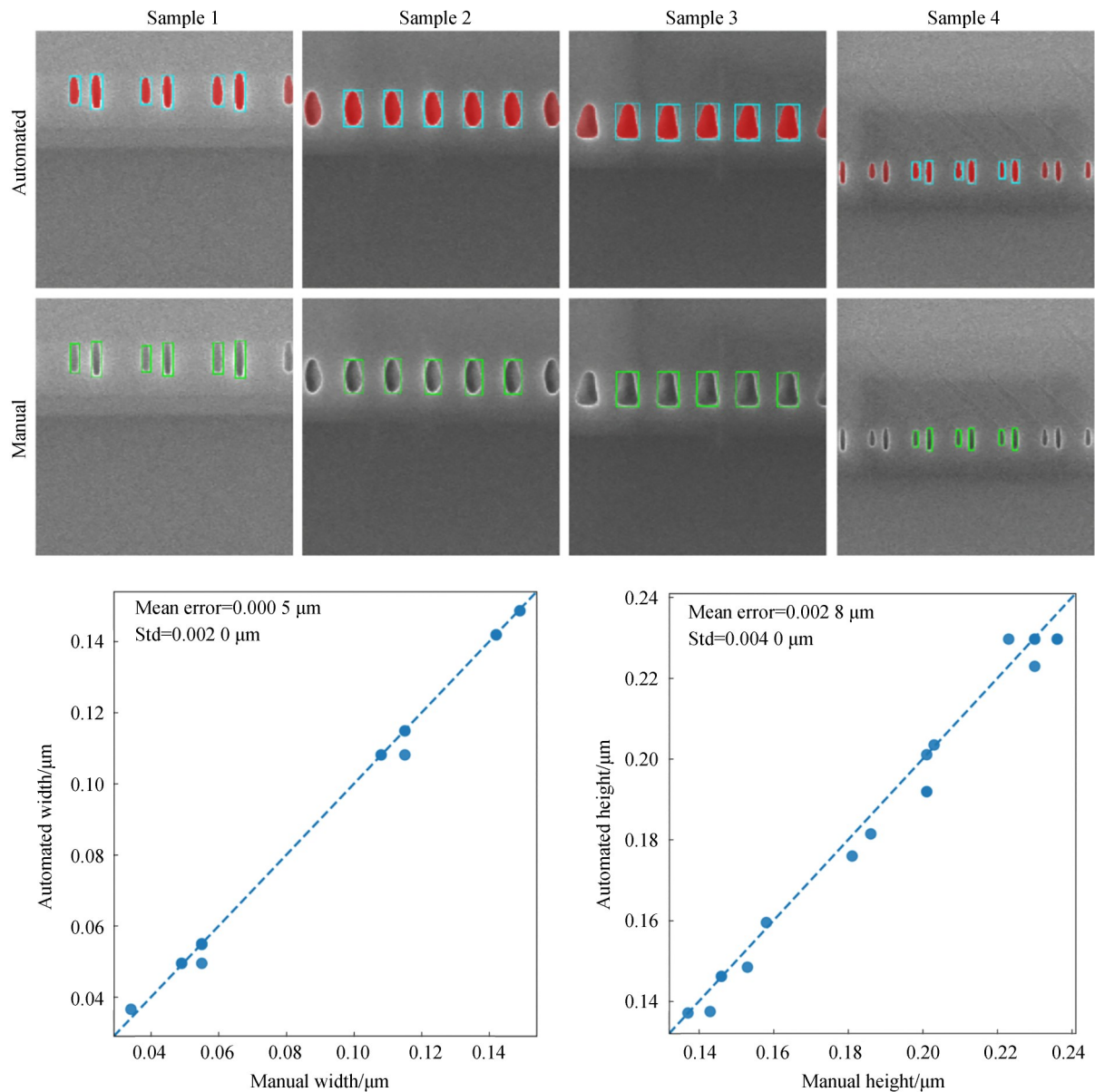


图 5 孔结构几何尺寸的自动量取与人工量取对比

Fig. 5 Comparison between automatic geometric measurement and manual measurement of hole structures

SEM 样本,对自动识别得到的孔区域二值掩模沿横向拼接,形成覆盖多个周期单元的长条视图。该处理方式在保持单孔识别精度的基础上,能够直观反映整个阵列中孔结构的分布情况。在阵列主体区域内,孔结构沿横向呈现出规则、连续的周期性排列,而在阵列边缘或个别位置处,孔结构形貌存在一定程度的不均匀性。基于上述掩模结果,本文进一步利用连通域的几何质心(centroid)确定各孔结构的中心位置,并据此计算相邻孔中心之间的局部周期

参数 p_i 。该参数反映了阵列中相邻周期单元的实际间距,如图 6(c)和 6(d)所示。结果表明,在大部分阵列区域内, p_i 在设计周期附近呈现出相对稳定的分布,体现出良好的横向周期一致性;同时,局部周期在相邻孔之间呈现出规则的上下交替波动。这一特征反映了在该类椭圆-圆型 PCSEL 截面投影条件下,单个周期单元内孔结构尺寸呈现“大-小”的稳定配对关系,从而体现出周期内部相邻孔之间良好的结构一致性与重复性。

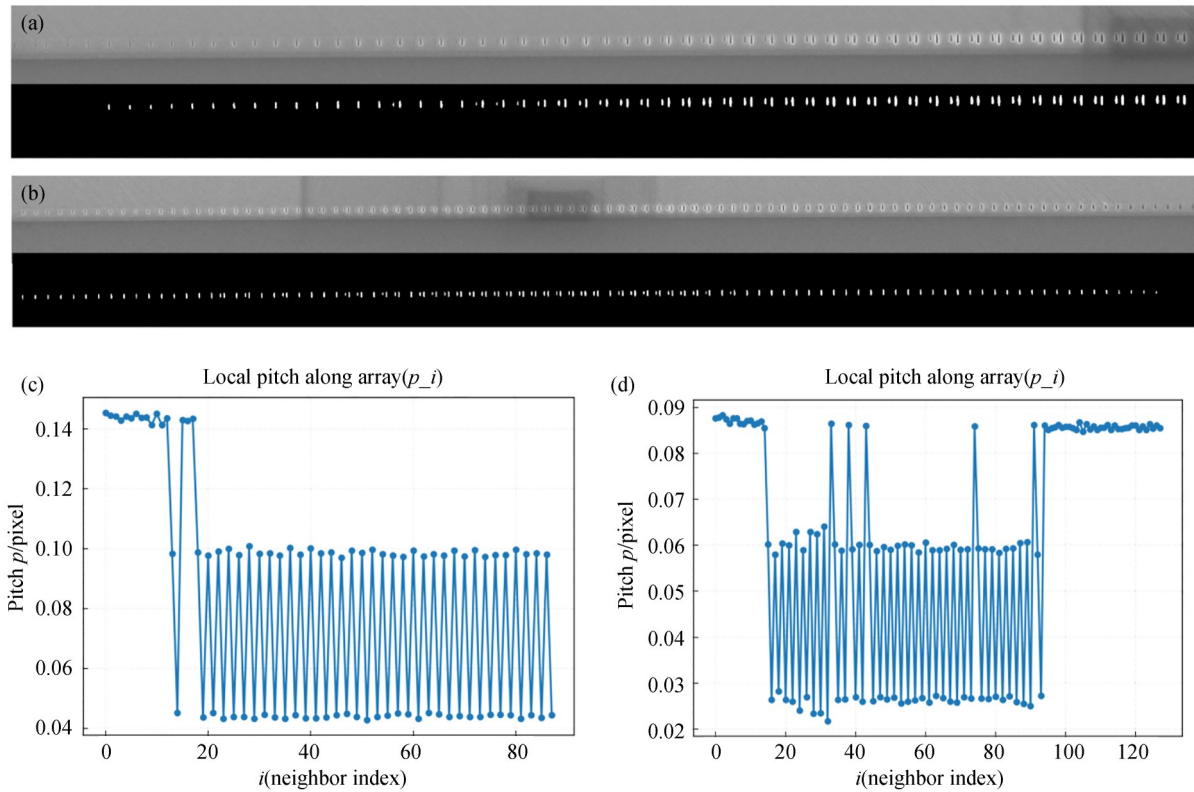


图 6 PCSEL 阵列截面中孔结构横向周期一致性分析

Fig. 6 Analysis of lateral periodicity of buried air-hole arrays in PCSEL cross-sectional

需要指出的是,在阵列的起始与末端区域,以及个别局部位置处, p_i 出现了明显偏离主体分布范围的异常点。这类异常通常对应掩埋孔在外延生长过程中发生的形貌演化差异,例如孔结构未完全闭合、局部生长速率不均匀,或由于截面倾斜导致的投影几何偏差等因素,反映出实际器件结构在阵列尺度上的真实非均匀性。进一步地,以 Sample 2 为例,在阵列中部约第 20~40 个周期单元内,同样 p_i 出现连续的大幅异常波动,明显偏离相邻区域的稳定分布特征。结合截面形貌分析可推测,该区域内原本应呈现椭圆-圆配对关系的周期单元构型发生了局部破坏。其中,尺寸较小的圆形纳米孔在外延生长过程中可能被完全填充或显著收缩,从而导致周期内部“大-小”结构关系消失。这一现象表明,外延生长条件在该区域未能有效维持设计的周期单元构型稳定性。

上述结果表明,基于自动识别掩模的阵列级统计分析能够从周期参数对阵列一致性进行协同表征。周期参数 p_i 反映孔结构在空间排布

上的规律性,异常区域表现与实际观察出良好的一致性,即周期失配往往伴随着孔的闭合和生长缺陷,从而指示局部结构退化或生长不稳定区域。该方法不仅能够验证阵列整体的一致性,还能够对局部异常进行灵敏定位,为外延工艺优化与过程监控提供更加全面且可靠的定量依据。

4 结 论

本文针对 PCSEL 截面显微图像中掩埋纳米孔结构人工量取效率低、重复性受限的问题,提出了一种基于自动识别与几何量取相结合的工程化分析方法。通过对大视场截面 SEM 图像进行预处理与横向分块输入,引入基于语义分割的孔区域自动识别模块,实现了对掩埋孔结构区域的稳定提取,并完成了孔结构横向与纵向尺寸参数的自动量取与统计分析。在保持与人工量取一致的几何定义前提下,该方法实现了孔结构尺寸参数的统一与自动化计算。通过与人工测量结果的系

统对比验证,自动量取结果在数值层面与人工量取结果保持良好的一致性。定量分析表明,孔结构横向尺寸的平均偏差为 -0.8 nm ,标准差为 2.0 nm ;纵向尺寸的平均偏差为 -2.8 nm ,标准差为 4.0 nm 。上述偏差量级显著小于孔结构本身的特征尺寸尺度,且在不同尺寸区间与样本条件下未观察到明显的系统性偏移,表明所提出的自动量取方法具有良好的稳定性与重复性,其量取精度能够满足当前PCSEL器件设计与制造过程中对几何参数的工程需求。进一步地,基于自动识别得到的孔结构掩模,本文实现了阵列中各孔结构几何中心位置及相邻孔间距的自动提取与批量统计分析。其中,孔结构中心位置通过连通域的几何质心计算获得,用于构建阵列的空间分布与周期关系。通过对阵列尺度上孔中心位置及局部周期参数的横向分布特征进行分析,可以直观揭示周期单元内部椭圆-圆孔结构的稳定配对关系,以及阵列起始、末端或局部区域内出现的周期失配与结构异常现象。实验结果表明,该方法不仅能够验证周期结构在整体上的一致性,还能够有效捕捉由外延生长条件变化引起的局部形貌退化或周期破坏区域,为器件结构一致性评估与工艺过程监控提供了定量依据。

参考文献:

- [1] NODA S, INOUE T, YOSHIDA M, *et al.* High-power and high-beam-quality photonic-crystal surface-emitting lasers: a tutorial[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2023, 15(4): 977.
- [2] YOSHIDA M, KATSUNO S, INOUE T, *et al.* High-brightness scalable continuous-wave single-mode photonic-crystal laser[J]. *Nature*, 2023, 618(7966): 727-732.
- [3] NODA S, KITAMURA K, OKINO T, *et al.* Photonic-crystal surface-emitting lasers: review and introduction of modulated-photonic crystals[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(6): 4900107.
- [4] LIANG Y, PENG C, SAKAI K, *et al.* Three-dimensional coupled-wave model for square-lattice photonic crystal lasers with transverse electric polarization: a general approach[J]. *Physical Review B*, 2011, 84(19): 195119.
- [5] REUTERSKIÖLD HEDLUND C, MARTINS DE PINA J, KALAPALA A, *et al.* Buried InP/airhole photonic-crystal surface-emitting lasers[J]. *Physica Status Solidi (a)*, 2021, 218(3): 2000416.
- [6] LEE H B, JUNG M H, KIM Y H, *et al.* Deep learning image segmentation for the reliable porosity measurement of high-capacity Ni-based oxide cathode secondary particles[J]. *Journal of Analytical Science and Technology*, 2023, 14(1): 47.
- [7] BISWAS M, PRAMANIK R, SEN S, *et al.* Microstructural segmentation using a union of attention guided U-Net models with different color transformed images[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13: 5737.
- [8] MCKENZIE A F, KYAW A M, GERRARD N D, *et al.* Kinetic influences on void formation in epitaxially regrown GaAs-Based PCSELS[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2023, 602: 126969.
- [9] REILLY K J, KALAPALA A, YEOM S, *et al.* Epitaxial regrowth and hole shape engineering for

综上所述,本文提出的基于自动识别的掩埋纳米孔结构量取与统计分析方法,能够在无需人工逐孔标注的情况下,实现对孔结构几何尺寸及阵列一致性的高效、稳定评估,显著提升了参数统计的效率与可重复性。该方法为PCSEL掩埋纳米孔结构的尺寸评估、阵列一致性分析及制造过程监控提供了一种可靠的技术手段,并为后续结合截面显微图像开展三维结构重构与工艺优化分析奠定了基础。

作者贡献声明:

李龙基:论文构思,方法论开发,软件实现,数据管理,形式分析,可视化呈现,初稿写作;

张燕:实验设计,调查研究,数据整理与分析;

陈伟、杨阳:数据分析,结果验证;

罗晨:实验支持,数据整理;

肖焱:方法指导,研究实施协调;

王俊:论文构思,研究指导,项目管理,获取资助,论文审核与编辑;

孙正明:研究指导,项目管理,论文审核与修改。

- photonic crystal surface emitting lasers (PCSELs) [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2020, 535: 125531.
- [10] BAJCSY P, FELDMAN S, MAJURSKI M, *et al.* Approaches to training multiclass semantic image segmentation of damage in concrete[J]. *Journal of Microscopy*, 2020, 279(2): 98-113.
- [11] DECOST B L, HOLM E A. A computer vision approach for automated analysis and classification of microstructural image data [J]. *Computational Materials Science*, 2015, 110: 126-133.
- [12] GOLDSTEIN J I, NEWBURY D E, MICHAEL J R, *et al.* *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*[M]. Springer, 2017.
- [13] CANNY J. A computational approach to edge detection[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, PAMI-8(6): 679-698.
- [14] LONG J, SHELHAMER E, DARRELL T. Fully convolutional networks for semantic segmentation[C]. *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). June 7-12, 2015, Boston, MA, USA.* IEEE, 2015: 3431-3440.
- [15] RONNEBERGER O, FISCHER P, BROX T. U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation[C]. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention-MICCAI 2015.* Cham: Springer, 2015: 234-241.
- [16] XIE S N, TU Z W. Holistically-nested edge detection [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2017, 125(1): 3-18.

作者简介:



李龙基(1999—),男,硕士研究生,主要从事半导体光子器件结构表征与三维重构研究,研究方向包括光子晶体表面发射激光器(PCSEL)结构建模、器件仿真及图像处理算法等。E-mail: 220234945@seu.edu.cn

通讯作者:



孙正明(1964—),男,东南大学首席教授,博士生导师,现任材料学院学术委员会主任,先后在东南大学、中国科学院金属研究所完成本科与硕士培养,并在中国科学院金属所与维也纳大学联合培养获得博士学位,长期从事复合材料、金属间化合物及先进陶瓷研究。E-mail: zmsun@seu.edu.cn

通讯作者:



王 俊(1965—),男,教授,博士研究生导师,先后在天津大学、中国科学院金属研究所、Queen's University 及 McMaster University 完成学士、硕士及博士阶段学习,主要研究方向包括半导体激光器芯片(EEL)、激光无线能量传输(LWPT)、垂直腔面发射激光器(VCSEL)、碟片激光器(OPSL)、光子晶体激光器(PCSEL)及量子级联激光器(QCL)等。E-mail: wjdz@scu.edu.cn