

引用本文:石孟杰,陈泳屹,宋悦,等. GaAs 基红外波段半导体激光器固态源 Zn 扩散技术研究[J]. 光通信技术,2025,49(4):25-29.

GaAs 基红外波段半导体激光器固态源 Zn 扩散技术研究

石孟杰^{1,2}, 陈泳屹^{1,2*}, 宋悦^{1,2*}, 秦莉^{1,2}, 王立军^{1,2}

(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为优化 980 nm 波段 GaAs 基半导体激光器的掺杂工艺并提升性能,研究了以固态 Zn 化合物薄膜为扩散源的 Zn 扩散技术,通过真空镀膜和等离子体增强化学气相沉积(PECVD)技术制备 ZnO 扩散源及 SiO₂ 盖层,结合不同退火条件调控 Zn 在 GaAs 及 InGaAs/GaAs/GaAsP 异质结构中的扩散行为,利用多种测试方法分析其扩散规律及对器件性能的影响。实验结果表明:Zn 的扩散深度随退火温度和时间增加而加深,杂质浓度达到约 10²⁰ cm⁻³ 量级,纵向与横向扩散深度比为 1:1,且 Zn 杂质在多层异质结构中的扩散行为显著影响了激光器的光致发光特性和有源区的完整性。

关键词:半导体激光器;杂质扩散;ZnO;980 nm;GaAs

中图分类号:TN91 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)04-0025-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.04.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on solid-state Zn diffusion technology for GaAs-based infrared semiconductor laser

SHI Mengjie^{1,2}, CHEN Yongyi^{1,2*}, SONG Yue^{1,2*}, QIN Li^{1,2}, WANG Lijun^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To optimize the doping process and enhance the performance of 980 nm wavelength GaAs-based semiconductor laser, this paper explores the Zn diffusion technology using solid Zn compound thin films as the diffusion source. The ZnO diffusion source and SiO₂ capping layer are fabricated through vacuum coating and plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) techniques. Different annealing conditions are combined to regulate the diffusion behavior of Zn in GaAs and InGaAs/GaAs/GaAsP heterostructures. Multiple testing methods are employed to analyze the diffusion rules and their impact on device performance. The research indicates that the diffusion depth of Zn increases with the rise of annealing temperature and time. The impurity concentration reaches the order of approximately 10²⁰ cm⁻³, and the ratio of the longitudinal diffusion depth to the lateral diffusion depth is 1:1. Moreover, the diffusion behavior of Zn impurities in the multi-layer heterostructure significantly affects the photoluminescence characteristics of the laser and the integrity of the active region.

Key words: semiconductor laser, impurity diffusion, ZnO, 980 nm, GaAs

收稿日期:2025-02-10。

基金项目:吉林省科技发展规划基金项目(20220201072GX)资助。

作者简介:石孟杰(1999—),女,硕士研究生,现就读于中国科学院大学长春光学精密机械与物理研究所微电子与固体电子学专业,主要从事高功率半导体激光器及量子阱混杂技术方面的研究工作,参与国家重点研发计划与吉林省科技发展规划项目重点研发项目,曾获得 2023-2024 学年中国科学院大学三好学生称号。



*通信作者 1:陈泳屹(1986—),男,博士,研究员,主要研究方向为高功率半导体激光器和光栅耦合半导体激光器。

*通信作者 2:宋悦(1989—),女,博士,副研究员,主要研究方向为高功率半导体激光器。

0 引言

在半导体激光器制造中,锌(Zn)扩散技术因其在器件局域改性、高导电性电极制备和光电性能优化等方面的关键作用而得到广泛应用^[1-3]。该技术通过精确控制 Zn 元素在 III-V 族化合物半导体中的扩散深度和浓度分布实现多种功能:在器件局域改性方面,Zn 扩散可诱导有源区量子阱混杂,从而改变有源区的带隙结构^[4];在电极制备环节,通过在接触区域形成重掺杂层,可以显著降低金属-半导体界面之间的接触电阻,保障高电流密度下的稳定电注入^[5];在优化光电性能方面,通过调控光场分布可提升光限制因子^[6]。目前,Zn 扩散技术的研究多集中于红光波段半导体激光

石孟杰,陈泳屹,宋悦,等: GaAs 基红外波段半导体激光器固态源 Zn 扩散技术研究

器。而在更广泛的半导体激光器应用中,980 nm 波段激光器因其在光通信、泵浦源及医疗领域的突出价值备受关注^[6-9]。尽管 980 nm 激光器是光通信、泵浦源及医疗等领域的核心器件,但目前关于 Zn 扩散技术在该波段激光器中的研究却相对不足,制约了其进一步性能优化与应用拓展。

本文采用固态 Zn 化合物薄膜作为扩散源,研究扩散源材料选择、扩散条件优化以及 Zn 在 GaAs 中的扩散动力学行为。基于 InGaAs/GaAs/GaAsP 半导体激光器多层异质结构,通过实验表征 Zn 扩散的剖面分布特性,并深入分析扩散行为对激光器发光特性的影响机制。

1 Zn 扩散模型

在 GaAs 晶体中,Zn 的扩散可以通过 2 种机制实现:解离机制和踢出机制^[10-12],如图 1 所示。在解离机制中,Zn 的扩散依赖于 GaAs 晶体中的本征点缺陷,特别是 Ga 空位 V_{Ga} 。当 Zn 杂质通过间隙扩散进入晶体后,它会与 V_{Ga} 空位发生反应,替代 Ga 原子并占据其晶格位置,形成替位锌 Zn_{Ga} 。Zn 的扩散速率由 V_{Ga} 的浓度决定。在踢出机制中,Zn 原子首先以间隙形式 Zn_i 进入 GaAs 晶格。随后, Zn_i 通过与晶格中的 Ga 原子发生碰撞或相互作用,将 Ga 原子从其晶格位置“踢出”,使其变为间隙 Ga 原子 I_{Ga} 。此时,Zn 原子则占据原先 Ga 原子的位置,同样形成替位锌 Zn_{Ga} 。因此,在该机制下,Zn 的扩散速率主要受到间隙 Zn 原子迁移能力的影响。

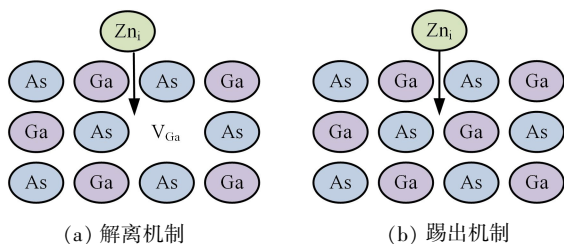


图 1 Zn 在 GaAs 晶体中的扩散机制示意图

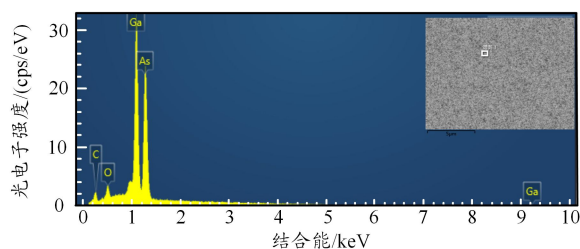
2 实验过程及结果分析

2.1 Zn 在 GaAs 中的扩散规律

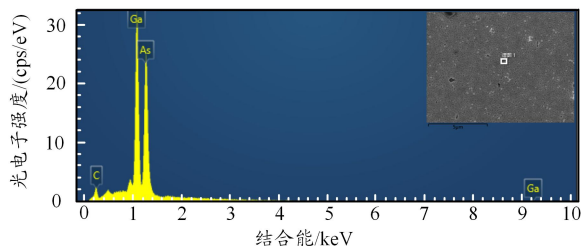
为确定固态扩散源的最佳材料,本文将 GaAs 衬底片分为 3 组,使用南光 DMD800 真空镀膜设备,在每组上分别生长了厚度为 30 nm 的 Zn 介质膜、ZnSe 介质膜和 ZnO 介质膜。为了避免高温条件下 Zn 化合物介质膜分解及 Zn 元素挥发,同时促进 Ga 元素的有效析出,采用 Oxford PlasmaPro 100 等离子体增强化

学气相沉积(PECVD)设备在 Zn 化合物介质膜表面沉积 SiO_2 保护层。完成介质层生长后,通过扫描电子显微镜(SEM)对样品剖面进行观察可知,GaAs 衬底、Zn 化合物介质膜和 SiO_2 保护层各部分明显的分界。此外,为了便于后续载流子浓度的表征,所有实验所用的样片均采用了掺杂 Si 浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 N 型 GaAs 衬底。实验中,将样片切割成 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ 的正方形样品,并使用 Allwin AW610M 退火炉在氮气环境中对样品进行高温快速热退火处理。

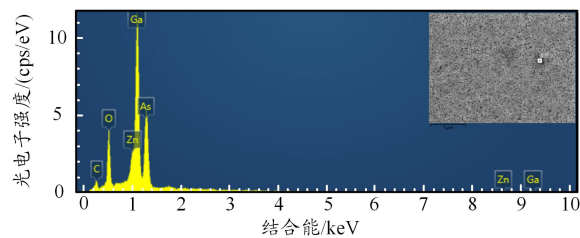
为了减少高温退火对半导体激光器外延片可能造成的损害,在实际应用中,退火温度最高不超过外延片生长时的温度,即 700°C 。鉴于纯 Zn 的熔点为 419.5°C ,Zn 介质膜样品的退火温度为 400°C ;而 ZnSe 和 ZnO 介质膜样品的退火温度则统一为 650°C 。所有介质样品的退火时间均为 30 min。完成退火过程后,将样品表面的介质层去除,并使用能谱仪(EDS)分别对 3 组介质膜样品表面进行测试,以分析样品材料微区成分中的元素种类及含量,测试结果如图 2 所示。可以看出,在 Zn 介质膜样品和 ZnSe 介质膜样品中,未能检测到 Zn 元素;而在 ZnO 介质膜样品中成功检



(a) Zn介质膜



(b) ZnSe介质膜

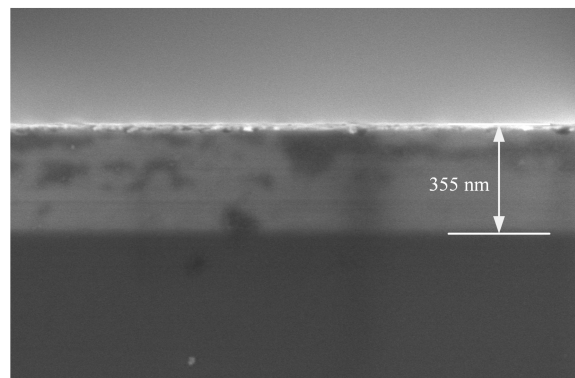


(c) ZnO介质膜

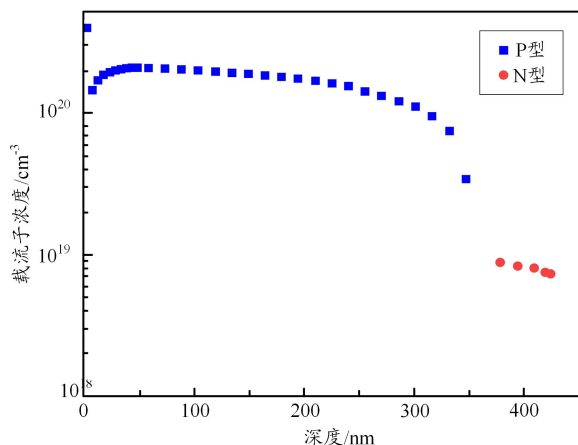
图 2 3 组介质膜样品的 EDS 能谱图

测到了 Zn 元素。这表明, ZnO 介质膜可以作为一种有效的固态 Zn 扩散源。图 2 右上角图片为样品表面形貌图及 EDS 测试点位示意图, C、O 为测试过程中引入的有机残留物激发的峰。因此, 在后续实验中, 本文将采用 ZnO 介质膜作为研究 GaAs 体系中固态源 Zn 扩散规律的主要材料。

将生长有 ZnO 介质膜和 SiO₂ 覆盖层的 GaAs 衬底样品分为 A、B、C、D 4 组, 分别在 550、600、625、650 °C 温度下进行退火处理, 退火时间分别为 5、10、15、20、25、30 min。退火处理后, 移除样品表面的介质层, 并使用 SEM 和电化学-电容电压法 (ECV) 对样品进行表征。在 N 型衬底片上进行 Zn 杂质扩散时, 会局部改变材料的导电性。通过 SEM 观察样品剖面, 可以看到杂质扩散区域与未扩散区域之间会出现明显的分界线。因此, 采用 ECV 技术可以进一步探究不同深度下载流子浓度情况。以退火温度为 600 °C 且退火时间为 10 min 的样品为例, 其 SEM 图和 ECV 表征结果如图 3 所示。可以看出, 在样品 355 nm 深处出现明显的分界线, 表明此处材料的导电性发生了突变; 在大约 350 nm 深



(a) SEM 图



(b) ECV 表征结果

图 3 样品的 SEM 图和 ECV 表征结果

度的位置, 样品从 P 型导电特性转变为 N 型导电特性, 这与 SEM 的结果相符。此外, 由 ECV 表征结果可知, P 型导电区域内空穴浓度约为 10^{20} cm^{-3} 。

由于在 550 °C 的退火温度下, Zn 扩散进入 GaAs 的深度均未达到 100 nm, 且受到设备精度限制, 无法准确表征该温度下的载流子浓度分布。因此, 本文仅对 B、C、D 这 3 组样品的 SEM 图像和 ECV 表征结果进行分析整理, 得到扩散深度随退火温度和时间的变化趋势图如图 4 所示。可以看出, 随着退火温度升高和退火时间延长, Zn 元素在 GaAs 中的扩散深度呈现显著增加的趋势。这表明, 较高的温度和更长的扩散时间有利于促进杂质原子更深地渗透到半导体材料中, 从而可能对其电学性能产生影响。

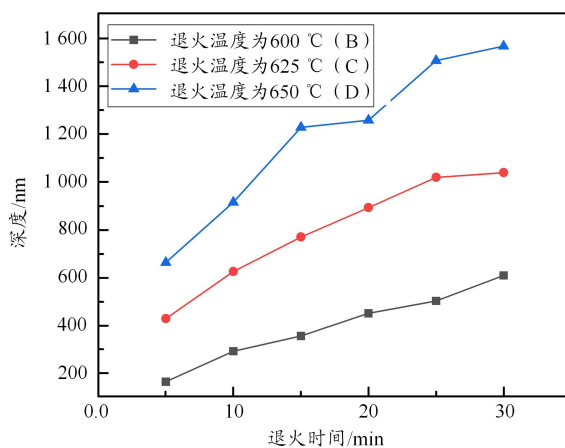


图 4 3 组样品在不同退火温度和时间下的 Zn 扩散深度

为了研究 Zn 杂质在 GaAs 中的横向扩散情况, 本文对样品表面的 SiO₂ 盖层进行图形化刻蚀处理, 使得退火后样品表面呈现出周期性 SiO₂ 覆盖的图案。在 650 °C 退火温度下进行 30 min 的高温退火处理后, 通过 SEM 观察发现, 在没有 SiO₂ 盖层覆盖的区域, Zn 杂质并未扩散进入 GaAs 材料中; 而在有 SiO₂ 盖层覆盖的区域, Zn 杂质的纵向扩散深度为 1.39 μm、横向扩散宽度为 1.33 μm, 其 SEM 图如图 5 所示。这表明 Zn 杂质在 GaAs 中扩散时, 其纵向与横向扩散深度比例为 1:1。这一规律的发现为后续实现精准局域 Zn 扩散提供了实验依据。

2.2 Zn 在 980 nm 半导体激光器外延片中的扩散

为了验证 Zn 在 980 nm 半导体激光器外延片中的扩散情况 and 其对外延片的影响, 本文在外延片上进行固态 Zn 源扩散并进行了表征。实验所用的外延片均是在 AIX-200/4 系统的低压金属有机化合物化学气相沉积 (MOCVD) 设备中, 在 N 型 GaAs 衬底上生长

石孟杰,陈泳屹,宋悦,等: GaAs 基红外波段半导体激光器固态源 Zn 扩散技术研究

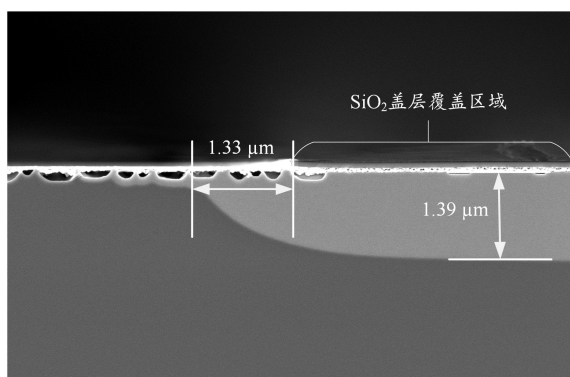


图5 Zn在GaAs中局域扩散样品SEM图

而成的。外延结构从上至下依次为:厚度为100 nm的P-GaAs盖层、厚度为200 nm的P-GaAs缓冲层、厚度为1 400 nm的P-AlGaAs包覆层、未掺杂的单有源区(阱区材料为 $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$ 、势垒区材料为 $\text{GaAsP}_{0.08}$ 、过渡层为GaAs)、厚度为2 000 nm的N-AlGaAs包覆层、厚度为200 nm的N-GaAs缓冲层以及N-GaAs衬底。在外延片表面依次沉积了ZnO介质膜和 SiO_2 盖层后,将样品切割为5 mm×5 mm的正方形。根据之前固态Zn源扩散实验得出的扩散规律,这些样品分别在600、625、650℃下退火10 min。退火完成后,对样品去除了表面覆盖层。然后,对退火后的样品和未经退火处理的原始外延片都进行SEM和光致发光光谱表征。

不同退火温度下的各样品剖面SEM图如图6所示。从图6(a)可以看出,在外延片中,具有不同导电性的材料形成了明显的层次结构。从图6(b)~图6(d)可以看出,随着P型导电性的增强,Zn扩散区域与未扩

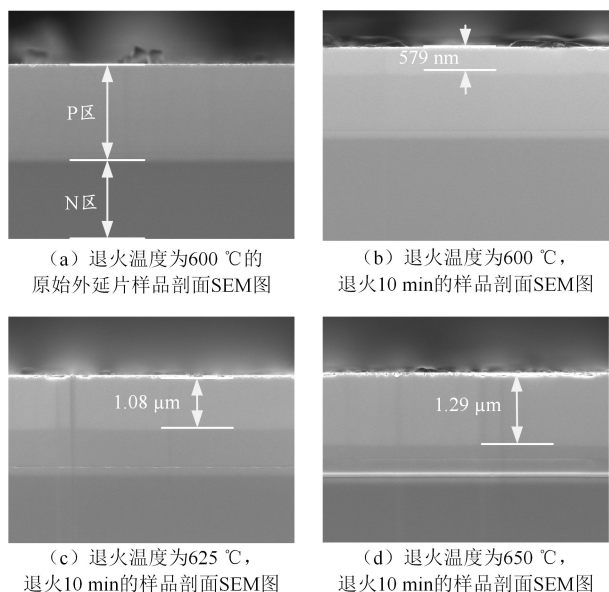


图6 样品剖面SEM图

散区域之间出现了显著的分层现象。同时,Zn在InGaAs/GaAs/GaAsP半导体激光器外延片中的扩散深度分别为579 nm、1.08 μm和1.29 μm。由于外延片中材料成分比GaAs衬底更加复杂,因此Zn在此类外延片中的扩散行为与GaAs衬底有所不同。相较于相同条件下Zn在GaAs衬底中的扩散,Zn在外延片中表现出更快的扩散速度和更深的扩散范围。这种现象的原因是Zn原子替代不同基质原子时所需能量的不同。在GaAs衬底中,Zn通过替代Ga原子实现扩散,其缺陷形成能约为1~2 eV。而在AlGaAs材料中,Zn原子替代Ga位点ZnGa的缺陷形成能显著降低至0.009 1 eV,替代Al位点ZnAl时甚至呈现负值(-1.821 eV)^[4]。这表明,相较于GaAs材料,Zn在AlGaAs中更容易替代Ga和Al原子。因此,在相同的扩散条件下,Zn在980 nm半导体激光器外延片中的扩散速度更快,扩散范围也更广。

本文对样品进行光致发光特征分析,结果如图7所示。可以看出,随着退火温度的升高和Zn扩散深度的增加,样品的发光峰波长逐渐蓝移,同时发光强度逐渐降低,半高峰宽逐渐增大。这些变化表明半导体激光器有源区内的缺陷增多,导致发光效率下降。当退火温度为650℃、退火时间为10 min时,样品的发光峰完全消失,表明有源区已经被破坏。尽管Zn杂质本身并未直接扩散进入有源区,但其扩散过程中引入的缺陷(如空位或间隙原子)已延伸至有源区。这些缺陷会促进有源区材料的组分互扩散(如Ga和As原子的相互迁移),并引发局部应力场的变化,最终可能影响器件的能带结构和光学性能。通过在InGaAs/GaAs/GaAsP半导体激光器外延片中进行ZnO源扩散实验,不仅揭

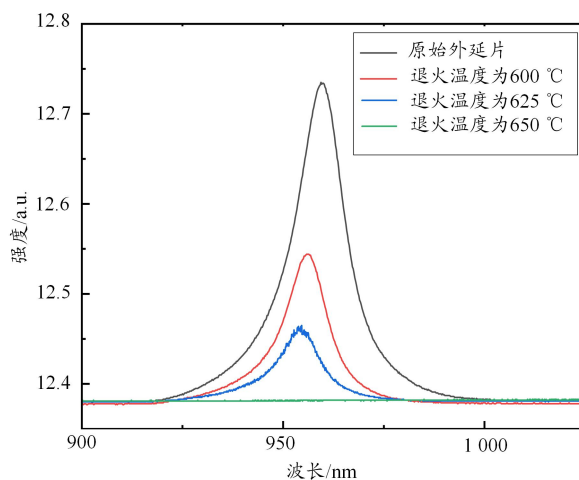


图7 3组样品在不同退火温度和10 min下的光致发光光谱图

示了Zn在多层异质结构中的扩散差异性,还明确了扩散对有源区光效的潜在影响,为半导体激光器的掺杂工艺设计提供了实验依据。

3 结束语

本文采用固态锌化合物薄膜作为扩散源,对Zn在GaAs中的扩散特性进行了全面研究。通过一系列实验对比与理论分析,最终选定ZnO作为最佳扩散源材料。实验结果表明,随着退火温度的升高和退火时间的延长,Zn在GaAs中的扩散深度不断增加,且杂质浓度达到了 10^{20} cm^{-3} 数量级。此外,在纵向与横向上的扩散深度比接近1:1;Zn杂质在多层异质结构中的扩散行为显著影响了激光器的光致发光特性和有源区的完整性。该研究结果为优化半导体激光器的掺杂工艺提供了重要的实验依据,对于开发高功率、长寿命的激光器具有重要指导意义。

参考文献:

- [1] CHEN C C, LIAW S J, YANG Y J. Stable single-mode operation of an 850-nm VCSEL with a higher order mode absorber formed by shallow Zn diffusion[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(4): 266–268.
- [2] SHIN Y C, KIM B J, KANG D H, et al. Performance improvement of 650 nm band AlGaInP laser diodes with optimal diffusion barriers [J]. Materials Science and Engineering B-Solid State Materials for Advanced Technology, 2006, 128(1–3): 80–82.
- [3] ZHU Z, ZHANG X, XIAO C, et al. Fabrication of highly reliable watt-level 660 nm semiconductor lasers[J]. Chinese Journal of Lasers-Zhongguo Jiguang, 2018, 45(5): 13–17.
- [4] 何天将,刘素平,李伟,等. Zn 杂质诱导 GaInP/AlGaInP 红光半导体激光器量子阱混杂的研究[J]. 光子学报, 2024, 53(1): 8–19.
- [5] KRAUTLE H, WACHENSCHWANZ D. Ohmic contacts on n-layers and p-layers of GaAs using laser-induced diffusion[J]. Solid-State Electronics, 1985, 28(6): 601–603.
- [6] 曹驰,王博,褚应波,等. 国产高性能抗辐照掺铒光纤[J]. 中国激光, 2021, 48(20): 212–215.
- [7] 马晓宇,张娜玲,仲莉,等. 高功率半导体激光泵浦源研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(12): 120–129.
- [8] 张志鹏,丁向东,季晓倩,等. 一种双波长多模式半导体激光治疗仪控制系统的设计 [J]. 中国高新区, 2018(1): 31–31.
- [9] DENG Y, YAN C, QU Y, et al. 980 nm 14-Pin butterfly module dual-channel CW QW semiconductor laser for pumping[DB/OL]. [2025–02–10]. <https://www.semanticscholar.org/paper/980-nm-14-pin-butterfly-module-dual-channel-CW-QW-Deng-Yan/f69704ce0d16d8e6527176a54058c1e603ea1439>.
- [10] NICOLS S P. Self-and Zinc diffusion in gallium antimonide [D]. San Diego: University of California, 1998.
- [11] REYNOLDS S, VOOK D W, GIBBONS J F. Open-tube Zn diffusion in GaAs using diethylzinc and trimethylarsenic: experiment and model[J]. Journal of Applied Physics, 1988, 63(4): 1052–1059.
- [12] TUCK B, KADHIM M A H. Anomalous diffusion profiles of Zinc in GaAs [J]. Journal of Materials Science, 1972, 7: 585–591.