光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250623002

InGaAlAs/InGaAlAs量子阱混杂技术研究

胡广凤[1,2]，张　犇[2,3]*，秦毕晟[2,3]，程立文[1]，张瑞英[2]*

（1. 扬州大学 物理科学与技术学院，江苏 扬州 225009；2. 中国科学院 苏州纳米技术与纳米仿生研究所纳米所器件部，江苏 苏州 215123；3. 中国科学技术大学 纳米技术与纳米仿生学院，江苏 苏州 215123）

摘　要： 为满足InP基光电子器件的低损耗单片集成需求，针对InGaAlAs/InGaAlAs多量子阱材料结构开展量子阱混杂（QWI）技术研究。文章着重探讨QWI技术中离子注入诱导（IIID）和无杂质空位扩散（IFVD）两种方法以实现单片集成器件中有源区与无源区吸收谱波长的调控。当采用IIID方法时，尽管通过离子注入和快速热退火工艺可实现一定的波长蓝移，但铝原子在InGaAlAs中具有较高的迁移势垒以及电感耦合等离子体-反应离子刻蚀引入的额外晶格缺陷，导致蓝移效果受限。在500 keV的注入能量，以及725℃，180 s的快速热退火条件下，样品仅实现了最大18.9 nm的蓝移，且工艺损伤问题较为突出。相比之下，采用IFVD方法则表现出更优的波长调控性能。具体来说，通过等离子增强型化学气相淀积（PECVD）沉积190 nm的SiN_x薄膜以诱导无源区量子阱混杂，在800℃，120 s的RTA条件下可实现最大114 nm左右的蓝移；相同条件下，采用PECVD沉积200 nm的SiO_2薄膜对有源区进行保护，蓝移仅为5.1 nm，满足单片集成器件中有源区与无源区吸收谱波长调控的需求。

关键词： 激光器；InGaAlAs/InGaAlAs量子阱；量子阱混杂；波长蓝移

中图分类号： TN256；O436　**文章编号：** 1001－5868(2025)05－0835－06

Quantum-Well Intermixing Technology in InGaAlAs/InGaAlAs Multiple Quantum Wells

HU Guangfeng[1,2], ZHANG Ben[2,3], QIN Bisheng[2,3], CHEN Liwen[1], ZHANG Ruiying[2]

(1. Physics and Technology College, Yangzhou University, Yangzhou 225009, CHN; 2. Nano-Devices and Materials Division, Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, CHN; 3. Nano Science and Technology Institute, University of Science and Technology of China, Suzhou 215123, CHN)

Abstract: To satisfy the low-loss monolithic integration requirements of InP-based optoelectronic devices, this study investigates quantum-well intermixing (QWI) technology in InGaAlAs/InGaAlAs multiple-quantum-well structures. Two QWI approaches—ion implantation-induced disordering (IIID) and impurity-free vacancy diffusion (IFVD)—are investigated to achieve wavelength tuning in the active and passive regions of monolithic integrated devices. When employing the IIID method, although ion implantation combined with rapid thermal annealing (RTA) can induce a certain blue shift, the effect is limited owing to the high migration barrier of aluminum atoms in InGaAlAs and the additional lattice defects introduced by inductively coupled plasma-reactive ion etching. Under conditions of 500 keV, 725℃, and 180 s, the maximum blue shift achieved is only 18.9 nm, with significant process-induced damage observed. By contrast, the IFVD technique exhibits superior wavelength tuning performance. Specifically, by depositing a 190 nm SiN_x film via plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) to induce QWI in the

收稿日期：2025－06－23.

*通信作者：张　犇，张瑞英

passive region, a blue shift of approximately 114 nm is achieved under RTA conditions of 800℃ and 120 s; under the same conditions, depositing a 200 nm SiO_2 film via PECVD to protect the active region resulted in a blue shift of only 5.1 nm. These results satisfy the requirements for precise wavelength control between the active and passive regions in monolithically integrated devices.

Key words: lasers; quantum well intermixing; InGaAlAs/InGaAlAs quantum; blue shift in wavelength

0 引言

随着高速光纤通信、数据中心互连和光学计算技术的快速发展,光子集成芯片已成为关键技术,其中有源区与无源区波导的低损耗集成对于优化系统性能和能效至关重要[1-3]。尽管异质集成、混合集成和基于外延生长的硅集成等解决方案已被提出[4-6],但在器件良率、成本和生产效率方面仍面临挑战。相比之下,单片集成提供了一种简单且可靠的方法,能够消除耦合对准的需求,并在同一芯片上同时构建有源区光子器件和低损耗无源区波导,该方案不仅在尺寸上更加紧凑,而且在恶劣环境下具有更高的稳定性[7]。在多种基于InP衬底的光子器件单片集成技术中,量子阱掺杂(QWI)具有显著优势[8]。QWI技术无需二次外延生长,可有效消除耦合损耗,同时兼容有源与无源器件工艺,是一种灵活、低成本且高可靠性的集成方案。采用InP衬底晶格匹配的InGaAsP或InGaAlAs材料体系的带隙范围为0.75~1.35 eV,覆盖了光纤的低损耗和低色散窗口[9]。基于这些材料制成的DFB和DBR激光器长期以来一直是光通信的主流光源。

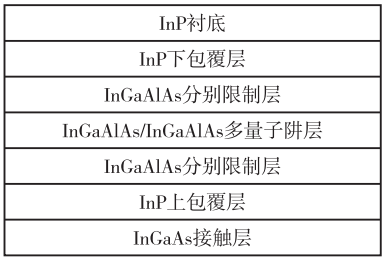
相比于复杂且界面陡峭性差的光吸收诱导扩散(PAID)技术[10]和会导致自由载流子光吸收的杂质诱导扩散(IID)技术[11],无杂质空位扩散(IFVD)技术不会引入杂质,避免了材料损伤[12],而离子注入诱导(IIID)技术具有横向扩散小、界面陡峭、可选区混杂的优点,且这两种方法均简单易控制[13],更适合于当下的光子集成芯片。在多量子阱(MQWs)材料体系中,InGaAlAs/InGaAlAs MQWs相比于InGaAsP/InGaAsP MQWs,具备更高的微分增益系数和更好的高温特性[14],在InP基光电子器件中具有更广泛的应用前景。尽管如此,由于InGaAlAs/InGaAlAs MQWs的生长温度较高,QWI技术在此材料体系中的应用需要更高的退火温度以实现阱垒间元素的互扩散,这使得其实现难度也远高于InGaAsP/InGaAsP MQWs。目前,关于InGaAlAs/InGaAlAs MQWs技术的系统性研究仍然较为匮乏。

此前,本团队已经对用于InGaAsP/InGaAsP MQWs的QWI进行了研究[15],并通过IID方法并实现了116 nm的最大蓝移[16]。在此基础上,本文进一步采用IIID和IFVD技术,首先通过SRIM软件对离子注入深度进行仿真,接着开展InGaAlAs/InGaAlAs MQWs的QWI实验研究,并引入半导体刻蚀工艺,探究其对QWI效果的影响,以期获得InGaAlAs/InGaAlAs MQWs的QWI全面影响因素,为其在单片集成领域的应用奠定基础。

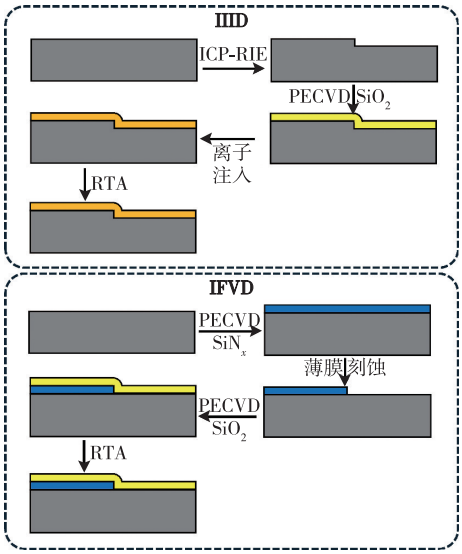
1 实验仿真

实验使用通过MOCVD外延技术制备的InGaAlAs/InGaAlAs量子阱结构材料作为研究对象,如图1(a)所示。该结构包括半绝缘InP衬底,Si掺杂的N型InP下包覆层,Al组分渐变的分别限制层,InGaAlAs/InGaAlAs多量子阱层,Zn掺杂的P型InP上包覆层和InGaAs接触层,PL谱峰值波长为1 295 nm。QWI工艺流程采用IIID和IFVD技术,如图1(b)所示。在清洗外延片后,依次采用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)SiO_2/SiN_x介质膜的沉积、光刻、介质膜刻蚀、电感耦合等离子体-反应离子刻蚀(ICP-RIE)、离子注入和快速热退火(RTA)等工艺。其中,离子注入剂量为1×10^{14} icons/cm^2,注入能量为300 keV和500 keV,注入角度为7°。此外,在InP基集成光电子器件中,不同高度的无源区之间的集成需求是不可避免的。例如,当制作脊波导表面光栅区时,其高度往往与相移区等无源区不一致。因此,本文还探讨了引入ICP-RIE工艺对QWI效果的影响,以确保QWI不

会影响集成器件的性能。



（a）外延片结构示意图



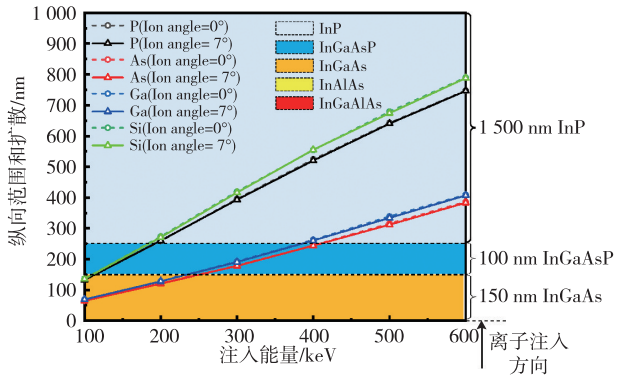
（b）IIID 和 IFVD 工艺流程图

图 1　外延结构和工艺流程图

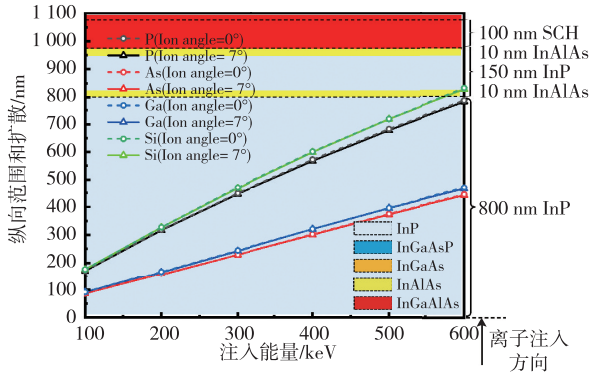
2　结果与讨论

利用 SRIM 软件对离子注入深度进行模拟，结果如图 2 所示。图中，浅蓝、深蓝、橙色、黄色、红色区域分别代表 InP，InGaAsP，InGaAs，InAlAs 和 InGaAlAs 材料。本文分别选用 P，As，Ga 和 Si 离子从 InGaAs 接触层注入，注入角度设定为 0°和 7°。根据此前的研究结果，尽管较高的注入能量可使离子达到更深区域，但同时也会引入更多杂质缺陷并加剧晶格损伤，即使经过 RTA 修复，仍会导致 PL 谱强度下降[1]。因此，在模拟过程中必须确保注入离子不穿透上包层。

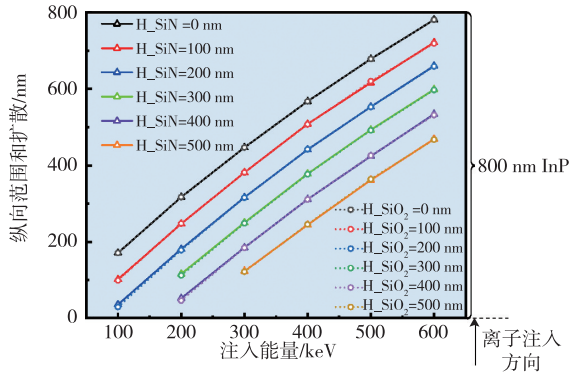
如图 2(a)所示，从 150 nm 的 InGaAs 接触层注入，其下依次为 100 nm 用于晶格匹配的 InGaAsP 过渡层及 1.5 μm p-InP 上包层。模拟结果显示，不同注入角度对注入深度影响不大，但为避免横向扩散和沟道效应，实现精确控制，最终选择 7°的注入角。在 300 keV 和 500 keV 条件下，P^+ 分别注入上包层



（a）上包层 1.5 μm



（b）上包层 0.8 μm



（c）上包层 0.8 μm，且有 PECVD SiO_2/SiN_x 介质膜

图 2　SRIM 离子注入深度仿真

143 nm 和 390 nm。图 2(b)展示了在 800 nm 的 InP 上包层条件下的离子注入情况，此时假设 InGaAs，InGaAsP 及部分 InP 上包层已被刻蚀去除。通过模拟，300 keV 和 500 keV 下的注入深度分别达到 449 nm 和 683 nm，其中 500 keV 的注入深度已接近电子隔离层 InAlAs，这表明材料损伤风险较大，工艺容差较低。为确保不同高度无源区的 QWI 效果一致，在 0.8 μm 上包层条件下采用不同厚度的 PECVD SiO_2 或 SiN_x 作为注入掩膜，模拟结果如图 2(c)所示，两种介质膜下的注入深度基本一致。当使用 500 nm SiO_2 时，300 keV 和 500 keV 下的注

入深度分别为122 nm和364 nm，与1.5 μm上包层条件下相当，确保了QWI效果的均一性。

图3展示了离子注入后InGaAlAs/InGaAlAs MQWs的PL谱，其注入能量分别为300 keV和500 keV，RTA条件设定为700℃/725℃，持续180 s。根据上述模拟参数，采用相应的P^+注入条件，对样品进行了RTA前后的PL谱测量。其中，1.5 μm_300/500 keV代表未经过ICP-RIE处理的样品，而0.8 μm_300/500 keV代表经过ICP-RIE刻蚀（去除部分接触层及上包层，并在刻蚀区域沉积500 nm PECVD SiO_2介质膜）后再进行离子注入的样品。

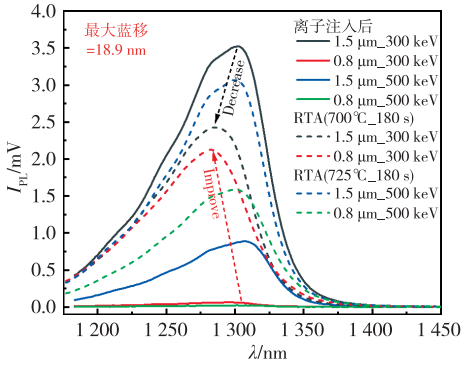
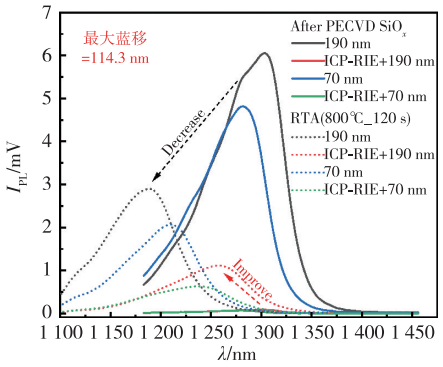


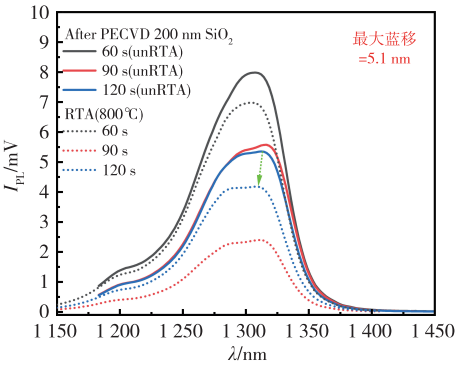
图3 离子注入InGaAlAs/InGaAlAs MQWs的PL谱

离子注入后，在500 keV条件下样品的PL谱强度明显低于300 keV。而经过ICP-RIE处理的样品，其PL谱强度进一步降低，原因在于刻蚀过程和过高注入能量均引入了额外晶格缺陷。经过RTA处理后，各条件下的缺陷得到修复，PL谱强度大幅恢复。在500 keV，725℃，180 s条件下，样品实现了最大18.9 nm的波长蓝移。然而，当退火温度提高至800℃时，样品表面出现气泡、薄膜脱落及材料损伤，表明离子注入和ICP-RIE引起的表面缺陷在高温下易导致应力集中。尽管先前研究指出，InGaAsP/InGaAsP MQWs在P^+离子注入条件下，通过750℃退火可实现最高116 nm的蓝移[2]，这主要归因于QWI机制依赖注入产生的P空位，促进阱垒内As与P的互扩散。而本研究的InGaAlAs/InGaAlAs MQWs因铝具有较高的迁移势垒和更高的Al—As键能（远高于In—As，Ga—As及As—P），以及较高的Al空位形成能，导致扩散过程受限，从而使得离子注入诱导的蓝移效果较弱，PL波长变化不明显。

鉴于IIID工艺在本体系中已不再适用，本文转而采用不会引入材料损伤的IFVD技术，通过PECVD沉积的SiN_x薄膜诱导QWI，并优化其生长参数以获得较大拉应力。在退火过程中，该应力有效传递至阱垒内，促使In与Ga发生互扩散，从而增大量子阱带隙，实现区域无源化。如图4(a)所示，实验采用70 nm和190 nm两种厚度的SiN_x薄膜，当RTA条件为800℃，120 s时，厚度为190 nm的SiN_x实现了最大114 nm的蓝移，而70 nm SiN_x则实现了93 nm蓝移，但后者在退火后表面薄膜未出现气泡，避免了拉应力过剩问题。另一方面，经过ICP-RIE处理的0.8 μm上包层样品尽管经过RTA后PL强度有所恢复，但蓝移幅度明显低于未刻蚀的1.5 μm样品，这主要归因于ICP-RIE引入的晶格损伤、表面缺陷增加及粗糙度上升，导致SiN_x薄膜拉应力分布不均，从而降低了应力传递效率，削弱了蓝移效果。



(a) 采用PECVD SiN_x诱导无源区量子阱混杂



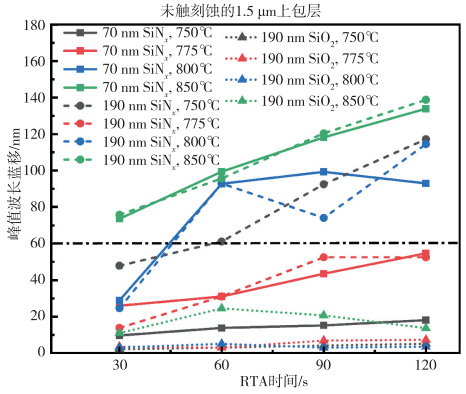
(b) 采用PECVD SiO_2保护有源区避免波长蓝移

图4 不同PECVD薄膜材料结合RTA对PL蓝移影响

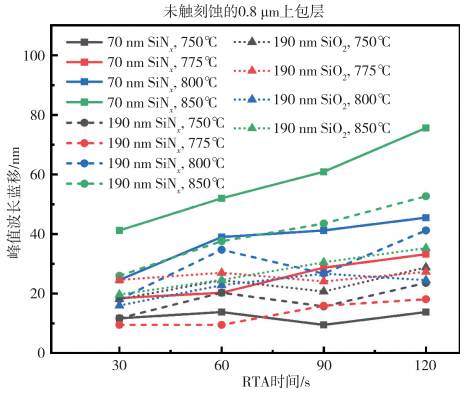
此外，如图4(b)所示，采用PECVD生长SiO_2薄膜对有源区进行保护，可有效防止有源区包层中P原子的挥发。而且由于SiO_2具有较低的热膨胀系数和压应力，通过调控薄膜生长参数，即使在800℃，120 s的RTA条件下，蓝移仅为5.1 nm，且PL强度下降较小，对量子阱内的量子效率影响有限。

图5分别展示了在不同RTA时间、温度、ICP-RIE处理及薄膜种类和厚度条件下样品的蓝移效果。

图 5(a)显示，在未进行 ICP-RIE 处理时，190 nm SiO_2 保护的有源区在 850℃，120 s 退火后蓝移仍小于 20 nm；而采用 70 nm 与 190 nm SiN_x 诱导 QWI 的无源区，仅需在 800℃，120 s 条件下即可实现约 100 nm 的蓝移，满足单片集成中对有源与无源区不同高度的要求。图 5(b)表明，在 ICP-RIE 刻蚀后，190 nm SiO_2 保护的有源区蓝移增大至最大 35 nm，这可能是由于 ICP-RIE 引入的额外点缺陷略微增强了蓝移；而 SiN_x 覆盖的无源区蓝移则明显减少，主要是因刻蚀导致的晶格损伤及表面缺陷增加降低了 SiN_x 薄膜的拉应力均匀性，进而削弱了阱垒内元素的互扩散。综合来看，为实现单片集成过程中各区域对波长蓝移的精准调控，建议先完成 QWI 工艺，再利用 ICP-RIE 刻蚀定义台阶，以避免蓝移效果失控。



(a) PECVD SiO_2/SiN_x 薄膜，RTA 后的波长蓝移



(b) 额外引入了 ICP-RIE 处理，RTA 后的波长蓝移

图 5　不同刻蚀深度和不同 PECVD 镀膜材料对 PL 蓝移影响

3　结论

本研究表明，在 InGaAlAs/InGaAlAs 多量子阱结构中，采用 IIID 方法在 500 keV 的注入能量，以及 725℃，180 s 的快速热退火条件下仅实现了 18.9 nm 的蓝移，并伴随较明显的工艺损伤；而通过 IFVD 技术，采用 PECVD 沉积 190 nm 的 SiN_x 薄膜，在 800℃，120 s 条件下实现了近 114 nm 的蓝移，同时进一步采用 200 nm 的 SiO_2 薄膜有效保护有源区，蓝移仅 5.1 nm。上述结果表明，IFVD 方法在精确调控有源区与无源区波长方面具有显著优势，为低损耗 InP 基单片集成光电子器件的工艺优化提供了有力支持。未来工作将进一步优化刻蚀工艺，减少晶格缺陷，并提高 QWI 工艺稳定性。

参考文献：

[1] Kaur M S, Boes A, Madden S J, et al. Silicon photonics for high-speed communications and photonic signal processing Nature[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 1234-1247.

[2] Xiao Z, Liu W, Xu S, et al. Recent progress in silicon-based photonic integrated circuits and emerging applications[J]. Advanced Optical Materials, 2023, 11(20): 2301028.

[3] Zia N, Ojanen S P, Viheriala J, et al. Widely tunable 2 μm hybrid laser using GaSb semiconductor optical amplifiers and a Si_3N_4 photonics integrated reflector[J]. Optics Letters, 2023, 48(5): 1319-1322.

[4] Kaur P, Boes A, Ren G, et al. Hybrid and heterogeneous photonic integration [J]. APL Photonics, 2021, 6(6): 061102.

[5] Porter C, Zeng S, Zhao X, et al. Hybrid integrated chip-scale laser systems[J]. APL Photonics, 2023, 8(8): 080902.

[6] Li L, Li G, Zhang Z , et al. Silicon-based optoelectronic heterogeneous integration for optical interconnection[J]. Chinese Physics B, 2024, 33(2): 024201.

[7] Alahmadi Y, LiKamWa P. Effects of selective area intermixing on InAlGaAs multiple quantum well laser diode [J]. Semiconductor Science and Technology, 2019, 34(2): 025010.

[8] Chu Y, Chen Q, Fan Z, et al. Tunable V-cavity lasers integrated with a cyclic echelle grating for distributed routing networks[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(12): 943-946.

[9] Vurgaftman I, Meyer J R, Ram-Mohan L R. Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys[J]. Journal of Applied Physics, 2001, 89(11): 5815-5875.

[10] Marsh J H, Kowalski O P, McDougall S D, et al. Quantum well intermixing in material systems for 1.5 μm[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 1998, 16(2): 810-816.

[11] 林　涛，孙　航，张浩卿，等. 无杂质空位诱导量子阱混杂研究及应用现状[J]. 激光与光电子学进展，2015，52(3)：24-33.

Lin Tao, Sun Hang, Zhang Haoqing, et al. Present status of impurity free vacancy disordering research and application[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 24-33.

[12] 林 涛，张浩卿，孙 航，等. 基于SiO_2膜的GaInP/AlGaInP无杂质空位扩散诱导量子阱混杂的研究[J]. 激光与光子学进展, 2015,52(2): 189-193.
Lin Tao, Zhang Haoqing, Sun Hang, et al. Impurity-free vacancy diffusion induces intermixing in GaInP/AlGaInP quantum wells using SiO_2 encapsulation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(2): 189-193.

[13] Lee K H, Roycroft B, O'Callaghan J, et al. Integration of AlInGaAs-MQW fabry-Pérot lasers with emission at two wavelength ranges via quantum-well intermixing[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(1): 27-29.

[14] Skogen E J, Raring J W, Morrison G B, et al. Monolithically integrated active components: a quantum-well intermixing approach[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(2): 343-355.

[15] 郭春扬，张瑞英，刘纪湾，等. Cu/SiO_2逐层沉积增强无杂质空位诱导InGaAsP/InGaAsP量子阱混杂[J]. 半导体技术, 2019, 44(3): 189-193.
Guo Chunyang, Zhang Ruiying, Liu Jiwan, et al. InGaAsP/InGaAsP quantum well intermixing induced by impurity free vacancy enhanced through Cu/SiO_2 deposition[J]. Semiconductor Technology, 2019, 44(3): 189-193.

[16] 葛晓红，张瑞英，郭春扬，等. 多变量离子注入型量子阱混杂效应[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(1): 176-182.
Ge Xiaohong, Zhang Ruiying, Guo Chunyang, et al. Multiple factor ion implantation-induced quantum well intermixing effect[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(1): 176-182.

作者简介：

胡广凤(2000—)，男，江苏省淮安市人，硕士研究生，主要研究方向为光电子器件的设计和仿真、制备及测试方面的研究；

张 犇(1997—)，男，安徽省淮北市人，博士，主要研究方向为III-V族半导体激光器芯片及其在光纤通信系统中的应用；

张瑞英(1972—)，女，内蒙古自治区和林格尔县人，博士，研究员，主要研究方向为III-V半导体光电器件及其在传感和通信系统中的应用。