

# 多变量离子注入型量子阱混杂效应

葛晓红<sup>1,2</sup>, 张瑞英<sup>2\*</sup>, 郭春扬<sup>2</sup>, 李安男<sup>2</sup>, 王帅达<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国科学技术大学纳米科学技术学院, 江苏 苏州 215123;

<sup>2</sup>中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所先进材料研究部轻量化实验室, 江苏 苏州 215123

**摘要** 为实现 InP 基单片集成光电子器件和系统, 对 InGaAsP/InGaAsP 分别限制异质结多量子阱激光器结构展开量子阱混杂(QWI)技术研究。在不同能量 P 离子注入、不同快速热退火(RTA)条件以及循环退火下, 研究了有源区量子阱混杂技术, 实验结果采用光致发光(PL)谱进行表征。实验结果表明: 在不同变量下皆可获得量子阱混杂效果, 其中退火温度影响最为显著, 且循环退火可进一步提高量子阱混杂效果; PL 谱蓝移随着退火温度、退火时间和注入能量的增大而增大, 退火温度对蓝移的影响最大, 在注入剂量为  $1 \times 10^{14}$  ion/cm<sup>2</sup>, 注入能量为 600 keV, 750 °C 二次退火 150 s 时获得最大蓝移量 116 nm。研究结果为未来基于 QWI 技术设计和制备单片集成光电子器件和系统奠定了基础。

**关键词** 激光器; 量子阱混杂; 离子注入; 波长蓝移; 光致发光谱

**中图分类号** TN304.2

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/LOP57.011409

## Multiple Factor Ion Implantation-Induced Quantum Well Intermixing Effect

Ge Xiaohong<sup>1,2</sup>, Zhang Ruiying<sup>2\*</sup>, Guo Chunyang<sup>2</sup>, Li Annan<sup>2</sup>, Wang Shuaida<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Nano Science and Technology Institute, University of Science and Technology of China, Suzhou, Jiangsu 215123, China;*

<sup>2</sup>*Lightweight Laboratory of Advanced Materials Division, Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215123, China*

**Abstract** To realize InP-based monolithic integrated optoelectronic devices and systems, the quantum well intermixing (QWI) technology has been experimentally investigated for the InGaAsP/InGaAsP confinement heterojunction multiple quantum well laser structures herein. The active-area QWI technology realized under P-ion implantation with different energies, different rapid thermal annealing (RTA) conditions, and cycle annealing is investigated, and the experimental results are characterized using photoluminescence (PL) spectra. Experimental results show that the QWI effect can be observed for all the samples with different variables, where the annealing temperature has the most significant effect and the cycle annealing can further enhance the QWI effect. The blue-shift in PL spectra increases with the annealing temperature and time and implantation energy, and the annealing temperature has the greatest effect on the blue shift. Finally, the maximum blue-shift achieved is approximately 116 nm with secondary annealing at 750 °C for 150 s when the injection dose and energy are  $1 \times 10^{14}$  ion/cm<sup>2</sup> and 600 keV, respectively. Our findings will benefit future design and fabrication of monolithic integrated optoelectronic devices and systems using QWI technology.

**Key words** lasers; quantum well intermixing; ion implantation; blue-shift in wavelength; photoluminescence spectra

**OCIS codes** 140.5960; 230.7405; 250.5590; 300.6170

**收稿日期:** 2019-06-27; **修回日期:** 2019-07-11; **录用日期:** 2019-07-16

**基金项目:** 江西省自然科学基金资助项目(2019ACBL20054)、江苏省重点研发计划(产业前瞻与共性关键技术)资助项目(BE2016083)

\* **E-mail:** ryzhang2008@sinano.ac.cn

## 1 引言

为高效、低耗、轻质地实现信息的产生、传输、处理和探测,人们将各种分立功能器件集成在同一载体上,为此研究人员发展出多种集成方式。到目前为止,光器件集成方式分为封装集成、混合集成与单片集成三大类。其中单片集成围绕特定功能、在同一衬底上进行多次外延、光刻和刻蚀等来制作所需要的功能单元,由此实现特定器件相关功能,其潜在的优势在于集成度高、可靠性高、功耗较低、功能完善,可批量生产,有望实现超高速率<sup>[1-2]</sup>。在光子集成电路的单片集成中,控制外延结构的带隙非常重要,现已发展多种方法在同一单片上实现不同禁带宽度,比如选区外延生长、非对称双波导、对接再生长、量子阱混杂(QWI)等。QWI属于外延后续处理技术,与前三种技术相比,其对工艺条件要求低,不需要额外的外延再生长过程,易于实现,可简化不同带隙波长集成器件的制作工艺,为光电功能集成拓展了发展空间。

目前实现QWI的方法主要分为6种,即高温快速退火诱导(RTA)<sup>[3]</sup>、离子注入诱导(IID)<sup>[4]</sup>、杂质诱导(IID)<sup>[5]</sup>、无杂质空位诱导(IFVD)<sup>[6]</sup>、激光诱导(LID)<sup>[7]</sup>和耦合Ar等离子增强诱导量子阱混杂(PAID)<sup>[8]</sup>。其中离子注入法具有调节性高、重复性好、可控性高等优点,可精确地控制器件需要的各种杂质浓度分布,从而广泛被应用于器件的后工艺制造中<sup>[4]</sup>。2001年,刘超等<sup>[9]</sup>对InGaAs/InGaAsP多量子阱(MQW)结构进行QWI,能量为2 MeV的P<sup>+</sup>注入样品后,以700 °C快速热退火90 s,获得带隙蓝移89 nm。2005年,Chen等<sup>[10]</sup>诱导InGaAsP/InP双量子阱QWI,能量为120 keV的P<sup>+</sup>注入样品后,在700 °C下快速热退火30 s,获得带隙蓝移25 nm。2012年,Parker等<sup>[11]</sup>用190 keV能量、200 °C的Zn离子注入In<sub>0.735</sub>Ga<sub>0.265</sub>As<sub>0.153</sub>P<sub>0.847</sub>/In<sub>0.735</sub>Ga<sub>0.265</sub>As<sub>0.513</sub>P<sub>0.487</sub>量子阱结构,以670 °C快速热退火90 s,有源区获得带隙蓝移14 nm,无源区获得带隙蓝移134 nm。2014年,Younis等<sup>[12]</sup>在GaAs/AlGaAs超晶格中进行As<sup>2+</sup>注入诱导量子阱混杂,能量为4 MeV,在775 °C下快速热退火60 s,获得90 nm蓝移量。2015年,Lin等<sup>[13]</sup>对GaInP/AlGaInP三量子阱激光器结构中的量子阱进行QWI,以40 keV能量注入N离子,以750 °C快速热退火200 s,获得54.9 nm蓝移量。2019年,林涛等<sup>[14]</sup>对张应变Ga<sub>0.575</sub>In<sub>0.425</sub>P量子阱激光器材料结构开展变温光致

发光特性的研究,采用N离子注入,注入能量为40 keV,以730 °C快速热退火300 s来诱导有源区发生量子阱混杂,获得最大蓝移值24.3 nm。

尽管上述手段实现了波长蓝移,满足III-V族有源或无源单片集成器件的要求。但是MeV量级的注入能量也有缺点,比如对于非混杂区域,需要非常厚的介质掩模来阻挡注入离子;而keV量级注入能量下的离子注入只能为激光器结构提供有限的带隙位移。大的注入能量、注入剂量或者过高的退火温度会使原有的量子阱区受损,导致器件质量下降。另一方面,尽管上述文献都采用离子注入方法实现量子阱混杂,但文献中多数讨论的是单一变量对波长蓝移的影响,比如退火温度对波长蓝移的影响或者用离子注入SRIM软件模拟出最佳注入能量然后进行实验。基于此,本文开展多种变量以及循环退火对量子阱混杂行为的影响研究,以期获得量子阱混杂更全面的影响因素。

## 2 离子注入情况模拟

样品经过标准清洗之后分成A和B两组。为减少异类物质对材料及器件的不良影响,选择P元素作为注入单质,并且用SRIM软件模拟不同能量P<sup>+</sup>在InGaAs/InP材料和InP材料的注入深度,模拟结果如图1(a)、(b)所示。由图1可知,P<sup>+</sup>的注入深度随注入能量的增加而增加,但是可达到的最大载流子浓度会随注入能量的增加而减少。比较图1(a)和图1(b)可知,在单纯的InP包覆层中注入相同能量的P<sup>+</sup>可获得更高的载流子浓度,但两类结构中的注入深度类似,因此在条件允许的情况下,去除顶层接触层,在相同注入能量下,可获得更大的载流子浓度和更深的注入深度,有助于实现量子阱混杂。在此基础上,我们开展P离子注入的量子阱混杂实验,并将两种结构进行对比。

## 3 量子阱混杂实验

实验采用三量子阱InGaAsP/InGaAsP半导体激光器外延片,具体材料结构如图2(a)所示。在InP衬底上依次外延生长200 nm InP缓冲层,120 nm InGaAsP分别限制异质结构层(SCH层),3个InGaAsP/InGaAsP多量子阱层,130 nm InGaAsP SCH层,2.1 μm InP包覆层,250 nm InGaAs欧姆接触层。离子注入前,以光刻胶为掩模对外延材料进行图案化处理,部分材料进一步腐蚀,以增加离子注入深度,如图2(b)所示。且根据图1

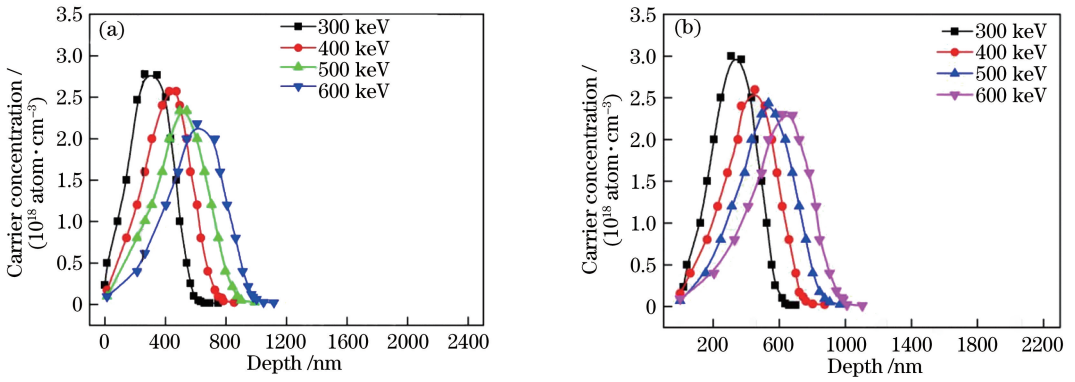


图 1  $P^+$  不同注入能量下注入深度分布。(a) A 组样品;(b) B 组样品

Fig. 1 Distributions of  $P^+$  implantation depth under different implantation energies. (a) Samples of group A; (b) samples of group B

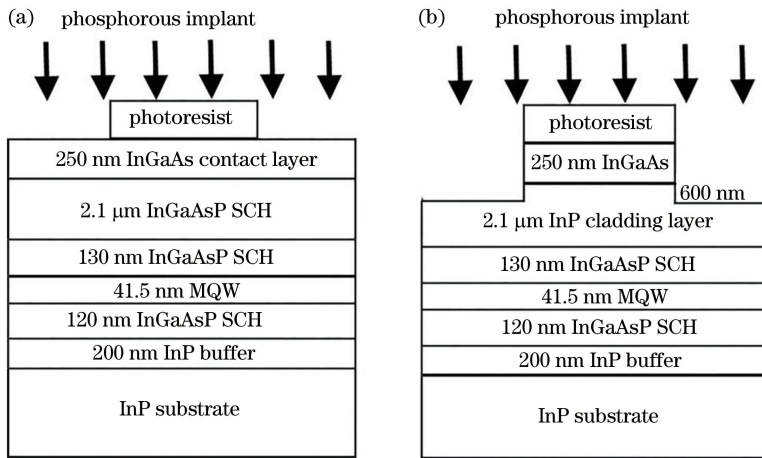


图 2 外延片材料截面图。(a) 无需腐蚀外延片结构, A 组样品;(b) InGaAs 欧姆接触层、600 nm InP 包覆层腐蚀后的外延片结构, B 组样品

Fig. 2 Section views of epitaxial material. (a) Epitaxial wafer structure without etch, samples of group A; (b) epitaxial wafer structure for etching InGaAs contact layer and 600 nm InP cladding layer, samples of group B

模拟可知, A 组样品和 B 组样品经高能  $P^+$  注入后, 注入深度都小于量子阱上面的包覆层厚度, 从而保证有源区量子阱在离子注入阶段不被破坏。该组成材料的光致发光(PL)谱峰值波长为 1515 nm。

A 组样品利用普通紫外光刻机进行光刻; 然后利用型号为 NV-GSD-HE 离子注入机进行离子注入, 注入条件为  $P^+$  注入、注入剂量为  $1 \times 10^{14} \text{ ion}/\text{cm}^2$ 、注入能量为 300 keV 及 600 keV; 有机清洗去胶之后采用等离子化学气相沉积(PECVD)生长 50 nm 厚的  $\text{SiO}_2$  介质层, 然后将其解理成  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  的样品; 选用型号为 RPM2000 的 PL 光谱仪, 在室温下测量每个样品的 PL 谱线, 激光器功率为 48.5 mW, 狭缝宽度为 0.1 mm, 由此获得各样品在 QWI 之前的原始量子阱材料的 PL 谱; 之后, 用 RTA-500 型快速热退火炉在  $650 \sim 750 \text{ }^\circ\text{C}$  下对 A 和 B 样品按  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  温度间

隔进行快速热退火处理, 时间分别为 60, 90, 150 s, 退火过程中, 为防止磷挥发对样品质量产生影响, 可将每个样品放置于一个直径为 10.16 cm 的 Si 片上, 样品顶层盖上直径为 5.08 cm 的 InP 衬底片, 且通入  $\text{N}_2$  作为载气保护; 为排除热场不均匀性对 QWI 实验的影响, 所有样品均置于退火炉同一位置。高温快速退火诱导之后, 继续对所有样品在相同条件下进行 PL 谱表征, 用以对比分析 QWI 前后的波长蓝移、PL 强度以及半峰全宽(FWHM)变化。A 组样品具体工艺流程图如图 3(a) 所示。

B 组样品用相同的条件光刻后进行选择性湿法腐蚀, 使用  $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$  混合溶液腐蚀掉 InGaAs 欧姆接触层, 然后用  $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}$  混合溶液腐蚀掉 600 nm 的 InP 包覆层, 之后所有工艺与 A 组样品相同, B 组样品具体工艺流程如图 3(b) 所示。

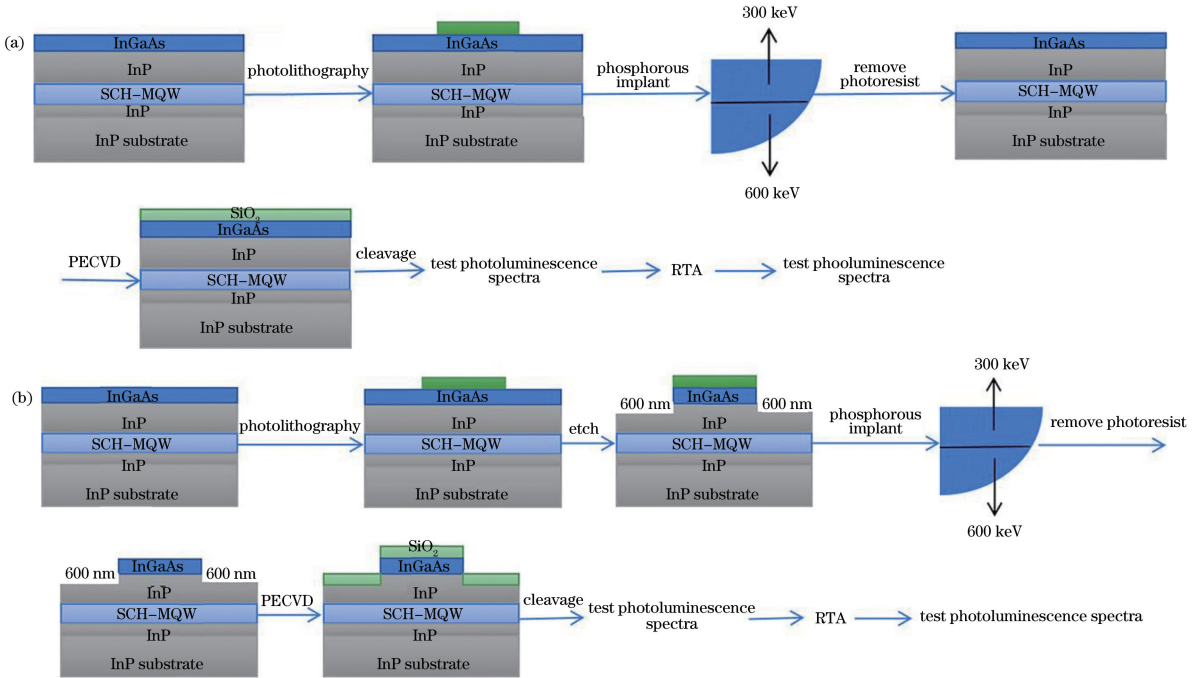


图 3 两组样品工艺流程图。(a) A 组;(b) B 组

Fig. 3 Process flow charts of two groups of samples. (a) Group A; (b) group B

## 4 结果与讨论

### 4.1 注入能量和退火温度对波长蓝移的影响

注入能量分别为 300 keV 和 600 keV 时,经不同温度退火后,A 样品 PL 谱的峰值波长变化情况如图 4 所示。可以看出随着退火温度增加,A 样品 PL 谱的峰值波长逐渐蓝移,在 600 keV、750 °C 条件下蓝移量最大,为 102 nm。在离子注入实验后,进行 RTA 处理,一方面是消除离子注入所造成的晶格损伤,提高晶体品质,另一方面是高温可促使有源区的量子阱混杂。PL 谱蓝移量随退火温度增加而增加,这是由于在 RTA 作用下,大量的空位或缺陷向有源区移动,虽然一部分间隙原子和空位在移动过程中会进行复合,但是仍有大量空位和间隙原子进入有源区,导致有源区中的 III 族原子和 V 族原子发生互扩散,使得量子阱材料的禁带宽度变宽,量子阱发光波长变短,出现蓝移现象,即 RTA 促使量子阱中构成阱垒材料的原子发生互扩散,使得量子阱材料对应的禁带宽度变宽,阱垒界面模糊,宏观上表现为量子阱的发光峰蓝移,从而测量结果就是 PL 谱蓝移。从图 4 还可以看出,当注入能量增大时,蓝移量增大,原因是注入离子与靶原子之间的作用会由能量较低时起主导作用的弹性碰撞(把动能传递给靶原子,引起原子移动)转变为能量较高时起主导作用的非弹性碰撞(把能量传递给电子,引起电子的

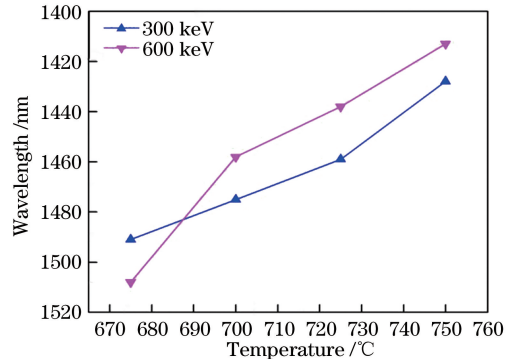


图 4 不同注入能量下,A 样品蓝移波长随退火温度的变化

Fig. 4 Blue-shift wavelength of sample A as a function of annealing temperature under different implantation energies

反冲或激发),而且能使产生空位的深度更大,更集中于有源区界面,因此能更有效地促进量子阱发生混合而产生更大的蓝移。

### 4.2 退火温度和退火时间对波长蓝移的影响

图 5 为不同退火温度、退火时间和退火次数下 A 样品的 PL 谱发光峰值波长的变化。对于一次退火处理,当退火温度不变时,蓝移量随退火时间的增加而增加;当退火时间不变时,蓝移量随退火温度的增加而增加,即退火温度和退火时间的增加都能促进量子阱混杂效应发生。原因是退火温度升高或时间增大后,更多的空位或缺陷扩散进入有源区量子阱,由于原子的扩散需要通过空位或者间隙原子等热缺陷的产生来实现,因此扩散的活化能本质上是



形成热缺陷所需要的能量。一般情况下杂质扩散活化能都比较高,即扩散比较困难,从而固体中原子的扩散通常需要在足够高的温度下才能进行。扩散系数表达式为

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad (1)$$

式中: $D$ 为扩散系数; $D_0$ 为频率因子; $Q$ 为扩散活化能; $R$ 为常数; $T$ 为温度。从(1)式看出随着温度升高,扩散系数急剧增大,即高温能促进空位和缺陷的扩散。当空位或者缺陷进入有源区后,随着退火温度的不断增加,在缺陷的作用下,阱区和垒区原子间的互扩散速率上升,加速了量子阱混杂的过程,导致波长蓝移量的增加。无规则行走与扩散距离之间的关系式为

$$R_n = A \sqrt{Dt}, \quad (2)$$

式中: $R_n$ 为扩散距离; $t$ 为退火时间; $A$ 为常数。从(2)式中可以看出,随着退火时间增加,原子的扩散距离增加,促使空位或者缺陷进入有源区,加速量子阱混杂过程,使得蓝移量增加。

从图5还可以看出,退火温度对蓝移量的影响要大于退火时间对蓝移量的影响,当退火温度较低时(如675℃),在任意退火时间下,量子阱混杂效应几乎微乎其微,该实验结果与(1)、(2)式表达的结果一致,更进一步表明该量子阱混杂过程是离子注入下热扩散导致的结果。只有当RTA条件所提供的能量大于该种材料发生热扩散的扩散活化能 $Q$ 时,量子阱垒才能发生互扩散,实现量子阱混杂。而(2)式表明,长的RTA时间可加深量子阱垒扩散程度,但不是决定作用,由此宏观上表现出其对应的PL谱峰值波长发生蓝移。就退火次数而言,图5表明二次退火样品的蓝移量进一步提高,而且经

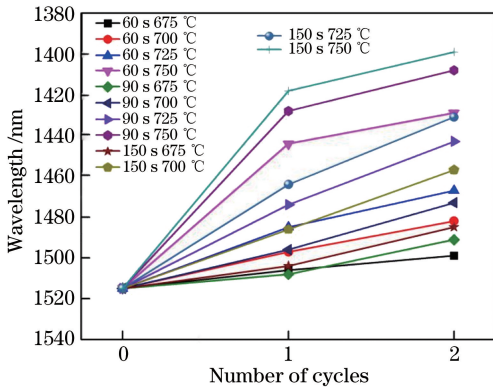


图5 不同退火温度和时间下波长蓝移变化图

Fig. 5 Variation in blue-shift of wavelength at different annealing temperatures and time

300 keV、750℃退火150 s的样品经二次退火后发生最大蓝移值,蓝移量达到116 nm。由此可知,一次退火并没有使势阱和势垒完全混合,再次进行RTA, $P^+$ 注入引起的空位或缺陷进一步向量子阱区扩散,有源区中量子阱和垒之间的原子也进一步扩散,量子阱混杂程度加深,导致波长蓝移更甚。

#### 4.3 注入能量和退火温度对PL强度的影响

图6为经300 keV和600 keV能量离子注入、不同RTA条件处理后,A样品PL强度随退火温度的变化图。由图6可知,随着温度增加,PL谱强度先增加后降低,在700℃时达到最大值。随着温度升高,PL谱强度增大,原因是高温修复了离子注入引起的缺陷;当温度再升高时,PL谱强度会降低,这可能是过多的空位或缺陷进入到有源区以后产生的杂质能级导致更多的非辐射复合,以及温度升高时材料中P原子有一定程度的挥发,而P原子挥发对样品所造成的退化影响大于退火对晶体的改善,导致晶体品质有所下降。

在图6中还可以看出,300 keV样品的整体PL强度要大于600 keV样品,原因可能是由于注入能量增大,入射深度更深,离子注入引起了更多的杂质缺陷,晶体损伤比较严重,退火并没有完全消除缺陷,没有修复晶格损伤,因此注入能量为600 keV的样品PL强度整体要小于注入能量为300 keV的样品。

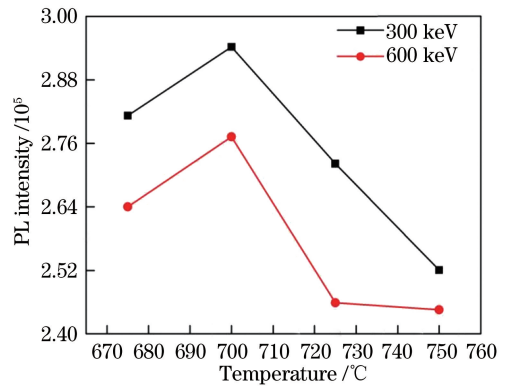


图6 不同注入能量下,A样品PL强度随温度变化曲线

Fig. 6 PL intensity of sample A as a function of annealing temperature under different implantation energies

#### 4.4 退火温度和退火时间对PL强度的影响

图7为A样品在不同退火温度和不同退火时间下的PL强度变化图。由图7可以看出,一次和二次退火之后PL强度总体趋势都有所降低,原因可能是P原子挥发导致晶格完整性下降;也可能是过度的退火使得材料中各类缺陷增加较多,量子阱和垒间的界面状况变差,一些不明非复合机制增多,

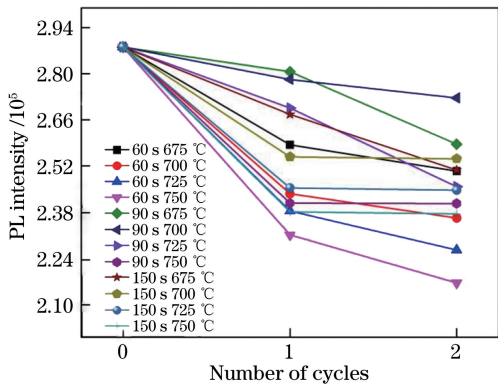


图 7 不同退火温度和时间下 A 样品 PL 强度变化图  
Fig. 7 Variation in PL intensity of sample A at different annealing temperatures and time

因此 PL 强度降低。虽然二次退火 PL 强度下降,但是蓝移量增加了 10~30 nm,因此循环退火并没有对有源区的发光特性造成致命破坏,可采用此种办法增加蓝移量从而达到我们所需要的理想波长。

4.5 注入能量和退火温度对 FWHM 的影响

图 8 为在注入能量分别为 300 keV 和 600 keV,不同温度退火时,A 样品的 FWHM 变化情况。由图 8 可以看出,FWHM 在退火温度少于 700 °C 时减小;退火温度再增加时,FWHM 基本是线型增加。FWHM 的减小说明晶体品质得到了一定的改善,这可能是 RTA 使得部分间隙原子移动到晶格格点,在一定程度上消除了晶格缺陷。之后 FWHM 线性增加说明 RTA 对晶体品质的优化作用部分被 P<sup>+</sup> 注入引入的晶格缺陷所抵消,该条件下空位或缺陷的扩散导致量子阱和垒原子互扩散界面模糊度增强。

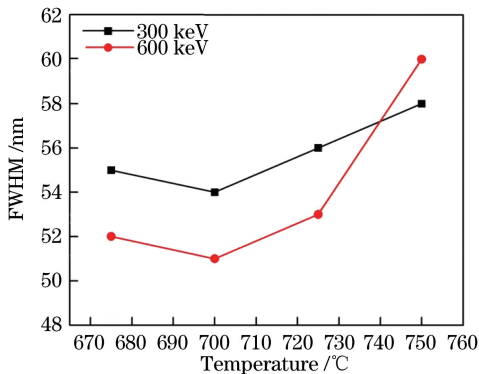


图 8 不同注入能量下,A 样品的 FWHM 随温度变化曲线  
Fig. 8 FWHM of sample A as a function of annealing temperature under different implantation energies

4.6 A 和 B 样品 PL 谱线对比

图 9 是 A 和 B 样品在 725 °C 退火 150 s 下的 PL 谱图,A 样品蓝移量为 51 nm,B 样品蓝移量为

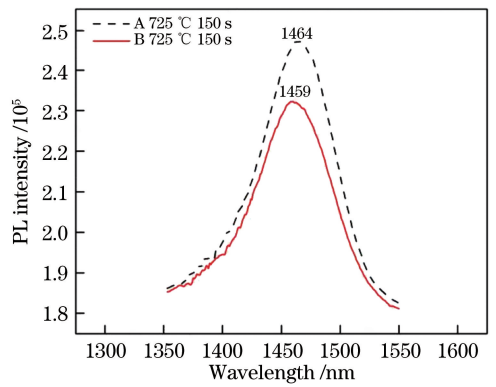


图 9 A、B 样品的 PL 谱线对比

Fig. 9 Comparison of PL spectra between samples A and B 56 nm。由图 9 可知,A、B 样品在相同条件下退火蓝移量相差仅为 5 nm,可见 B 样品更深的离子注入深度并没有导致更大程度的蓝移,说明离子注入造成的损伤分布对量子阱混杂并没有明显的影响,后续 RTA 会使注入引起的杂质缺陷扩散进入有源区,从而发生程度近乎相同的蓝移;但是 B 样品 PL 强度要小于 A 样品,可能是由于入射深度更深,离子注入会引起更多的杂质缺陷,晶体损伤比较严重,退火并没有完全消除缺陷,没有修复晶格损伤。在这些退火条件下,B 样品得到的结果也类似,因此以上实验结果只讨论了 A 样品。

5 结 论

对 P 离子注入 InGaAsP/InGaAsP 量子阱引起的量子阱混杂技术进行系统研究。结果表明,经离子注入并结合快速热退火处理,量子阱材料可获得显著的 PL 谱波长蓝移,但 PL 谱强度下降。蓝移量随注入能量、退火温度、退火时间的增加而增加,其中退火温度的影响最大,在一次退火时 A 样品在注入剂量  $1 \times 10^{14}$  ion/cm<sup>2</sup>、注入能量 600 keV、750 °C 退火 150 s 条件下可以得到 102 nm 的蓝移量;在二次退火时,A 样品在注入剂量  $1 \times 10^{14}$  ion/cm<sup>2</sup>、注入能量 300 keV、750 °C 退火 150 s 条件下可以得到 116 nm 的蓝移量,且适度循环退火可使得 QWI 效果进一步提升。上述研究成果有助于进一步利用离子注入诱导量子阱混杂技术实现有源无源光子集成回路。

参 考 文 献

[1] Huang H, Ren X M, Lü J H, et al. Monolithically integrated Si-based wavelength-selective photodetector operating at long wavelength [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(s1): 356-359. 黄辉,任晓敏,吕吉贺,等.具有波长选择功能的单

- 片集成 Si 基长波长光探测器 [J]. 中国激光, 2009, 36(s1): 356-359.
- [2] Chen B. Monolithic integration technology based on selective epitaxy growth [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.  
陈彬. 基于选区外延生长的单片集成技术 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [3] Zhang D H, Sun L, Yoon S F. Doping effect on the intermixing in GaInAsP/InP multiple quantum well structures grown using all solid sources [J]. Journal of Crystal Growth, 2004, 268(3/4): 401-405.
- [4] Dhamodaran S, Devaraju G, Pathak A P, et al. Ion beam modification studies of InP based multi quantum wells [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 2008, 266(8): 1810-1815.
- [5] Lin T, Zheng K, Ma X Y. AlGaInP/GaInP quantum well intermixing induced by zinc impurity diffusion [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(11): 2209-2214.  
林涛, 郑凯, 马晓宇. Zn 杂质扩散诱导 AlGaInP/GaInP 量子阱混杂 [J]. 光学学报, 2008, 28(11): 2209-2214.
- [6] Lin T, Sun H, Zhang H Q, et al. Present status of impurity free vacancy disordering research and application [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 030003.  
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): 030003.
- [7] Genest J, Dubowski J J, Aimez V. Suppressed intermixing in InAlGaAs/AlGaAs/GaAs and AlGaAs/GaAs quantum well heterostructures irradiated with a KrF excimer laser [J]. Applied Physics A, 2007, 89(2): 423-426.
- [8] Nie D, Mei T, Djie H S, et al. Analysis of inductively coupled argon plasma-enhanced quantum-well intermixing process for multiple bandgap implementation [J]. Journal of Crystal Growth, 2006, 288(1): 32-35.
- [9] Liu C, Li G H, Han D J, et al. Band-gap blue shift by ion implantation in InGaAs/InGaAsP quantum-well laser-structure [J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2001, 37(2): 170-173.  
刘超, 李国辉, 韩德俊, 等. InGaAs/InGaAsP 量子阱激光器材料带隙蓝移研究 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2001, 37(2): 170-173.
- [10] Chen J, Zhao J, Wang Y C, et al. InGaAsP/InP double quantum well intermixing induced by phosphorus ion implantation [J]. Semiconductor Photonics and Technology, 2005, 11(4): 217-220.
- [11] Parker J S, Sivananthan A, Norberg E, et al. Regrowth-free high-gain InGaAsP/InP active-passive platform via ion implantation [J]. Optics Express, 2012, 20(18): 19946-19955.
- [12] Younis U, Holmes B M, Hutchings D C. Characterization and optimization of ion implantation for high spatial resolution quantum well intermixing in GaAs/AlGaAs superlattices [J]. The European Physical Journal Applied Physics, 2014, 66(1): 10101.
- [13] Lin T, Zhang H Q, Guo E M, et al. Study of N ions implantation induced quantum well intermixing in GaInP/AlGaInP quantum well structures [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 650: 336-341.
- [14] Lin T, Ning S H, Li J J, et al. Temperature-dependent photoluminescence characteristics of strained GaInP quantum well structure [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(1): 0125001.  
林涛, 宁少欢, 李晶晶, 等. 张应变 GaInP 量子阱结构变温光致发光特性 [J]. 光子学报, 2019, 48(1): 0125001.