

# 不同 Al 组分的扩散阻挡层对无杂质空位诱导量子阱混杂的影响

张娜玲<sup>1,2</sup>, 井红旗<sup>1\*</sup>, 袁庆贺<sup>1,2</sup>, 仲莉<sup>1</sup>, 刘素平<sup>1</sup>, 马晓宇<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院半导体研究所光电子器件国家工程研究中心, 北京 100083;

<sup>2</sup>中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049

**摘要** 为了获得更好的量子阱混杂效果,深入探讨了不同 Al 组分的扩散阻挡层对无杂质空位诱导量子阱混杂的影响。首先在两种不同 Al 组分外延片表面上分别生长了一层 200 nm 厚的 SiO<sub>2</sub> 介质薄膜,然后在 865~905 °C 温度范围内,进行了 90 s 的高温快速热退火处理。实验结果表明,低铝结构的波长蓝移量更大,且光致发光 (Photoluminescence, PL) 谱的强度下降更小,这说明在无杂质空位诱导量子阱混杂中,外延结构中的 Al 和 Ga 对点缺陷扩散的影响是不同的, Ga 更有利于点缺陷的扩散。研究结果为无杂质空位诱导量子阱混杂的理论研究及器件的外延结构设计提供了参考。

**关键词** 材料; 高铝结构; 低铝结构; 无杂质空位诱导; 量子阱混杂; 波长蓝移

**中图分类号** TN248.4

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/CJL202148.2403001

## 1 引言

量子阱混杂技术已被广泛应用于光子集成电路、光电子集成电路和带有非吸收窗口结构的大功率半导体激光器中。常见的实现量子阱混杂的方法包括离子注入诱导<sup>[1-3]</sup>、杂质诱导<sup>[4]</sup>和无杂质空位诱导<sup>[5-6]</sup>等。无杂质空位诱导由于没有杂质引入,工艺过程简单、成本低廉,且外延片在混杂后仍能够保持较高的晶格质量,因此得到了研究人员的广泛关注。

科研人员对无杂质空位诱导量子阱混杂进行了大量的理论研究<sup>[7-11]</sup>,提出了量子阱混杂中的组分扩散遵循 Fick 第二定律的假设,并推导出了量子阱结构的组分扩散解<sup>[8-9]</sup>,解释了 SiO<sub>2</sub> 薄膜增强无杂质空位诱导量子阱混杂的原因<sup>[10-11]</sup>。同时,许多文献对无杂质空位诱导量子阱混杂的退火温度<sup>[12]</sup>、退火时间<sup>[13]</sup>、介质膜种类<sup>[14-15]</sup>、介质膜生长厚度和质量<sup>[16]</sup>等进行了研究,并成功地将无杂质空位诱导量子阱混杂技术应用到器件当中,制备出带有非吸收

窗口的 915 nm<sup>[17-18]</sup>、940 nm<sup>[19]</sup> 大功率半导体激光器,提高了光学灾变 (Catastrophe Optical Damage, COD) 阈值,论证了无杂质空位诱导是一种提高大功率半导体激光器输出性能的有效手段。然而,当前研究均集中于无杂质空位诱导量子阱混杂技术的理论研究、实验条件研究及其制备的器件性能分析,关于器件外延结构对量子阱混杂技术的影响研究鲜有报道。

本文对具有不同 Al 组分浓度波导层和限制层的外延片进行了变温快速热退火实验,温度变化范围为 865~905 °C,探讨了不同外延结构对量子阱混杂的影响,并对实验结果进行了理论分析与讨论。实验结果表明,随着退火温度的升高,两种样品的波长蓝移量都在增加;而在相同实验条件下,波导层和限制层的 Al 组分浓度越低,外延片的波长蓝移量越大,PL 谱的强度下降越小。研究结果为无杂质空位诱导量子阱混杂技术的理论研究及器件的外延结构设计提供了参考。

收稿日期: 2021-03-23; 修回日期: 2021-04-22; 录用日期: 2021-05-17

基金项目: 国家重点研发项目(2018YFB1107301)、国防科技重点基金(6142405041803)

通信作者: \*jinghq@semi.ac.cn

## 2 实 验

采用金属有机物化学气相沉积 (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) 设备制备了 InGaAs/GaAs 量子阱外延结构样品 1 和样品 2, 其详细的外延结构分别如图 1(a)、(b) 所示。样品 1 为高铝结构, 其 P 型波导层和限制层分别为 130 nm 厚的  $\text{Al}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{As}$  和 1150 nm 厚的  $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{As}$ ,

(a)	(b)
150 nm GaAs contact layer	150 nm GaAs contact layer
1150 nm $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{As}$ confinement layer	1150 nm $\text{Al}_{0.37}\text{Ga}_{0.63}\text{As}$ confinement layer
130 nm $\text{Al}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{As}$ waveguide layer	130 nm $\text{Al}_{0.255}\text{Ga}_{0.745}\text{As}$ waveguide layer
10 nm GaAs barrier layer	10 nm GaAs barrier layer
7.9 nm InGaAs quantum well	7.9 nm InGaAs quantum well
10 nm GaAs barrier layer	10 nm GaAs barrier layer
245 nm $\text{Al}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{As}$ waveguide layer	245 nm $\text{Al}_{0.255}\text{Ga}_{0.745}\text{As}$ waveguide layer
3100 nm $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ confinement layer	3100 nm $\text{Al}_{0.31}\text{Ga}_{0.69}\text{As}$ confinement layer
500 nm GaAs buffer layer	500 nm GaAs buffer layer
GaAs substrate	GaAs substrate

图 1 975 nm 半导体激光器的外延结构。(a) 样品 1; (b) 样品 2

Fig. 1 Epitaxial structure of 975 nm semiconductor laser. (a) Sample 1; (b) sample 2

基于本课题组对无杂质空位诱导量子阱混杂的前期研究<sup>[16]</sup>, 本文首先采用等离子体增强化学气相沉积 (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD) 设备, 在样品 1 和样品 2 表面上生长了一层 200 nm 厚的  $\text{SiO}_2$  介质薄膜, 生长条件为  $\text{SiH}_4$  流速 8 mL/min,  $\text{N}_2\text{O}$  流速 520 mL/min, 生长温度 280 °C, 生长压强为 1900 mTorr (1 mTorr = 0.133 Pa)。然后利用快速热退火设备对样品 1 和样品 2 进行变温和变时间快速热退火处理, 变温时保持退火时间不变, 变时间时保持退火温度不变。退火完成后, 利用 HF 酸去除样品表面的  $\text{SiO}_2$  介质薄膜, 再用浓硫酸、双氧水与水配制的 411 溶液对样品进行盖帽层 GaAs 腐蚀, 腐蚀时间为 50 s, 最后用丙酮和异丙醇对样品片进行清洗。完成上述步骤后, 对实验样品进行光致发光 (Photoluminescence, PL) 谱测试。

## 3 实验结果与分析讨论

### 3.1 退火温度的影响

对样品 1、样品 2 进行变温快速热退火实验, 温度变化范围为 865~905 °C, 每次退火时间为 90 s。波长蓝移量 ( $\Delta\lambda$ ) 随退火温度的变化如图 2 所示。

N 型波导层和限制层分别为 245 nm 厚的  $\text{Al}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{As}$  和 3100 nm 厚的  $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ 。相比于样品 1, 样品 2 在各层厚度不变的情况下, 各层中 Al 的组分较低, 其中 P 型波导层和限制层分别为  $\text{Al}_{0.255}\text{Ga}_{0.745}\text{As}$  和  $\text{Al}_{0.37}\text{Ga}_{0.63}\text{As}$ , N 型波导层和限制层分别为  $\text{Al}_{0.255}\text{Ga}_{0.745}\text{As}$  和  $\text{Al}_{0.31}\text{Ga}_{0.69}\text{As}$ , 即样品 2 为低铝结构。两种样品的势阱和势垒的厚度及组分是完全相同的。

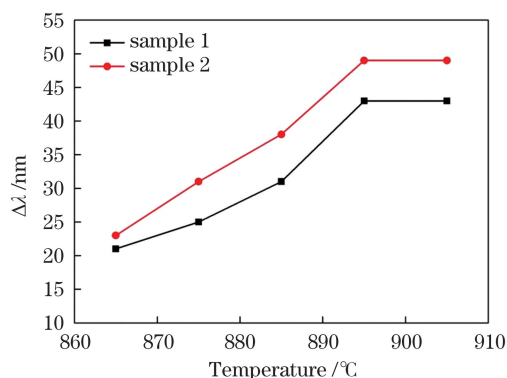


图 2 退火温度对波长蓝移量的影响

Fig. 2 Influence of annealing temperature on wavelength blue shift

由图 2 可知, 在 865~905 °C 退火温度范围内, 样品的波长蓝移量为 20~50 nm, 随着退火温度的增加, 样品 1 和样品 2 的波长蓝移量均增加, 而当退火温度大于 895 °C 时, 两种样品的波长蓝移量皆不再增加, 分别为 43 nm 和 49 nm。

对 III-V 族化合物半导体材料来说, 温度对 III 族原子的空位浓度及间隙原子浓度有很大的影响<sup>[20]</sup>, 空位的归一化热平衡浓度可以写为

$$[V_{\text{III}}] = \exp(-E_{\text{V}}/K_{\text{B}}T), \quad (1)$$

间隙原子的归一化热平衡浓度可以写为

$$[I_{\text{III}}] = \exp(-E_1/K_B T), \quad (2)$$

式中: $E_V$  和  $E_I$  分别为形成一个空位和间隙原子所需要的能量; $K_B$  为玻尔兹曼常数; $T$  为温度。

由(1)、(2)式可知,晶体中点缺陷密度会随着温度的升高而快速增大。基于  $\text{SiO}_2$  薄膜的无杂质空位诱导量子阱混杂是源于高温条件下表面  $\text{SiO}_2$  薄膜对 Ga 原子的溶解及二氧化硅中的少量 Si 原子向外延片的扩散<sup>[11]</sup>。其过程是 Ga 原子在高温退火条件下,扩散进入表面  $\text{SiO}_2$  介质薄膜,在外延片表面留下大量 Ga 空位点缺陷;同时, $\text{SiO}_2$  中的 Si 原子在高温条件下进入外延片,产生点缺陷;这些点缺陷通过热扩散进入到量子阱附近区域,促使量子阱发生组分变化,宏观上表现为能带的展宽和发光波长蓝移。对于 InGaAs/GaAs 量子阱结构的外延片,在点缺陷和浓度梯度的共同作用下,势阱中的部分 In 原子扩散出去,导致带隙变大<sup>[7,21]</sup>。因此,随着温度的升高,样品 1 和样品 2 中的点缺陷浓度会快速增大,扩散速度也会增加,样品势阱中 In 原子的扩散浓度增加,在宏观上表现为随着退火温度的升高,样品 1 和样品 2 的波长蓝移量增大,如图 2 所示。

无  $\text{SiO}_2$  介质膜的外延片高温退火时,也会发生缺陷扩散。对无  $\text{SiO}_2$  介质膜的样品 1 和样品 2 在相同条件下(退火温度为  $875\text{ }^\circ\text{C}$ ,退火时间为  $90\text{ s}$ )进行退火处理,结果显示,低铝结构样品 2 的波长蓝移量为  $8\text{ nm}$ ,高铝结构样品 1 的波长蓝移量为  $6\text{ nm}$ ,与具有  $\text{SiO}_2$  介质膜的样品相比,无  $\text{SiO}_2$  介质膜样品的蓝移量更低,但低铝结构样品的蓝移量比高铝结构样品

的蓝移量大。针对有无  $\text{SiO}_2$  介质膜,低铝结构样品的波长蓝移量都比高铝结构样品波长蓝移量大的现象,基于相关研究<sup>[22]</sup>,本文提出 InGaAs/GaAs 量子阱外延结构的无杂质空位诱导量子阱混杂主要是源于 Ga 空位扩散诱导,且量子阱混杂程度和 Ga 空位浓度的对数函数呈正比的假说;基于文献<sup>[23,24]</sup>,本文提出外延片盖帽层产生的 Ga 空位向下扩散运动时和扩散进外延片的 Si 原子在外延片中运动时,下层 Ga 原子比 Al 原子更容易占据上方的 Ga 空位且 Si 原子更容易替代 Ga 原子的假说。因此,相比于 Al 原子,Ga 原子更有利于点缺陷 Ga 空位和 Si 间隙原子的扩散,低铝结构中的 Ga 原子浓度比高铝结构中的高,故在相同退火条件下,低铝结构样品 2 的波长蓝移量比高铝结构样品 1 的波长蓝移量高。

高温退火会对样品的晶格造成一定的损伤,且随着退火温度的升高,样品晶格的损伤变严重。除此之外,随着退火温度的升高,量子阱混杂程度增加,势阱和势垒的带隙差减小,势垒对势阱中载流子的限制作用降低。因此,随着退火温度的持续增加,外延片 PL 谱的强度逐渐下降,半峰全宽(FWHM)变宽,如图 3 所示。从图 3 中还可以看到,高铝结构样品 1 的 PL 谱强度比低铝结构样品 2 减小得更多。分析认为,实验中所使用的快速热退火设备的密封性不是很好,高温退火时外延片中的 Al 会被氧化,而高铝结构样品中 Al 的浓度较大,被氧化的程度相对较高,导致外延片损伤较严重,故表现出 PL 谱强度减小得更多。

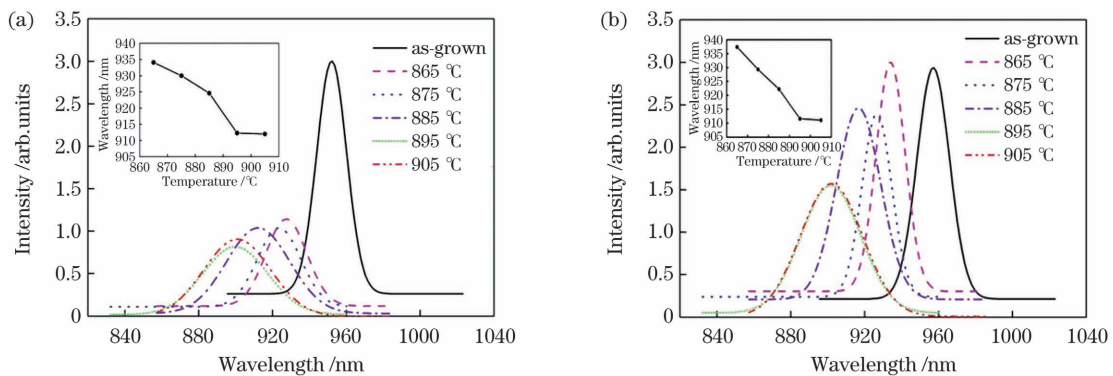


图 3 退火温度对 PL 谱强度的影响。(a)样品 1;(b)样品 2

Fig. 3 Influence of annealing temperature on PL spectral intensity. (a) Sample 1; (b) sample 2

### 3.2 退火时间的影响

基于上述退火温度对波长蓝移量影响的实验结果,选用低铝结构样品 2,在  $875\text{ }^\circ\text{C}$  条件下,进行不同时长条件下的快速热退火实验,结果如图 4 所示。随着退火时间的增加,低铝结构样品 2 的波长蓝移量增加,外延片量子阱的 PL 谱强度

减小。

对于 InGaAs/GaAs 单量子阱结构的外延片,在点缺陷和浓度梯度的作用下,势阱中的部分 In 原子向外扩散,导致带隙变大。考虑沿生长方向( $z$ )的一维扩散,各组分的原子浓度  $C$  随时间的变化遵从 Fick 第二定律:



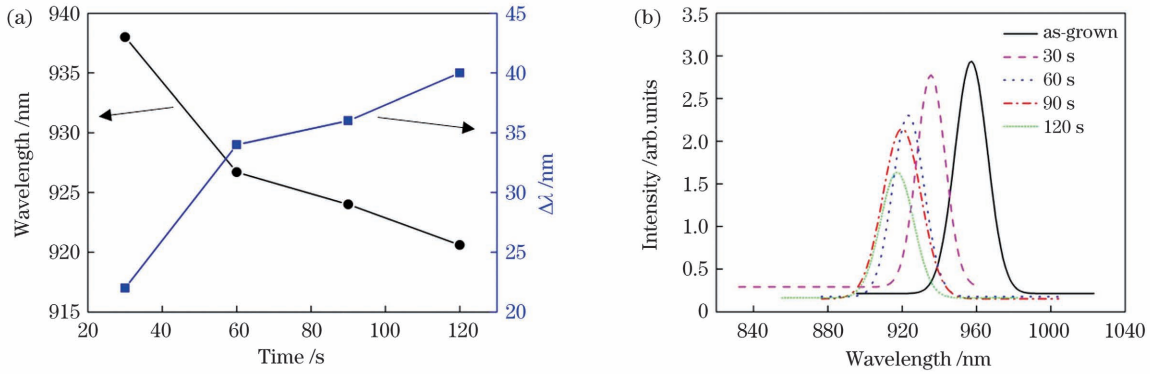


图 4 退火时间对量子阱混杂的影响。(a)对波长蓝移的影响;(b)对 PL 谱强度的影响

Fig. 4 Influence of annealing time on quantum well mixing. (a) Influence on wavelength blue shift; (b) influence on PL spectral intensity

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial C^2}{\partial z^2}, \quad (3)$$

式中:  $D$  为扩散系数;  $t$  为扩散时间。

对于 InGaAs/GaAs 单量子阱结构, In 原子的分布可以表示为

$$C_w = \begin{cases} C'_w, & |z| < \frac{d}{2} \\ C_b, & |z| > \frac{d}{2} \end{cases}, \quad (4)$$

式中:  $d$  为阱宽;  $C'_w$  和  $C_b$  分别为势阱和势垒中 In 组分的浓度。

根据 Fick 第二定律, 推导出混杂后单量子阱结构中 In 组分的浓度表达式为

$$C_{z,t} = \frac{C_b - C'_w}{2} \left[ \operatorname{erfc}\left(\frac{d - 2z}{4\sqrt{Dt}}\right) + \operatorname{erfc}\left(\frac{d + 2z}{4\sqrt{Dt}}\right) \right] + C'_w, \quad (5)$$

式中:  $\operatorname{erfc}(\cdot)$  为余误差函数。根据以上推导结果, 对不同扩散长度下量子阱区的 In 组分浓度(原子数分数, 全文同)进行模拟, 结果如图 5 所示, 其中扩散长

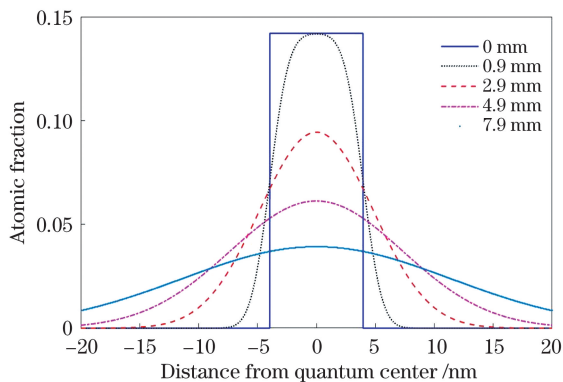


图 5 In 原子在不同扩散长度下的浓度

Fig. 5 Concentrations of In atoms under different diffusion lengths

度  $L = \sqrt{Dt}$  分别选取为 0, 0.9, 2.9, 4.9, 7.9 nm。

In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>As 材料带隙与组分浓度的函数关系可以表示为

$$E_g^\Gamma = 0.36 + 0.629x + 0.436x^2, \quad (6)$$

式中:  $x$  为 In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>As 材料中 Ga 原子的原子数分数;  $E_g^\Gamma$  为 In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>As 材料的  $\Gamma$  带带隙。

随着扩散时间的增加, 扩散长度  $L$  增加, 由图 5 可知, 随着扩散长度  $L$  的增加, 扩散出去的 In 逐渐增多,  $x$  逐渐增大。随着  $x$  的增大, 量子阱 In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>As 的禁带宽度逐渐增大, 外延片激光波长 ( $\lambda$ ) 与禁带宽度 ( $E_g$ ) 的关系为

$$\lambda = \frac{1.24}{E_g}. \quad (7)$$

由(7)式可知, 随着禁带宽度的增加, 激光波长逐渐减小, 故呈现出随着退火时间的增加, 激光波长逐渐减小、波长蓝移量逐渐增加的现象, 如图 4(a)所示。从图 4(b)中可以看出, PL 谱的强度随退火时间的增加呈现出逐渐减小的趋势。这主要是因为随着退火时间的增加, 势阱和势垒的带隙差减小, 势垒对势阱中载流子的限制作用降低, 同时外延片的晶格损伤变严重。

## 4 结 论

采用无杂质空位诱导量子阱混杂技术, 对两种具有不同 Al 组分波导层和限制层的 InGaAs/GaAs 单量子阱外延片进行了退火实验。实验结果表明, 当退火时间为 90 s, 温度变化范围为 865~905 °C 时, 样品波长蓝移量为 20~50 nm; 随着退火温度的升高, 两种样品的波长蓝移量都在增加, 但 PL 谱的强度逐渐减小且其半峰全宽逐渐变宽。在相同退火条件下, 低铝结构外延片的波长蓝移量更大, PL 谱强度下降得更小。针对实验结果, 提出假说:

1) InGaAs/GaAs 量子阱外延结构的无杂质空位诱导量子阱混杂主要是源于 Ga 空位扩散诱导, 且量子阱混杂程度与 Ga 空位浓度的对数函数呈正比; 2) 外延片盖帽层产生的 Ga 空位向下扩散运动时和扩散进外延片的 Si 原子在外延片中运动时, 下层 Ga 原子比 Al 原子更容易占据上方的 Ga 空位且 Si 原子更容易替代 Ga 原子。因此, 相比于 Al 原子, Ga 原子更容易使点缺陷 Ga 空位和 Si 原子向下扩散。研究结果为量子阱混杂的理论研究及器件外延结构的设计提供了参考。

### 参 考 文 献

- [1] Ge X H, Zhang R Y, Guo C Y, et al. Multiple factor ion implantation-induced quantum well intermixing effect[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(1): 011409.  
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): 011409.
- [2] 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.
- [3] Yin T, Letal G J, Robinson B J, et al. The effects of InP grown by He-plasma assisted epitaxy on quantum-well intermixing [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2001, 37(3): 426-429.
- [4] Ohno T, Takiguchi M, Wakabayashi K, et al. Characteristics of red-emitting broad area stripe laser diodes with zinc diffused window structures [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7583: 75830W.
- [5] Taniguchi H, Ishii H, Minato R, et al. 25-W 915-nm lasers with window structure fabricated by impurity-free vacancy disordering (IFVD)[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(5): 1176-1179.
- [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] Hsieh K Y, Hwang Y L, Lee J H, et al. Enhanced/suppressed interdiffusion of InGaAs-GaAs-AlGaAs strained layers by controlling impurities and gallium vacancies[J]. *Journal of Electronic Materials*, 1990, 19(12): 1417-1423.
- [8] Schlesinger T E, Kuech T. Determination of the interdiffusion of Al and Ga in undoped (Al, Ga)As/GaAs quantum wells [J]. *Applied Physics Letters*, 1986, 49(9): 519-521.
- [9] Gontijo I, Krauss T, Marsh J H, et al. Postgrowth control of GaAs/AlGaAs quantum well shapes by impurity-free vacancy diffusion[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1994, 30(5): 1189-1195.
- [10] Deppe D G, Guido L J, Holonyak N, Jr, et al. Stripe-geometry quantum well heterostructure  $Al_xGa_{1-x}As$ -GaAs lasers defined by defect diffusion [J]. *Applied Physics Letters*, 1986, 49(9): 510-512.
- [11] Hulko O, Thompson D A, Simmons J G. Quantitative compositional profiles of enhanced intermixing in GaAs/AlGaAs quantum well heterostructures annealed with and without a SiO<sub>2</sub> cap layer [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2009, 24(4): 045015.
- [12] O'Brien S, Shealy J R, Bour D P, et al. Effects of rapid thermal annealing and SiO<sub>2</sub> encapsulation on GaInAs/AlInAs heterostructures [J]. *Applied Physics Letters*, 1990, 56(14): 1365-1367.
- [13] Han D J, Niu J S, Zhu H L, et al. Impurity-free vacancy diffusion technique for InGaAsP/InP multiple quantum well laser structure [J]. *Chinese Physics Letters*, 2001, 18(1): 100-102.
- [14] Du S C, Fu L, Tan H H, et al. Investigations of impurity-free vacancy disordering in (Al)InGaAs(P)/InGaAs quantum wells [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2010, 25(5): 055014.
- [15] An Y P, Yang H, Mei T, et al. Cap layer influence on impurity-free vacancy disordering of InGaAs/InP quantum well structure[J]. *Chinese Physics Letters*, 2010, 27(1): 017302.
- [16] Wang X, Zhao Y H, Zhu L N, et al. Impurity-free vacancy diffusion induces quantum well intermixing in 915 nm semiconductor laser based on SiO<sub>2</sub> film [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(3): 0314003.  
王鑫, 赵懿昊, 朱凌妮, 等. 基于 SiO<sub>2</sub> 薄膜的 915 nm 半导体激光器的无杂质空位诱导量子阱混合研究[J]. *光子学报*, 2018, 47(3): 0314003.
- [17] Naito H, Nagakura T, Torii K, et al. Long-term reliability of 915-nm broad-area laser diodes under 20-W CW operation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(15): 1660-1662.
- [18] Morita T, Nagakura T, Torii K, et al. High-efficient and reliable broad-area laser diodes with a window structure [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(4): 1502104.

- [19] Zhou L, Gao X, Xu L Y, et al. InGaAs/GaAsP/GaInP quantum well lasers with window structure fabricated by impurity free vacancy disordering [J]. *Solid-State Electronics*, 2013, 89: 81-84.
- [20] Zhou L. Research on anti catastrophic optical damage of high power semiconductor laser diodes [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014: 27-28.  
周路. 高功率半导体激光器抗 COD 关键技术研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2014: 27-28.
- [21] Zhang J Y. Design and fabrication of current non-injection, transparent non-absorptive window for 9XX nm devices [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019: 26.  
张继宇. 9XX nm 器件电流非注入、透明无吸收窗口的设计与制作 [D]. 长春: 长春理工大学, 2019: 26.
- [22] Oh Y T, Kang T W, Hong C Y, et al. The relation between Ga vacancy concentrations and diffusion lengths in intermixed GaAs/Al<sub>0.35</sub>Ga<sub>0.65</sub>As multiple quantum wells [J]. *Solid State Communications*, 1995, 96(4): 241-244.
- [23] Yu X H, Ge Z H, Chang B K, et al. Electronic structure of Zn doped Ga<sub>0.5</sub>Al<sub>0.5</sub>As photocathodes from first-principles [J]. *Solid State Communications*, 2013, 164: 50-53.
- [24] Gao S L, Yang Q, Chen S P, et al. Periodic table of chemical elements [M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2016.  
高胜利, 杨奇, 陈三平, 等. 化学元素周期表 [M]. 4 版. 北京: 科学出版社, 2016.

## Influence of Diffusion Barriers with Different Al Compositions on Impurity-Free Vacancy Induced Quantum Well Mixing

Zhang Naling<sup>1,2</sup>, Jing Hongqi<sup>1\*</sup>, Yuan Qinghe<sup>1,2</sup>, Zhong Li<sup>1</sup>, Liu Suping<sup>1</sup>, Ma Xiaoyu<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> National Engineering Research Center for Optoelectronic Devices, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

<sup>2</sup> College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

### Abstract

**Objective** In recent years, the quantum well mixing technology has been widely used in photonic integrated circuits, optoelectronic integrated circuits, and high-power semiconductor lasers with non-absorbing window structures. As for impurity-free vacancy induced quantum well mixing, due to the fact that there is no introduction of impurities, the process is simple, the cost is low, and the epitaxial wafer can maintain high lattice quality after quantum well mixing. The current literature reports are focused on the theoretical research, the exploration of experimental conditions, and the performance analysis of the related devices, but the reports on the influence of epitaxial structure on impurity-free vacancy induced quantum well mixing are still blank. In this article, the rapid thermal annealing experiment is carried out on the epitaxial wafers with different Al composition concentration waveguide layers and confinement layers, the influence of epitaxial structure on quantum well mixing is discussed, and the experimental results are theoretically analyzed and discussed. The research results provide a reference for the theoretical study of impurity-free vacancy induced quantum well mixing and the design of epitaxial structure of the device.

**Methods** Firstly, the InGaAs/GaAs single quantum well epitaxial wafer is grown using the metal-organic chemical vapor deposition equipment, the sample 1 is a high-aluminum structure, and the sample 2 is a low-aluminum structure, whose detailed epitaxial structures are shown in Figs. 1(a) and 1(b), respectively. Second, the 200 nm SiO<sub>2</sub> dielectric film is grown on the surface of the samples 1 and 2 using the plasma enhanced chemical vapor deposition equipment. Then, the samples 1 and 2 are carried to a rapid thermal annealing treatment under different annealing temperature and time conditions. Finally, the PL spectral test is performed on the samples 1 and 2, and the experimental results are analyzed and discussed focusing on the influence of epitaxial structure on impurity-free vacancy-induced quantum well mixing.

**Results and Discussions** Firstly, the influence of annealing temperature on impurity-free vacancy induced

quantum well mixing is analyzed. The wavelength blue shifts of these two samples are 20–50 nm in the range of 865–905 nm. The wavelength blue shift gradually increases (Fig. 2) and the PL spectral intensity gradually decreases (Fig. 3) as the annealing temperature increases. The wavelength blue shifts of these two samples do not increase when the annealing temperature is greater than 895 nm. Under the same experimental conditions, the wavelength blue shift of the sample 2 with a low aluminum structure is larger than that of the sample 1 with a high aluminum structure (Fig. 2), and the PL spectral intensity of the sample 2 decreases less (Fig. 3). Second, based on the influence of annealing temperature on impurity-free vacancy induced quantum well mixing, the influence of annealing time on impurity-free vacancy induced quantum well mixing is also studied. Under the condition of 875 nm, with the increase of annealing time, the wavelength blue shift of the sample 2 gradually increases, and the PL spectral intensity gradually decreases.

**Conclusions** The influence of epitaxial structure on impurity-free vacancy induced quantum well mixing is discussed. The experimental results show that under the same experimental conditions, the sample 2 with a low-aluminum structure has a greater wavelength blue shift, and the PL spectral peak intensity decreases less. This shows that as for impurity-free vacancy induced quantum well mixing, Al and Ga in the epitaxial structure have different influences on the diffusion of point defects, and Ga is more conducive to the diffusion of point defects. According to the experimental results, we propose the following hypotheses: 1) when the InGaAs/GaAs quantum well epitaxial structure produces impurity-free vacancy-induced quantum well mixing, it is mainly induced by Ga vacancy diffusion, and the degree of quantum well mixing is proportional to the logarithmic function of Ga vacancy concentration; 2) when Ga vacancies generated in the cap layer of the epitaxial wafer diffuse downward and Si atoms diffuse into the epitaxial wafer and move in the epitaxial wafer, the Ga atoms in the lower layer are easier to occupy the upper Ga vacancies than Al atoms, and the Si atoms are easier to replace Ga Atoms, therefore, compared with Al atoms, Ga atoms are more likely to cause point defect Ga vacancies and Si atoms to diffuse downward.

**Key words** materials; high aluminum structure; low aluminum structure; impurity-free vacancy induction; quantum well mixing; wavelength blue shift

**OCIS codes** 160.3380; 140.2020; 140.3070; 140.5960