

引用格式: WANG Yuxiao, ZHU Lingni, ZHONG Li, et al. Research on Si-induced Quantum Well Intermixing Based on Cyclic Annealing (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(2):0251210

王子晓,朱凌妮,仲莉,等. 基于循环退火的 Si 诱导量子阱混杂研究(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(2):0251210

## 基于循环退火的 Si 诱导量子阱混杂研究(特邀)

王子晓<sup>1,2</sup>, 朱凌妮<sup>1</sup>, 仲莉<sup>1,3</sup>, 祁琼<sup>1</sup>, 李伟<sup>1</sup>, 刘素平<sup>1</sup>, 马骁宇<sup>1,3</sup>

(1 中国科学院半导体研究所 光电子器件国家工程中心, 北京 100083)

(2 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

(3 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

**摘 要:**腔面光学灾变损伤是制约半导体激光器输出功率以及可靠性的主要因素之一。为制备高功率和高可靠性半导体器件,初步探索了 Si 杂质诱导量子阱混杂技术,并将其应用于 975 nm 半导体激光器的非吸收窗口制备工艺。采用循环退火方式,研究了不同条件下 Si 杂质诱导量子阱混杂的效果,当退火温度为 830 °C,退火时间为 10 min,循环次数为 3 次时,达到最大波长蓝移量 59 nm。分别在 800 °C 5 次 10 min 和 830 °C 3 次 10 min 退火条件下制备了非吸收窗口。与普通器件相比,制备非吸收窗口的器件阈值电流增大,斜率效率下降,工作电流大于 10 A 后器件斜率效率降低,电流-工作电流曲线呈现饱和趋势。相较之下,800 °C 5 次 10 min 条件下对应的器件性能相对较好。工作电流达到 15 A 后普通器件失效,而制备了非吸收窗口的器件则在电流大于 20 A 后仍可正常工作,腔面光学灾变损伤阈值提高了 33.0% 以上。

**关键词:** 半导体激光器;量子阱混杂;非吸收窗口;腔面光学灾变损伤;硅;退火

中图分类号: TN314+.3; TN248.4 文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20225102.0251210

## 0 引言

半导体激光器自 1962 年发明以来便发展迅速,高功率和高可靠性一直是其追求的目标。但由于体积限制,半导体激光器的出光面积较小,输出功率过高时会引起腔面光学灾变损伤,引发器件失效<sup>[1-2]</sup>。非吸收窗口(Non-absorbing Window, NAW)技术常用于抑制腔面光学灾变损伤(Catastrophic Optical Mirror Degradation, COMD),实现方法有二次外延生长和量子阱混杂(Quantum Well Intermixing, QWI)等<sup>[3]</sup>。其中二次外延生长是腐蚀腔面外延层后再生长一层宽带隙材料,这种方法工艺复杂,难以保证二次生长后的晶体质量<sup>[4]</sup>。量子阱混杂是采用介质膜生长<sup>[5-7]</sup>或离子注入<sup>[8]</sup>等方式,通过高温退火向外延层内部引入缺陷,诱导量子阱和量子垒发生元素互扩散,使带隙宽度变大、波长蓝移,从而减少对发光区激射光的吸收,防止腔面因热吸收导致的升温而遭到破坏。

20 世纪 80 年代,人们发现 Si 扩散可有效诱导 III-V 族量子阱结构的量子阱和量子垒元素互扩散或超晶格结构的层间扩散,因而 Si 杂质诱导量子阱混杂(Impurities Induced Disorder, IID)被广泛应用和研究。1985 年, KALISK R W 等发现生长一层 Si 介质膜并在 750 °C 下退火 144 h 后,可以诱导 AlGaAs/GaAs 超晶格结构发生元素互扩散,激射波长蓝移约 85 nm<sup>[9]</sup>。1998 年, LEE J K 等使用 Si 离子注入方式进行 980 nm 半导体激光器非吸收窗口制备,经过 900 °C、10 min 快速热退火后,器件的腔面光学灾变损伤阈值比传统器件高 1.65 倍<sup>[10]</sup>。1995 年, HU S Y 等应用自对准技术在脊形波导两边沉积 Si 介质膜,并进行 850 °C、90 min 的退火,利用 Si 的扩散和混杂效应在脊形两侧形成电流非注入区,得到 0.3 μm 的有源区宽度,实现 0.9 mA 的

基金项目: 国家自然科学基金(No.62174154)

第一作者: 王子晓(1995-),女,博士研究生,主要研究方向为高功率半导体激光器。Email: wangyuxiao@semi.ac.cn

通讯作者: 朱凌妮(1983-),女,助理研究员,博士,主要研究方向为大功率半导体激光器。Email: lingxiao431@semi.ac.cn

导师(通讯作者): 仲莉(1980-),女,研究员,博士,主要研究方向为大功率半导体激光器。Email: zhongli@semi.ac.cn

收稿日期: 2021-11-11; 录用日期: 2022-01-19

<http://www.photon.ac.cn>

阈值电流<sup>[11]</sup>。1999年,HIRAMOTO K等发现Si诱导量子阱混杂引发的波长蓝移随Si注入能量增大而增大(100~350 eV),在该范围内制备的带有非吸收窗口的脊形波导激光器腔面处的吸收均下降至传统激光器的1/10以下,且器件性能基本保持不变<sup>[12]</sup>。2007年,河北工业大学的彭海涛通过Si离子注入方式对GaAs/AlGaAs结构进行混杂,在850℃、2 h的退火条件下得到65~85 nm的波长蓝移<sup>[13]</sup>。2020年,半导体研究所的刘翠翠等采用介质膜生长方式,经过900℃、180 s的快速退火后得到52 nm蓝移,而825℃、2 h管式炉退火后得到93 nm蓝移<sup>[5]</sup>。关于Si杂质诱导量子阱混杂的研究大多集中于国外,Si杂质的引入方式大多采用离子注入的方法,但离子注入工艺成本较高,不适合大规模应用,因而本文采用介质膜沉积高温退火扩散的方法引入Si杂质。

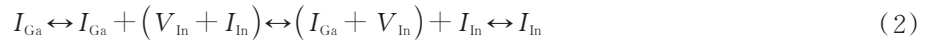
基于实验室的经验<sup>[5]</sup>,当退火温度过高或时间过长时,片子表面会出现烧蚀孔,这将影响后续工艺制备。为了保证退火后片子表面形貌,并降低工艺的成本,本文对量子阱混杂技术的研究采用了较低的退火温度并使用循环退火的方式以减少每次退火的时间,通过介质膜沉积加退火的方式引入Si杂质。将该工艺应用于975 nm半导体激光器器件非吸收窗口制备,器件的腔面光学灾变损伤水平得到了改善。

## 1 基于循环退火的量子阱混杂工艺研究

### 1.1 量子阱混杂机理分析

Si诱导QWI的混杂机理一直备受争议,其中广泛应用的是Si对(Si-pair)模型。该模型最早由GREINER M E等<sup>[14]</sup>提出,认为孤立的Si扩散系数较小,Si占据镓空位( $V_{Ga}$ )与砷空位( $V_{As}$ )形成 $Si_{Ga}^+$ 和 $Si_{As}^-$ ,临近的 $Si_{Ga}^+$ 和 $Si_{As}^-$ 结合形成 $Si_{Ga}^+-Si_{As}^-$ 中性对,与周围的 $V_{Ga}$ 和 $V_{As}$ 互换从而实现Si扩散。而KAHEN K B等<sup>[15]</sup>进一步将 $Si_{Ga}^+-Si_{As}^-$ 模型调整为 $Si_{Ga}^+-V_{Ga}^-$ 模型,认为Si占据 $V_{Ga}$ 并与 $V_{Ga}$ 形成中性对,通过与临近的 $V_{Ga}$ 互换达到扩散效果。

Si的扩散在外延层引入大量的缺陷,进而诱导量子阱与量子垒发生元素互扩散。以本文使用的 $In_xGa_{1-x}As/GaAs$ 量子阱结构为例,由于V族元素扩散系数远小于III族元素,所以仅考虑III族元素互扩散。Si诱导产生大量 $V_{Ga}$ 和镓间隙原子( $I_{Ga}$ ),在高温退火条件下,量子阱的In与量子垒的Ga发生互扩散,扩散过程如下



假设互扩散系数为常数,且在阱垒中相同,扩散对量子阱界面位置不产生影响。只考虑沿生长方向 $y$ 的一维扩散,则各组分原子的浓度 $C$ 随时间 $t$ 的变化满足Fick第二定律

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla C) = D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (3)$$

式中, $D$ 为Ga的扩散系数。Ga组分的初始分布为

$$C(y, 0) = \begin{cases} C_b & |y| > l \\ C_w & |y| < l \end{cases} \quad (4)$$

式中, $2l$ 为量子阱厚度, $C_b$ 和 $C_w$ 分别为量子垒和量子阱Ga组分浓度。求解Fick第二定律,得到单量子阱结构的Ga组分表达式为

$$C(y, t) = \frac{C_b - C_w}{2} \left( \operatorname{erfc} \left( \frac{y+l}{2L_d} \right) + \operatorname{erfc} \left( \frac{-y+l}{2L_d} \right) \right) + C_w \quad (5)$$

式中, $L_d = \sqrt{Dt}$ 为扩散长度。通过将 $L_d$ 取不同的值,可以得到不同扩散程度下的Ga组分变化,进而由 $In_xGa_{1-x}As$ 的禁带宽度计算式(6)得到量子阱禁带宽度的变化。

$$E_g = 1.424 - 1.615x + 0.555x^2 \quad (6)$$

图1是 $L_d$ 分别取值为1 nm、2 nm、3 nm、4 nm、5 nm时Ga组分变化以及量子阱禁带宽度变化,可以看到随着Ga的扩散长度增大,量子阱与量子垒Ga元素组分的阶跃差异逐渐消失,量子阱的禁带宽度不断增大,使激射波长不断向短波移动。量子阱混杂抑制半导体激光器腔面光学灾变损伤的机理是增大腔面处禁带

宽度,减少腔面处光吸收,使其对谐振腔传输光透明。本文采用Si诱导QWI,旨在通过高温热处理增大Si扩散深度,诱导阱垒Ga、In元素互扩散,增大量子阱带隙宽度,宏观表现为PL谱波长蓝移。

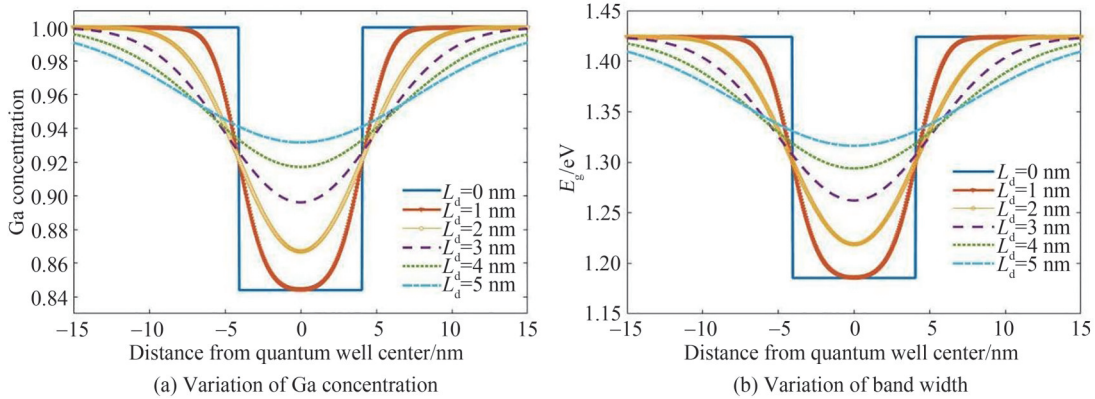


图1 Ga扩散长度对Ga组分及量子阱禁带宽度的影响

Fig.1 The influence of diffusion length on Ga concentration and band gap width of quantum well

### 1.2 量子阱混杂实验

采用 $In_xGa_{1-x}As/GaAs$ 量子阱外延结构,外延结构由下而上依次是:GaAs衬底、 $Al_{0.37}GaAs$ 及 $Al_{0.31}GaAs$ 下限制层、 $Al_{0.25}GaAs$ 下波导层、GaAs量子垒、 $In_{0.156}GaAs$ 量子阱、GaAs量子垒、 $Al_{0.25}GaAs$ 上波导层、 $Al_{0.37}GaAs$ 上限制层以及GaAs欧姆接触层,如图2所示。

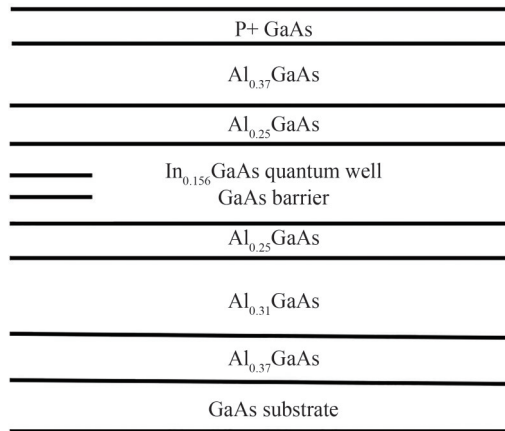


图2 外延结构示意图

Fig.2 The epitaxial structure of the samples

在量子阱外延片表面生长130 nm的Si介质膜,然后分成小片分别在不同的条件下退火,通过光致荧光(Photoluminescence, PL)谱表征的波长蓝移来反映混杂的效果。退火过程在快速退火炉中进行,并通 $N_2$ 以防止Si表面氧化。退火时在实验片上下覆盖GaAs晶片,在高温时提供As压。

Si诱导量子阱混杂的退火温度一般为 $800\text{ }^\circ\text{C}\sim 1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[3,8,16]</sup>,而过高的退火温度会给外延片带来一定程度的损伤。为了在降低热效应的影响、减轻量子阱劣化的同时,保证外延片的表面形貌<sup>[16]</sup>,实验采用的退火温度为 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $830\text{ }^\circ\text{C}$ ,通过循环退火的方式进行混杂条件探索,具体操作为在每次退火结束后,样片原位降温至室温后重复退火操作。

### 1.3 实验结果与讨论

图3是样片在 $830\text{ }^\circ\text{C}$ 下分别经历一次、两次和三次10 min退火的PL表征图,考虑到腐蚀带来的测量误差,PL谱采用归一化的表现形式。外延片初始波长为952 nm。样本经历一次10 min退火时,PL谱波长为934 nm,波长蓝移量只有18 nm。而随着循环次数增加,波长蓝移量增大,在三次循环退火后蓝移量达到59 nm。

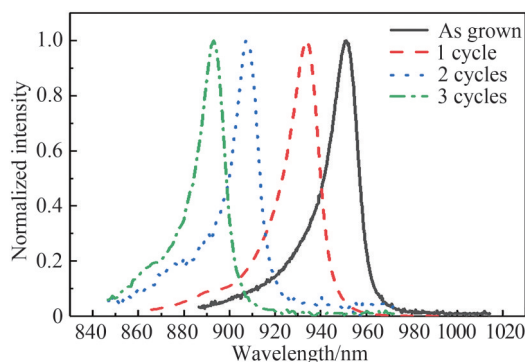


图3 830 °C下进行不同次数循环退火后的PL谱

Fig.3 The PL spectra of the samples with different annealing times under 830 °C

根据前文对量子阱混杂机理的讨论,量子阱混杂的程度与扩散元素的扩散长度 $L_d$ 有关。根据 $L_d = \sqrt{Dt}$ 及式(5),随着退火时间增大,量子阱In与量子垒的Ga互扩散加深,量子阱的In组分减少,Ga组分增大,导致量子阱禁带宽度减小,宏观表现为激射波长蓝移量增大。而循环退火是每次退火效果的累积,所以当退火次数在一定范围内增加时,退火样片的波长蓝移量增加。

基于830 °C退火的实验结论,将退火温度降低至800 °C,分别对样品进行3次和5次循环10 min退火,PL谱测量结果如图4。结果表明,退火温度降低后,样品的波长蓝移量减小。对于同样的3次10 min循环退火,该温度下的蓝移为19 nm,比830 °C下少40 nm,而经历5次循环退火后,蓝移量也仅为26 nm。

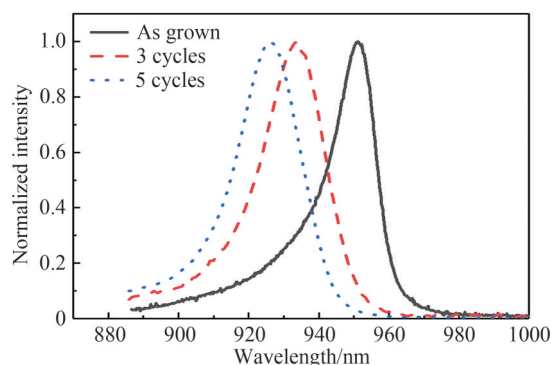


图4 800 °C下分别进行不同循环次数退火后的PL谱

Fig.4 The PL spectra of the samples with different annealing times under 800 °C

在晶格材料内,原子的扩散能力由其扩散系数决定,扩散系数满足 Arrhenius 定律

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-\Delta p}{K_B T}\right) \quad (7)$$

式中, $K_B$ 为玻尔兹曼常数, $\Delta p$ 为相应点缺陷的激活能, $T$ 为温度。可以看到扩散系数 $D$ 与退火温度呈正比,与缺陷激活能 $\Delta p$ 呈反比。原子的扩散需要克服其扩散激活能,当退火温度较低时,Si获得的能量较小,因而无法扩散。800 °C可能在Si克服激活能所需的温度阈值附近,导致其扩散系数较小,诱导量子阱混杂的作用有限。因此,在800 °C下5次10 min循环退火得到的蓝移量依旧很小。

## 2 器件制备及性能

### 2.1 器件制备

基于同一种外延结构,分别应用800 °C 5次10 min循环退火和830 °C 3次10 min循环退火两种退火条件,制备了两组带有非吸收窗口的半导体激光器单管器件。对于非吸收窗口之外的区域,采用TiO<sub>2</sub>对外延层进行保护,防止退火产生的热效应对外延片产生影响。在介质膜制备过程中,为了能够使用剥离工艺来去除窗口的TiO<sub>2</sub>,实现非吸收窗口定位,选择在室温下制备TiO<sub>2</sub>介质膜。

器件的制备过程如下:1)在外延层表面沉积一层130 nm Si介质膜;2)将抑制区的Si介质膜刻蚀掉,涂胶后生长200 nm TiO<sub>2</sub>,并采用剥离技术去除窗口区的TiO<sub>2</sub>;3)在快速退火炉中循环退火;4)去除抑制区的TiO<sub>2</sub>和窗口区的Si;5)光刻发光区单管结构;6)外延片减薄,制备电极;7)解理镀膜,激光器腔长为4 500 μm,条宽为100 μm,前后腔面分别蒸镀反射率为3%的增透膜和95%的高反射膜。为了对比量子阱混杂的效果,应用同炉外延片和相同的光刻结构,制备了无非吸收窗口的普通单管器件。

## 2.2 器件性能

图5是分别经历800 °C 5次10 min循环退火、830 °C 3次10 min循环退火以及无非吸收窗口的三种器件的功率-工作电流曲线。可以看到,对于普通的无非吸收窗口的器件,阈值电流为0.440 A,斜率效率为0.975 W/A,最大功率为13.1 W。制备了非吸收窗口后,器件的性能略有下降,800 °C 5次10 min循环退火和830 °C 3次10 min循环退火条件下,阈值电流分别为0.544 A和0.628 A。工作电流在10 A以下时器件的斜率效率分别为0.871 W/A和0.875 W/A,工作电流大于10 A之后,二者的斜率效率下降,出现热饱和趋势。普通器件在工作电流达到15 A后出现了腔面光学灾变损伤,器件失效;制备了非吸收窗口的器件在20 A的工作电流下仍可继续工作,功率可达14.0 W,器件腔面光学灾变损伤阈值提升了33.0%以上。

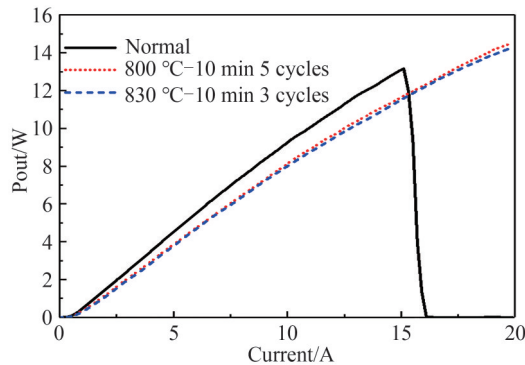


图5 不同条件下制备的器件的功率-工作电流特性  
Fig.5 Power-current curves of devices produced under different conditions

单管器件制备非吸收窗口后斜率效率降低、阈值电流上升,可能是因为高温退火后热应力释放,在量子阱内部引入缺陷,从而导致量子阱劣化,内量子效率降低<sup>[5]</sup>。此外,800 °C 5次10 min循环退火条件下制备的器件性能优于830 °C 3次10 min循环退火的器件,推测是由于830 °C下温度过高,对量子阱有更大的损伤,虽然在小片单点实验中,830 °C下Si诱导量子阱混杂实验得到更好的效果。

## 3 结论

本文采用循环退火方式,研究了不同条件下Si杂质诱导量子阱混杂的效果。当退火温度为830 °C,退火时间为10 min,循环次数为3次时,达到59 nm的波长蓝移量。分别在800 °C 5次10 min和830 °C 3次10 min循环退火条件下制备带有非吸收窗口的半导体激光器器件,与普通激光器相比,其阈值电流分别增大23.6%和42.7%,斜率效率分别下降10.7%和10.2%,当电流大于10 A时功率-工作电流曲线出现饱和趋势。普通器件在工作电流达到15 A后出现腔面光学灾变损伤,制备了非吸收窗口的器件则在电流大于20 A后仍可正常工作,腔面光学灾变损伤水平提高了33.0%以上,非吸收窗口技术大大提高了器件的可靠性水平。本文的结果不止适用于本文所对应的边发射半导体激光器,对于其它量子阱结构、量子点结构以及超晶格结构的半导体器件也有良好的应用前景。

### 参考文献

- [1] ARSLAN S, GÜNDOĞDU S, DEMIR A, et al. Facet cooling in high-power InGaAs/AlGaAs lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(1): 94-97.
- [2] SONG Yue, NING Yongqiang, QIN Li, et al. Review on the methods of preventing catastrophic optical mirror damage in high-power diode lasers[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(5): 618-626.  
宋悦, 宁永强, 秦莉, 等. 大功率半导体激光器抗腔面灾变性光学损伤技术综述[J]. 半导体光电, 2020, 41(5): 618-626.
- [3] LIU Cuicui. Study on the quantum well intermixing induced by Si impurities in InGaAs/AlGaAs high power semiconductor

- lasers[D]. Beijing:University of Chinese Academy of Sciences,2020.  
刘翠翠. Si 杂质诱导 InGaAs/AlGaAs 高功率半导体激光器量子阱混杂的研究[D]. 北京:中国科学院大学,2020.
- [4] YAO Nan, ZHAO Yihao, LIU Suping, et al. High power 915 nm semiconductor lasers with non-absorbing windows[J]. Semiconductor Technology,2015,40(8):596-600.  
姚南,赵懿昊,刘素平,等. 带有非吸收窗口的大功率 915 nm 半导体激光器[J]. 半导体技术,2015,40(8):596-600.
- [5] LIU Cuicui, LIN Nan, XIONG Cong, et al. Intermixing in InGaAs/AlGaAs quantum well structures induced by the interdiffusion of Si impurities[J]. Chinese Optics,2020,13(1):203-216.  
刘翠翠,林楠,熊聪,等. Si 杂质扩散诱导 InGaAs/AlGaAs 量子阱混杂的研究[J]. 中国光学. 2020,13(1):203-216.
- [6] JIA Z, YANG H, PERROTT A H, et al. Study on the proximity of QWI in InP-based AlGaInAs MQWs using the IFVD method and its application in single frequency teardrop laser diodes[J]. Optics Express,2020,28(21):31904-31913.
- [7] GUO Chunyang, ZHANG Ruiying, LIU Jiwan, et al. InGaAsP/InGaAsP quantum well intermixing induced by impurity free vacancy enhanced through Cu/SiO<sub>2</sub> deposition[J]. Semiconductor Technology,2019,44(3):189-193.  
郭春扬,张瑞英,刘纪湾,等. Cu/SiO<sub>2</sub> 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.
- [8] HIRAMOTO K, SAGAWA M, KIKAWA T, et al. High-power and highly reliable operation of Al-free InGaAs-InGaAsP 0.98 μm lasers with a window structure fabricated by Si ion implantation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics,1999,5(3):817-821.
- [9] KALISKI R W, GAVRILOVIC P, MEEHAN K, et al. Photoluminescence and stimulated emission in Si- and Ge-disordered Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As-GaAs superlattices[J]. Journal of Applied Physics,1985,58(1):101-107.
- [10] LEE J K, PARK K H, JANG D H, et al. Improvement of Catastrophic Optical Damage (COD) level for high-power 0.98-μm GaInAs-GaInP laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters,1998,10(9):1226-1228.
- [11] HU S Y, PETERS M G, YOUNG D B, et al. Submilliamp-threshold InGaAs/GaAs quantum-well ridge-waveguide lasers with impurity-induced disordering [C]. 1995 53rd Annual Device Research Conference Digest, IEEE, 1995:142-143.
- [12] HIRAMOTO K, SAGAWA M, KIKAWA T, et al. High-power and highly reliable operation of Al-Free InGaAs-InGaAsP 0.98-μm lasers with a window structure fabricated by Si ion implantation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics,1999,5(3):817-821.
- [13] PENG Haitao. Improving the COD level of high-power semiconductor lasers using quantum well intermixing[D]. Tianjin: Hebei University of Technology,2007.  
彭海涛. 用量子阱混合技术提高大功率半导体激光器腔面的 COD 阈值[D]. 天津:河北工业大学,2007.
- [14] GREINER M E, GIBBONS J F. Diffusion of silicon in gallium arsenide using rapid thermal processing: Experiment and model[J]. Applied Physics Letters,1984,44(8):750-752.
- [15] KAHEN K B. Ga vacancy-assisted diffusion of Si in GaAs[J]. Journal of Applied Physics,1989,66(12):6176-6178.
- [16] LIN Shengjie, LI Jianjun, HE Linjie, et al. Enhanced AlGaAs/InGaAs quantum well intermixing by the technology of cyclic annealing[J]. Journal of Optoelectronics · Laser,2014,25(8):1471-1475.  
林盛杰,李建军,何林杰,等. 基于循环退火技术的 InGaAs/AlGaAs 量子阱混杂[J]. 光电子激光,2014,25(8):1471-1475.

## Research on Si-induced Quantum Well Intermixing Based on Cyclic Annealing (Invited)

WANG Yuxiao<sup>1,2</sup>, ZHU Lingni<sup>1</sup>, ZHONG Li<sup>1,3</sup>, QI Qiong<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, LIU Suping<sup>1</sup>,  
MA Xiaoyu<sup>1,3</sup>

(1 National Engineering Research Center for Opto-electronic Devices Institute of Semiconductors, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(2 School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 College of Materials Science and Opto-electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Catastrophic Optical Mirror Degradation (COMD) is one of the main factors that restrict the output power and reliability of semiconductor lasers. To achieve high power and high reliability and avoid

COMD at the same time, Non-absorbing Window (NAW) is often applied to semiconductor laser preparation process, which contains secondary epitaxial growth technology and Quantum Well Intermixing (QWI). For the high cost and high difficulty of secondary epitaxial growth technology, QWI is more widely used. The common methods of QWI include Rapid Thermal Annealing (RTA), Ion Implantation Induced Disorder (IID), Laser Induced Disorder (LID), Plasma Enhancement Induced Disorder (PID), Impurity Free Vacancy Disorder (IFVD), Impurities Induced Disorder (IID), etc. RTA is easy to achieve, which only needs high temperature annealing, but the repeatability and reliability is low. On the contrary, IID, LID and PID do well in repeatability and reliability, expensive equipment is needed, however. Besides, IFVD is often conducted in relatively higher temperature. Compared to such methods above, IID technology causes impurity atoms such as Si and Zn diffuse from surface of epitaxial layer into active layer with lower temperature and high repeatability, leading to inter-diffusion of group III atoms between quantum well and barrier, which widen the band gap of quantum well.

The mechanism of Si-induced QWI has been controversial, and the  $\text{Si}_{\text{Ga}}^+ - \text{V}_{\text{Ga}}^-$  pair model is widely used. In the  $\text{Si}_{\text{Ga}}^+ - \text{V}_{\text{Ga}}^-$  pair model, the diffusion coefficient of isolated Si is small. Si occupies gallium vacancies ( $\text{V}_{\text{Ga}}$ ) to form  $\text{Si}_{\text{Ga}}^+$ . The adjacent  $\text{Si}_{\text{Ga}}^+$  and  $\text{V}_{\text{Ga}}$  forms  $\text{Si}_{\text{Ga}}^+ - \text{V}_{\text{Ga}}^-$  neutral pair, diffusing by exchanging with surrounding  $\text{V}_{\text{Ga}}$  and  $\text{Si}_{\text{Ga}}^+$ .

In this paper, Si-induced QWI under different conditions was explored and applied to the fabrication of 975 nm semiconductor laser devices, using the cyclic annealing method. When the annealing test is carried out under temperature 830 °C at a duration of 10 min in 3 cycles, the maximum wavelength blue shift is 59 nm. NAW was fabricated under 800 °C at a duration of 10 min in 5 cycles and 830 °C at a duration of 10 min in 3 cycles, separately. The results show that threshold current and slope efficiency of the semiconductor lasers with NAW increases compared with ordinary devices. When the operating current is greater than 10 A, the slope efficiency of the devices decrease, and the Power-Current curves indicates a tendency towards saturation. The performance of the devices prepared under 800 °C at a duration of 10 min in 5 cycles is relatively better. Ordinary devices fail when the operating current reaches 15 A. Devices with NAW can still work normally after the current is greater than 20 A, and the COMD threshold is increased by more than 33.0%.

**Key words:** Semiconductor laser; Quantum well intermixing; Non-absorbing window; Catastrophic optical mirror degradation; Si; Annealing

**OCIS Codes:** 140.3330; 140.5960; 140.5965; 230.2090; 230.5590