

doi:10.3788/gzxb20184703.0314003

基于 SiO₂ 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

王鑫^{1,2}, 赵懿昊¹, 朱凌妮¹, 侯继达^{1,2}, 马骁宇¹, 刘素平¹

(1 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)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为了提高 915 nm 半导体激光器腔面抗光学灾变的能力, 采用基于 SiO₂ 薄膜无杂质诱导量子阱混合法制备符合 915 nm 半导体激光器 AlGaInAs 单量子阱的非吸收窗口. 研究了无杂质空位诱导量子阱混合理论及不同退火温度、不同退火时间、SiO₂ 薄膜厚度、SiO₂ 薄膜折射率、不同盖片等试验参数对制备非吸收窗口的影响, 并且讨论了 SiO₂ 薄膜介质膜的多孔性对无杂质诱导量子阱混合的影响. 实验制备出蓝移波长为 53 nm 的非吸收窗口, 最佳制备非吸收窗口条件为退火温度为 875℃, 退火时间为 90s, SiO₂ 薄膜折射率为 1.447, 厚度为 200 nm, 使用 GaAs 盖片.

关键词: 半导体激光器; 光学灾变; 量子阱混杂; 非吸收窗口; 薄膜

中图分类号: O436

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)03-0314003-7

Impurity-free Vacancy Diffusion Induces Quantum Well Intermixing in 915 nm Semiconductor Laser Based on SiO₂ Film

WANG Xin^{1,2}, ZHAO Yi-hao¹, ZHU Ling-ni¹, HOU Ji-da^{1,2}, MA Xiao-yu¹, LIU Su-ping¹

(1 *The National Engineering Research Center for Optoelectronic Devices, Institute of Semiconductors Chinese Academy of Sciences Beijing 100083, China*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The non-absorbing window is adopted in the 915nm semiconductor laser to improve the catastrophic optical damage level of the device. The non-absorbing window is fabricated by impurity free vacancy diffusion induces quantum well intermixing based on SiO₂ thin film technology. The theory of the impurity free vacancy diffusion induces quantum well intermixing will be systematic researching. And the different experimental conditions such as the annealing temperature, the thickness of SiO₂ thin film, the refractive index of SiO₂ film and the cover gaps are evaluated in the paper. And the mechanism is discussed for the effect of the porosity SiO₂ film dielectric film in the impurity free vacancy diffusion induces quantum well intermixing. Ultimately the experiment results show that a luminescence blue shift 53 nm is obtained from the sample. The optimal experimental conditions are annealing at 875℃ for 90s, and the thickness of the SiO₂ thin film is 200 nm with the refractive index is 1.447, choosing GaAs cap piece to be the cover gap.

Key words: Semiconductor laser; Catastrophic optical damage; Quantum well intermixing; Non-absorbing window; Film

OCIS Codes: 140.2020; 140.3330; 140.3460; 310.6845; 310.6870

基金项目: 国家自然科学基金(No.61306057)资助

第一作者: 王鑫(1988-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为高损伤阈值半导体激光器件. Email: wangxinhehe123@semi.ac.cn

通讯作者: 赵懿昊(1982-), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为大功率半导体激光器件. Email: zyhhiaaoo@semi.ac.cn

导 师: 马骁宇(1963-), 男, 研究员, 硕士, 主要研究方向为大功率半导体激光器件及技术. Email: maxy@semi.ac.cn

收稿日期: 2017-08-23; 录用日期: 2017-12-13

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

0 引言

目前,泵浦光纤激光器等器件需要体积小、重量轻、大功率、高可靠性 915/975 nm 波长半导体激光器,而制约半导体激光器大功率输出和可靠性的原因是腔面光学灾变(Catastrophic Optical Damage, COD),发生腔面光学灾变的原因是由于腔面处的光吸收引起腔面发热,造成带隙收缩,从而引起器件损坏.利用量子阱混合技术在大功率半导体激光器上制备非吸收窗口(non-absorbing window),减少腔面的光吸收,抑制腔面光学灾变,是提高半导体激光器输出功率和可靠性的有效方法^[1-2].量子阱混合主要有三种方法,分别是杂质诱导量子阱混杂(Impurity Induced Disorder, ID)、离子注入诱导量子阱混杂(Ion-Implantation Induced Disorder, IID)和无杂质空位诱导量子阱混合(Impurity Free Vacancy Diffusion, IFVD).IFVD 因其具有无杂质引入、退火时间短等特点,可以较好地保持量子阱的光学特性,从而保持器件良好的光电特性等特点被广泛关注.

IFVD 通常要求带有量子阱结构的外延片表面在介质膜的作用下进行快速退火(Rapid Temperature Annealing, RTA),一般介质膜材料如 SiO₂、Cu-SiO₂可以促进混杂效果,SrF₂、Si₃N₄和 TiO₂可以抑制混杂效果.对于在不同介质膜材料作用下进行快速退火的 IFVD 研究,如 2015 年 Hideyuki Naito 等人利用无杂质量子阱混合技术实现 915nm 半导体激光器 20W 功率的连续输出.2015 年林涛等人利用 N 离子诱导实现 GaInP 量子阱 54.9nm 的非吸收窗口^[3-4].长春理工大学周路等人,利用溅射沉积 SiO₂的方法实现 28.9nm 波长蓝移^[5].中科院半导体研究所崔晓等人利用 Cu-SiO₂薄膜材料实现最大 172nm 蓝移波长的非吸收窗口器件^[6].

本文在介绍利用量子阱混杂(QWI)技术制备 915 nm 半导体激光器非吸收窗口的基本原理基础上进一步分析材料扩散对扩散系数的影响,并提出了量子阱混合的理论模型.利用离子增强型化学气相沉积(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)的方法在激光器外延片上生长一定厚度的 SiO₂薄膜制备非吸收窗口,分析了快速退火温度、薄膜厚度、薄膜折射率、不同盖片件等对 AlGaAs/AlGaInAs 单量子阱激光器量子阱混合的影响.通过快速退火炉(RTA)、椭偏仪、光致发光光谱仪进行实验和数据采集,分析 IFVD 量子阱混杂现象和非吸收窗口的制备效果.

1 IFVD 实验原理

无杂质空位诱导量子阱混合(IFVD)是在量子阱结构的半导体外延片表面,首先利用如离子溅射、离子增强型化学气相沉积等不同工艺方法,沉积一层介质膜,然后对外延片进行快速退火处理,通过高温诱导量子阱和垒区发生组分互扩散,发生互扩散时,材料表面的原子外扩散进入介质膜中,在原位置形成空位缺陷,同样介质膜中也会存在一定量的空位缺陷,这些缺陷通过高温扩散也能进入量子阱中,这样量子阱和量子垒之间就会产生原子浓度梯度,引起阱和垒中原子间的相互扩散,宏观上表现为能带的展宽,发光波长蓝移.对于 AlGaAs/InGaAlAs 材料系的量子阱结构,QWI 是基于在表面薄膜对 Ga 原子溶解度和高温的共同作用下,Ga 原子的外扩散向表面薄膜移动和 Al 原子的内扩散进入量子阱中完成的^[7].Ga/Al 原子的互扩散过程需要通过 GaAs 负离子缺陷完成,即三族空穴 V_{III}和填隙原子 I_{III},其过程为 Ga 原子在高温退火条件下,经过晶体内部的 Frenkel 缺陷从外延帽层中外扩散进入表面介质膜中,在外延片表面留下大量的 Ga 原子空位 V_{Ga},空位热扩散进入量子阱区促进量子阱和量子垒中的原子半径相似的 Al 原子和 Ga 原子互扩散产生浓度梯度,从而影响能带的变化.

在三元系 AlGaAs 量子阱材料的 QWI 理论研究中,由于 V 族原子互扩散系数远小于 III 族原子,一般只要处理 III 族原子的互扩散问题.假设互扩散系数为常数,且在势阱和势垒中相同,同时扩散对量子阱界面位置不造成影响.

考虑沿生长方向 z 一维扩散,各组分原子浓度 C 随时间变化遵从由质量守恒导出的 Fick 第二定律^[5]

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (1)$$

以常见的 AlGaAs/GaAs 三元化合物单量子阱结构和超晶格结构为例,Al 的组分初始分布为

$$C(z,0) = \begin{cases} C_b & |z| \geq h \\ C_w & |z| < h \end{cases} \quad (2)$$

$$C(z,0) = \begin{cases} C_b & \text{else} \\ C_w & |z - zil| < h \end{cases} \quad (3)$$

根据 Fick 第二定律,推导出单量子阱结构和超晶格结构的组分浓度分布表达式为^[8]

$$C(z,t) = \frac{C_b - C_w}{2} \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{h-z}{2\sqrt{DT}}\right) + \operatorname{erfc}\left(\frac{h+z}{2\sqrt{DT}}\right) \right] + C_w \quad (4)$$

$$C(z,t) = \frac{C_b - C_w}{2} \left\{ \sum_{i=\frac{n}{2}+1}^{\frac{n}{2}} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{h+2il-z}{2\sqrt{DT}}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{h-2il+z}{2\sqrt{DT}}\right) \right] + \operatorname{erfc}\left(\frac{h+\frac{nl}{2}-z}{2\sqrt{DT}}\right) + \operatorname{erfc}\left(\frac{h+\frac{nl}{2}+z}{2\sqrt{DT}}\right) \right\} + C_w \quad (5)$$

式中 D 代表扩散系数, T 代表扩散时间, z 为外延片生长方向, C_w 和 C_b 为势阱和势垒中原子的组分浓度, h 是量子阱宽度的一半, $2l$ 是超晶格的周期, $i=1,2,\dots,n$ 代表第 i 个势阱, 假设 n 为偶数. 式中 erf 和 erfc 分别为误差函数和余误差函数.

以 Al_{0.25}Ga_{0.75}As/GaAs 单量子阱结构的 QWI 为例, 根据以上的推导结果, 对不同扩散长度下量子阱区的禁带宽度变化进行模拟.

由禁带宽度 E_g 与三元化合物材料 Ga_{1-x}Al_xAs 组分的关系^[9]

$$E_g = 1.424 + 1.247x \quad 0 < x < 0.45 \quad (6)$$

$$E_g = 1.424 + 1.247x + 1.147(x - 0.45)^2 \quad 0.45 < x < 1 \quad (7)$$

可得出 Al 原子在不同扩散长度下 QWI 禁带宽度变化图如图 1, 计算过程中扩散长度 $L_d = \sqrt{DT}$ 分别选取为 $L_d^1 = 0$ nm, $L_d^2 = 0.5$ nm, $L_d^3 = 1.5$ nm, $L_d^4 = 2.5$ nm, $L_d^5 = 5$ nm. 由图可知, 随着扩散长度的增加, 量子阱中心处的禁带宽度不断增大, 使得量子阱激光器发射的波长向短波方向移动, 产生波长蓝移, 但是随着量子阱禁带宽度的不断增大, 材料结构的均匀性变差, 一般会在测试结果中发现光谱强度降低, 半峰全宽 (Full Width at Half Maxima, FWHM) 变大^[10].

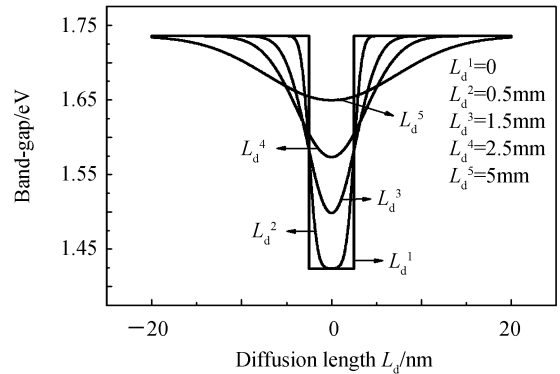


图 1 Al 原子在不同扩散长度下 QWI 禁带宽度变化图
Fig.1 Band-gap changes indifferent diffusion lengths of Al atoms

2 实验条件

实验中使用的 915 nm 半导体激光器外延层结构通过金属有机化学气相沉积 (Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) 在 n-GaAs 衬底上生长, 生长温度为 600°C, 各层厚度、成分及生长顺序是: 1 300 nm 的下限制层 N-AlGaAs, 500nm AlGaAs 过渡层, 700nm 的下波导层 N-AlGaAs, 8 nm 的垒层 Al_{0.25}Ga_{0.75}As, 9 nm 的量子阱 AlGaInAs, 10 nm 的垒层 Al_{0.25}Ga_{0.75}As, 700 nm 的上波导层 AlGaAs, 1 100 nm 的上限制层 P-AlGaAs, 200 nm P-GaAs 盖层. 外延层详细结构如图 2 所示.

在外延片表面利用离子增强型化学气相沉积 (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD) 方法生长一层 SiO₂ 介质薄膜, 薄膜厚度为 100~400 nm, 生长条件为 SiH₄ 流速 2~13 sccm, N₂O 流速固定为 520 sccm, 生长温度为 280°C, 生长压强为 1 mTorr. 然后利用 RTA 快速退火设备对生长完 SiO₂ 薄膜的外延片进行快速退火促进波长蓝移, 退火温度为 800~900°C. 完成试验后利用椭偏仪和光致发光光谱仪 (Photoluminescence, PL) 对实验片进行测试.

200 nm P-GaAs cladding layer
1100 nm P-AlGaAs confining layer
700 nm AlGaAs waveguide layer
10 nm Al _{0.25} Ga _{0.75} As barrier layer
9 nm AlGaInAs quantum well
8 nm Al _{0.25} Ga _{0.75} As barrier layer
700 nm N-AlGaAs waveguide layer
500 nm AlGaAs buffer layer
1300 nm N-AlGaAs confining layer
N-GaAs substrate

图2 915nm 半导体激光器外延层结构
Fig.2 915nm semiconductor laser epitaxial layer structure

3 实验结果和讨论

3.1 退火温度对 IFVD 的影响

对于 III-V 族化合物半导体材料,温度对于 III 族原子的空位浓度有着很大的影响.空位的归一化热平衡浓度可表示为^[11]

$$[V_{III}] = \exp(-E_V/k_B T) \quad (8)$$

填隙原子的归一化热平衡浓度为

$$[I_{III}] = \exp(-E_I/k_B T) \quad (9)$$

式中 E_V 和 E_I 代表形成一个空位和填隙原子的能量.

从式(8)~(9)可以看出,III 族原子的空位和填隙原子的归一化浓度与温度成指数关系,晶体中点缺陷的浓度会随温度的升高而迅速增大,因此高温退火是 QWI 技术中的必要条件.将 SiO₂ 薄膜厚度设定为 200 nm,退火时间为 90 s,退火温度设为 800~900℃.

由图 3 可知,随着 RTA 退火温度的提高,波长蓝移量变大,900℃时波长蓝移达到 70nm.互扩散系数为

$$D_{III} = f_1 D_{V_{III}} [V_{III}] + f_2 D_{I_{III}} [I_{III}] \quad (10)$$

将式(8)、(9)带入式(10)可得

$$D_{III} = f_1 D_{V_{III}} \exp(-E_V/k_B T) + f_2 D_{I_{III}} \cdot \exp(-E_I/k_B T) \quad (11)$$

式中 D_{III} 族化合物中 III 族原子的互扩散系数, $D_{V_{III}}$ 和 $D_{I_{III}}$ 分别代表 III 族填隙原子和空位的扩散速率,方括号表示归一化浓度,系数 f_1 和 f_2 为包含有 III 族格点浓度和晶体结构信息的常量.可以得出三族原子的扩散系数跟温度也成指数关系,退火温度升高,扩散系数增大,量子阱带宽变大,波长蓝移量增加.

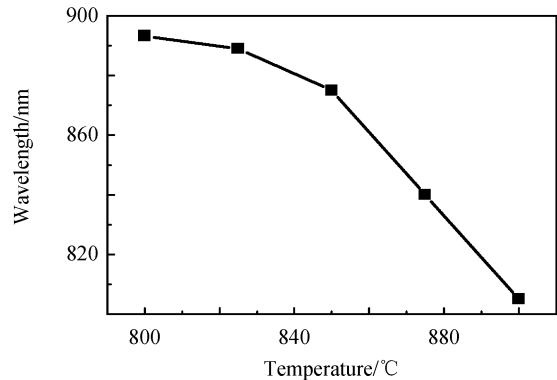


图3 不同退火温度对波长蓝移的影响
Fig.3 The degree of the wavelength blue shift at various temperature of the RTA

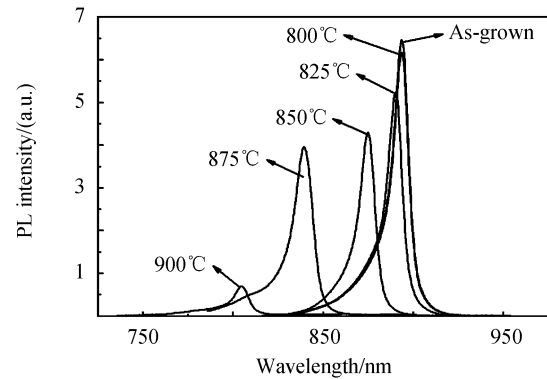


图4 不同退火温度对 PL 强度的影响
Fig.4 The variation of relative PL intensity after RTA

在退火温度持续增加的情况下,波长蓝移量增加,外延片量子阱 PL 强度持续下降,FWHM 变宽,如图 4 所示.在退火温度达到 900℃ 时,PL 强度已经降低非常多,只有起始(as-grown)强度的 1/30,半峰宽(FWHM)也得到了展宽,说明外延片量子阱的光学质量有了很大程度的下降,对于之后器件的制备有着非常大的影响,直接会导致器件的 COD 阈值降低和寿命的减少.在 RTA 退火温度为 875℃ 时,虽然波长蓝移为 50 nm,但是量子阱 PL 强度下降不多,为起始强度的 60%,半峰宽(FWHM)没有明显的展宽,可以说量子阱的光学质量基本保持完好,而对于量子阱光学质量稍微下降的情况通常可以通过循环退火来实现量子阱光学质量的修复,并且最佳的量子阱混杂蓝移波长为 20~50 nm 之间,退火温度在 875℃ 时具有最佳的效果.所以将退火温度选为 875℃.

3.2 SiO₂ 薄膜折射率对 IFVD 的影响

从 IFVD 的机理中可以看出,Ga 原子进入 SiO₂ 薄膜促进量子阱混杂程度的提高,而 SiO₂ 是多孔性薄膜, SiO₂ 薄膜的折射率越低,多孔性越好^[12-15],从而在高温退火后量子阱混杂的程度越大,波长蓝移量越大,量子阱宽度越宽.利用调节 PECVD 生长 SiO₂ 薄膜时 SiH₄ 的流速,改变 SiO₂ 薄膜的折射率,从而探索最佳的 SiO₂ 薄膜生长条件.

将 SiO₂ 薄膜厚度设定为 200 nm,退火温度固定为 875℃,退火时间为 90 s,利用不同的 SiH₄ 流速生长 SiO₂ 介质薄膜, SiH₄ 的流速为 2~13 sccm.不同 SiH₄ 流速生长的 SiO₂ 薄膜的折射率和生长时间如图 5 所示.从图中可以看出,随着 SiH₄ 流速的增加, SiO₂ 的折射率先减小后增加,所用时间几乎线性减少.

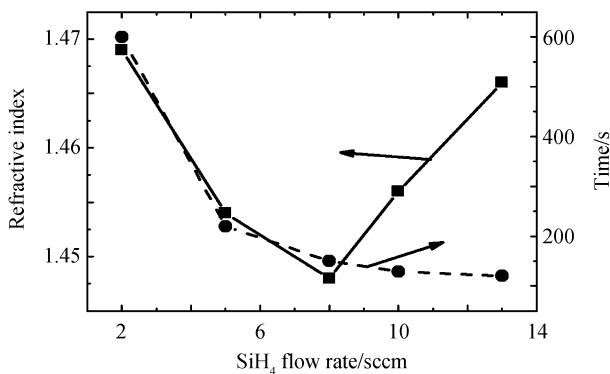


图 5 SiO₂ 薄膜折射率和生长时间随 SiH₄ 流速变化曲线
Fig.5 The variation of the SiO₂ film refractive index and the growth time at various SiH₄ flow rate

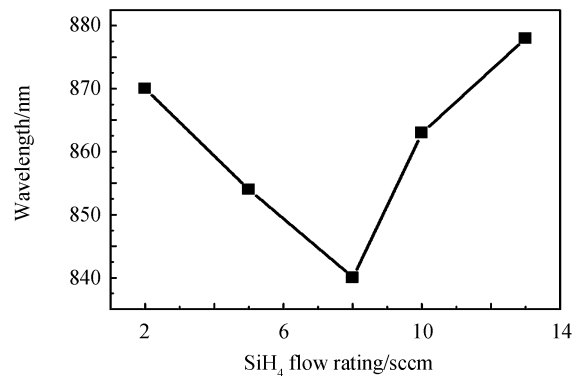


图 6 波长随 SiH₄ 流速变化曲线
Fig.6 The variation of the wavelength at various of the SiH₄ flow rate

图 6 为不同 SiH₄ 流速生长的 SiO₂ 薄膜经过 875℃、90 s 时间高温退火后外延片波长蓝移图.从图中可以看出,随着 SiH₄ 流速的增加,在退火温度和退火时间固定的情况下,外延片量子阱发射波长蓝移量先减小后增加,即量子阱宽度先减少后增加,变化趋势与 SiO₂ 薄膜折射率变化趋势一致,当 SiH₄ 流速为 8 sccm 时, SiO₂ 薄膜折射率为 1.447,退火后外延片量子阱发射波长蓝移量最大为 53 nm.分析为利用 PECVD 生长 SiO₂ 薄膜当 SiH₄ 流速由 13 sccm 降到 8 sccm 时 SiO₂ 薄膜折射率持续降低,多孔性增大,而随着 SiH₄ 流速继续降低,由 8 sccm 降到 2 sccm 时,由于生长固定厚度 200 nm SiO₂ 薄膜的时间几乎随着 SiH₄ 流速持续减少而线性增加,当 SiH₄ 流速持续减少到 8 sccm 以下时,由于生长时间的大幅增加,造成 SiO₂ 薄膜的致密性增加,多孔性降低,从而 IFVD 效果减小.最终确定利用 SiH₄ 流速为 8 sccm 时生长的 SiO₂ 薄膜折射率最低,多孔性最好,适合进行 IFVD 实验.

3.3 SiO₂ 薄膜厚度对 IFVD 的影响

利用 PECVD 生长设备对外延片表面生长不同厚度的 SiO₂ 薄膜,厚度分别为 100 nm、150 nm、200 nm、250 nm、300 nm 和 400 nm.并且分别在 875℃ 的条件下进行快速退火处理,退火时间为 90 s.由 IFVD 的基本原理可以理解为,因为 SiO₂ 多孔性薄膜且对于 Ga 原子的溶解性较大,所以 SiO₂ 薄膜厚度越大,薄膜可以吸收的 Ga 原子越多,IFVD 效果应该越明显,波长蓝移量越大^[16-18].

而由图 7 中可以看出,随着 SiO₂ 薄膜厚度的增加,波长蓝移量先增加后减少,在 SiO₂ 薄膜厚度为 200 nm 时为最大蓝移量 53 nm,分析可能在高温退火过程中,钨素灯辐照加热方式对不同厚度 SiO₂ 薄膜具

有差异.因为样品本身是通过钨素灯辐照的辐射吸收达到快速升温, SiO_2 薄膜厚度不同,对辐照光的反射率就不同(最大差异量达到20%).吸收程度越低,加热效果就越差,而IFVD对退火炉的钨卤素灯辐照强度具有很大的依赖性,因而在发射波长的蓝移量呈现出上述差异.最终确定 SiO_2 薄膜厚度为200 nm时最优.

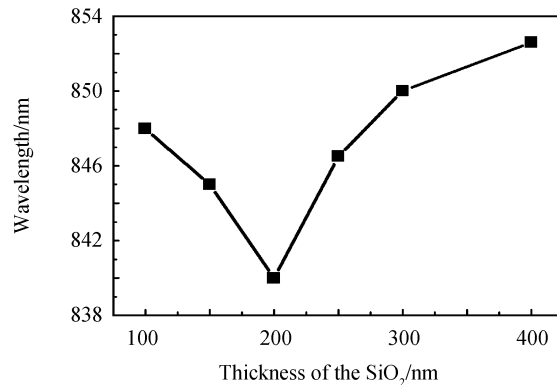


图7 不同 SiO_2 薄膜厚度对波长蓝移的影响

Fig.7 The degree of the wavelength blue shift at various thickness of the SiO_2

3.4 不同盖片对IFVD的影响

实验中在进行快速退火的过程中外延片表面由盖片保护,在RTA退火炉中进行高温退火.讨论了不同盖片对IFVD的影响,选用的盖片分别为Si和GaAs材料盖片,退火温度为850℃和875℃,时间为90 s.从图8和图9中可以看出,利用GaAs盖片(L_4 和 L_5)相对于Si盖片(L_2 和 L_3)量子阱波长蓝移多了15~40 nm左右,而且从退火之后外延片的表面形貌可以看出,利用GaAs盖片的外延片表面形貌基本保持完好,而用Si盖片的外延片有大量白色物质析出.分析为利用Si盖片的外延片析出的白色物质为As材料,因为利用GaAs作为顶层盖片可以使外延片的表面受到As影响,在高温退火过程中可以抑制表面As原子的析出,保护表面形貌,而利用Si片作为盖片则无法在外延片的表面形成As压,而导致As原子高温下析出,外延片表面形貌遭到破坏,从而影响量子阱混杂,造成量子阱波长蓝移量减少.

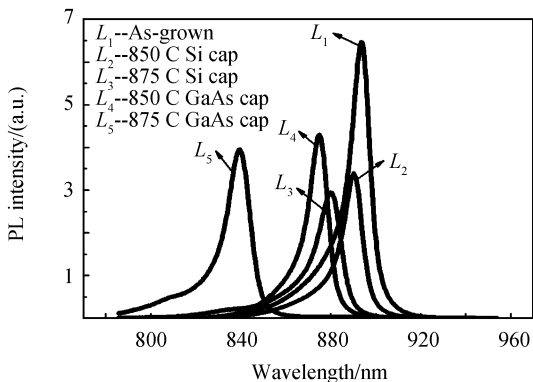


图8 不同盖片对波长蓝移的影响

Fig.8 The degree of the wavelength blue shift at different cap

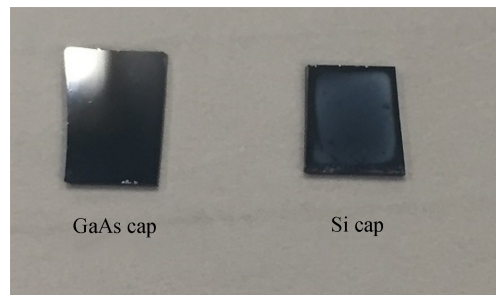


图9 不同盖片对外延片表面的影响

Fig.9 The degree of the surface of the epitaxial wafer at different cap

4 结论

本文利用无杂质空位诱导量子阱混杂技术(IFVD)在GaAs基915 nm半导体激光器件上制备了具有蓝移波长53 nm的非吸收窗口.在讨论IFVD理论的基础上,系统地研究了不同实验参数如退火温度、 SiO_2 薄膜厚度、 SiO_2 薄膜折射率和不同材料盖片对单量子阱结构无杂质空位诱导量子阱混合的影响.最终确定制备非吸收窗口最佳实验条件为 SH_4 流速8 sccm- SiO_2 折射率为1.447,RTA快速退火温度为875℃, SiO_2 薄膜厚度为200 nm,选择GaAs盖片为保护盖片,实现了对AlGaAs/GaAs单量子阱激光器无杂质空位诱导量子阱混杂技术实验条件的优化.本文对GaAs基915 nm半导体激光器制备非吸收窗口技术提供了有效的指导.

参考文献

- [1] AN Ning, HAN Xin-wei, LIU Cheng-zhi, *et al.* Simulation analysis of 2 μm InGaAsSb/AlGaAsSb laser diode with dual

- waveguide[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(9): 0914001.
 安宁, 韩兴伟, 刘承志, 等. 2 μm InGaAsSb/AlGaAsSb 双波导半导体激光器的结构设计[J]. 光子学报, 2016 **45**(9): 0914001.
- [2] WANG Shu-na, ZHANG Pu, XIONG Ling-ling, *et al.* Influence of temperature on smile in high power diode laser bars [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(5): 0514001.
 王淑娜, 张普, 熊玲玲, 等. 温度对功率半导体激光器列阵 smile 的影响[J]. 光子学报, 2016 **45**(5): 0514001.
- [3] NAITO H, NAGAKURA T, TORII K, *et al.* Long-term reliability of 915nm broad-area laser diodes under 20-W CW operation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, **27**(15): 1660-1662.
- [4] LIN Tao, ZHANG Hao-qing, GUO En-min, *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.
- [5] ZHOU Lu, BO Bao-xue, WANG Yun-hua, *et al.* Study of 940nm semiconductor lasers with non-absorb window structure fabricated by impurity-free vacancy disordering[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(8): 1-5.
 周路, 薄报学, 王云华, 等. 基于无杂质混合法制备带有无吸收窗口的 940nm GaInP/GaAsP/GaInAs 半导体激光器研究[J]. 中国激光, 2012, **39**(8): 1-5.
- [6] CUI Xiao, ZHANG Can, LIANG Song, *et al.* Study on enhanced quantum well intermixing by Cu sputtering[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2014, **25**(7): 133-137.
 崔晓, 张灿, 梁松, 等. Cu 溅射诱导增强量子阱混杂实验研究[J]. 光电子激光, 2014, **25**(7): 133-137.
- [7] LIN Sheng-jie, LI Jian-jun, HE Lin-jie, *et al.* Enhance AlGaAs/InGaAs quantum well intermixing by the technology of cycles annealing[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2014, **25**(8): 1471-1475.
 林胜杰, 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.
- [8] LIN Tao, MA Xiao-yu. Theoretical analysis of the inter-diffusion coefficients in the AlGaInP material quantum well intermixing[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2013, **16**: 738-741.
- [9] 黄德修. 半导体光电子学[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2013: 57.
- [10] YUE You-lan. Study of theory and simulation on semiconductor InGaAsP quantum wells intermixing technology[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2003, **20**(3): 350-358.
 岳优兰. InGaAsP 量子阱混合技术理论及模拟研究[J]. 量子电子学报, 2003, **20**(3): 350-358.
- [11] 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.
- [12] YU Jae-su, SONG Dong-jin, LIM Yong-tak, *et al.* Influence of dielectric deposition parameters on the quantum well In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs intermixing by impurity-free vacancy disordering[J]. *Journal of Apples Physics*, 2002, **92**: 1386-1390.
- [13] LIN Tao, ZHANG Hao-qing, SUN Hang, *et al.* Impurity-free vacancy diffusion induces intermixing in GaInP/AlGaInP quantum wells using sio₂ encapsulation[J]. *Laser Optoelectronics Progress*, 2015, **52**: 021602-1-5.
- [14] KAHRAMAN A, GUR E, AYDINLI A, *et al.* Impurity-free quantum well intermixing for large optical cavity high-power laser diode structures[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2016, **31**: 1-8.
- [15] DEENAPANRAY P, TAN H, MICHAEL C, *et al.* Silane flow rate dependence of SiO_x cap layer induced impurity-free intermixing of GaAs/AlGaAs quantum wells[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2000, **147**(5): 1950-1956.
- [16] HUIKO O, THOMPSON D, SIMMONS J, *et al.* The effect of different proximity caps on quantum well intermixing in InGaAsP/InP QW structures[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2006, **21**: 870-875.
- [17] WANG Fei-fei, LI Xin-kun, LIANG De-chun, *et al.* High-power short-wave length InAlGaAs/AlGaAs quantum dot superluminescent diodes[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(6): 706-710.
 王飞飞, 李新坤, 梁德春, 等. 大功率短波长 InAlGaAs/AlGaAs 量子点超辐射发光管[J]. 发光学报, 2016, **37**(6): 706-710.
- [18] DEENAPANRAY P, LAMB B, TAN H, *et al.* Impurity-free disorder mechanisms in GaAs-based structure using doped spin-on silica layers[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, **80**(23): 4351-4353.