

# 快速热退火对 GaAs/AlGaAs 量子阱材料结构及发光特性的影响

智民, 方铨\*, 牛守柱, 房丹, 唐吉龙, 王登魁, 王新伟, 王晓华, 魏志鹏

长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022

**摘要** 研究了快速热退火(RTA)对 GaAs/AlGaAs 量子阱材料结构及发光特性的影响。结果表明,当退火温度为 800 °C 时,材料晶体质量和光致发光(PL)强度得到显著提升;当退火温度为 900 °C 时,材料晶体质量和 PL 强度降低。依据峰值能量理论得到了室温下 PL 峰位的发光机制。通过分峰拟合发现,RTA 导致 PL 峰位整体蓝移。PL 扫描图表明,RTA 可以显著提高材料的整体晶体质量和发光均匀性。

**关键词** 材料; GaAs/AlGaAs; 量子阱; 互扩散; 快速热退火

中图分类号 O472

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.051603

## Effect of Rapid Thermal Annealing on Structural and Luminescence Properties of GaAs/AlGaAs Quantum Wells

Zhi Min, Fang Xuan, Niu Shouzhu, Fang Dan, Tang Jilong, Wang Dengkui,  
Wang Xinwei, Wang Xiaohua, Wei Zhipeng

State Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, Changchun University of  
Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** The influence of rapid thermal annealing (RTA) on the structural and luminescence properties of GaAs/AlGaAs quantum wells is investigated. The results show that, when the annealing temperature is 800 °C, the crystal quality and photoluminescence (PL) intensity is significantly improved. When the annealing temperature is 900 °C, the crystal quality and PL intensity decrease. According to the peak energy theory, the luminous mechanism at room temperature of PL peaks is obtained. A whole RTA-induced blue shift of PL peaks is observed by peak-differentiating and fitting. The PL mapping demonstrates that RTA can significantly improve the whole crystal quality and the luminous uniformity of materials.

**Key words** materials; GaAs/AlGaAs; quantum well; interdiffusion; rapid thermal annealing

**OCIS codes** 160.3380; 040.4200; 260.3800; 300.6500

## 1 引言

III-V 族化合物 GaAs 是一种重要的半导体材料,具有直接跃迁的能带结构,广泛应用于激光器<sup>[1-2]</sup>、红外光电探测器件<sup>[3-4]</sup>以及太阳能电池<sup>[5-8]</sup>等制造中。GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器

(QWIP)具有成熟的材料制备工艺,以及可低成本、大面积制备均匀的焦平面阵列等优点,可满足人们在民用、军事等应用领域的需求<sup>[9-10]</sup>,其中量子阱材料的晶体质量、合金组分对发光及探测波长等产生影响。GaAs 和 AlGaAs 构成了量子阱材料的异质界面,Al 表面迁移率越小,引入外来杂质的概率越

收稿日期: 2017-12-12; 收到修改稿日期: 2018-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(61404009,61474010,61574022,61504012,61674021,11674038)

作者简介: 智民(1993—),男,硕士研究生,主要从事激光及其与物质相互作用方面的研究。E-mail: z401404611@163.com

导师简介: 王晓华(1967—),女,博士,研究员,主要从事半导体光电子材料与器件方面的研究。

E-mail: biewang2001@126.com

\* 通信联系人。E-mail: fangxuan110@126.com

大,界面处容易堆积杂质。这些杂质在界面处以非辐射复合中心的形式存在,会捕获载流子,抑制辐射复合发光,从而影响器件的性能。目前,界面控制手段有离子注入诱导界面混合<sup>[11]</sup>、阳极氧化诱导界面混合<sup>[12]</sup>、杂质空位诱导界面混合<sup>[13-14]</sup>、无杂质空位诱导界面混合<sup>[15-16]</sup>及激光退火诱导界面混合<sup>[17]</sup>等,均可以改善量子阱的结构特性。然而,这些界面控制手段会降低材料质量及器件性能。快速热退火(RTA)可以有效去除材料中的缺陷,且诱导的界面混合更加均匀<sup>[18-20]</sup>。研究 RTA 对 GaAs/AlGaAs 量子阱材料结构及发光性能的影响,能为后续优化退火参数及制备高性能 GaAs/AlGaAs 量子阱材料提供参考。

本文采用分子束外延(MBE)方式生长 GaAs/AlGaAs 多量子阱,通过 RTA 处理量子阱材料。通过高分辨 X 射线衍射仪(HRXRD)和光致发光(PL)扫描系统研究了不同退火温度对量子阱材料晶体质量与结构的影响,利用室温 PL 谱对 GaAs/AlGaAs 量子阱材料进行了光学性质表征,研究了退火前后材料发光强度的变化。用分峰拟合后的室温 PL 谱研究了不同退火温度下材料发光峰位的移动情况,讨论了 RTA 对 GaAs/AlGaAs 量子阱材料结构及光学特性的影响。

## 2 实验部分

使用芬兰 DCA 公司的 P600 MBE 系统进行样品的外延生长,V 族源采用 As 的单质源,III 族源采用 Al、Ga 的单质源。衬底采用半绝缘的 GaAs 衬底。由于 8~12  $\mu\text{m}$  远红外波段是空气中最为重要的大气窗口,且在这一波段工作的激光探测器被广泛应用于军事和民用等领域<sup>[21]</sup>,因此采用电子干涉模型模拟计算了多量子阱的结构参数<sup>[22]</sup>,从而使其探测波长达到 8~12  $\mu\text{m}$ ,满足后期器件应用需求。首先,在 GaAs(001)衬底上同质外延生长表面光滑的 GaAs 缓冲层,随后外延生长 n 型掺杂的 GaAs 下欧姆接触层,其中 Si 掺杂浓度(粒子数浓度,下同)为  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ;其次,生长多量子阱,其中包括 50 nm 厚的  $\text{Al}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{As}$  势垒层和 5 nm 厚的 n 型掺杂的 GaAs 势阱层(Si 掺杂浓度为  $8.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ),并重复交替生长 30 个周期;最后,外延生长 n 型掺杂的 GaAs 上欧姆接触层并将其作为帽层(Si 掺杂浓度为  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ )。样品的生长温度为 680  $^{\circ}\text{C}$ ,V 族源与 III 族源的束流强度比为 50, GaAs 阱层生长速率为  $4 \times 10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,AlGaAs 层

生长速率为  $1 \times 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,样品结构示意图如图 1 所示。

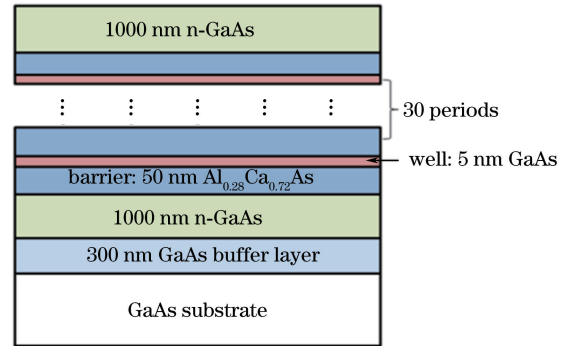


图 1 样品结构示意图

Fig. 1 Structural parameters of samples

样品生长后,利用美国 Allwin21 Corp 公司的 Accu Thermo AW610 型快速热退火系统进行热退火处理,样品被均匀切成 7 份,一份未处理样品作为参照组,余下样品采用不同退火温度进行 RTA,退火温度分别为 650,700,750,800,850,900  $^{\circ}\text{C}$ ,退火时间为 30 s。利用 HRXRD 和 PL 扫描系统测试样品退火前后的结构质量,用 PL 谱表征样品的光学性质。

## 3 结果与讨论

图 2 所示为未处理样品和退火温度在 650~900  $^{\circ}\text{C}$  的样品 X 射线衍射(XRD)图。与未处理样品相比,退火温度为 650  $^{\circ}\text{C}$  的样品的各级衍射峰强度和半峰全宽(FWHM)基本没有变化。随着退火温度的继续上升,样品的各级衍射峰强度逐渐增大,各级衍射峰 FWHM 逐渐减小。当退火温度为 800  $^{\circ}\text{C}$  时,各级衍射峰强度达到最大,FWHM 最小,由图 2(a)可知,各级衍射峰峰位向小角度方向偏移。说明退火温度为 800  $^{\circ}\text{C}$  时,材料中存在的缺陷和位错被除去,结晶质量显著提高<sup>[20]</sup>,且晶格常数变大,相应的 Al 含量变大,这可能是因为阱中 Al 原子向阱外扩散引起了衍射峰峰位向小角度偏移<sup>[23]</sup>。当退火温度继续升高,样品的各级衍射峰强度较退火温度为 800  $^{\circ}\text{C}$  的显著降低,FWHM 也显著增大。当退火温度达到 900  $^{\circ}\text{C}$  时,量子阱界面的混合效应增强,使得量子阱内部原子的互扩散更加明显,Al 原子向量子阱外迅速扩散,从而减弱了量子限制效应,造成样品结构质量降低。

对样品进行了 PL 扫描测试,结果如图 3 所示。图 3(a)所示为未处理样品与 RTA 样品的 PL 扫描

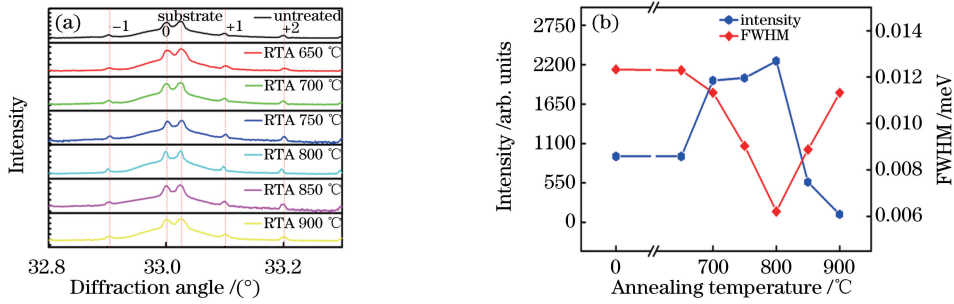


图 2 (a)不同样品的 XRD 图;(b)不同退火温度下样品的+1 级衍射峰强度和 FWHM

Fig. 2 (a) XRD patterns of different samples; (b) FWHM and +1 diffraction peak intensity of samples under different annealing temperatures

结果,虚线内为样品,可以看出,未处理样品的发光强度很不均匀。当退火温度持续升高到 900 °C 时,由于 RTA 消除了样品中存在的缺陷和位错,样品发光强度分布的均匀性得到了显著提升。图 3(b)

所示为未处理样品与 RTA 样品的 FWHM 扫描结果,随着退火温度的升高,样品的 FWHM 由未处理样品的 51 nm 减小到 40 nm 左右,说明 RTA 提高了材料的整体质量。

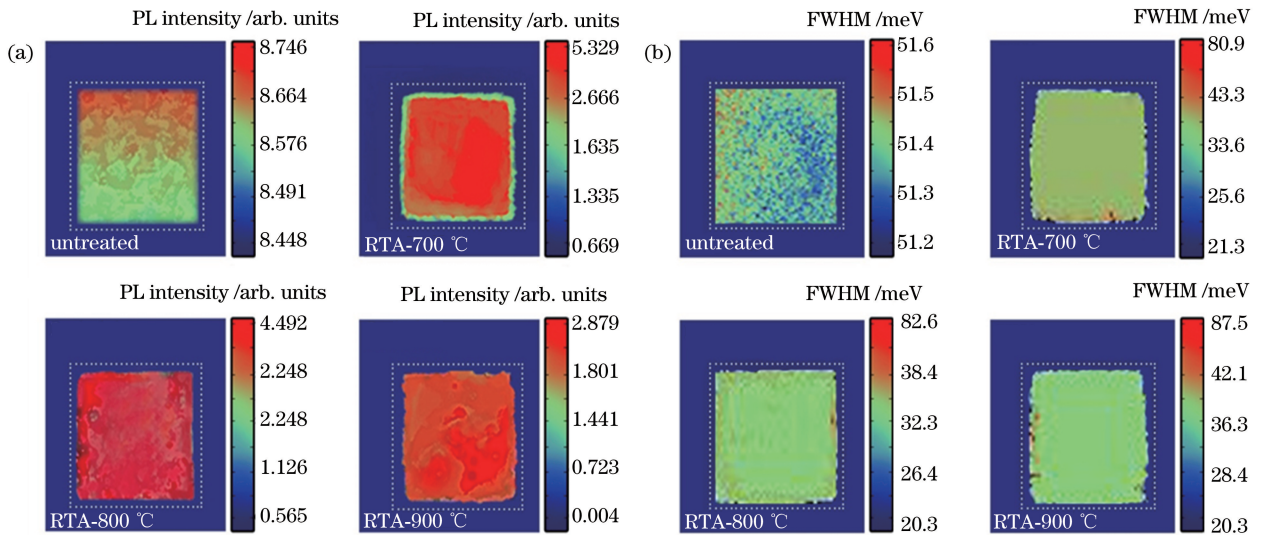


图 3 不同样品的 PL 扫描测试结果。(a)发光强度;(b) FWHM

Fig. 3 PL scanning test results of different samples. (a) Luminous intensity; (b) FWHM

图 4 所示为室温下未处理样品和 RTA 处理样品的 PL 谱,可以看到,室温下样品的 PL 谱中主要有 4 个峰位,分别标为 P1、P2、P3 和 P4,并且 P4 峰位随着退火温度的升高,发光强度增大。当退火温度为 700 °C 时,其发光强度比未处理样品提高了约 50%;当退火温度提高到 800 °C 时,其发光强度比未处理样品提高了约 1 倍。这是因为样品中原有的缺陷和位错是以量子阱中非辐射复合中心的形式存在,RTA 处理将这些非辐射复合中心从 AlGaAs 层和 GaAs/AlGaAs 界面处除去,增大了 GaAs/AlGaAs 量子阱的发光强度。而当退火温度为 900 °C 时,样品的 PL 强度较 800 °C 时显著减小,且 P4 峰形越来越明显。

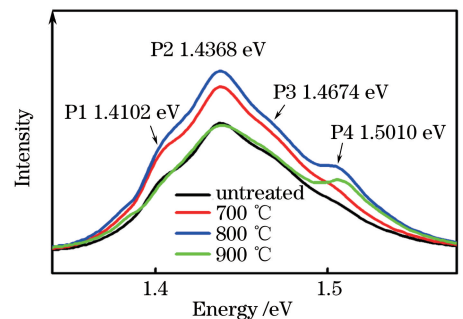


图 4 室温下未处理样品和 RTA 处理样品的 PL 谱对比  
Fig. 4 PL spectrum comparison between untreated sample and RTA treated samples at room temperature

这 4 个峰位对应的能量分别为 1.4102, 1.4368, 1.4674, 1.5010 eV, GaAs 在温度为 300 K 时的禁带

宽度  $E_g^{[24]}$  为

$$E_g = 1.519 - \frac{\alpha T^2}{\beta + T}, \quad (1)$$

式中  $T$  为温度,  $\alpha = 5.405 \times 10^{-4}$  eV/K,  $\beta = 204$  K。故室温下 GaAs 的禁带宽度  $E_g = 1.423$  eV。P1 和 P2 峰位与室温下 GaAs 的禁带宽度比较吻合, P1 峰可能来源于 GaAs 缓冲层, 且样品存在重掺杂的 GaAs 上接触层, 因此主峰 P2 峰位来自于导带底到价带顶的辐射复合跃迁, 室温下带间复合占主导地位。

量子阱中导带的基态能量<sup>[25]</sup>为

$$E_{c0} = \left( \frac{\pi}{2} \frac{a_c}{L_w + \Delta L_w} \right)^2, \quad (2)$$

式中  $L_w$  为阱宽;  $a_c = 2h/\sqrt{2m_{cw}}$ , 其中  $h$  为普朗克常数, 导带势阱中电子的有效质量  $m_{cw} = 0.067m_0$ ,  $m_0$  为电子的静止质量;  $\Delta L_w = a_c/\sqrt{b_c \Delta E_c}$ , 其中  $b_c = m_{cw}/m_{cb}$ , 导带势垒中电子的有效质量  $m_{cb} = (0.067 + 0.083x)m_0^{[26]}$ , 势垒高度  $\Delta E_c = 0.65 \times \Delta E_g = 0.65 \times 1.247x^{[27]}$ ,  $x$  为 Al 的含量。由(2)式可以求出量子阱中导带的基态能级。

价带重空穴基态的能量为

$$E_{hv0} = \left( \frac{\pi}{2} \frac{a_{hv}}{L_{hvW} + \Delta L_{hvW}} \right)^2, \quad (3)$$

式中  $a_{hv} = 2h/\sqrt{2m_{hvW}}$ , 其中价带阱中重空穴带对应的电子有效质量  $m_{hvW} = 0.62m_0$ ;  $\Delta L_{hvW} = a_{hv}/\sqrt{b_{hv} \Delta E_{hv}}$ , 其中  $b_{hv} = m_{hvW}/m_{hvB}$ , 价带垒中重空穴带对应的电子有效质量  $m_{hvB} = (0.62 + 0.14x)m_0$ , 价带高度差  $\Delta E_{hv} = 0.35 \Delta E_g = 0.35 \times 1.247x$ 。

在 GaAs/Al<sub>0.28</sub>Ga<sub>0.72</sub>As 多量子阱结构中, 阱层中掺杂的 Si 杂质使 Si 成为了施主杂质, 在掺杂浓度很高的情况下, Si 原子会取代 As 原子成为受主杂质。不同结构参数下施主和受主的结合能不同, 由此可以计算出施主能级和受主能级的能量<sup>[28]</sup>。

由理论计算可知, 导带电子基态能级到价带重空穴基态能级的跃迁能量  $E_{ch} = E_{c0} + E_g + E_{hv0} = 1.5122$  meV, 与 P4 峰位所对应能量 1.5010 meV 比较符合。导带基态电子能级与受主能级间的能量差  $E_{DA} = E_D + E_g + E_A = 1.4622$  meV (其中  $E_D$  为施主能级的能量,  $E_A$  为受主能级的能量), 与 P3 峰位对应能量 1.4674 meV 比较符合。因此, P3 峰位为量子阱中施主能级和受主能级间跃迁复合的发光峰, 而 P4 峰位为量子阱的特征发光峰位, 即量子阱中导带基态能级到价带重空穴基态能级的复合发光峰。

图 5(a) 所示为未处理样品和不同退火温度样品的室温 PL 归一化分峰图。

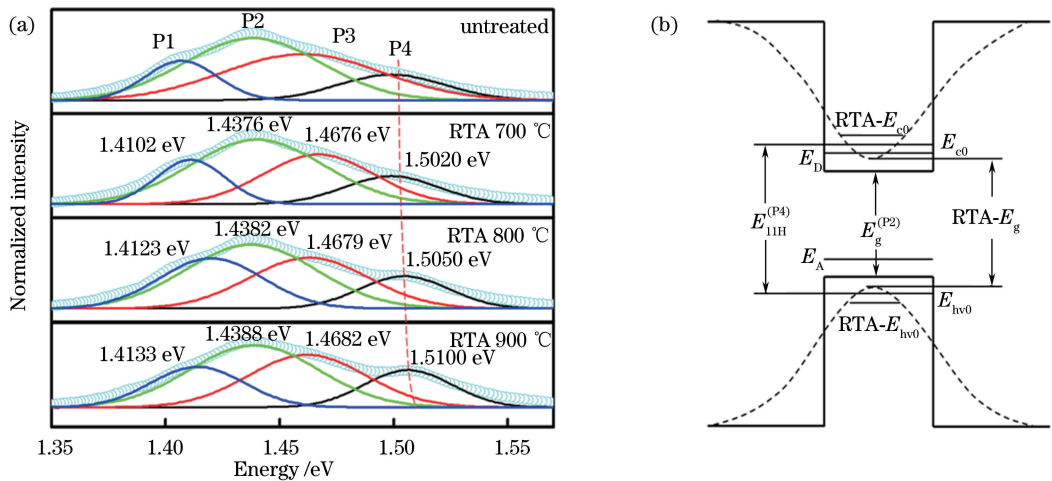


图 5 (a) 未处理样品与 RTA 样品归一化分峰拟合图; (b) 能带分裂图

Fig. 5 (a) Normalized peak-differentiating and fitting diagram of untreated sample and RTA treated samples;

(b) band splitting graph

由图 5 可知, P4 峰位随退火温度升高向高能端移动(蓝移)。当退火温度为 700 °C 时, 其峰位基本不变; 当退火温度为 800 °C 时, 峰位蓝移了约 4 meV; 当退火温度为 900 °C 时, 峰位蓝移了约 10 meV。随着退火温度的升高, P1、P2 和 P3 峰位也发生蓝移。RTA 量子阱特征发光峰峰位蓝移, 与 Li 等<sup>[29]</sup>报道的

GaN<sub>x</sub>As<sub>1-x</sub>/GaAs 量子阱异质界面处 N、As 原子互扩散的结果类似。在 RTA 过程中, AlGaAs 与 GaAs 异质界面处存在着 Al、Ga 原子的互扩散, 且随着退火温度的升高, Al、Ga 原子扩散量增加, 导致势垒中 Al 原子含量呈余误差函数分布, 扩散后量子阱中 Al 含量  $X_{(c)}$ <sup>[30]</sup> 为

$$x_{(z)} = X \left[ 1 + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left( \frac{z - L_z/2}{2\sqrt{Dt}} \right) - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left( \frac{z + L_z/2}{2\sqrt{Dt}} \right) \right], \quad (4)$$

式中  $L_z$  为量子阱的宽度;  $z$  为阱坐标;  $\operatorname{erf}(\cdot)$  表示误差函数;  $t$  为退火时间; 扩散系数  $D = D_0 \exp(-\Delta E/kT)$ , 其中  $D_0 = 10^{17} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\Delta E \approx 5.6 \text{ eV}$ ,  $k$  为玻尔兹曼常数。根据参考文献[31]可知, Al 原子和 Ga 原子的扩散会导致禁带宽度以及带间能量的增加, 并且使得量子阱的阱深减小、阱宽增加, 量子阱由标准的方形势阱变成非方形势阱, 如图 5(b) 所示。因此, Al、Ga 原子的互扩散引起 Al 组分的分布变化和阱垒层厚度的变化, 带间输运能量增加, 量子阱特征发光峰(P4)峰位蓝移<sup>[32]</sup>, 且由于 RTA 导致了禁带宽度的增大, 其他峰位带间输运能量变大, P1、P2 和 P3 峰位发生蓝移。当退火温度持续升高到 900 °C 时, Al 原子向量子阱外迅速扩散, 量子阱中量子限制效应减弱, 材料质量下降, 因而其 PL 强度显著减小。

## 4 结 论

研究了 RTA 对 GaAs/AlGaAs 多量子阱材料结构及性能的影响。结果表明, 在室温 PL 谱中, 与未处理样品对比, 当退火温度为 700 °C 和 800 °C 时, 样品的带边发光峰位的发光强度增大, 800 °C 时增大了 1 倍左右, 这是由于 RTA 去除了样品中的缺陷和位错, 抑制了非辐射复合, 使得发光强度增大。在 XRD 谱中, 与未处理样品对比, 当退火温度为 700 °C 和 800 °C 时, 其 XRD 各级衍射峰强度逐渐增大, FWHM 减小, 说明快速热退火改善了样品结晶质量, 与 PL 测试结果一致。当退火温度为 900 °C 时, PL 谱中的带边发光强度显著减小, 量子阱特征发光峰比较明显, 通过分峰拟合发现发光峰跃迁能量发生了蓝移, 这主要是由于高温退火引起了量子阱界面处 Al、Ga 原子的互扩散, 带间输运能量增加, 发光峰峰位整体蓝移。Al、Ga 原子的互扩散导致了量子限制效应减弱, 从而引起材料发光强度减小。在 XRD 谱中, 当退火温度为 900 °C 时, 高温热退火引起量子阱界面处 Al、Ga 原子的互扩散, 材料质量降低, 其各级衍射峰强度减小, 各级衍射峰 FWHM 增大, 与 PL 测试结果相符。PL 扫描图显示, RTA 可以显著改善材料整体发光均匀性, 提高材料整体质量。

## 参 考 文 献

[1] Saxena D, Mokkapatil S, Parkinson P, *et al.*

Optically pumped room-temperature GaAs nanowire lasers[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(12): 963-968.

[2] Liu M H, Cui B F, He X, *et al.* Study of high power semiconductor laser with low threshold current [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 0502001.

刘梦涵, 崔碧峰, 何新, 等. 大功率低阈值半导体激光器研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0502001.

[3] Xu Z J, Lin S S, Li X Q, *et al.* Monolayer MoS<sub>2</sub>/GaAs heterostructure self-driven photodetector with extremely high detectivity [J]. *Nano Energy*, 2016, 23: 89-96.

[4] Peytavit E, Arscott S, Lippens D, *et al.* Terahertz frequency difference from vertically integrated low-temperature-grown GaAs photodetector [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 81(7): 1174-1176.

[5] Han H V, Lin C C, Tsai Y L, *et al.* A highly efficient hybrid GaAs solar cell based on colloidal-quantum-dot-sensitization [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 5734.

[6] Åberg I, Vescovi G, Asoli D, *et al.* A GaAs nanowire array solar cell with 15.3% efficiency at 1 sun [J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2016, 6(1): 185-190.

[7] Ma D Y, Chen N F, Tao Q L, *et al.* Performance of space GaInP/(In)GaAs/Ge triple-junction solar cell containing Bragg reflector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1131001.

马大燕, 陈诺夫, 陶泉丽, 等. 包含布拉格反射器的空间用 GaInP/(In)GaAs/Ge 三结太阳能电池性能 [J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 1131001.

[8] Zhou G L, Xu J M, Lu J, *et al.* Irradiation effect of continuous-wave laser on triple-junction GaAs solar cells [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(11): 111412.

周广龙, 徐建明, 陆健, 等. 连续激光对三结 GaAs 电池的损伤效应 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(11): 111412.

[9] Gunapala S D, Bandara S V, Liu J K, *et al.* 1024 × 1024 Format pixel co-located simultaneously readable dual-band QWIP focal plane [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2009, 52(6): 395-398.

[10] Gunapala S D, Bandara S V, Liu J K, *et al.* 640/spl times/512 pixel long-wavelength infrared narrowband, multiband, and broadband QWIP focal plane arrays [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2003, 50(12): 2353-2360.

[11] Djie H S, Ooi B S, Aimez V. Neutral ion-

- implantation-induced selective quantum-dot intermixing[J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(26): 261102.
- [12] Červenka J, Kalousek R, Bartošik M, *et al.* Fabrication of nanostructures on Si (100) and GaAs (100) by local anodic oxidation [J]. Applied Surface Science, 2006, 253(5): 2373-2378.
- [13] Deppe D G, Holonyak N, Jr. Atom diffusion and impurity-induced layer disordering in quantum well III-V semiconductor heterostructures [J]. Journal of Applied Physics, 1988, 64(12): R93-R113.
- [14] Marsh J H, Bradshaw S A, Bryce A C, *et al.* Impurity induced disordering of GaInAs quantum wells with barriers of AlGaInAs or of GaInAsP [J]. Journal of Electronic Materials, 1991, 20(12): 973-978.
- [15] 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.
- [16] Zhao J, Feng Z C, Wang Y C, *et al.* Luminescent characteristics of InGaAsP/InP multiple quantum well structures by impurity-free vacancy disordering [J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 200(10): 3245-3249.
- [17] Sengupta D K, Horton T, Fang W, *et al.* Redshifting of a bound-to-continuum GaAs/AlGaAs quantum-well infrared photodetector response via laser annealing [J]. Applied Physics Letters, 1997, 70(26): 3573-3575.
- [18] Xie K, Wie C R, Varriano J A, *et al.* Improvement of GaAs/AlGaAs quantum well laser diodes by rapid thermal annealing [J]. Journal of Electronic Materials, 1994, 23(1): 1-6.
- [19] Li L H, Pan Z, Xu Y Q, *et al.* Effects of rapid thermal annealing and SiO<sub>2</sub> encapsulation on GaNAs/GaAs single quantum wells grown by plasma-assisted molecular-beam epitaxy [J]. Applied Physics Letters, 2001, 78(17): 2488-2490.
- [20] Ni H Q, Niu Z C, Xu X H, *et al.* High-indium-content In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs quantum wells with emission wavelengths above 1.25 μm at room temperature [J]. Applied Physics Letters, 2004, 84(25): 5100-5102.
- [21] Levine B F. Quantum-well infrared photodetectors [J]. Journal of Applied Physics, 1993, 74(8): R1-R81.
- [22] Cheng X K, Huang B B, Xu X G, *et al.* Interference of electron in GaAs/AlGaAs multi-quantum well structure [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(5): 692-694.
- 程兴奎, 黄柏标, 徐现刚, 等. GaAs/AlGaAs 多量子阱结构中的电子干涉 [J]. 电子学报, 2001, 29(5): 692-694.
- [23] Roch T, Schrenk W, Anders S, *et al.* X-ray investigation of interface broadening by rapid thermal processing [J]. The Society for Micro-electronics, 2004: 109-111.
- [24] Dawson P, Duggan G, Ralph H I, *et al.* Free excitons in room-temperature photoluminescence of GaAs-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As multiple quantum wells [J]. Physical Review B, 1983, 28(12): 7381-7383.
- [25] Harrison P. Quantum wells, wires and dots: theoretical and computational physics of semiconductor nanostructures [M]. 3rd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2009.
- [26] Levine B F, Bethea C G, Shen V O, *et al.* Tunable long-wavelength detectors using graded barrier quantum wells grown by electron beam source molecular beam epitaxy [J]. Applied Physics Letters, 1990, 57(4): 383-385.
- [27] Willardson R K, Beer A C. Semiconductors and semimetals [M]. New York: Academic press, 1977.
- [28] Li H, Cheng X K, Zhou J M, *et al.* Photoluminescence of doped GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As superlattice [J]. Vacuum Electronics, 2005(3): 17-19.
- 李华, 程兴奎, 周均铭, 等. 掺杂 GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As 超晶格的光致发光特性分析 [J]. 真空电子技术, 2005(3): 17-19.
- [29] Li L H, Pan Z, Zhang W, *et al.* Effects of rapid thermal annealing on the optical properties of GaN<sub>x</sub>As<sub>1-x</sub>/GaAs single quantum well structure grown by molecular beam epitaxy [J]. Journal of Applied Physics, 2000, 87(1): 245-248.
- [30] Smith P E. Atomic diffusion and interface electronic structure of III-V heterojunctions and their dependence on epitaxial growth transitions and annealing [D]. Columbus: The Ohio State University, 2007.
- [31] Li N, Lu W, Li N, *et al.* Influence on GaAs/AlGaAs quantum well infrared photodetector of proton implantation and rapid thermal annealing [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2000, 19(1): 25-28.
- 李娜, 陆卫, 李宁, 等. 质子注入和快速退火对

GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器的影响 [J]. 红外与毫米波学报, 2000, 19(1): 25-28.

[32] Sousa M A, Esteves T C, Sedrine N B, *et al.* Influence of nitrogen implantation and thermal

annealing on the optical properties of green emitting InGaN/GaN multiple quantum wells [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 09703.