

InGaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器中势垒生长温度的研究

霍大云 石震武 张伟 唐沈立 彭长四

Barrier growth temperature of InGaAs/AlGaAs-quantum well infrared photodetector

Huo Da-Yun Shi Zhen-Wu Zhang Wei Tang Shen-Li Peng Chang-Si

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 068501 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.068501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.068501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I6>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于谐振腔增强型石墨烯光电探测器的设计及性能分析

[Design and performance analysis of microcavity-enhanced graphene photodetector](#)

物理学报.2016, 65(13): 138501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.138501>

含有 AlGaAs 插入层的 InAs/GaAs 三色量子点红外探测器 [Three-color InAs/GaAs quantum dot infrared photodetector with AlGaAs inserting layer](#)

物理学报.2016, 65(10): 108502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.108502>

基于高阻 ZnO 薄膜的光电导型紫外探测器

[Photoconductive UV detector based on high-resistance ZnO thin film](#)

物理学报.2015, 64(19): 198501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.198501>

基于垂直晶体管结构的低电压并五苯光电探测器

[Low-voltage pentacene photodetector based on a vertical transistor configuration](#)

物理学报.2015, 64(10): 108503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.108503>

InGaAs/AlGaAs量子阱红外探测器中 势垒生长温度的研究*

霍大云 石震武[†] 张伟 唐沈立 彭长四

(苏州大学光电信息科学与工程学院/苏州纳米科技协同创新中心, 苏州 215006)

(2016年7月20日收到; 2016年12月22日收到修改稿)

InGaAs/AlGaAs量子阱是中波量子阱红外探测器件最常用的材料体系, 本文以结构为2.4 nm In_{0.35}Ga_{0.65}As/40 nm Al_{0.34}Ga_{0.66}As的多量子阱材料为研究对象, 利用分子束外延生长, 固定InGaAs势阱的生长温度(465 °C), 然后依次升高分别选取465, 500, 545, 580 °C生长AlGaAs势垒层, 从而获得四个不同的多量子阱样品. 通过荧光光谱以及X射线衍射测试系统分析了势垒层生长温度对InGaAs量子阱发光和质量的影响, 并较准确地给出了量子阱大致的温致弛豫轨迹: 465—500 °C, 开始出现相分离, 但缺陷水平较低, 属弹性弛豫阶段; 500—545 °C, 相分离加剧并伴随缺陷水平的上升, 属弹性弛豫向塑性弛豫过渡阶段; 545—580 °C, 相分离以及缺陷水平急剧上升, 迅速进入塑性弛豫阶段, 尤其是580 °C时, 量子阱的材料质量被严重破坏.

关键词: 中波红外探测, 量子阱红外探测器件, InGaAs/AlGaAs多量子阱, 温致弛豫

PACS: 85.60.Gz, 85.35.Be, 81.07.St, 78.67.De

DOI: 10.7498/aps.66.068501

1 引言

1987年, Levine等^[1]首次验证了多量子阱(MQWs)在红外探测领域的应用, 标志着量子阱红外探测器件(QWIP)的正式出现^[1-5]. 由于该类器件具有优异的材料均匀性、较窄的光谱响应以及灵活的能带剪裁等优势^[5-8], 引起了全球范围内如Jet Propulsion Laboratory^[9], Army Research Laboratory^[10], Goddard^[11], Thales等^[12]知名研究单位和军方机构的开发热潮, 但大部分工作都集中在GaAs/AlGaAs基QWIP的研究. 这是由于其垒阱之间天然具备几乎为“零”的晶格失配以及极其相近的生长窗口等优点, 可以非常容易地获得高质量的外延材料. 但由于受GaAs/AlGaAs量子阱的能带结构限制, 其工作波长主要位于长波、甚长波段, 无法有效覆盖中波(3—5 μm)区域.

考虑到现代军事环境中有很多目标, 例如战

斗机、导弹等大型战略武器在高速飞行时, 发动机尾部喷焰羽状废气柱的红外辐射主要落在中波区域以及目前第三代红外探测器对双(多)色(同时覆盖中/长波)大面阵焦平面成像技术的要求^[13], 具有中波响应的InGaAs/AlGaAs基QWIP成为全球研究的新热点. 然而该类器件的制备比GaAs/AlGaAs QWIP要困难得多, 其原因在于: InGaAs量子阱材料的热稳定性差需在低温沉积(参考区间为450—500 °C), 而AlGaAs势垒层需升温生长以保证“Al”原子的迁移能力(一般不低于580 °C), 但升温生长势垒将导致InGaAs量子阱(高应变)发生应力释放(即应变弛豫)^[14], 这将严重影响其材料质量. 然而, 目前InGaAs/(Al)GaAs量子阱材料在应力释放方面的研究主要是探讨InGaAs的生长厚度和生长温度对其应力的影响, 而垒层(Al)GaAs的生长温度对其应力的影响研究相对较少^[15-18], 因此对于该材料的实际生长, AlGaAs势垒层的生长温度选择是高质量制备

* 国家自然科学基金(批准号: 11504251)、江苏高校优势学科建设工程、科技部国际合作项目(批准号: 2013DFG12210)、江苏省高校自然科学研究重大项目(批准号: 12 KJA140001)和江苏省普通高校研究生科研创新计划(批准号: KYLX15_1252)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: zwshi@suda.edu.cn

InGaAs/AlGaAs 基 QWIP 的技术关键. 基于此, 本文利用分子束外延 (MBE) 在 GaAs(001) 衬底上生长了四个变势垒层温度的中波 InGaAs/AlGaAs 应变 MQWs 样品. 然后通过室温、低温光致发光 (PL) 以及对称 (004) 面、非对称 (115) 面 X 射线衍射 (XRD) 测试手段对样品进行了全面的表征测量, 系统分析了势垒层生长温度对 InGaAs 量子阱发光和材料质量的影响并较准确地给出了量子阱大致的温致弛豫轨迹, 特别是确定了弹性弛豫向塑性弛豫过渡的温度区间, 为实际生长 InGaAs/AlGaAs 基 QWIP 器件提供了关键的技术参考.

另外值得一提的是, 目前有关 (001) 衬底上外延的应变 MQWs (或超晶格) 结构的 XRD 测试研究几乎只集中于对称面的扫描, 而鲜有论及非对称面的测试结果 (不同于体材料的研究). 本文通过采用 ω -2 θ 的面 (mapping) 扫描方式成功获得了应变 InGaAs/AlGaAs MQWs 样品非对称 (115) 面的多级卫星峰数据, 结合常用的对称 (004) 面的数据, 最终使得我们对量子阱整个弛豫过程有更清晰的理解和全面的认识.

2 样品生长与测试

首先, 本文利用 VG 80H-MBE 在半绝缘 (001) GaAs 衬底上分别制备了四个 InGaAs/AlGaAs MQWs 样品. 如图 1 所示: 四个样品的量子阱层都固定在 465 °C 生长, 只是各自之间势垒层的生长温度分别为 465, 500, 545 以及 580 °C. 除此之外,

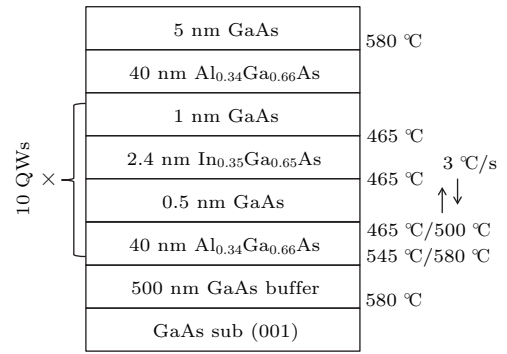


图 1 四个不同 AlGaAs 势垒生长温度的 MQWs 样品结构示意图

Fig. 1. Sample structures of four MQWs with different AlGaAs barrier growth temperature.

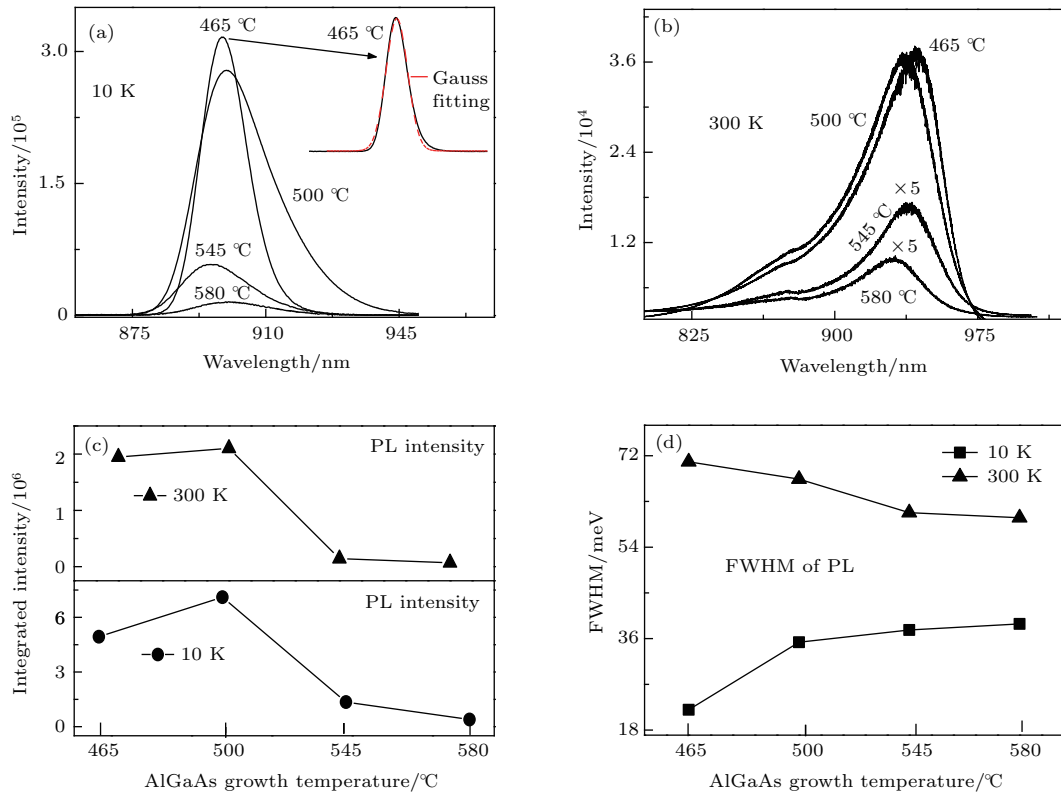


图 2 (网刊彩色) (a) 样品低温 10 K 荧光谱; (b) 室温 300 K 荧光谱; (c) 荧光积分强度数据 (10 K/300 K); (d) 荧光半高全宽数据 (10 K/300 K)

Fig. 2. (color online) (a) PL of samples @10 K; (b) PL of samples @300 K; (c) integrated intensity of PL; (d) full width at half maximum (FWHM) of PL (10 K/300 K).

它们的材料结构以及其他生长工艺完全一致. 其中“垒阱”之间生长切换方式为: 从“垒”切换到“阱”采用中断降温至 465 °C 后生长, 而从“阱”切换到“垒”则采用边升温边生长, 升降温速率为 3 °C/s.

接着, 采用 JY-T64000 型拉曼光谱仪对这四个样品进行了室温 300 K、低温 10 K 下的 PL(光荧光)测试. 测试条件为: 激发波长 532 nm, 功率 0.1 mW, 积分时间 1 ms. 图 2 (a) 和图 2 (b) 分别为量子阱 10 K 以及 300 K 的光谱结果.

然后, 采用 PANalytical-DY 1220 型 XRD 对这四个样品进行了对称 (004) 以及非对称 (115) 面的 ω -2 θ 线扫描. 图 3 (a) 和图 3 (b) 分别为 (004) 和 (115) 扫描的典型结果. 发现 (115) 面的扫描结果无法获得任何 MQWs 特殊的多级衍射卫星峰图样. 后改用 ω -2 θ 面 (mapping) 扫描, 成功获得 (115) 的

多级卫星峰数据, 典型的结果如图 4 所示. 接着, 我们对四个样品的卫星峰个数进行了系统的统计 (见表 1) 以及对 -1th 卫星峰进行了 ω 摇摆曲线的测试, 半高全宽的结果如图 5 所示.

表 1 样品 XRD (004) 及 (115) 扫描的卫星衍射峰个数统计
Table 1. Satellite peak counts for XRD (004) and (115) scanning of samples.

衍射方向	位置	465 °C	500 °C	545 °C	580 °C
(004)	负卫星峰	25	25	26	27
	正卫星峰	3	4	7	7
(115)	负卫星峰	9	8	8	8
	正卫星峰	0	0	0	0

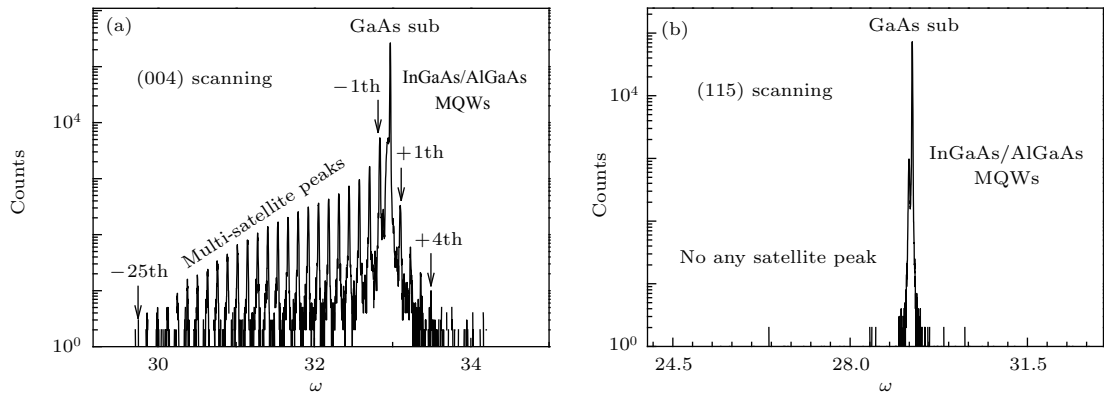


图 3 (a) XRD (004) ω -2 θ 线扫描结果; (b) XRD (115) ω -2 θ 线扫描结果

Fig. 3. (a) XRD (004) ω -2 θ scanning (line-mode); (b) XRD (115) ω -2 θ scanning (line-mode).

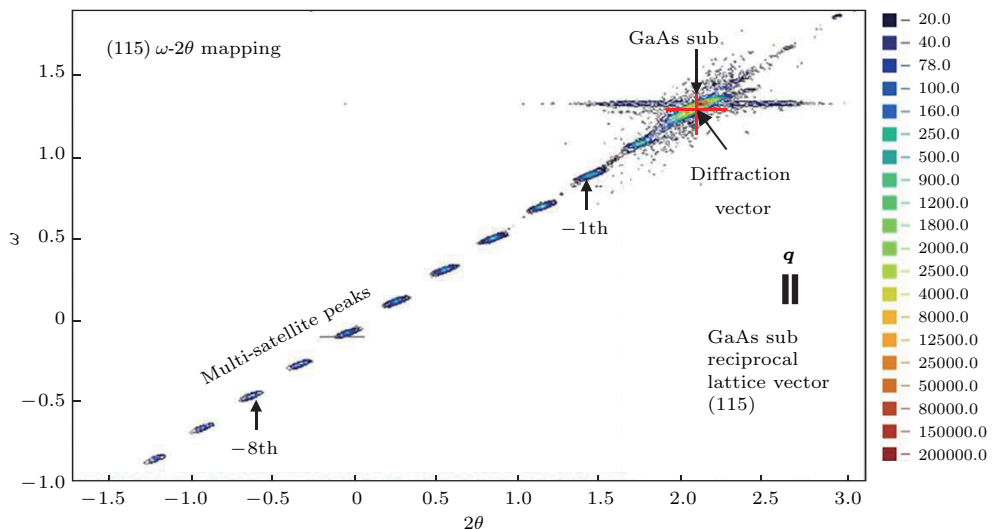


图 4 (网刊彩色) XRD (115) ω -2 θ 面扫描结果

Fig. 4. (color online) XRD (115) ω -2 θ mapping-scanning.

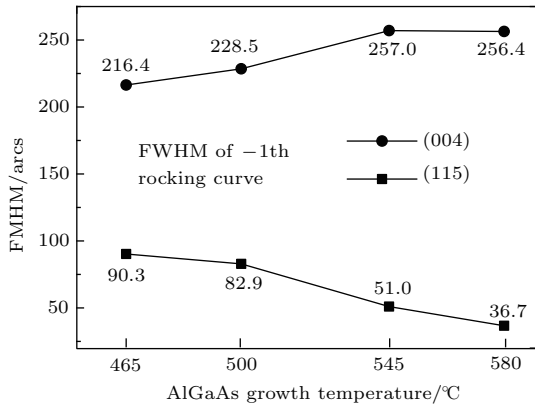


图5 样品XRD (004)及(115)-1th卫星衍射峰 ω 摇摆曲线的半高全宽结果

Fig. 5. FWHM for the ω -rocking curve of -1th satellite peak (004)/(115).

3 讨论与分析

图2(a)和图2(b)表明量子阱的发光强度和峰形受AlGaAs势垒生长温度的强烈调制. 图2(c)和图2(d)分别定量地给出了样品发光积分强度以及发光峰的半高全宽随势垒生长温度的变化趋势. 低温10 K时(如图2(a)所示): 465 °C的样品量子阱荧光很强, 其发光峰经高斯拟合(见右上角内置拟合曲线)发现具有很好的对称性, 同时如图2(d)所示, 其具有最低的半高全宽(22.0 meV), 说明该样品的量子阱具有优异的材料均匀性(未出现相分离), 故465 °C下量子阱未发生明显弛豫; 500 °C的样品荧光峰形开始出现了沿主峰右侧(长波)扩展的不对称性, 伴随半高全宽增至35.3 meV(如图2(d)所示), 说明量子阱已经发生相分离^[19, 20], 引入了高In局域态的发光, 但如图2(c)所示, 此时量子阱的荧光强度并没有发生衰减(相比未弛豫的465 °C样品更强), 故500 °C下量子阱的弛豫属弹性弛豫^[19]; 随着势垒生长温度的继续升高, 545和580 °C两个样品的荧光强度出现了极速下降, 同时如图2(d)所示, 其半高全宽随温度逐渐展宽, 故在545 °C时就发生了塑性弛豫^[19], 使得阱内产生了大量的缺陷, 尤其到了580 °C, 样品发光强度相比465 °C样品衰减了一个多量级(如图2(c)所示), 表明升温将进一步加剧塑性弛豫, 从而迅速使得阱内的缺陷水平不断升高, 严重恶化材料的发光性能. 以上论述在300 K荧光的强度数据中得到了更有力的支持: 由于低温10 K时被冻结的一部分缺陷, 将在室温时被热激活, 对应的这部分非辐射复合中心将消耗更多的光生载流子, 大大降低载流子的辐

射复合效率. 因此300 K下, 580 °C和545 °C两个样品相比465 °C样品发光强度下降达到了两个数量级(见图2(c)). 同理, 500 °C的样品室温发光依然和465 °C样品维持在同一个水平, 也再次有力地证明了该温度下量子阱虽然发生相分离, 但缺陷水平非常低, 属弹性弛豫. 虽然300 K和10 K的样品荧光数据在发光强度上具有一致的变化趋势, 但在其他方面存在着显著的矛盾: 首先, 对比图2(b)和图2(a)中的荧光峰形, 发现室温的荧光峰形的不对称性与低温(10 K)时完全相反, 表现为沿主峰左侧(短波)扩展. 其原因可解释为: 室温将导致去局域化^[21], 抑制了高In局域态的发光, 从而消除了原来低温时沿主峰右侧扩展的不对称性. 同时室温使得热运动加剧, 促进了价带中“空穴”从重空穴带热激发到轻空穴带, 故在主峰(“电子-重空穴”辐射复合)的左侧将出现“电子-轻空穴”复合的辐射信号, 最终导致了由“长波”扩展转变为“短波”扩展的不对称.

其次, 如图6(a)所示, 高温580 °C生长AlGaAs相比低温465 °C时, 原位反射高能电子衍射(RHEED)实时监测呈现出更加清晰明亮的主线以及再构线, 证明升温生长势垒将大大提高“Al”原子的迁移能力, 从而获得高平整度的外延表面. 原子力显微镜(AFM)测试显示(见图6(b)), 580 °C样品的表面平整度远优于低温465 °C样品. 另外XRD对称(004)扫描数据也表明, 样品的-1th卫星衍射峰的半高全宽随势垒温度升高而减少, 由465 °C时的90.3 arcs降至580 °C时的36.7 arcs(如图5所示), 且也观察到卫星峰的个数随温度升高而有所增加, 尤其是正卫星峰的个数从低温时的3个上升到高温时的7个(见表1). 因此, 虽然升温生长AlGaAs势垒将使InGaAs量子阱发生弛豫, 引起相分离(导致In组分的不均匀); 但另一方面升温将显著改善势垒本身材料的平整性, 从而获得平滑均匀的垒阱界面以及保证MQWs之间的重复性. 然而不管是量子阱中In组分的均匀性还是量子阱界面的平整度都将影响荧光的半高全宽. 分析图2(d), 样品室温300 K荧光峰的半高全宽随势垒生长温度变化的趋势和低温10 K的数据截然相反. 分析其原因为: 10 K时, 由于低温载流子的热运动受到很大抑制, 界面的粗糙(即阱宽起伏)引起的能级起伏也随之被大幅削弱, 对于465 °C样品虽然其量子阱的界面较粗糙, 但仍表现出最低的半高全宽(22.0 meV), 而界面较平整的580 °C样品却具有最大的半高全宽, 故正如之前的论述, 样品

低温荧光半高全宽随势垒温度升高的展宽主要是由量子阱发生相分离破坏了均匀性引起的. 到了 300 K 时, 首先, 热激发导致的去局域化过程将抹去样品间那部分由 In 组分不均匀导致的展宽, 同时界面粗糙度引起的展宽将被迅速增强, 此时样品

间荧光的半高全宽大小将主要由界面的质量决定. 故 465 °C 样品表现出最大的半高全宽 (70.8 meV), 相比之下, 高温 580 °C 样品的半高全宽却仅为 59.8 meV, 整体表现为随势垒温度升高而减小的趋势.

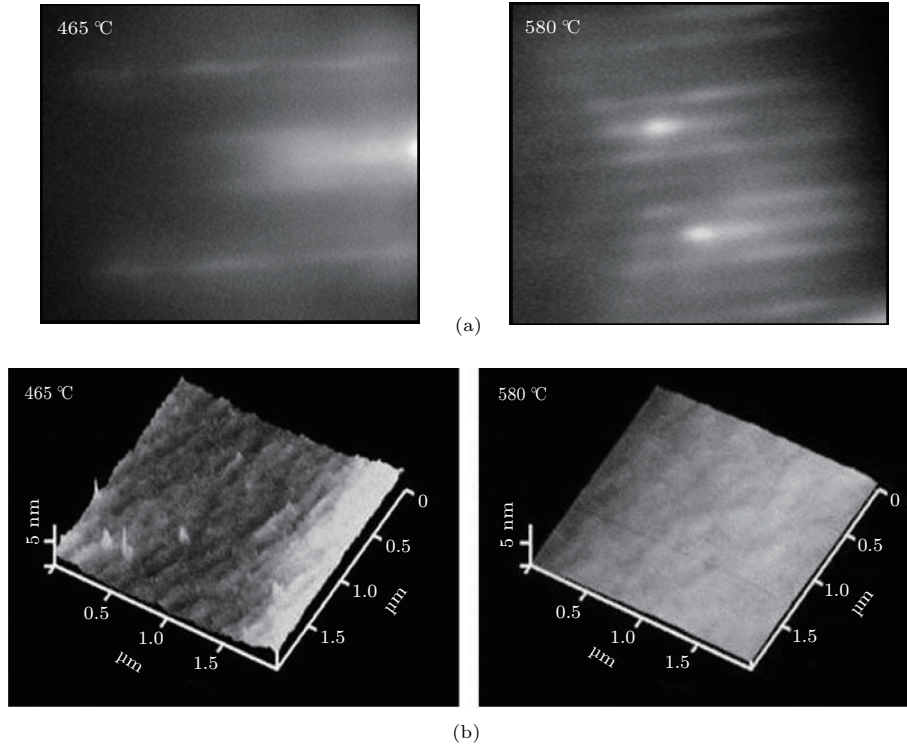


图 6 (a) 465 °C 以及 580 °C 下 AlGaAs 外延生长时 RHEED 的衍射图样; (b) 465 °C 以及 580 °C 两个样品的 AFM 测试结果

Fig. 6. (a) RHEED patterns for the epitaxy of AlGaAs @465 °C/580 °C; (b) AFM testing for samples of 465 °C and 580 °C.

最后值得一提的是, 本文在 XRD 测试时除进行了目前普遍采用的 (004) 扫描, 还对这四个样品进行了 (115) 扫描. 扫描结果显示 (见图 5), MQWs 的 -1 th 卫星衍射峰的半高全宽并未按照之前提及的 (004) 扫描结果那样随势垒温度升高而降低, 反而有所上升. 分析其原因是势垒升温除了能大幅改善界面质量和量子阱结构的周期重复性, 但也会促使量子阱发生塑性弛豫并引入材料缺陷. 对于 (004) 扫描, 其衍射矢量方向与量子阱生长方向一致, 因而对沿生长方向上的界面平整度以及量子阱周期的重复性将非常敏感, 故最终数据趋势由“界面改善”这一因素主导. 然而 (115) 的扫描结果却正好能反映出塑性弛豫引起的材料缺陷升高这一事实, 很好地支持了之前有关“荧光强度”数据的分析 (见图 2(c)). 这为本研究提供了很好的补充, 有效地增强了我们认识量子阱整个弛豫过程时的完

整性和清晰度.

故经本文研究证实: 在制备 InGaAs/AlGaAs 多量子阱材料时, 当生长 AlGaAs 层时温度高于 500 °C 条件下, 即可在量子阱中观察到轻微的弹性弛豫痕迹; 而当温度提高至 545 °C, 量子阱将发生剧烈的塑性弛豫, 其晶体质量将被严重破坏. 因此, 在实际生长时, 势垒的生长温度必须锁定在低温生长, 但低温生长 AlGaAs 将大大牺牲量子阱界面的质量和平整度, 而界面的不平整将直接影响后续器件工作时子带红外吸收的特性 (峰位、带宽等) 以及引入对光生载流子横向运输时的散射效应 (大大降低光生电流的抽取效率). 为了提高界面平整度, 目前常用的做法是在 InGaAs 和 AlGaAs 材料间插入一层超薄的 GaAs 以平滑界面. 本文所用的样品结构中同样采用了该方法, 但从实验结果分析发现其并不理想, 分析原因可能在于低温生长

AlGaAs时,随着势垒的厚度增加材料表面的起伏将会被不断放大,所以当势垒结束后紧接着生长量子阱时,AlGaAs/InGaAs界面的粗糙度(即量子阱的“下界面”)很难通过简单引入GaAs薄层恢复平整.而且随着量子阱的堆叠,这种界面恶化会迅速传递给后续量子阱的“上界面”,最终导致严重的后果.2013年,Shi等^[22]提出了一种“低温AlGaAs盖层技术”,他们将势垒层分成两步生长:先低温生长一定厚度,然后升温生长剩余的部分,实验中成功获得了峰值波长与全低温生长高度一致的器件.故基于这一技术,完全有望凭借其后续升温去改善每一层势垒上表面的平整度,从而极大地提高量子阱的界面质量.除此之外,我们还可以从能带理论出发,设计选择Al组分和In组分更低的量子结构以及在满足器件基本参数(如暗电流等)的前提下,尽可能地减小势垒厚度,从而降低获得高质量量子阱界面的原始生长难度.

4 结 论

本文从InGaAs, AlGaAs材料间生长温度差异巨大这一事实出发,分析讨论了在实际生长InGaAs/AlGaAs基中波QWIP时垒阱温度过渡中存在的相关问题,并提炼出高质量获得该系列QWIP关键在于AlGaAs势垒生长温度的选择和控制在.基于此,本文系统研究和讨论了势垒层生长温度对量子阱的结构质量和发光特性的影响规律,较准确地给出了InGaAs量子阱随势垒生长温度的大致温致弛豫轨迹,特别是确定了弹性弛豫向塑性弛豫转变的温度区间(500—545 °C),为实际生长中波InGaAs/AlGaAs基QWIP器件提供了关键技术参考.

参考文献

- [1] Levine B F, Choi K K, Bethea C G, Walker J, Malik R J 1987 *Appl. Phys. Lett.* **50** 1092
- [2] Yuan X Z, Lu W, Li N, Chen X S, Shen X C, Zi J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 503 (in Chinese) [袁先漳, 陆卫, 李宁, 陈效双, 沈学础, 资剑 2003 物理学报 **52** 503]

- [3] Levine B F, Bethea C G, Hasnain G, Shen V O, Pelve E, Abbott R R, Hsieh S J 1990 *Appl. Phys. Lett.* **56** 851
- [4] Lee S C, Krishna, Brueck S R J 2009 *Opt. Express* **17** 23160
- [5] Castellano F, Rossi F, Faist J, Lhuillier E, Berger V 2009 *Phys. Rev. B* **79** 205304
- [6] Levine B F 1993 *J. Appl. Phys.* **74** R1
- [7] Nedelcu A, Costard E, Bois P, Marcadet X 2007 *Infrared Phys. Technol.* **50** 227
- [8] Li N, Yuan X Z, Li N, Lu W, Li Z F, Dou H F, Shen X C, Jin L, Li H W, Zhou J M, Huang Y 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 797 (in Chinese) [李娜, 袁先漳, 李宁, 陆卫, 李志峰, 窦红飞, 沈学础, 金莉, 李宏伟, 周均铭, 黄绮 2000 物理学报 **49** 797]
- [9] Gunapala S, Bandara S, Bock J, Ressler M, Liu J, Mummolo J, Rafol S, Ting D, Wemer M 2002 *Aerospace Conference Proceedings* Montana, American, March 9–16, pp3–1437
- [10] Bandara S V, Gunapala S D, Liu J K, Rafol S B, Shott C A <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA408864> [2010-7-29]
- [11] Choi K K, Jhabvala M D, Sun J, Jhabvala C A, Waczynski A, Olver K 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 201113
- [12] Costard E, Bois P, de Rossi A, Nedelcu A, Cocle O, Gauthier F H, Audier F 2003 *C. R. Phys.* **10** 1089
- [13] Wang L M, Zhang R, Lin Y N, Xu S L 2008 *Infrared Laser Eng.* **S2** 570 (in Chinese) [王力民, 张蕊, 林一楠, 徐世录 2008 红外与激光工程 **S2** 570]
- [14] Lourenco M A, Homewood K P, Considine L 1994 *Mater. Sci. Eng. B* **28** 507
- [15] Whaley G J, Cohen P I 1990 *Appl. Phys. Lett.* **57** 144
- [16] Sasaki T, Suzuki H, Sai A, Takahashi M, Fujikawa S, Kamiya I, Ohshita Y, Yamaguchi M 2011 *J. Cryst. Growth* **323** 13
- [17] Quillec M, Goldstein L, Roux G L, Burgeat J, Primot J 1984 *J. Appl. Phys.* **55** 2094
- [18] Tanner B K, Parbrook P J, Whitehouse C R, Keir A M, Johnson A D, Jones J, Wallis D, Smith L M, Luun B, Hogg J H C 2001 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **34** A109
- [19] Li Q, Wang G T 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 181107
- [20] Zhang G, Ovtchinnikov A, Pessa M 1993 *J. Cryst. Growth* **127** 209
- [21] Cho Y H, Gainer G H, Fischer A J, Song J J, Keller S, Mishra U K, DenBaars S P 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 1370
- [22] Shi Z W, Wang L, Zhen H L, Wang W X, Chen H 2013 *Nanoscale Res. Lett.* **8** 310

Barrier growth temperature of InGaAs/AlGaAs-quantum well infrared photodetector*

Huo Da-Yun Shi Zhen-Wu[†] Zhang Wei Tang Shen-Li Peng Chang-Si

(School of Optoelectronics Information Science and Engineering, Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China)

(Received 20 July 2016; revised manuscript received 22 December 2016)

Abstract

The InGaAs/AlGaAs quantum wells have been extensively applied to quantum well infrared photodetector of mid-wavelength. In this letter, four samples of 2.4 nm $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}/40$ nm $\text{Al}_{0.34}\text{Ga}_{0.66}\text{As}$ multi-quantum wells are grown by molecular beam epitaxy with the InGaAs wells growing all at a temperature of 465 °C but the AlGaAs wells growing at temperatures of 465 °C, 500 °C, 545 °C, and 580 °C respectively. The dependence of InGaAs quantum well strain relaxation on the AlGaAs growth temperature is systematically studied by photoluminescence spectroscopy and X-ray diffraction and then the thermal-induced relaxations of three key-stages are clearly observed in the following temperature ranges. 1) 465–500 °C for the stage of elastic relaxation: the phase separation begins to take place with a low defect density; 2) 500–545 °C for the transition stage from elastic relaxation to plastic relaxation: the phase separation will be further intensified with defect density increasing; 3) 545–580 °C for the fast stage dominated by elastic relaxation and the defect density will sharply increase. Especially when AlGaAs temperature increases to 580 °C, a very serious plastic relaxation will take place and the InGaAs quantum well will be dramatically destroyed.

Keywords: mid-infrared detection, quantum well infrared photodetector, InGaAs/AlGaAs multi-quantum wells, thermal-induced relaxation

PACS: 85.60.Gz, 85.35.Be, 81.07.St, 78.67.De

DOI: 10.7498/aps.66.068501

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11504251), the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (PAPD), China, the International Cooperation Project by MOST, China (Grant No. 2013DFG12210), the Natural Science Research Project of Jiangsu Higher Education, China (Grant No. 12KJA140001), and the Post-graduate Innovation Project of Jiangsu Higher Education, China (Grant No. KYLX15_1252).

[†] Corresponding author. E-mail: zwshi@suda.edu.cn