

文章编号 1004-924X(2007)05-0678-06

# GaAs(110)量子阱材料生长和光学特性

刘林生<sup>1,2,3</sup>, 刘肃<sup>1</sup>, 王文新<sup>2</sup>, 赵宏鸣<sup>2</sup>, 刘宝利<sup>2</sup>, 蒋中伟<sup>2</sup>,  
高汉超<sup>2</sup>, 王佳<sup>2</sup>, 黄庆安<sup>1,3</sup>, 陈弘<sup>2</sup>, 周均铭<sup>2</sup>

1. 兰州大学 物理科学与技术学院, 甘肃 兰州, 730000;
2. 中国科学院 物理研究所 凝聚态国家实验室, 北京, 100080;
3. 东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 江苏 南京, 210096)

**摘要:** GaAs (110)衬底上生长 GaAs 外延层时,不同生长条件下存在单层和双层两种生长模式,对应反射高能电子衍射(RHEED)强度振荡呈现出单双周期的变化。通过透射电子显微镜(TEM)、室温和低温光荧光谱(PL谱)对两种生长模式下的样品进行了测量。结果表明,量子阱样品在双层生长模式下光学性能较差,单层生长模式下光学性能比较好,但是量子阱界面会变得粗糙。利用这一特点,采用 RHEED 强度振荡技术,能够实现在 GaAs(110)衬底上生长高质量量子阱。

**关键词:** 光荧光谱; 砷化镓; 量子阱; 分子束外延

**中图分类号:** TN304.23 **文献标识码:** A

## Optical properties and material growth of GaAs(110) quantum wells

LIU Lin-sheng<sup>1,2,3</sup>, LIU Su<sup>1</sup>, WANG Wen-xin<sup>2</sup>, ZHAO Hong-ming<sup>2</sup>, LIU Bao-li<sup>2</sup>, JIANG Zhong-wei<sup>2</sup>,  
GAO Han-chao<sup>2</sup>, WANG Jia<sup>2</sup>, HUANG Qing-an<sup>1,3</sup>, CHEN Hong<sup>2</sup>, ZHOU Jun-ming<sup>2</sup>

1. School of Physical Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
2. National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

3. MEMS Key Laboratory of the Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** There are two growth modes (monolayer-by-monolayer and bilayer-by-bilayer) under different conditions that correspond to monolayer and bilayer RHEED (Reflection High Energy Electron Diffraction) oscillations when GaAs epitaxial layer grows on GaAs (110) substrate. TEM (Transmission Electron Microscope) and photoluminescence measurements at room temperature and low temperature show that the quantum wells have very bad optical property under bilayer-by-bilayer growth mode and have nice optical property and rough interfaces under monolayer-by-monolayer growth mode. The results show that using different RHEED oscillations under different growth conditions, it is possible to grow high quality quantum wells on GaAs(110) surface.

**Key words:** photoluminescence; GaAs; quantum well; molecular beam epitaxy

收稿日期:2007-01-25;修订日期:2007-03-18.

基金项目:中国科学院知识创新工程资助项目;国家自然科学基金资助项目(No. 10504030)

## 1 引言

近年来,用分子束外延技术在 GaAs (110)取向衬底上生长 III-V 族半导体材料引起了人们很大的兴趣<sup>[1,2]</sup>。在 GaAs (110)取向衬底上生长的材料有优良的电学和光学性能。研究表明生长在 GaAs (110)取向衬底上的波导结构比生长在其他取向衬底上的非线性二次谐波效应要强得多<sup>[3]</sup>。另外,在自旋电子学领域,近年也发现生长在 GaAs (110)取向衬底上的 AlGaAs/GaAs 量子阱内的电子有非常长的自旋弛豫时间,比 GaAs (100)衬底上的长了 1~2 个数量级<sup>[4-7]</sup>。

在非极性的 GaAs (110)表面上生长高质量的材料比在极性的 GaAs (100)表面上要难得多<sup>[8,9]</sup>,到目前为止国内外有关在 GaAs (110)衬底上生长的这类性能优良的光学材料的研究很少。

本文利用在 GaAs(110)衬底上生长 GaAs 时,不同生长条件下反射高能电子衍射(Reflection High Energy Electron Diffraction, RHEED)强度振荡发生单双周期变化这一特点,找到了一种在 GaAs(110)衬底上生长高质量量子阱材料的简便方法。通过室温和低温光荧光谱,对不同条件下生长的材料的光学特性进行了研究。

## 2 实验工作

本实验所有的样品是用 VG 公司 V80H 型分子束外延设备生长的。衬底为 AXT(American Xtal Technology)公司 GaAs (110)取向半绝缘衬底。固态 As 源裂解区温度为 850℃,样品在 As<sub>2</sub>模式下生长。衬底的脱膜温度为 580℃(经红外测温仪校正),与 GaAs (100)衬底脱膜温度相当。当反射高能电子衍射仪 RHEED 屏幕上呈现清晰的(1×1)再构图案时,表明衬底脱膜干净,接着在屏幕上选取[1, -1, 0]衍射方向的镜面反射线,利用 RHEED 强度振荡的计算机采集系统,通过高品质 CCD 摄像头记录了不同衬底温度和 V/III 束流等效压强比(由衬底加热器处规管测得)下的 RHEED 强度振荡曲线。

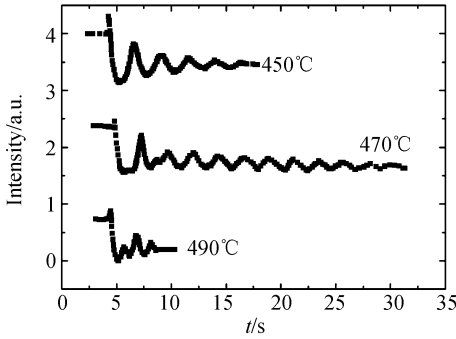
根据上面结果,本文选择 V/III(As<sub>2</sub>/Ga)束

流等效压强比为 50,不同衬底生长温度(450℃, 470℃, 490℃),生长了三个多量子阱样品(阱宽 8 nm, Al<sub>0.4</sub>Ga<sub>0.6</sub>As 垒宽 27 nm)。本文采用离子减薄法制制备透射电镜样品,使用 JEM2011 型透射电子显微镜(TEM),操作电压 200 kV,对样品截面进行了观察。同时还利用 Accent 公司 RPM2000 型快速光荧光谱仪,对样品进行了室温光荧光谱的测量。低温光荧光谱(PL)测量的激光光源为波长 632.8 nm 的 He-Ne 激光器,功率为 4 mW,使用的 SpectraSense 光谱仪分辨率为 0.01 nm,测量温度 19 K。本文利用当前国际通用的时间分辨克尔旋转谱<sup>[10,11]</sup>法测量了室温下上述样品中量子阱内的自旋寿命。由自锁模钛蓝宝石激光器产生的光脉冲(120 fs, 76 MHz)经分束器分裂为泵浦光和探测光。泵浦光(圆偏振)和探测光(线偏振)的光强比为 10 : 1,泵浦光的功率为 5 mW。波长 837 nm(室温下量子阱共振激发波长)的圆偏振泵浦光沿量子阱的生长方向垂直入射到样品表面,接收探测光的反射光记录电子自旋信号。

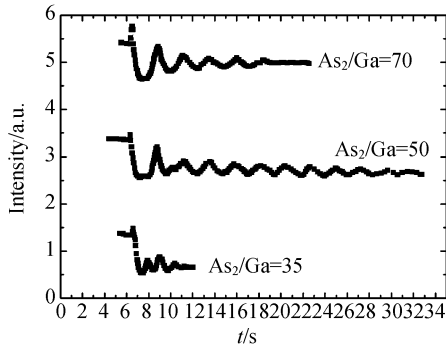
## 3 主要实验结果和分析讨论

图 1 是生长 GaAs 层时,[1, -1, 0]衍射方向镜面发射点的 RHEER 强度振荡曲线。图 1(a)为固定 As<sub>2</sub>/Ga 束流,等效压强比 50,衬底温度 450℃、470℃ 和 490℃ 时的 RHEED 振荡曲线。图中衬底温度为 490℃ 时 RHEED 振荡频率是衬底温度 450℃ 时的 2 倍,衬底温度为 470℃ 时振荡开始的两个周期内出现了衬底温度为 490℃ 时的 2 倍频率成分。Ga 源温度是固定的,GaAs 的生长速度是不变的,出现两个不同的 RHEED 振荡周期,分别对应着双层生长模式和单层生长模式<sup>[12]</sup>。RHEED 振荡周期的个数,衬底温度 470℃ 时最多,衬底温度 490℃ 时,振荡衰减最快,只观测到 3 个周期,主要由于在 As<sub>2</sub>/Ga 束流等效压强比不变时,温度升高,衬底表面 As 脱附增加,提供与 Ga 结合的有效 As 量减少,处于富 Ga 状态,表面变得粗糙<sup>[13]</sup>。图 1(b)为衬底温度 470℃ 时,不同的 As<sub>2</sub>/Ga 束流等效压强比下的 RHEED 振荡曲线。图中 As<sub>2</sub>/Ga 束流等效压强比为 35 时振荡频率是 As<sub>2</sub>/Ga 束流等效压强比为 70 时的 2 倍,As<sub>2</sub>/Ga 束流等效压强比为 50

时,在振荡开始的两个周期内出现了  $As_2/Ga$  束流等效压强比为 70 时的 2 倍频率成分。与图 1(a)相同,不同的  $As_2/Ga$  束流等效压强比下出现了 GaAs 的单层和双层生长模式。 $As_2/Ga$  束流等效压强比为 35 时,振荡衰减很快,主要是由于  $As_2/Ga$  束流等效压强比降低,提供与 Ga 结合的有效 As 量减少,处于富 Ga 状态,表面变得粗糙<sup>[13]</sup>。



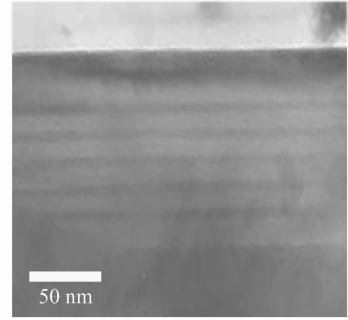
(a)固定  $As_2/Ga$  束流等效压强比为 50,衬底温度为 450℃、470℃ 和 490℃ 下的 RHEED 振荡曲线  
(a) At  $As_2/Ga$  beam equivalent pressure (BEP) ratio of 50 and the substrate temperatures of 450℃, 470℃ and 490℃, respectively



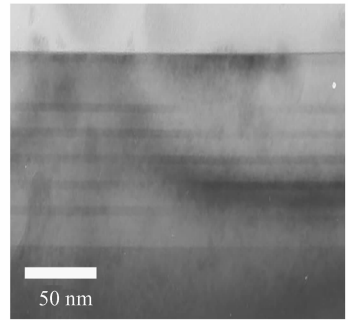
(b)衬底温度 470℃ 时,不同的  $As_2/Ga$  束流等效压强比下的 RHEED 振荡曲线(通过改变 As 束流来改变  $As_2/Ga$  束流等效压强比)  
(b) At a substrate temperature of 470℃ and a varying  $As_2/Ga$  BEP ratio due to As flux changed

图 1 生长 GaAs (110)外延层时,[1, -1, 0]衍射方向镜面发射点的 RHEED 强度振荡曲线  
Fig. 1 RHEED intensity oscillations of the specular beam in [1, -1, 0] azimuth for growth of GaAs (110) thin films

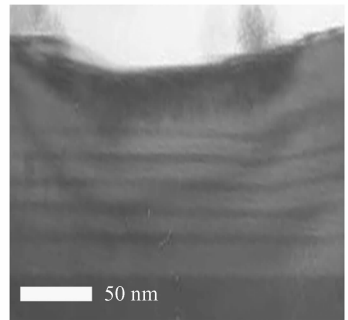
由图 1 可以看出,GaAs 在(110)表面上生长时,单层和双层生长模式发生转化的温度范围( $\sim 20^\circ C$ )和  $As_2/Ga$  束流等效压强比范围( $\sim 15$ )都很窄,在双层生长模式(或单双模式临界情况)下生长表面比较平整。



(a)生长温度 450℃  
(a) At substrate temperature of 450℃



(b)生长温度 470℃  
(b) At substrate temperature of 470℃



(c)生长温度 490℃  
(c) At substrate temperature of 490℃

图 2 固定  $As_2/Ga$  束流等效压强比 50 不变,不同生长温度下 GaAs (110) 衬底上生长的  $Al_{0.4}Ga_{0.6}As/GaAs$  多量子阱样品横截面的透射电子显微镜照片  
Fig. 2 Cross-section TEM micrograph of  $Al_{0.4}Ga_{0.6}As/GaAs$  (110) multiple quantum wells at different substrate temperatures when the  $As_2/Ga$  BEP ratio is 50

图 2 是  $As_2/Ga$  束流等效压强比为 50 时,不同生长温度的 GaAs (110) 衬底上生长的  $Al_{0.4}Ga_{0.6}As/GaAs$  多量子阱样品横截面的透射电子显微镜照片。图 2(a)和(b)是生长温度为 450℃和 470℃时样品横截面的透射电子显微镜的照片,从图中可以看出,量子阱界面比较平整,视场中没有位错。图 2(c)是生长温度为 490℃时样品横截面的透射电子显微镜照片,从图中看出量子阱界面不平整,图中与衬底的界面是平整的,说明量子阱截面不平整是量子阱区生长粗糙引起的。

将图 2 与图 1(a)对照可以看出,GaAs 在 (110)表面上生长时,在双层生长模式(或单双模式临界情况)下生长表面比较平整。近年来,D. M. Holmes 等人对(110)表面上生长 GaAs 外延层进行研究的結果证明了这一结论<sup>[12]</sup>。

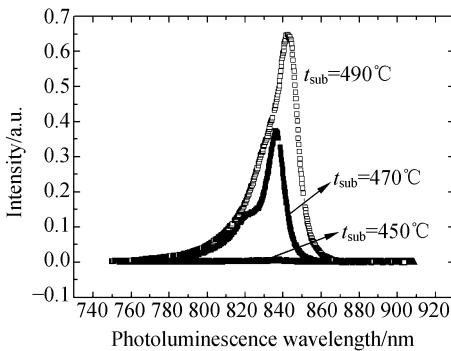


图 3 固定  $As_2/Ga$  束流等效压强比为 50,不同生长温度下生长的  $Al_{0.4}Ga_{0.6}As/GaAs$  (110) 多量子阱的室温光荧光谱(PL)的测试曲线

Fig. 3 Photoluminescence spectra (at room temperature) of  $Al_{0.4}Ga_{0.6}As/GaAs$  (110) multiple quantum wells grown at different substrate temperatures, when the  $As_2/Ga$  BEP ratio is 50

图 3 是不同生长温度下生长的  $Al_{0.4}Ga_{0.6}As/GaAs$  (110)多量子阱的室温光荧光谱(PL)的测试曲线。从图中可以看出,随着衬底温度的提高,多量子阱样品的发光强度随之提高。衬底温度为 450℃,生长的多量子阱样品发光很弱,主要是由于温度降低,衬底表面 As 脱附减少,提供与 Ga 结合的有效 As 量增加,生长材料中的深能级中心和杂质都会随着增加<sup>[14]</sup>,发光就会大大减弱。

衬底温度提高,提供与 Ga 结合的有效 As 量减少,由 As 引入的杂质和深能级中心减少,样品的发光强度增加。从图 3 中还可以看出,衬底温度为 490℃时的发光峰位相对于衬底温度为 470℃时有红移并且发光峰半高宽(FWHM)较宽。由图 2 可知,这归因于衬底温度为 490℃时量子阱样品的界面粗糙,电子弛豫到阱比较宽的地方与空穴复合发光,造成了发光峰位红移。由于界面粗糙,发光峰的半高宽也较宽。当衬底温度为 470℃时,发光主峰(e1-hh1 跃迁)短波长侧有一个明显的肩膀(822 nm),对应于量子阱的 e1-lh1 跃迁,表明该条件下生长的量子阱样品质量很好。

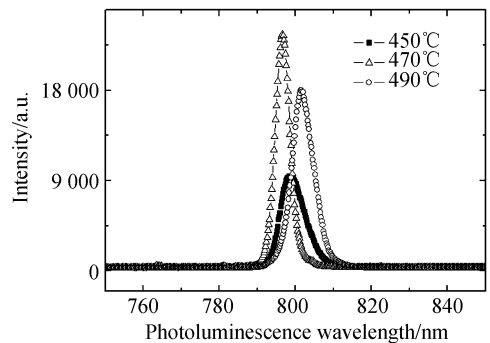


图 4 固定  $As_2/Ga$  束流等效压强比为 50,不同生长温度下生长的  $Al_{0.4}Ga_{0.6}As/GaAs$  (110) 多量子阱的低温(19 K)光荧光谱(PL)

Fig. 4 Photoluminescence spectra (at 19 K) of  $Al_{0.4}Ga_{0.6}As/GaAs$  (110) multiple quantum wells grown at different substrate temperatures, when the  $As_2/Ga$  BEP ratio is 50.

图 4 是不同生长温度下生长的  $Al_{0.4}Ga_{0.6}As/GaAs$  (110)多量子阱的低温(19 K)光荧光谱的测试曲线。与图 3 相似,图 4 中衬底温度为 450℃,生长的多量子阱样品发光较弱,主要是由于温度降低,衬底表面 As 脱附减少,提供与 Ga 结合的有效 As 量增加,生长材料中的深能级中心和杂质都会随着增加,发光减弱。衬底温度提高,提供与 Ga 结合的有效 As 量减少,由 As 引入的杂质和深能级中心减少,样品的发光强度增加。从图 4 中还可以看出,衬底温度为 490℃时的发光峰位相对于衬底温度为 470℃时有明显红移并且发光峰半高宽(FWHM)较宽。与图 3 时相似,

这归因于衬底温度为 490℃ 时量子阱样品的界面粗糙,电子弛豫到阱比较宽的地方与空穴复合发光,造成了发光峰位红移。由于界面粗糙,发光峰的半高宽也较宽。

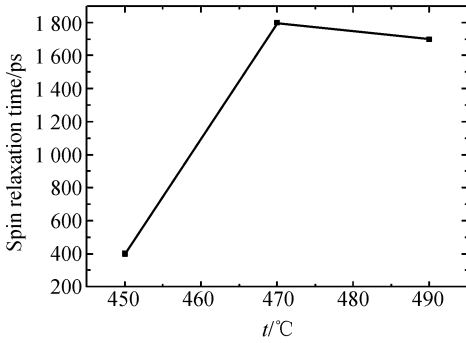


图 5 室温下  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}$  (110) 多量子阱内电子自旋弛豫时间随生长温度的变化曲线

Fig. 5 Electron spin relaxation time (at room temperature) of  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}$  (110) multiple quantum wells grown at different substrate temperatures

图 5 是室温下  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}$  (110) 多量子阱内电子自旋弛豫时间随生长温度的变化曲线。图中生长温度 450℃ 时,量子阱内电子自旋弛豫时间很短。这主要是由于温度比较低,材料

中的深能级中心和杂质比较多,量子阱内光激发到导带上的电子电荷寿命很短,量子阱内电子自旋弛豫时间缩短。从图中还可以看出,随着生长温度的提高,材料的光学性能变好,量子阱内电子自旋弛豫时间增加。生长温度 490℃ 时,量子阱内电子自旋弛豫时间有些下降,这是由于生长温度 490℃ 时界面开始变得粗糙引起的<sup>[15]</sup>。

综上所述可以看出,量子阱样品在双层生长模式下光学性能很差,在单层生长模式下光学性能比较好,但是量子阱界面变得粗糙。

## 4 结 论

在  $\text{GaAs}(110)$  衬底上生长  $\text{GaAs}$  外延层时,单层和双层生长模式发生转化的温度范围(约 20℃)和  $\text{As}_2/\text{Ga}$  束流等效压强比范围(约 15)都很窄,在双层生长模式(或单双模式临界情况)下生长表面比较平整。本文的研究表明,量子阱样品在双层生长模式下光学性能很差,在单层生长模式下光学性能比较好,但是量子阱界面变得粗糙。我们采用 RHEED 振荡的办法可以比较容易地找到生长光学性能和界面比较好的量子阱材料的最佳生长条件。

## 参考文献:

- [1] 程文芹,刘双,周均铭,等. (110)取向的调制掺杂  $\text{GaAs-AlGaAs}$  单异质结的光致荧光光谱[J]. 物理学报,1993,42(9):1529-1531.  
CHENG W Q, LIU SH, ZHOU J M, *et al.*. Photoluminescence of (110) modulation-doped  $\text{GaAs-AlGaAs}$  heterostructures[J]. *Acta. Phys. Sin.*, 1993, 42(9): 1529-1531. (in Chinese)
- [2] 蓝田,徐飞岳. 用低能电子衍射研究  $\text{GaAs}(110)$  表面的弛豫[J]. 物理学报,1989,38(3):357-365.  
LAN T, XU F Y. A study of  $\text{GaAs}(110)$  surface relaxation with low-energy-electron-diffraction[J]. *Acta. Phys. Sin.*, 1989, 38(3): 357-365. (in Chinese)
- [3] VAKHSHOORI D, FISCHER R J, HONG M, *et al.*. Blue-green surface-emitting second-harmonic generators on (111)B  $\text{GaAs}$ [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, 59(8): 896-898.
- [4] OHNO Y, TERAUCHI R, ADACHI T, *et al.*. Spin Relaxation in  $\text{GaAs}(110)$  Quantum Wells[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 83(20):4196-4199.
- [5] KONG L G, LIU X Y, DU G, *et al.*. Monte Carlo simulation of in-plane spin-polarized transport in  $\text{GaAs}/\text{GaAlAs}$  quantum well in the three-subband approximation[J]. *Chin. Phys.*, 2006, 15(3): 654-658.
- [6] ADACHI T, OHNO Y, MATSUKURA F, *et al.*. Spin relaxation in n-modulation doped  $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$  (1 1 0) quantum wells[J]. *Physica E*, 2001,10(1-3):36-39.
- [7] ZUTIC I, FABIAN J, SARMA S D. Spintronics: Fundamentals and applications[J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2004, 76: 323-410.

- [8] ZHOU J M, HUANG Y, LI Y K, *et al.*. Growth and properties of AlGaAs/GaAs heterostructures on GaAs(110) surface[J]. *J. Crystal Growth*, 1987, 81: 221-223.
- [9] TOK E S, NEAVE J H, FAHY M R, *et al.*. Influence of arsenic incorporation on surface morphology and Si doping in GaAs(110) homoepitaxy[J]. *Microelectronics Journal*, 1997, 28(8-10): 833-839.
- [10] KIKKAWA J M, SMORCHKOVA I P, SAMARTH N, *et al.*. Room-temperature spin memory in two-dimensional electron gases[J]. *Science*, 1997, 277: 1284-1287.
- [11] SANADA H, MATSUZAKA S, MORITA K, *et al.*. Gate control of dynamic nuclear polarization in GaAs quantum wells[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 94: 097601.
- [12] HOLMES D M, TOK E S, SUDIJONO J L, *et al.*. Surface evolution in GaAs(110) homoepitaxy; from microscopic to macroscopic morphology[J]. *J. Crystal Growth*, 1998, 192(1-2): 33-46.
- [13] HOLMES D M, BELK J G, SUDIJONO J L, *et al.*. Differences between As<sub>2</sub> and As<sub>4</sub> in the homoepitaxial growth of GaAs(110) by molecular beam epitaxy[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, 67(19): 2848-2850.
- [14] KOHRBRUCK R, MUNNIX S, BIMBER D, *et al.*. Influence of the As:Ga flux ratio on growth rate, interface quality, and impurity incorporation in AlGaAs/GaAs quantum wells grown by molecular beam epitaxy[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, 54(7): 623-625.
- [15] HENINI M, KARMOV O Z, JOHN G H, *et al.*. Gated spin relaxation in (110)-oriented quantum wells[J]. *Physica E*, 2004, 23: 309-314.

作者简介:刘林生(1978—),男,兰州大学物理科学与技术学院博士研究生,研究方向为 III-V 族半导体材料纳米结构生长,自旋电子学及材料的光学分析等。E-mail:linshengliu@gmail.com