

文章编号: 1000-7032(2009)02-0214-05

# 界面生长中断对 GaAs (111) 衬底上 AlGaAs/GaAs 量子阱电子自旋寿命的影响

杨成良<sup>1</sup>, 叶慧琪<sup>2</sup>, 王文新<sup>2\*</sup>, 高汉超<sup>2</sup>,  
胡长城<sup>3</sup>, 刘宝利<sup>2</sup>, 陈 弘<sup>2</sup>

(1. 首都师范大学 物理系, 北京 100048;

2. 中国科学院物理研究所 北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190; 3. 吉林大学 物理学院, 吉林 长春 130031)

**摘要:** 用固源分子束外延技术 (SSMBE) 在 GaAs (111) 衬底上, 采用不同的界面中断时间生长了多组 AlGaAs/GaAs 多量子阱样品 (MQWs), 通过室温发光光谱和时间分辨克尔旋转谱 (TRKR) 研究了界面生长中断对发光光谱半峰全宽 (FWHM) 和量子阱中电子自旋弛豫时间 (自旋寿命) 的影响, 发现了自旋寿命随着界面生长中断时间的增加呈现先减小后增加的趋势, 此变化趋势与荧光光谱半峰全宽表征的材料质量随中断时间的变化一致, 适当的界面生长中断时间能有效的增加 GaAs (111) 衬底上 AlGaAs/GaAs 多量子阱中电子自旋寿命。

**关 键 词:** 时间分辨克尔旋转谱; 多量子阱; 分子束外延; 光致发光

**中图分类号:** O484.1; O484.4<sup>+1</sup> **PACS:** 78.66.-w; 81.15Hi **PACC:** 7865K; 8115 **文献标识码:** A

## 1 引 言

随着电子器件小型化的发展, 电子的量子特性受到人们的关注, 利用电子波动特性, 成功制作了隧穿共振二极管<sup>[1]</sup> 和单电子晶体管器件<sup>[2]</sup>。现如今信息存储和处理技术飞速发展, 电子的另一量子特性——自旋越来越受到关注。Averkiev 等<sup>[3]</sup>、Kiseler 等<sup>[4]</sup> 指出 GaAs (001) 面量子阱电子自旋寿命室温下主要受体反转非对称性 (BIA)<sup>[5]</sup> 和结构反转非对称性 (SIA)<sup>[6]</sup> 相互作用的影响, 而 SIA 又受杂质分布、表面效应、界面相互作用等因素的影响<sup>[7]</sup>。Cartoixa 等人指出 GaAs (111) 面量子阱中电子自旋的研究将为自旋 LED、自旋共振晶体管和自旋存储的实现奠定基础<sup>[8]</sup>, 并有理论预测可以通过合适的样品设计或者栅偏压设置改变结构反转非对称性, 当  $\alpha_{BIA} = \alpha_{SIA}$  时量子阱中电子自旋寿命将有实质性的增加<sup>[9]</sup>。所以 GaAs (111) 衬底上量子阱电子自旋弛豫的研究具有重大意义。但由于 GaAs (111) 面有三个悬键, 比

GaAs (100) 面多一个悬键, 更多的悬键数量, 增加了与表面Ⅲ族原子结合的几率, 降低了吸附原子在 GaAs (111) 表面的迁移速率, 增加了材料中缺陷的密度, 增加了 GaAs (111) 材料的生长难度<sup>[10]</sup>。因此实验上对 GaAs (111) 衬底生长的量子阱中电子自旋弛豫的研究还未见到详细报道。

本文利用固源分子束外延技术 (SSMBE) 在 GaAs (111) 衬底上, 生长多组 AlGaAs/GaAs 多量子阱 (Multiple Quantum Wells, MQWs)。通过室温荧光光谱, 时间分辨克尔旋转谱等手段, 对不同界面中断时间的材料的光学特性和量子阱电子自旋寿命进行了研究。

## 2 实 验

AlGaAs/GaAs 多量子阱样品是在 VG V80H 固态源分子束外延设备上生长完成的。半绝缘 GaAs (111) 衬底用 In 粘在钼块上, 经低温去气后传进生长室, As 炉裂解区温度为 850 °C, 在 As 气氛保护下完成氧化膜脱附, 脱膜温度 580 °C (经

收稿日期: 2008-08-25; 修订日期: 2008-11-24

基金项目: 国家自然科学基金(10874212, 10534030)资助项目

作者简介: 杨成良(1980-), 男, 河南洛阳人, 主要从事量子阱光电材料的分子束外延生长的研究。

\* : 通讯联系人; E-mail: wxwang@iphy.ac.cn, Tel: (010)82649208

红外测温仪校正)。经多次优化生长后,采用 GaAs 的生长速率为 500 nm/h, V/III 束流比为 50, 缓冲层生长温度 580 °C, 在 610 °C 的生长条件下完成量子阱区的生长, 其结构如图 1 所示。

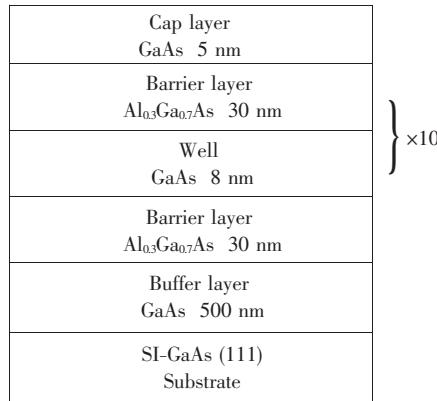


图 1 量子阱的结构

Fig. 1 The schematic diagram of the QW sample structure

为了研究结构的对称性与电子自旋寿命之间的关系, 生长了两组实验样品。采用不同的中断方法和时间, 用来改善量子阱界面的平整度, 第一组样品, 分别为样品 a 只中断量子阱的下界面(反转界面), 中断时间为 30 s; 第二组样品, 样品 A, B, C, D 和 E 的量子阱区采用上下界面(正常界面和反转界面)均中断, 上下界面中断时间相同, 中断时间分别为 0, 10, 20, 30, 40 s。用 Accent 公司 RPM2000 型快速光荧光谱仪, 对样品进行室温光致发光的测量, 激发源激光功率 4.3 mW, 激发波长 532 nm, 光谱仪分辨率 0.01 nm。利用文献 [11] 报道的时间分辨克尔旋转谱测量室温下样品量子阱中电子的自旋寿命, 其实验配置如图 2 所示。

由自锁模钛蓝宝石激光器产生的光脉冲(120 fs, 76 MHz)经分束器分成泵浦(pump)光和探测(probe)光。泵浦光的功率为 4 mW, 其圆偏

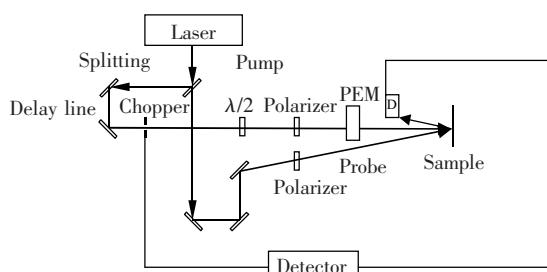


图 2 时间分辨 Kerr 旋转法探测器示意图

Fig. 2 The schematic diagram of time-resolved Kerr rotation detector

振度由光弹性调制器调制, 调制频率为 50 kHz; 线偏振探测光的功率为 0.2 mW, 中心波长为 837 nm(室温下量子阱共振激发波长)。圆偏振泵浦光和线偏振探测光沿量子阱的生长方向, 以近垂直入射的方式入射到样品表面, 探测光经样品反射, 由探测器探测反射光来记录电子自旋随时间变化的信息。

### 3 结果与讨论

图 3 是样品 a 和样品 D 的光致发光光谱, 两个样品具有相同的中断时间而不同的中断方式, 差别在于样品 D 采用的是上下界面中断而样品 a 采用的是下界面中断也就是只有反转界面中断。图 3 表明样品 a 的半峰全宽为 23.1 nm, 样品 D 的半峰全宽为 18.3 nm, 更窄的半峰全宽表明样品具有更低的界面粗糙度和更高晶体质量, 双界面中断样品的发光强度比下界面中断样品的发光强度有明显的增强, 这主要是因为双界面中断降低了界面和 AlGaAs 势垒的非辐射复合中心的浓度<sup>[10]</sup>, 双界面中断的样品的荧光强度和半峰全宽均好于单界面中断的样品, 表明双界面中断的样品与单界面中断相比具有更好的材料质量和更低的界面粗糙度。

为了进一步研究双界面中断不同时间对界面粗糙度的影响, 测量了样品 A ~ E 的室温发光光谱如图 4 所示。图 4 是采用不同中断时间所制备的量子阱样品的归一化荧光光谱, 光谱的半峰全宽见表 1。从图 4 可以看出随着中断时间的增加, 量子阱的室温发光光谱的半峰全宽先变窄后变宽, 中断时间为 30 s 时其荧光半峰全宽最窄为 18.3 nm。中断时间从 0 增加到 30 s, 其荧光半峰

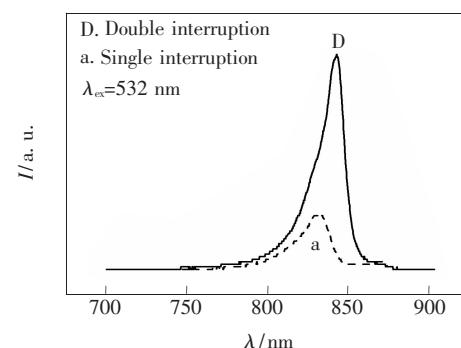


图 3 两种中断生长方式量子阱发光光谱

Fig. 3 The PL spectra of the QW samples with different interruption growth mode

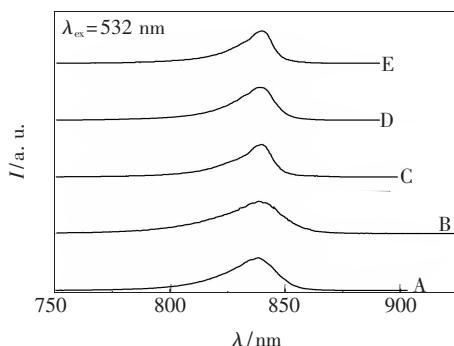


图4 不同中断时间的量子阱室温发光光谱

Fig. 4 The RT PL spectra of the QW samples with different interruption time

全宽变窄主要是因为随着中断时间的增加生长表面的阳离子(Al或Ga)能够有时间在表面迁移,显著地降低界面的粗糙度<sup>[12,13]</sup>,生长过程中引入的非故意掺杂的杂质和缺陷(包括陷阱)较少,当中断时间大于30 s时量子阱荧光发射峰的半峰全宽变宽,虽然生长表面的阳离子(Al或Ga)有足够的空间在表面迁移,但是非故意掺杂的量子阱样品界面积累的杂质或缺陷(包括陷阱)随中断时间的增加而增加<sup>[14]</sup>,这时引入的杂质对发光光谱的半峰全宽变化起主要作用。

图5给出了自旋弛豫时间与界面中断时间的关系,界面中断时间从0增加到30 s时,量子阱中电子自旋弛豫时间随中断时间的增加而增加,当中断时间大于30 s时自旋寿命反而减小,与发光光谱半峰全宽表征的材料质量随中断时间的变化一致。界面中断时间、发光谱半峰全宽和量子阱中电子自旋弛豫时间的实验数据均列在表1中。中断时间在0~30 s的范围内,自旋弛豫时

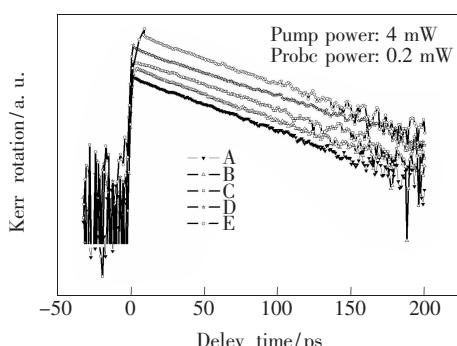


图5 不同中断时间量子阱时间分辨克尔旋转谱

Fig. 5 The Kerr spectra of the samples at different interruption time

间随界面中断时间的增加而增加,可能是因为中断时间增加降低了量子阱界面的粗糙度,降低了量子阱的结构反转非对称性(SIA),使量子阱内电子自旋寿命增加,也可能是随中断时间的增加量子阱粗糙度和非辐射复合中心浓度的降低,减少了自旋电子在量子阱中的散射,使量子阱中电子自旋寿命增加。这还需要在实验和理论上进一步的研究。对于样品E,生长中断时间增加,量子阱中电子自旋寿命反而降低。说明随着反转界面生长中断时间的延长,其它影响阱内电子自旋寿命的因素变得重要。对这些非故意掺杂的Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As/GaAs多量子阱样品而言,认为电子自旋寿命随界面生长中断时间增加而降低的原因是界面积累的杂质或缺陷(包括陷阱)随中断时间的增加而增加。Köhrbruck等<sup>[15]</sup>观察到界面浅杂质和陷阱的浓度随生长中断时间的增加显著地增加,使在[111]晶向上生长的GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As量子阱样品中,电子-空穴相互作用变得重要<sup>[16]</sup>。从上面可以看出,长的界面生长中断时间会引起强的电子-空穴相互作用,加快电子自旋的弛豫,于是电子自旋寿命就缩短了。另外,随着界面中断时间的增加,非辐射复合中心浓度增加,量子阱内电荷寿命会降低。电荷寿命的降低也会使得量子阱内电子自旋寿命降低。界面、杂质和缺陷对量子阱中电子自旋寿命的影响,还需要进一步的研究。

#### 表1 不同中断时间样品的自旋寿命和发光光谱半峰全宽的情况

Table 1 The relationship of interruption time, electron spin relaxation time and full width at half maximum of fluorescent emission spectrum

样品编号	A	B	C	D	E
中断时间(s)	0	10	20	30	40
自旋弛豫时间(ps)	44.0	44.9	47.6	58.9	47.2
荧光半峰全宽(nm)	24.5	22.3	18.7	18.3	21.9

## 4 结 论

用MBE技术在GaAs(111)衬底上生长Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As/GaAs多量子阱。用室温光致发光研究了量子阱界面不同生长中断时间对QW界面质量的影响。合适的界面生长中断时间可以明显地增加量子阱中电子自旋寿命,主要是因为改善

了界面晶体质量降低了结构中心反演非对称对自旋寿命的影响。当界面生长中断时间大于 30 s,

量子阱中电子自旋寿命反而减小, 是因为浅杂质和陷阱的浓度随中断时间的增加而显著增加。

## 参 考 文 献:

- [1] Esaki L, Tsu R. Superlattice and negative differential conductivity in semiconductors [J]. *IBM J. Res. Dev.*, 1970, **14**(1):61-65.
- [2] Likharev K K. Single-electron devices and their applications [J]. *IEEE*, 1999, **87**(4):606-632.
- [3] Averkiev N S, Golub L E. Giant spin relaxation anisotropy in zinc-blende heterostructures [J]. *Phys. Rev. B*, 1999, **60**(23):15582-15584.
- [4] Kisele V A A, Kim K W. Suppression of D'yakonov-Perel' spin relaxation in 2D channels of finite width [J]. *Phys. Status Solidi B*, 2000, **221**(1):491-494.
- [5] Dresselhaus G. Spin-orbit coupling effects in zinc blende structures [J]. *Phys. Rev.*, 1955, **100**(1):580-586.
- [6] Bychkov Y A, Rashba E I. Oscillatory effects and the magnetic-susceptibility of carriers in inversion-layers [J]. *J. Phys. C*, 1984, **17**(33):6039-6045.
- [7] Henini M, Karimov O Z, John G H, et al. Gated spin relaxation in (110)-oriented quantum wells [J]. *Phys. E*, 2004, **23**(3-4):309-314.
- [8] Cartoixà X, Ting D Z Y, Chang Y C. Suppression of the D'yakonov-Perel' spin-relaxation mechanism for all spin components in [111] zinc blende quantum wells [J]. *Phys. Rev. B*, 2005, **71**(4):045313-1-5.
- [9] Weber C P, Orenstein J, Andrei Bernevig B, et al. Nondiffusive spin dynamics in a two-dimensional electron gas [J]. *Phys. Rev Lett.*, 2007, **98**(7):076604-1-4.
- [10] Albert Chin, Lee K. High quality Al(Ga)As/GaAs/Al(Ga)As quantum wells grown on (111)A GaAs substrates [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**(24):3437-3439.
- [11] Liu B, Zhao H, Wang J, et al. Electron density dependence of in-plane spin relaxation anisotropy in GaAs/AlGaAs two-dimensional electron gas [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(11):112111-1-3.
- [12] Morkoc H, Drummond T J, Fischer R, et al. Moderate mobility enhancement in single period  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  heterojunctions with GaAs on top [J]. *J. Appl. Phys.*, 1982, **53**(4):3321-3323.
- [13] Shang X Z, Wang W C, Wu S D, et al. Effects of indium doping on the properties of AlAs/GaAs quantum wells and inverted AlGaAs/GaAs two-dimensional electron gas [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2004, **19**(3):519-522.
- [14] Leosson K, Jensen J R, Langbein W, et al. Exciton localization and interface roughness in growth-interrupted GaAs/AlAs quantum wells [J]. *Phys. Rev. B*, 2000, **61**(15):10322-10329.
- [15] Kohrbruck R, Muninx S, Bimberg D, et al. Inequivalence of normal and inverted interfaces of molecular beam epitaxy grown AlGaAs/GaAs quantum wells [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1990, **8**(4):798-804.
- [16] Ohno Y, Terauchi R, Adachi T, et al. Electron spin relaxation beyond D'yakonov-Perel' interaction in GaAs/AlGaAs quantum wells [J]. *Phys. E*, 2000, **6**(1-4):817-820.

## Effect of Interface Growth Interruption on Spin Relaxation in GaAs(111)-AlGaAs/GaAs Quantum Wells

YANG Cheng-liang<sup>1</sup>, YE Hui-qi<sup>2</sup>, WANG Wen-xin<sup>2</sup>, GAO Han-chao<sup>2</sup>,  
HU Chang-cheng<sup>2,3</sup>, LIU Bao-li<sup>2</sup>, CHEN Hong<sup>2</sup>

(1. Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

2. Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. School of Physics, Jilin University, Changchun 130031, China)

**Abstract:** The influence of interface growth interruption on electron spin relaxation time in AlGaAs/GaAs

(111) multiple quantum wells (MQWs) grown by solid source molecular-beam epitaxy (SSMBE), has been investigated by room temperature photoluminescence (PL) and time-resolved Kerr rotation spectroscopy (TRKR). The interface roughness of quantum wells with different growth interruption time is studied by PL, and the results show that the full width at half maximum (FWHM) of PL spectra decrease with the growth interruption time to a minimum value then turn to increase with that. TRKR measurements at room temperature show that the appropriate growth interruption time can increase electron spin relaxation time in AlGaAs/GaAs QWs. Electron spin relaxation time and FWHM of PL spectra have the same variation tendency with growth interruption time. The electron spin relaxation time can be effectively increased at a proper interface growth interruption time.

**Key words:** time-resolved Kerr rotation spectrum; multiple quantum wells; molecular beam epitaxy; photoluminescence

**CLC number:** O484.1; O484.4<sup>+1</sup>    **PACS:** 78.66.-w; 81.15Hi    **PACC:** 7865K; 8115    **Document Code:** A

---

Received date: 2008-08-25

## 《中国光学与应用光学》征稿启示

经国家新闻出版总署批准,《中国光学与应用光学》于2008年10月创刊,该刊为国家级正式出版物,双月刊,A4开本,国内外公开发行,刊号:ISSN 1674-2915/CN22-1389/04。

《中国光学与应用光学》报道如下内容:基础光学、发光理论与发光技术、光谱学与光谱技术、激光与激光技术、集成光学与器件、纤维光学与器件、光通信、薄膜光学与技术、光电子技术与器件、信息光学、新型光学材料、光学工艺、现代光学仪器与光学测试、光学在其他领域的应用等。

《中国光学与应用光学》诚征学术价值显著、实验数据完整的原创性论文;研究前景广阔,具有实用、推广价值的技术报告;有创新意识,能够反映当前先进水平的阶段性研究简报;对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告;以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。根据期刊定位,编辑部将优先发表内容新颖、可读性强的综述性论文和用英文发表的学术性论文。

《中国光学与应用光学》热忱欢迎广大读者、作者关心和支持本刊的发展,并积极订阅、踊跃赐稿,来稿请发送到 gxyygx2007@126.com。

编辑部地址:吉林省长春市东南湖大路3888号    邮编:130033

电邮:gxyygx2007@126.com

电话:0431-86176852  0431-84627061

传真:0431-84695881

《中国光学与应用光学》编辑部