

GaAs/AlGaAs 量子点阵的制备及其荧光特性

王杏华 李国华 李承芳 李月霞
程文超 宋爱民 刘 剑 王志明

(半导体超晶格国家重点实验室, 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要 采用电子束曝光和反应离子刻蚀的工艺, 将 GaAs/AlGaAs 量子阱外延材料制成量子点阵, 其光荧光谱显示出蓝移, 并且蓝移量随着量子点直径尺寸的减少而增大.

关键词 GaAs/AlGaAs, 量子点, 光荧光

1 引 言

近年来, 人们对半导体超晶格及其低维结构的研究正在不断地深入. 随着维度的降低, 制备技术变得越来越困难, 而低维结构的电学、光学性质变得更加奇特, 使人们能够人为地剪裁能带结构, 实现人工改性, 引发出—门新兴的能带工程.

对量子阱广泛深入的研究, 已制成了许多实用化的量子器件. 如 GaAs 量子阱 HEMT 器件^[1], AlGaAs、InGaAlP 量子阱激光器^[2]和 InGaAs 量子阱探测器^[3]等. 量子阱的引入大大提高了器件的速度, 提高了激光器的输出功率, 降低了阈值电流密度, 提高了量子阱探测器的灵敏度, 进一步降低了噪声.

随着研究的深入, 人们进一步转向了量子线和量子点结构, 并已获得了许多有益的结果. 然而, 在量子线和量子点的制备上, 难度要大得多. 因而也限制了其研究的发展, 在制备量子线、量子点的工艺技术上, 各国科学工作者正在进行许多有益的探索.

制备量子点的方法有许多种, 例如: (1) 直接外延生长^[4,5]; (2) 将外延生长与微细加工技术结合起来制备量子点^[6,7]; 以及(3) 再结晶法^[8].

我们采用分子束外延的方法, 在 GaAs 衬底上首先生长出 AlGaAs/GaAs/AlGaAs 量子阱结构, 之后采用电子束曝光和反应离子刻蚀的方法, 制造出了具有不同直径的量子点, 并在低温下测试其光荧光特性. 结果表明, 我们成功地制备出了 GaAs 量子点阵, 其荧光峰值出现了蓝移. 随着量子点尺度的减少蓝移增大, 从而有力地证明了量子点阵的限制效应.

2 量子点阵的制备

在研究中, 量子点阵是在量子阱结构的基础上通过电子束曝光、反应离子刻蚀等工艺制备而成的. 图1示出了制备工艺流程: 量子阱结构的外延生长—电子束曝光—显影—淀积 NiCr—剥离—反应离子刻蚀.

AlGaAs/GaAs/AlGaAs 量子阱结构是采用 MBE 生长而成的. 1# 样品的结构为: 衬底为掺 Si 的 n 型 (100) GaAs, 杂质浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 其上依次外延生长: 1) 300nm 厚的掺 Si-GaAs 缓冲层, Si 的浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; 2) 86.5nm 厚的 AlGaAs 势垒层, Al 的

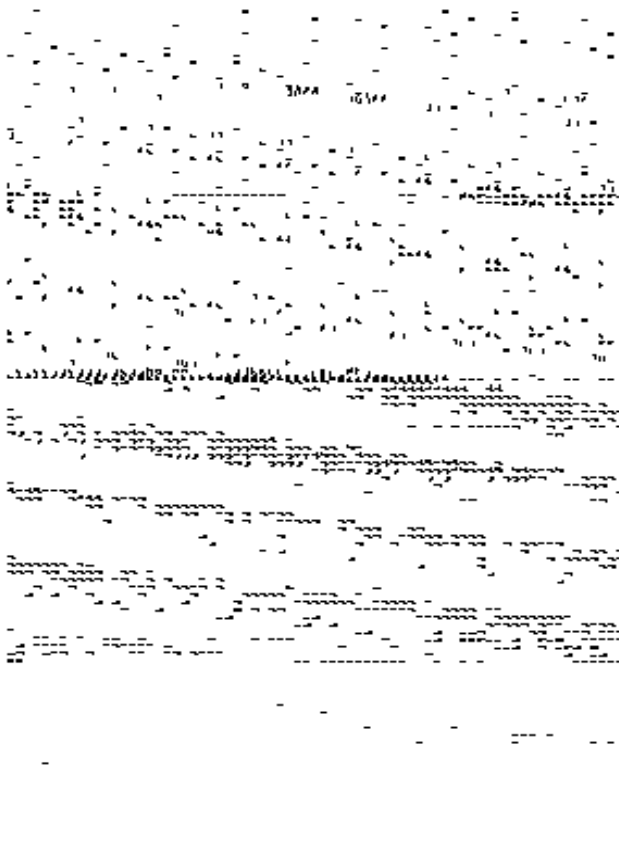


图1 制备 GaAs 量子点阵的工艺过程

Fig. 1 Fabrication processes of GaAs quantum dot array.

在电子回旋共振系统(ECR)中, SiCl_4 的气源下, 进行反应离子刻蚀, 制成了圆柱形的量子点结构. 像馅饼一样, 圆柱形中间夹着两个 GaAs 量子点, 纵向厚度分别为 19.5nm 和 4.2nm. 在我们的实验中, 量子点的直径分别定为 130nm、75nm 和 46nm 等几种. 图2示出了 GaAs 量子点阵的扫描电子显微镜照片, 照片的放大倍数为 150K, 拍摄角度为 40° . 可以看出, 我们成功地制备出量子点阵柱形结构. 各量子点阵的尺寸基本均匀一致, 形状几乎彼此相同.

3 荧光特性的测量结果及讨论

采用氩离子激光器作激发光源, 在 10K 低温下测试了上述量子点阵的光荧光特性. 激发波长为 488nm, 样品上的激发功率约为 2mW, 光斑直径 5 μm. 荧光由配备有显微光路的 HRD-1 双光栅单色仪分光后, 用光电倍增管(RCAC31034, GaAs 阴极型)接收, 光子计数器(型号为 PAR1140)计数, 图3示出了量子点阵的典型光谱. 主要结果如下:

刻蚀前的量子阱外延材料中, 测得很强的荧光光谱, 峰值为 1.5492eV, 半高宽度(FWHM)为 3meV. 而量子点阵的样品中较强的荧光光谱, 其峰值出现在 1.5492eV 以上的高能端, 有明显的蓝移(如图3所示). 进一步测试表明, 量子点尺寸越小, 蓝移量越

组分 x 值为 0.3; 3) 4.2nm 厚的 GaAs 量子阱; 4) 86.5nm 厚的 AlGaAs 势垒层, $x = 0.3$; 5) 第二个 GaAs 量子阱, 厚为 19.5nm; 6) 第二个 AlGaAs 势垒层, 厚 86.5nm, $x = 0.3$; 7) 掺 Be 的 GaAs 顶盖层, Be 的杂质浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 厚度为 70nm, 第2至第6层均无有意掺杂.

GaAs/AlGaAs 量子阱外延片曾经过光荧光测试的检验, 其荧光峰出现在 1.5492eV 处, 只有荧光检验合格的外延材料才进行后面的制作工艺, 以便确保结构的完整. 在外延片上表面均匀用上光刻胶, 采用电子束曝光, 显影后形成具有不同直径的圆点的图案, 再在其上面淀积一层厚为 30nm 的 NiCr 合金层. 接着用剥离技术去除光刻胶及其上面的 NiCr 合金, 留下的便只是 NiCr 合金的圆点. 以其为抗蚀剂, 在



图2 量子点阵的SEM照片

Fig.2 Scanning electron microscopy (SEM) of quantum dot array.

大. 对于 130、75和 46nm 的量子点阵来说, 蓝移量分别是2, 2.7和4.3meV. 表1列出了1# 样品的这些实验数据. 这一结果证实了, 量子点由于在三个方向上都具有势垒限制, 其辐射复合的能量不但依赖于材料本身, 还依赖于量子点的尺寸大小, 随着量子点直径的减少, 限制作用变大, 复合发出的光子能量更大, 因而蓝移更为明显.

表1 1# 样品中量子阱和量子点阵的荧光性质

Table 1 PL characteristics of 1# quantum well and quantum dot arrays.

样 品	QW	QD-130nm	QD-75nm	QD-46nm
荧光峰的波长/nm	800.4	799.4	799.0	798.2
荧光峰的峰值能量/eV	1.5492	1.5512	1.5519	1.5535
峰值相对 QW 的蓝移量/meV		2	2.7	4.3
荧光峰的半高宽度 FWHM/meV	3	50~60		

与量子阱样品的光荧光相比, 量子点阵的光荧光显然朝高能方向移动了, 但其光强和光谱峰的宽度均不同于量子阱样品. 仔细分析量子点阵的光荧光谱, 我们看到在低能端有一个较弱的发光峰, 它和 GaAs 体材料的发光峰一致, 显然它是 GaAs 缓冲层的发光. 此外, 荧光谱的低能端不如高能端那样陡, 而是延展得很宽. 究其原因有两方面: 一是在电子束曝光及反应离子刻蚀等工艺过程中, 引进了一些表面缺陷、界面态等等, 它们大部分是非辐射复合中心, 降低了发光效率, 它们的存在使得谱线在低能端展宽; 其次是量子点的尺寸不很均匀, 致使几个量子点阵的荧光峰变宽, 量子阱的半高宽度为 3meV, 而量子点阵的光荧光峰的半高宽度大于 50meV.

量子点阵的荧光强度明显比量子阱的弱, 可以解释如下: 由于量子点的密度有限, 在氦离子激光器的激发下, 只有激发光斑中一部分打到量子点上, 使量子点发光. 发光面积的减少自然会引起发光光强的减弱. 另外, 如上所述, 在工艺过程中, 引进的一些

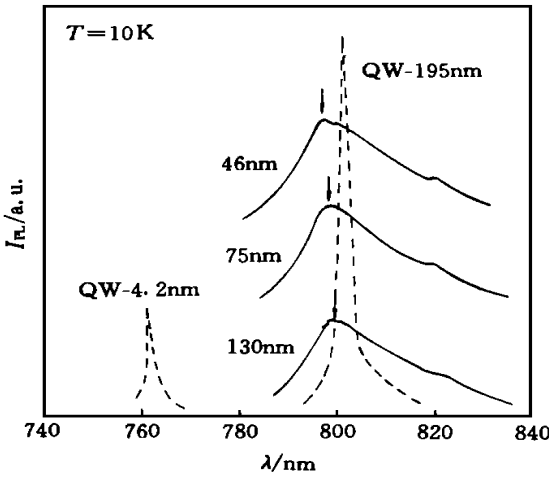


图3 量子点阵的荧光谱. 箭头表示荧光峰的波长
 —— 为量子点阵的荧光谱
 —— 为量子阱的荧光谱

Fig. 3 Photoluminescence (PL) spectra of GaAs/AlGaAs quantum dot array. Arrows show the peak wavelengths for PL spectra.

表面缺陷、界面态等等, 作为非辐射中心, 会降低发光效率, 使发光强度变弱.

我们还有4.2nm 量子阱制备的量子点阵, 其光荧光太弱, 探测不到荧光来.

下面我们就实验误差对实验结果的影响作些讨论:

实验中, 单色仪的狭缝宽度为200 m, 它所引入的荧光波长的分辨率小于0.2nm, 不同量子点阵的荧光峰值与量子阱比较, 其蓝移量为1 ~ 2.2nm (见表1), 大大超出了仪器的分辨率, 说明我们得出蓝移的结论是肯定的. 另外, 量子点阵中, 由于表面态、界面缺陷的存在会使荧光峰变得很宽, 半高宽度大于50meV; 不同量子点阵之间的峰值的移动, 有时偏小, 例如, QD-130nm 和 QD-75nm 的两种量子点阵之间的移动为0.4nm, 但至少能够说明蓝移的趋势是存在的.

我们对另一样品(2[#])进行了研究; 它是一个双量子阱结构, 阱宽都为6nm. 两阱间的势垒层为20nm. 在刻蚀两种尺寸的量子点阵 QD-100nm 和 QD-50nm 的过程中, 工艺上采取了一些改进措施, 有意降低了量子点阵样品中的表面态、缺陷等, 这样量子点阵样品的荧光峰宽度明显降低了, 原量子阱样品的荧光峰半高宽度为5nm, 量子点阵样品 QD-100nm 和 QD-50nm 的荧光峰半高宽度分别为11和7meV(如表2所示). 实验观测到: 这两个量子点阵样品的荧光峰值相对于2[#]样品的量子阱蓝移了2.5meV 和5.5meV. 再次表明了蓝移量随着量子点直径尺寸的减少而增大.

表2 2[#] 样品中量子阱和量子点阵的荧光性质

Table 2 PL characteristics of 2[#] quantum well and quantum dot arrays.

样品	QW	QD-100nm	QD-50nm
荧光峰的峰值能量/eV	1.605	1.6075	1.6105
峰值相对 QW 的蓝移量/meV		2.5	5.5
荧光峰的半高宽度 FWHM /meV	5	11	7

4 结 论

采用 MBE 外延生长 GaAs/AlGaAs 量子阱技术同电子束曝光、反应离子刻蚀等微细加工相结合, 成功地制备出直径46 ~ 130nm 的量子点阵. 低温光荧光测试表明, 量子点阵发出的荧光光谱出现了明显的蓝移, 并且蓝移量随着量子点直径的减少而增大. 这

说明量子点阵存在着三维量子限制作用,使其能级提高了,态密度也更为集中了。

在这类量子点阵中,量子点周边存在大量工艺过程中引入的各种缺陷、界面、表面态,它们会有非辐射复合,影响荧光发射使量子点阵的发光强度不如量子阱样品那样强,谱线也被展宽得多,但我们相信,通过增大量子点的密度、均匀性;并结合一些其它工艺,如降低反应离子刻蚀的能量、或反应离子刻蚀后再用化学腐蚀方法去除前者引进的缺陷,以及其它保护性的工艺,必将使得这些量子点阵的发光强度和宽度等获得改善,2[#]样品的量子点阵比1[#]样品的荧光峰半高宽度变窄就是一个例证。

另外,目前对量子点的研究还只限于光学性质方面,而我们制备的圆柱形的量子点上面已淀积了一层合金,加上其它的工艺,可制备出适合电学性质测试的样品。因此,这种外延生长和光刻技术相结合的方法,具有很大的研究和应用的潜力。

参 考 文 献

- [1] Chao P C, Shur M S, Tiberrio R C *et al*, IEEE Electron Devices, 1989, ED-36: 461.
 [2] Tsang W T, Weisbch C, Miller R C *et al*, Appl. Phys. Lett., 1979, 35:673.
 [3] Prank U, Mikulla M. Appl. Phys. Lett., 1993, 62: 129.
 [4] Tanaka S, Iwai S, Aoyagi Y. Appl. Phys. Lett., 1996, 69: 4096.
 [5] Sunamuna H, Usami N, Shiraki Y. Appl. Phys. Lett., 1995, 66: 3024.
 [6] Wirthl E, Straub H, Schmid M *et al*, Proc. of the Internat. Sympos. on Blue Lasers and LED's, Chiba, Japan, 1996, 244.
 [7] Illing M, Bacher G, Kummell T *et al*, Appl. Phys. Lett., 1995, 67: 124.
 [8] 成步文,余金中,于卓等.发光学报,1997,18: 217.

PREPARATION OF GaAs/AlGaAs QUANTUM DOTS AND THEIR PHOTOLUMINESCENCE CHARACTERISTICS

Wang Xinghua Li Guohua Li Chengfang Li Yuexia

Cheng Wenchao Song Aiming Liu Jian Wang Zhiming

(National Laboratory for Superlattices and Microstructures Institute of Semiconductors,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

Abstract

GaAs/AlGaAs quantum dots were made by Electron Beam Lithography (EBL) and Reactive Ion Etching (RIE) on GaAs/AlGaAs quantum well wafers. Their photoluminescence shows blue-shift, the amount of blue-shift increases with the decrease of quantum dot size.

Key words GaAs/AlGaAs, quantum dot, luminescence