

# 掺杂 GaAs/AlGaAs 超晶格的激发态 向受主中心跃迁的发光

李 华<sup>1)</sup> 程兴奎<sup>1)</sup> 周均铭<sup>2)</sup> 黄 绮<sup>2)</sup>

(<sup>1)</sup> 山东大学物理与微电子学院, 山东济南, 250100)

(<sup>2)</sup> 中国科学院物理研究所, 北京, 100080)

**摘 要** 在室温下测量了 GaAs/Al<sub>0.28</sub>Ga<sub>0.72</sub>As 超晶格的光致发光, 发现在波长  $\lambda = 764\text{nm}$  处存在一较强的发光峰。理论分析表明, 此峰是量子阱阱口附近能级上的电子与受主杂质上的空穴复合发光。实验还观测到在  $\lambda = 824\text{nm}$  和  $829\text{nm}$  处分别存在一发光峰。分析表明,  $\lambda = 829\text{nm}$  和  $\lambda = 824\text{nm}$  处的发光峰分别为激子发光和量子阱中基态电子与基态重空穴的复合发光; 理论计算值与实验结果符合得很好。

**关键词** GaAs/AlGaAs 超晶格 光致发光

## Photoluminescence Due to Electron Transition from Excited State to Acceptor of Doped GaAs/AlGaAs Superlattice

LI Hua<sup>1)</sup> CHENG Xingkui<sup>1)</sup> ZHOU Junming<sup>2)</sup> HUANG Qi<sup>2)</sup>

(<sup>1)</sup> School of Physics and Microelectronics of Shandong University, Shandong Jinan, 250100)

(<sup>2)</sup> Institute of physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080)

**Abstract:** Photoluminescence of a GaAs/Al<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.72</sub>As superlattice was measured at T=300K. A stronger peak at  $\lambda = 764\text{nm}$  on the photoluminescence spectrum was observed. Theoretical analysis has indicated that the peak can be attributed to the recombination of electrons on the first excited state at the mouth of the quantum well and holes on acceptor impurity. Such peaks were also observed at  $\lambda = 824\text{nm}$  and  $\lambda = 829\text{nm}$  respectively. Their appearance are related to ground states and excitons respectively. The experimental results are consistent with the calculated positions of photoluminescence peaks.

**Key words:** GaAs/AlGaAs, superlattice, photoluminescence

### 1 引言

光致发光是研究半导体超晶格、量子阱导带与价带子带间跃迁及激子效应的最常用

的方法。关于 GaAs/AlGaAs 超晶格在低温下的光致发光已有很多报道。通常, 在对超晶格材料进行光致发光测量时, 入射光束与超晶格材料的阱 / 垒层界面是垂直的。与此不同, 我们

**收稿日期:** 2005-03-17

**作者简介:** 李华 (1980 —), 女, 山东大学物理与微电子学院硕士研究生, 目前从事半导体超晶格量子阱方面的研究。

采用入射光束平行于超晶格的阱/垒层界面,并且在室温下对用 MBE 生长的掺杂 GaAs/AlGaAs 超晶格进行了光致发光测量。实验除观测到通常出现的激子发光外,还观察到了激发态上的电子向受主中心跃迁的发光。本文报导有关结果。

## 2 样品制备与测量结果

在半绝缘的 GaAs 衬底 (100) 面上,用 MBE 方法首先生长掺 Si 的 GaAs 底层, Si 的掺杂浓度为  $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ , 层厚为  $1 \mu\text{m}$ , 然后生长 GaAs/Al<sub>0.28</sub>Ga<sub>0.72</sub>As 超晶格结构, GaAs 阱层厚  $4.8 \text{nm}$ , Si 的掺杂浓度为  $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ , Al<sub>0.28</sub>Ga<sub>0.72</sub>As 势垒层厚  $10 \text{nm}$ , 共 50 个周期, 最后生长掺 Si 的 GaAs 顶层, Si 的掺杂浓度为  $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ , 层厚  $0.5 \mu\text{m}$ 。

将生成的材料的一边刻蚀成倾角为  $17^\circ$  的斜面<sup>[1]</sup>, 如图 1 所示。然后对样品进行光致发

光测量。测量时,入射光束平行于材料的生长面,与斜面法线方向成  $73^\circ$  (布鲁斯特角) 角入射,即入射光束以布鲁斯特角入射。

图 2 为在温度  $T=300\text{K}$  时测得的光致发光谱。可以看出,在  $\lambda=824 \text{nm}$  处存在一强发光峰,在波长  $\lambda=764 \text{nm}$  处存在一较强发光峰,而在  $\lambda=828.8 \text{nm}$  处则存在一弱发光峰。

## 3 理论分析

量子阱中的基态电子能级可由下式来计算<sup>[2]</sup>:

$$E_{cn} = \frac{\left(\frac{\pi}{2} \frac{a_c}{1_w + \Delta 1_w}\right)^2}{1 + \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 b_c \left(\frac{\Delta 1_w}{1_w + \Delta 1_w}\right)^3} \quad (1)$$

式中,  $a_c = \frac{2\hbar}{\sqrt{2m_{cw}^*}}$ ,  $b_c = \frac{m_{cw}^*}{m_{cb}^*}$ ,  $\Delta 1_w = \frac{a_c}{\sqrt{b_c \Delta E_c}}$ ,  $m_{cw}^*$  和  $m_{cb}^*$  分别为阱中和垒中电子的有效质量。对于 GaAs/AlGaAs 结构,  $m_{cw}^* =$

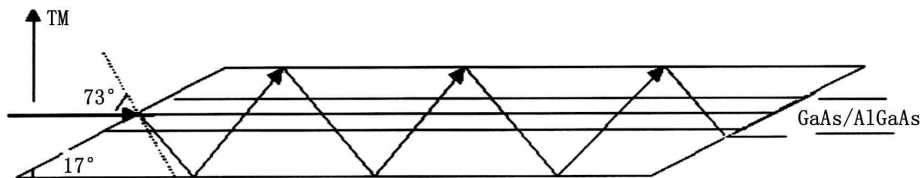


图 1 GaAs/Al<sub>0.28</sub>Ga<sub>0.72</sub>As 超晶格光致发光谱的测量光路

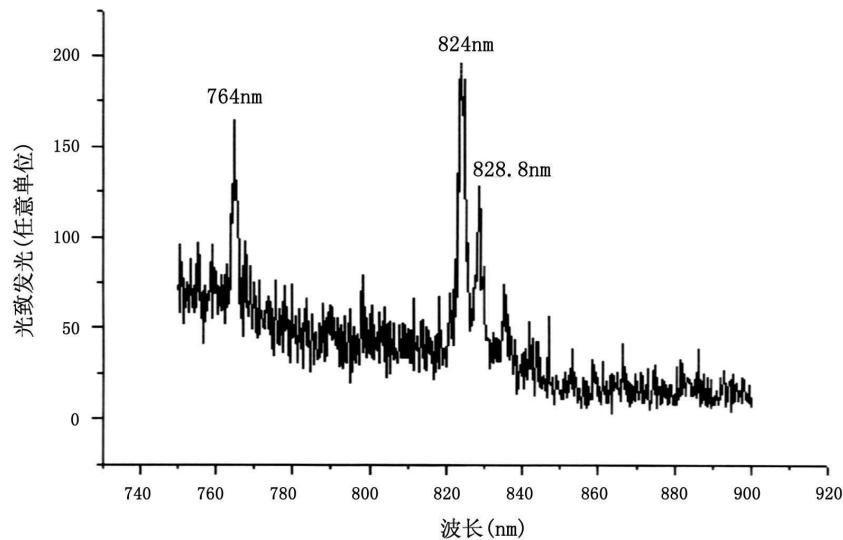


图 2 在  $T=300\text{K}$  时测量出的 GaAs/Al<sub>0.28</sub>Ga<sub>0.72</sub>As 超晶格的光致发光谱

$0.067m_0$  ,  $m_{cb}^* = (0.067 + 0.083x)m_0$  [3] ,  $\Delta E_c = 0.65 \Delta E_g$  [4] ,  $\Delta E_g = 1.247x$  。若  $x = 0.28$  ,  $l_w = 4.8\text{nm}$  ,则将有关量值代入计算得到:  $\Delta E_g = 0.349\text{eV}$  ,  $\Delta E_c = 0.227\text{eV}$  ,  $E_{C0} = 68.0\text{meV}$  。

同理,价带量子阱中的重空穴基态能级也可由下式计算 [2]

$$E_{v0} = \frac{\left(\frac{\pi a_v}{2 l_w + \Delta l_w}\right)^2}{1 + \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 b_v \left(\frac{\Delta l_w}{l_w + \Delta l_w}\right)^3} \quad (2)$$

式中,  $a_v = \frac{2\hbar}{\sqrt{2m_{vw}^*}}$  ,  $b_v = \frac{m_{vw}^*}{m_{vb}^*}$  ,  $\Delta l_w = \frac{a_v}{\sqrt{b_v \Delta E_{vc}}}$  。 $m_{vw}^* = 0.62m_0$  ,  $m_{vb}^* = (0.62+0.14x)m_0$  [3] ,  $\Delta E_v = 0.35 \Delta E_g$  [4] , 将有关量值代入式 (2) 计算得到  $E_{v0} = 15.1\text{meV}$  。

GaAs 能带隙与温度的关系为 [5]

$$E_g = 1.519 - \frac{\alpha T^2}{\beta + T} \quad (3)$$

式中,  $\alpha = 5.405 \times 10^{-4}\text{eV/k}$  ,  $\beta = 204\text{K}$  。 $T = 300\text{K}$  时, 由 (3) 式可得,  $E_g = 1.4224\text{eV}$  。

掺入 GaAs 阱层中的 Si 杂质, 起其施主作用。当掺杂浓度较高时, 部分 Si 原子取代 As 原子成为受主杂质。在超晶格量子阱结构中, 浅施主态结合能和浅受主态结合能与量子阱的阱深、阱宽、垒宽有关 [6] 。对本实验所用的超晶格材料, 施主结合能约为  $10\text{meV}$  , 所以施主能级的位置约为:  $E_D \approx E_{C0} - 10\text{meV} = 58.0\text{meV}$  , 即施主能级在导带底以上  $58.0\text{meV}$  处。受主结合能约为  $40\text{meV}$  , 受主能级的位置约为  $E_A \approx E_{V0} - 40\text{meV} = 25.1\text{meV}$  , 即受主能级在价带顶以上  $25.1\text{meV}$  处。

在该超晶格结构的理论设计中, 我们使阱口附近存在第一激发态, 即  $E_{C1} \approx \Delta E_c$  。处于第一激发态的电子跃迁到受主杂质与空穴复合发光, 发射的光子能量为  $E_P = E_{C1} + E_g + E_A = 0.227 + 1.4224 - 0.0251 = 1.624(\text{eV})$  , 而实验观测到的波长为  $764\text{nm}$  的发光峰, 对应的能量  $E_P = 1.623\text{eV}$  。

量子阱中基态电子跃迁到基态重空穴发射的光子能量为  $E_P = E_{C0} + E_g + E_{V0} = 0.0680 +$

$1.4224 + 0.0151 = 1.5055(\text{eV})$  , 实验观测到的波长为  $824\text{nm}$  的发光峰, 对应的  $E_P = 1.505\text{eV}$  。

激子的结合能为

$$E_b = |E_1| = R^* = \frac{m^*}{m_0 \epsilon^2} \times 13.6\text{eV} \quad (4)$$

对于 GaAs ,  $m^* = 0.067m_0$  ,  $\epsilon = 12.5$  , 可得  $E_b = 5.83\text{meV}$  。激子复合发光发射的光子能量为  $E_P = E_{C0} + E_g + E_{V0} - E_b = 0.0680 + 1.4224 + 0.0151 - 0.0058 = 1.499\text{eV}$  。实验观测到的波长为  $828.8\text{nm}$  的发光峰, 对应的  $E_P = 1.496\text{eV}$  。

图 3 示出了 3 个发光峰所对应的电子跃迁。

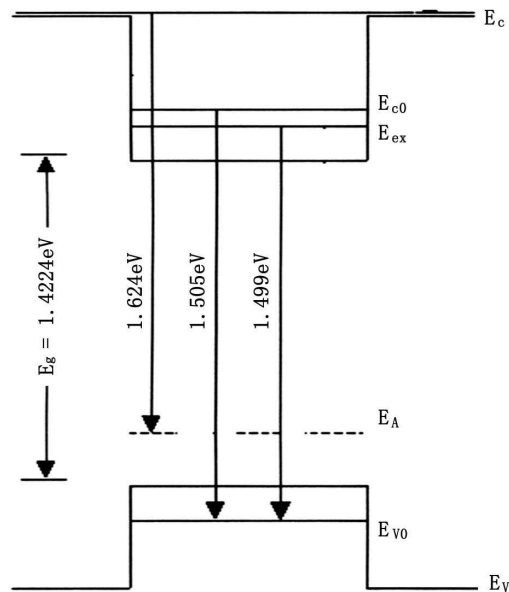


图 3 GaAs/AlGaAs 超晶格结构光致发光的能带示意图

## 4 结论

(1) 对于室温下 GaAs/AlGaAs 超晶格激发态的电子与受主杂质上的空穴复合发光, 理论计算出的此峰的位置在  $E_P = 1.624\text{eV}$  处, 实际测得的波长为  $764\text{nm}$  的发光峰所对应的位置为  $E_P = 1.623\text{eV}$  , 二者相当一致, 表明该发光峰是处于量子阱阱口附近激发态上的电子与受主杂质上的空穴复合引起的。

(2) 理论计算的 GaAs/AlGaAs 超晶格量子阱内的基态电子到重空穴的复合发光峰的位置在  $E_P = 1.5055\text{eV}$ ，激子复合的发光峰位置在  $E_P = 1.498\text{eV}$ ，与实验测出的发光峰位置  $E_P = 1.505\text{eV}$  ( $\lambda = 824\text{nm}$ ) 和  $E_P = 1.496\text{eV}$  ( $\lambda = 828.8\text{nm}$ ) 符合得相当好。

### 参考文献

- [1] Neana Imam. Quantum well infrared photodetector structure synthesis: methodology and experimental verification. IEEE Journal of Quantum Electronics 2003, 39(3): 468.
- [2] Toshihiko Makino. Analytical formulas for the optical Gain of Quantum well. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1996, 32(3): 493.
- [3] Sadal Adachi. GaAs, AlAs and  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ : Material parameters for use in research and device Applications. J Appl Phys, 1985, 58(3): R1-29.
- [4] LeVine BF. Tunable long-wavelength detectors using graded barrier quantum wells grown by electron beam source molecular beam epitaxy. Appl Phys Lett, 1990, 57(4): 383.
- [5] Thurmond C D. The standard thermodynamic functions for the formation of electrons and holes in Ge, Si, GaAs and GaP. J electrochem Soc, 1975, 122: 1133.
- [6] 朱邦芬, 夏建白. 《半导体超晶格物理》, 上海科学技术出版社, 1995年.

## 国外专利介绍

### 红外吸收滤光片及其制备方法

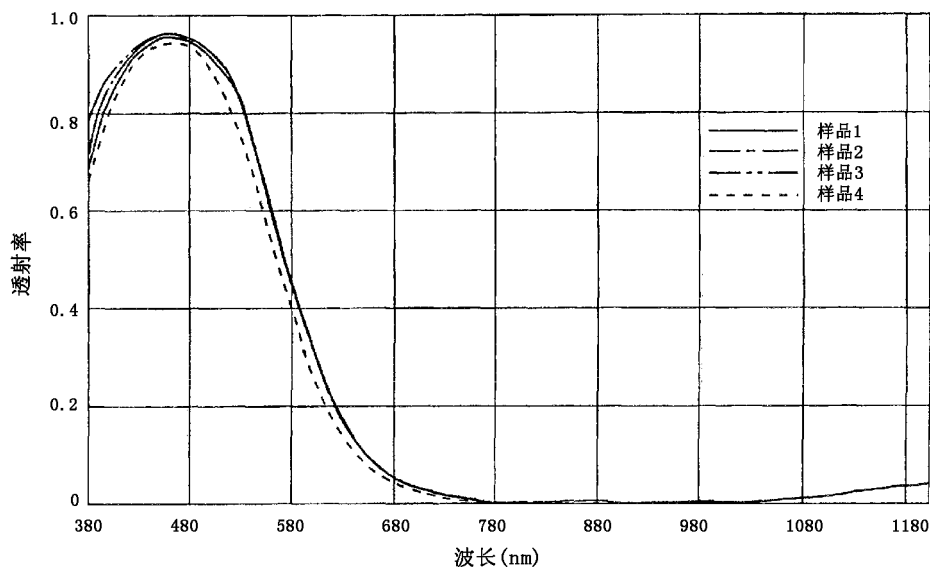
美国专利 US6903036

(2005年6月7日授权)

本发明提供一种红外吸收滤光片及其制备方法。该红外吸收滤光片由 70~98% 克分子的  $\text{SiO}_2$ 、1~

12% 克分子的 CuO 和 1~18% 克分子的网络外体氧化物构成, 其制备过程就是将一种二价铜化合物和一种充当网络外体氧化物的金属物质化合物掺入一种湿凝胶中。为了使二价铜化合物和作为网络外体氧化物的金属物质化合物沉淀在湿凝胶中, 可将湿凝胶浸在一种浸渍溶剂中。该湿凝胶经干燥和加热后, 便可形成一种红外吸收玻璃。这种红外吸收玻璃可以切割和抛光, 最后可以被制备成一种红外吸收滤光片。

本专利说明书共 13 页, 其中有 5 张插图。



高编译