

InGaAs/GaAs 量子阱双光束发光研究*

窦红飞 陆 飞 陈效双 李 宁 沈学础

(红外物理国家实验室, 中国科学院上海技术物理研究所 上海 200083)

G. Li C. Jagadish

(Department of Electronic Materials of Engineering, Research School of Physical Science and Engineering,
Institute of Advanced Studies, Australian National University, Canberra, Act0200, Australia)

摘要 本文报道采用双光束光致发光手段研究 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ 本征样品及 4 种不同位置 δ 掺杂样品 观察到了由 He-Ne 激光导致的激光强度随附加的第二束激发光(白光)强度变化而演变的现象 实验结果显示, 未掺杂样品的光致发光增量较大; 单边、双边掺杂样品的光致发光强度变化趋势一致; 而阱中中心掺杂、界面掺杂样品随着白光强度的增强出现饱和趋势 应用光生载流子从表面到阱中在不同样品中的运输过程和辐射复合与非辐射复合的机制解释了上述现象

PACC: 7855, 7390

1 引言

随着半导体工艺尺寸的不断减小, 在原子尺寸范围内掺杂就变得极为重要, 同时 MOCVD 与 MBE 技术的发展, 使这种掺杂成为现实, 即 δ 掺杂 将量子阱结构与 δ 掺杂相结合, 不仅增加了能带工程的调节自由度, 而且还将改善器件的电学与光学性质, 从而引起众多研究小组的兴趣^[1-5] 其中 InGaAs/GaAs 系统由于其有效质量较小, 导带不连续因子较大, Si 调制掺杂 InGaAs/GaAs 异质结结构能获得更大的电子密度: InGaAs 中由于 Γ 能谷与 L 能谷的距离较大, 能获得较大的稳定的电子饱和速率^[6], 因此, 近几年来, δ 掺杂 InGaAs/GaAs 异质结结构成为高速器件的一个研究热点^[4] 人们又将 Si 掺杂于异质结的不同位置, 研究其运输性质与光学性质, 以优化器件的性质^[7-9]

光吸收与光发射光谱是研究低维半导体能带结构普遍采用的方法 通常的光致发光方法是结合锁相技术, 用被调制的交变激光激发材料中的电子空穴对, 即产生非平衡载流子复合发光, 然后用探测器接收从半导体出射的辐射复合引起的光子 而本文所报道的双光束发光是在通常的光致发光实验的基础上, 同时用一束非调制的白光照射样品, 在样品上产生一

* 国家自然科学基金(No. 19525409 和 No. 69676014)、上海启明星计划资助项目

窦红飞 女, 1970 年出生, 博士生, 专业方向: 半导体光学性质

1998-03-07 收到, 1998-08-17 定稿

直流的光生载流子. 本文主要研究这些直流的光生载流子对激光所激发产生的交流光生载流子的复合的影响, 即直流光生载流子对光致发光的影响. 目前, 尚未见关于直流光生载流子对光致发光影响的报道

2 实验

2.1 样品制备

In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs 单量子阱系统在 630 nm 下采用低压 (10⁴Pa)MOVPE (Metalorganic Vapor Phase Epitaxy) 方法, 以 TMGa, TMIn 和 AsH₃ 为生长源, 掺杂源是 H₂ 稀释的 500ppm 的 SiH₄, 以 (100) 向 (110) 偏离 2° 方向的 GaAs 为衬底生长 In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs, GaAs 的生长速度是 2 μm/h, In_{0.2}Ga_{0.8}As 生长速度为 1.2 μm/h. 具体样品结构及 Si-δ 掺杂位置如图 1 所示, 其中 (a) 为 Si-δ 掺杂于 GaAs 势垒层中, (b) 为掺杂于 GaAs 双边势垒层中. 掺杂层距离 In_{0.2}Ga_{0.8}As 界面都是 10nm, (c) 为 In_{0.2}Ga_{0.8}As 阱中中心掺杂, (d) 为 In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs 界面掺杂, 掺杂面密度为 4.5 × 10¹² cm⁻², 半宽度约为 5nm.

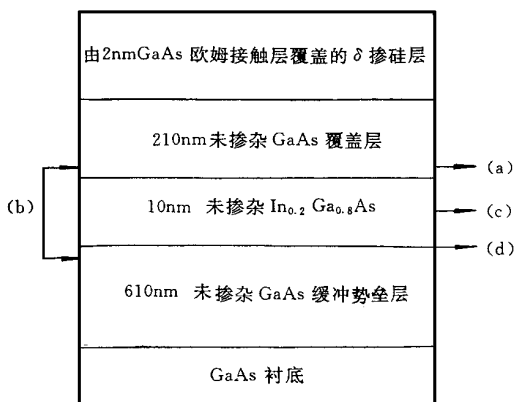


图 1 In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs 量子阱结构及其不同位置掺杂

- (a) 单边势垒掺杂, (b) 双边势垒掺杂,
(c) 阱中中心掺杂, (d) 界面掺杂

2.2 光谱测量

以 He-Ne 激光器的 633nm 谱线为激发光源, 激发功率为 7mW/cm², 并用斩波器进行 47Hz 调制; 另一束激发光源是卤钨灯, 经透镜聚集后直接照射样品, 样品出射的光被硅光二

极管接收, 经锁相放大器检测, 同时用计算机采集数据. 测量温度为 77K. 测量示意图如图 2 所示

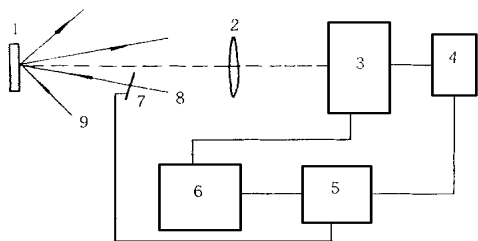


图 2 双光束发光实验装置示意图

1. 样品, 2. 透镜, 3. 单色仪, 4. 探测器, 5. 锁相放大器, 6. 计算机, 7. 斩波器, 8. 激光器, 9. 白光源

3 实验结果与讨论

图 3 分别是未掺杂样品与 4 种不同位置掺杂样品在无白光和有白光照射下的光致发光谱. 其中图 3(a) 是未掺杂样品的光致发光谱, 其发光峰位在 1.321eV, 半峰宽为 12meV, 是从第一电子能级到重空穴的跃迁; In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs δ 掺杂之

后, 以掺杂中心形成 V 形势阱, 改变了本征时的方形势分布, 电子、空穴的能级位置发生了改变, 实验中观察到的光致发光谱的峰位、半峰宽、强度均发生了变化^[10]. 图 3(b) 是单边掺杂样品的 PL 谱, 由于掺杂之后 V 形势阱的存在所产生的 Stark 效应, 从第一电子能级到重空穴的跃迁能量减小, 发光峰是 1.320eV, 相对于本征样品红移, 其半峰宽为 45meV. 双边势垒掺杂样品的发光谱如图 3(c) 所示, 其发光峰位为 1.313eV, 半峰宽为 47meV. 掺杂之后, 阱中的电子与杂质的相互作用, 散射作用增强, 其 PL 半峰宽增大, 尤其是阱中中心与界

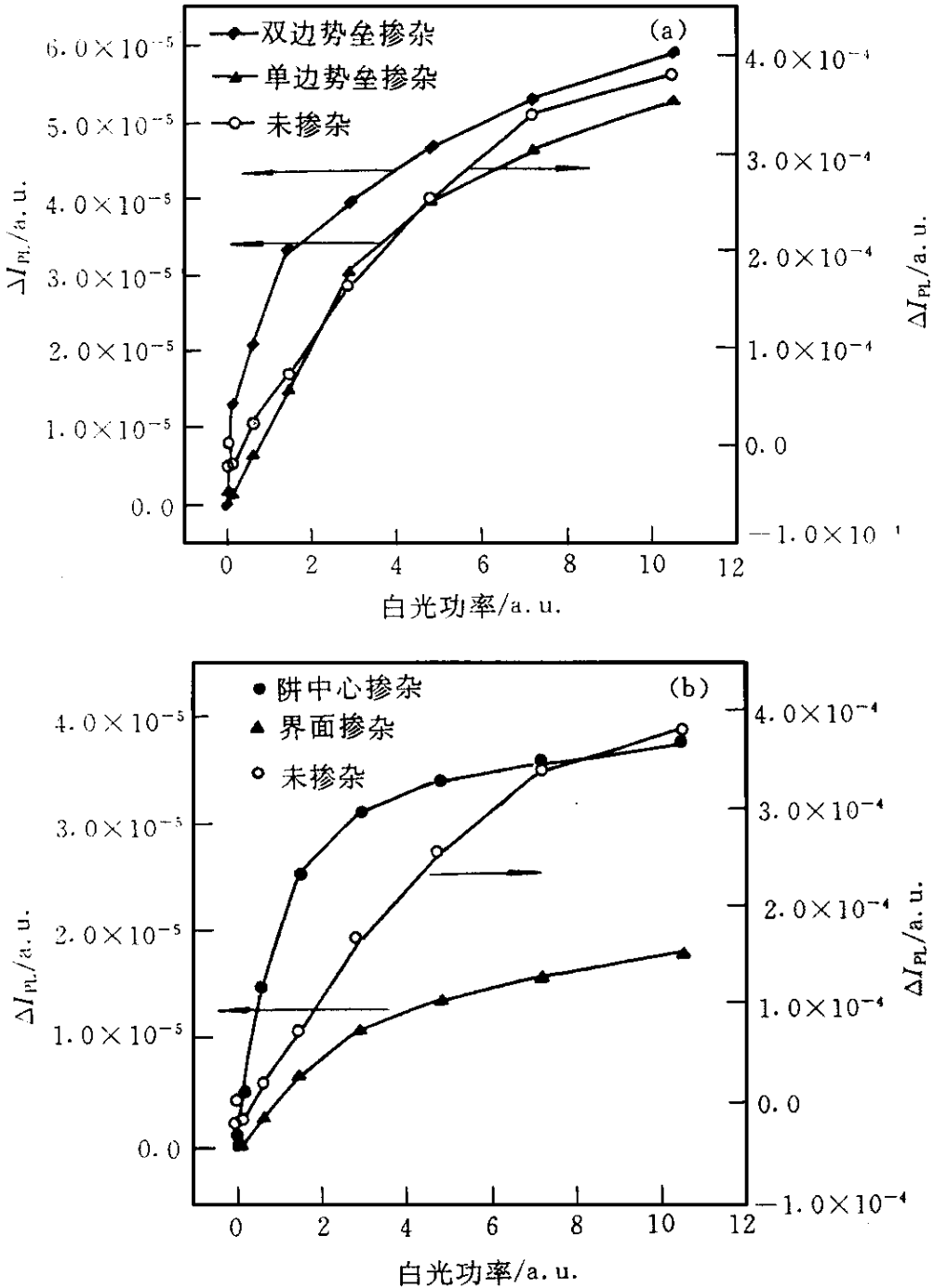


图3 没有白光时的光致发光谱与白光存在时的光致发光谱

(a) 未掺杂样品, (b) 单边势垒掺杂样品, (c) 双边势垒掺杂样品, (d) 阱中中心掺杂样品, (e) 界面掺杂样品

面掺杂样品, 非平衡载流子与杂质在空间上没有完全分离, 散射作用增强, 光致发光谱较复杂, 发光峰宽增大, 如图 3(d) 阱中中心掺杂样品的 PL 峰为 1.367eV, 半峰宽是 112meV, 图

3(e)是界面掺杂样品的光致发光谱,其峰位在1.397eV,半峰宽为74meV.在白光照射下样品的发光峰位没有变化,但是它们的发光强度均有所增大,相对于无白光照射时的光致发光峰强度,在有白光照射下的发光峰强度的增量与白光强度的关系如图4所示,随着白光强度的增大,ΔI_{PL}均增大,其中未掺杂样品增加的量最大;图4(a)中两条曲线基本平行,表明随白光强度增大,单边掺杂与双边掺杂样品光致发光强度变化趋势是一致的;图4(b)显示阱中中心掺杂、界面掺杂样品ΔI_{PL}随着白光强度增大逐渐减小,出现饱和趋势

未经斩波器调制的白光激发样品产生电子空穴对,它们复合发光,其出射的荧光信号,经探测器为直流成分,发光强度可以表示为:

$$I_{PL}(0) = \Delta n(0) \Delta p(0) \quad (1)$$

没有白光存在时,经斩波器调制后的激光照射在样品上,它所产生的荧光信号,经探测器为交流信号,其发光强度可以表示为:

$$I_{PL}(\omega) = \Delta n(\omega) \Delta p(\omega) \quad (2)$$

其中 ω 为调制频率,当激光和白光同时存在时,光致发光强度表示为:

$$I_{PL} = (\Delta n(\omega) + \Delta n(0)) (\Delta p(\omega) + \Delta p(0)) \quad (3)$$

锁相放大器检测的是探测器中的交流成分,即包含 Δn(ω) 或 Δp(ω) 的乘积项.当两束光都存在时,5个样品的荧光强度均有所加强,说明探测器接收到的信号进入锁相放大器不仅有 He-Ne 激光器所产生的恒定交流荧光成分,而且还有由于白光的存在所产生的额外交流荧光成分,其发光强度增量可以表示为:

$$\Delta I_{PL} = \Delta n(\omega) \Delta p(0) + \Delta n(0) \Delta p(\omega) \quad (4)$$

光照射在样品上,被样品吸收,产生非平衡载流子 Δn 和 Δp,会不断地扩散或运输到 In_{0.2}Ga_{0.8}As 阱中,然后复合后发光.由于空穴的有效质量较大,运输到阱中的空穴将少于电子,设这部分空穴与电子的比例因子为 α,则空穴表示为 αΔn,其中 α < 1,则(4)式可以写为:

$$\Delta I_{PL} = 2\alpha \Delta n(0) \Delta n(\omega) \quad (5)$$

随光程的增加,光强呈指数衰减.运输到 In_{0.2}Ga_{0.8}As 阱中的电子数目表示为:

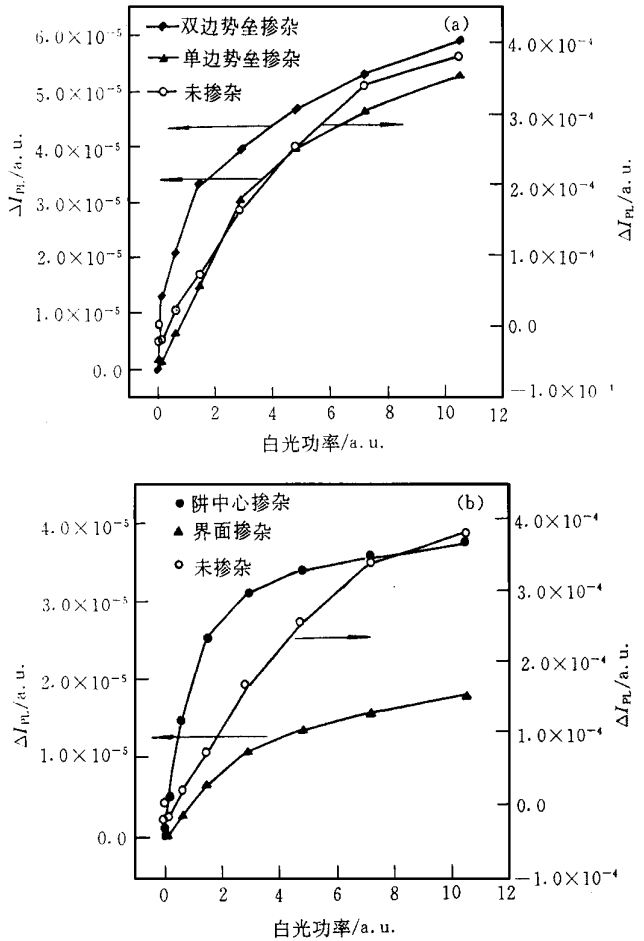


图4 光致发光增量与白光照射强度的关系
(a)单边势垒掺杂、双边势垒掺杂样品与未掺杂样品
(b)阱中中心掺杂、界面掺杂样品与未掺杂样品

$$\Delta n = \int_0^L \eta(z) G(z) dz \quad (6)$$

其中 $G(z)$ 为电子产生率, 它与光强成正比, 即 $G(z) = I_0 e^{-\alpha z}$, α 为 GaAs 的吸收系数, $\eta(z)$ 为光生电子输运到 In_{0.2}Ga_{0.8}As 阱中的效率. 当光照射在样品上达到平衡时, 连续性方程表示为

$$\frac{d\Delta n}{dz} = G - \frac{\Delta n}{\tau} - \frac{\Delta n}{\tau_n} = 0 \quad (7)$$

其中 τ , τ_n 分别是光生电子的辐射复合与无辐射复合的寿命. 则 Δn 可以表示为:

$$\Delta n = G\tau \frac{1}{1 + \frac{\tau}{\tau_n}} \quad (8)$$

根据典型的带间跃迁吸收系数在这 5 种样品中, 光从表面到达阱中时, 其强度约衰减 1 个数量级, 那么从缓冲层中产生的光生载流子数目较少. 按照 (6) 式, 对于发光强度的增加主要贡献来自于表面到 In_{0.2}Ga_{0.8}As 阱中的那部分光生载流子. 双边掺杂样品比单边掺杂样品在缓冲层中多了一层掺杂, 但是在图 4(a) 中显示, 2 个样品曲线非常接近, 这说明缓冲层中的非平衡载流子对阱中的发光强度影响较小, 同时也证明了上述的分析.

随着白光照射强度的增大, 非平衡载流子增多, 载流子与杂质的散射作用加强, 无辐射复合增大, 即 τ_n 逐渐减小, 按照 (5) 和 (8) 式, ΔI_{PL} 逐渐减小, 出现饱和趋势. 由于界面掺杂增加了晶格的无序性, 无辐射复合增强, 因此界面掺杂样品的 ΔI_{PL} 与中心掺杂样品相比小.

对于未掺杂样品, 由于价带势分布不存在空穴的势垒, 其比例因子 α 将大于单边与双边势垒掺杂样品; 另外与界面、中心掺杂样品相比较, 其晶格有序性较好, 非辐射复合载流子寿命较长, 综合 (5) 和 (8) 式, 未掺杂样品的光致发光强度增量将比其它 4 种掺杂样品大, 如图 4 中 (a)、(b) 所示, 未掺杂样品的光致发光强度增量比其它 4 种掺杂样品高 1 个数量级. 这也显示了载流子在量子阱与表面之间的区域中的传输特性可以明显地在我们的双光束发光实验中得到反映. 这为我们用稳态双光束发光的方法研究半导体中一些特殊结构下的传输特性提供了新的可能性.

4 结论

通过对 In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs 系列样品双光束发光实验的研究, 发现光生载流子的输运与它们的复合机制决定了不同样品发光强度增量随白光强度变化的不同演变规律. 光致发光强度的增强主要来自于从表面输运到阱中的载流子; 而且与空穴的比例因子有关, 即价带的势分布有关; 非辐射复合减小了发光强度的增量. 这些很好地解释了未掺杂样品的发光增量较大; 单边、双边掺杂样品发光强度变化趋势一致; 界面、中心掺杂样品随白光强度增大出现的饱和趋势. 同时也显示了双光束发光实验方法有可能是一种无接触式的光生载流子输运特性研究的新手段.

参 考 文 献

- [2] M ao-long Ke and B. Ham ilton, Phys Rev , 1993, **B47**(8): 4790~ 4793
- [3] C. I Harris, H. Kalt, B. Monemar *et al* , Surf Sci , 1992, **263**: 462; J. J. Harris, R. Murray and C. T. Foxon, Sem i- cond Sci Technol , 1993, **8**: 31
- [4] D. Richards, J. Wager, M. Majer *et al* , Semicond Sci Technol , 1993, **8**: 1421; W. P. Hongm A. Zrenner, O. H. Kim *et al* , Appl Phys Lett , 1990, **57**: 1117.
- [5] M ao-long Ke, D. Westwood, R. H. William s *et al* , Phys Rev Lett , 1995, **B51**: 5038
- [6] M. Van Hore, G. Zon and W. de Raedt, J. Vac , Sci Tech , 1993, **B11**: 1203
- [7] Y. J. Jeon, Y. H. Jeong, B. Kim *et al* , IEEE Electron Device Lett , 1995, **16**: 563
- [8] M. J. Kao, W. C. Hsu, H. M. Shien *et al* , Jpn J. Appl Phys , Part 2, Lett , 1995, **34**: L1
- [9] J. Dickmann, Appl Phys Lett , 1992, **60**: 88
- [10] M ao-long Ke, X. Chen, M. Zervos *et al* , J. Appl Phys , 1996, **79**: 2627.

Photoluminescence of InGaAs/GaAs with Double Lights

Dou Hongfei, Lu Wei, Chen Xiaoshuang, Li Ning, Shen Xuechu

*(National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083)*

G. Li, C. Jagadish

*(Department of Electronic Materials of Engineerings, Research School of Physical Science and Engineering,
Institute of Advanced Studies, Australian National University, Canberra, Act0200, Australia)*

Received 7 March 1998, revised manuscript received 17 August 1998

Abstract The PL of δ -doped $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ heterostructures are studied with the double lights. The intensity of PL excited by He-Ne laser increases with the intensity of the second light (white light). The experimental results show that, the increment of PL intensity for the undoped sample is the largest, and the increment increases similarly between the samples of the doped in one barrier and doped in the both barrier. The saturation appears with the increasing of the intensity of tungsten filament in the samples of the doped in the center well and in the interface. And the increment of the doped in the center well is about 3 times larger than that of the doped in the interface. The transportation of the carriers from the surface to the well, the radiation and non-radiation are applied to explain the above phenomena well.

PACC: 7855, 7390