

In_{0.15}Ga_{0.85}As-GaAs 应力层多量子阱中 束缚子带—连续带跃迁

方 晓 明 沈 学 础

中国科学院上海技术物理研究所红外物理开放研究实验室,上海,200083

侯宏启 冯 巍 周均铭

中国科学院物理研究所,北京,100080

1989 年 6 月 15 日收到

在 10—300K 温度范围,研究了稳态发光二极管(LED)辐照对 15 周期的 In_{0.15}Ga_{0.85}As(8nm)-GaAs(15nm) 应力层多量子阱的光电流谱的影响.各跃迁过程对应的光电流峰的强度随 LED 光强的增大而减弱,并且具有不同的变化规律.据此可区分出束缚子带和连续带间的跃迁及其亚结构,并由跃迁的能量位置,直接确定导带和价带的不连续量,得出重空穴价带的能带台阶 $Q_v = 0.38 \pm 0.01$.

PACC: 7340L;7865;6855

一、引 言

近年来,对应力层超晶格和量子阱的兴趣和研究日益广泛^[1],原因之一在于它们增大了在给定衬底上选择外延材料的可能性,并开辟了新的器件应用前景.

InGaAs-GaAs 应力层超晶格和量子阱最近几年受到广泛的注意^[2-4].关于其能带排列和子带结构,无论是理论上或是实验上存在着明显分歧的意见和结果.在文献[5]中,我们报道了这种异质结构的光电流谱研究结果.实验和计算表明,电子和重空穴束缚在 InGaAs 层,轻空穴束缚在 GaAs 层.拟合计算得出重空穴价带的能带台阶 $Q_v = 0.40 \pm 0.01$.此外,还观察到束缚子带和连续带间的跃迁.

本文报道在 10—300K 温度范围,稳态 LED 辐照对 15 周期的 In_{0.15}Ga_{0.85}As(8nm)-GaAs(15nm) 应力层多量子阱的光电流谱的影响,由此区分出束缚子带和连续带间的跃迁及其亚结构,并根据这种跃迁的能量位置,直接确定重空穴价带的能带台阶 Q_v .

二、实验与结果

样品结构以及电极制备方法已在文献[5]中描述.实验中,单色测量光束用斩波器加以调制,调制频率为 20Hz,样品中产生的调制光电流讯号由锁相放大器检测.测量光电

流的同时,用光强稳定的 650nm 波段的 LED 辐照样,辐照光强可由电流调节,并随电流的增大而增强。

图 1 给出不同温度下,15 周期的 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}(8\text{nm})\text{-GaAs}(15\text{nm})$ 应力层多量子阱的光电流谱对 LED 光强的依赖关系。由图 1(a) 可见,光电流谱上呈现四个明显的光谱结构, a, b, c 以及对应 GaAs 基本带间跃迁的结构 e 。这些光谱结构的强度都随

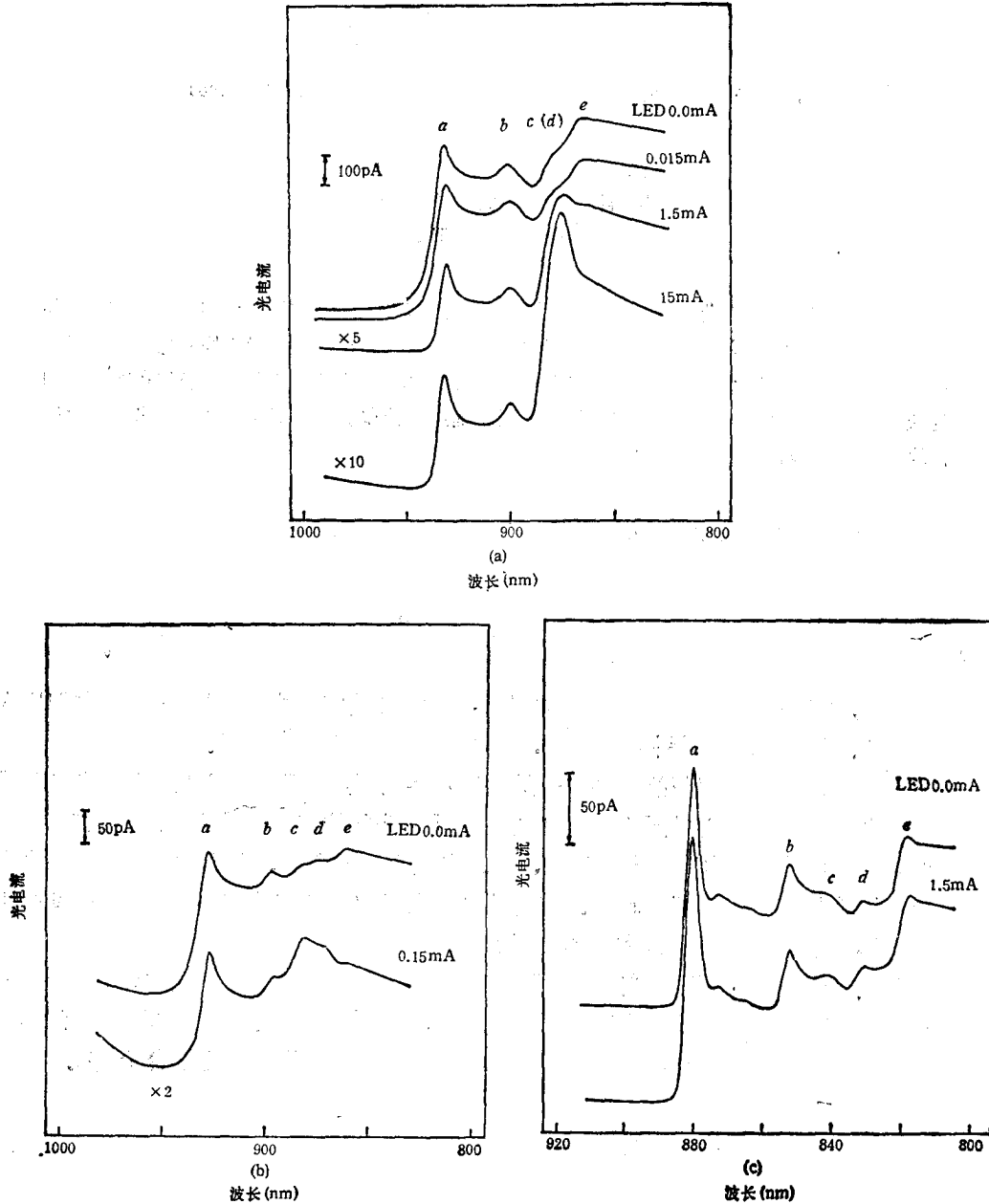


图 1 温度 300K (a), 275K(b), 83K(c) 时样品 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}(8\text{nm})\text{-GaAs}(15\text{nm})$ 的光电流谱对 LED 光强的依赖关系。

LED 光强的增大而减弱,但结构 c 变化要缓慢得多. 由图 1(b), (c) 可见,图 1(a) 中的结构 c 实际包含着亚结构,在此这两个结构记为 c 和 d , 并且 1.5mA 的 LED 光照仅引起其强度的微小变化.

三、讨 论

650nm 波段 LED 辐射的光子能量大于 GaAs 的禁带宽度,光激发产生的电子和空穴,从激发态弛豫到 InGaAs 层,分别占据导带电子基态和重空穴基态. 在电场作用下,这部分载流子也形成光电流. 但由于 LED 辐射未加调制,锁相放大器检测的光电流讯号并不包括 LED 辐射的贡献,而是单色光引起的调制光电流讯号. 但 LED 辐射注入的非平衡载流子的存在,增大了调制单色光注入的非平衡载流子的复合几率. 因此,稳态 LED 辐照的效果,是降低调制光电流讯号. 增大 LED 光强,意味着增加非平衡载流子数目,因而调制的非平衡载流子的复合几率进一步增大,调制光电流讯号随之降低. 这便是图 1 所示的光电流强度对 LED 光强的依赖关系的物理起因.

在文献[5]中,我们已经指认了图 1(a) 所示的光谱结构 a 和 b , a 和 b 分别对应于量子阱内重空穴和轻空穴基态到导带电子基态的子带间激子跃迁 11HH 和 11LH,并推测 c 对应于束缚子带和连续带间的跃迁. 对 c 结构起源的推测,是根据不同样品的光电流谱的对比以及用包络函数模型^[6]所作的计算. 在此,根据图 1(a) 所示的光电流强度对 LED 光强的依赖关系,可以从实验上直接判明光谱结构 c 的起源.

量子阱中的载流子,在其平面层内的运动可以认为是自由的(假定不考虑与 z 方向运动的耦合),而 z 方向的运动受到限制,是量子化的,因而具有准二维载流子的特征. 前面所说的连续带,是指非束缚的子带,即量子阱外的子带. 连续带有显著的带特征,相邻势阱层的包络函数充分交叠,对于多势阱,子能级展宽成子能带. 因此,与二维载流子不同,占据连续带的载流子,其 z 方向的运动大体上也是自由的,因而具有三维准自由载流子的特征. 由图 1(a) 可见,光谱结构 c 随 LED 光强的变化远小于其它三个结构,由此可以推断, c 对应的跃迁过程和 a, b 不同,并与连续带有关. 如上指出,LED 辐射注入的非平衡载流子很快弛豫到势阱中的电子和空穴基态,影响这些态上二维载流子的复合几率及有关的光跃迁讯号强度,而对与连续带有关的光跃迁讯号影响较小. 这就是为什么 LED 辐照对结构 c 的影响远小于其它三个结构,以致当 LED 电流为 15mA 时, c 的强度明显地大于其它三个结构. 这一论证反之给我们提供依据,可以从谱结构强度随 LED 辐照的变化规律,直接推断所涉及的跃迁是否与连续带有关抑或是量子阱内二维态间的子带跃迁.

在文献[5]中,图 1(b) 所示的光谱结构 c 被推断为轻空穴连续带到导带势阱中电子基态的跃迁, d 被推断为重空穴第一激发态到导带电子连续带的跃迁(见图 2). 在此,按这两个结构对 LED 光强的依赖关系,还可以进一步证实上述指认.

c 对应的跃迁过程在轻空穴连续带中产生空穴,部分空穴可以进入轻空穴基态,即束缚在 GaAs 层. 因此, InGaAs 层内电子与 GaAs 层内轻空穴的复合是实空间中的间接复合. 跃迁过程 d 产生的重空穴束缚在 InGaAs 层,其与电子的复合在实空间中是直接

复合. 显然, 后一种复合要比前一种容易发生, 受 LED 光照的影响也稍大一些. 由图 1(b) 可见, 光谱结构 d 随 LED 光强的变化较之 c 要稍大一点, 由此似有助于推断, c 对应的跃迁过程与轻空穴有关, 而 d 对应的跃迁过程则与重空穴有关.

InGaAs-GaAs 界面的能带排列及各种可能的跃迁过程示于图 2. 既然光电流谱表明, 结构 c 和 d 的能量位置 E_c 和 E_d 比较靠近, 由此即可粗略估计, InGaAs-GaAs 界面处导带和重空穴价带的非连续量 ΔE_c 和 ΔE_h 不应有很大差别, 即如果定义 $Q_c = \Delta E_h / (\Delta E_h + \Delta E_c)$, 则 Q_c 不应与 Q_c 有很大差别.

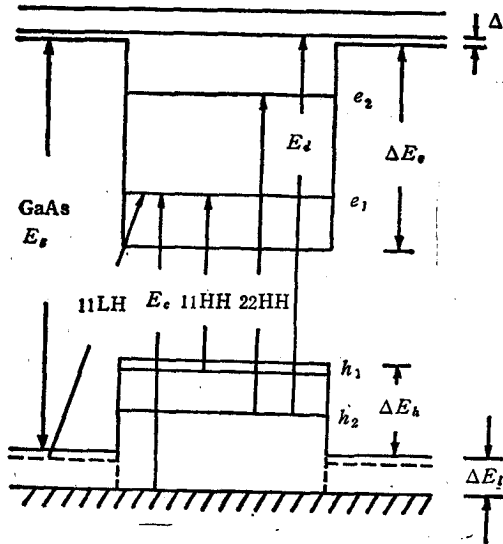


图 2 InGaAs-GaAs 应力层多量子阱的能带排列及各种跃迁过程示意图

由图 1(c) 可见, 低温下光谱结构 c 和 d 的能量位置已明显可分辨开来. 由实验结果与包络函数模型的拟合计算^[1], 我们已经得出重空穴价带的能带台阶 $Q_c = 0.40 \pm 0.01$. 如上所述, 通过光电流谱对 LED 光强的依赖关系, 进一步表明了对光谱结构 c 和 d 指认的可靠性. 因此, 可以由 $E_c, E_d, 11HH, 11LH$ 和 E_g^{GaAs} 的实验值直接确定 $\Delta E_c, \Delta E_h$ 和 ΔE_i . 参考图 2 可得出下列关系式:

$$\Delta E_i = E_c - 11LH - E_{ox} + l_1, \quad (1)$$

$$\Delta E_h + \Delta E_i = E_c - 11HH - E_{ox} + h_1, \quad (2)$$

$$\Delta E_c = E_d - 11HH - E_{ox} - h_2 + h_1 + e_1 - \Delta. \quad (3)$$

其中 e_1, h_1 和 l_1 分别是势阱中导带电子、重空穴和轻空穴的基态能级, h_2 是重空穴的第一激发态能级, E_{ox} 是激子束缚能, Δ 是导带电子的第一连续带到 GaAs 导带底的能量间隔. E_{ox} 已由实验确定^[2], 约为 8meV . (1)–(3) 式中, $E_c, E_d, 11HH, 11LH$ 用相应的实验值, e_1, l_1, h_1, h_2 和 Δ 由计算确定. 计算表明, h_1, l_1 和 Δ 都是小量, 并且随能带不连续因子 Q 变化缓慢. 例如, Q_c 从 0.4 变化到 0.2, h_1 和 l_1 分别从 7meV 和 4meV 变化到 6meV 和 8meV . e_1 和 h_2 在数值上很接近, 两者之差也是小量. 例如, Q_c 从 0.4 变化到 0.2, e_1 和 h_2 分别从 25meV 和 28meV 变化到 28meV 和 21meV . 因此, $\Delta E_c, \Delta E_h$ 主要由 E_c, E_d 与 $11HH$ 和 $11LH$ 的相对能量间隔决定. 表 1 列出了不同温度下 $11HH, 11LH, E_g^{GaAs}, E_c$ 和 E_d 的实验值以及由 (1)–(3) 式得出的 $\Delta E_c, \Delta E_h, \Delta E_i$ 和 Q_c . 可以看出, 用这种直接方法确定的能带台阶与用拟合计算方法得出的 Q_c 符合得很好.

如前所述, E_d 被指认为重空穴第一激发态到导带电子连续带的跃迁. 在此, 通过简单的计算, 可以验证这一指认的可靠性. 如果假定 E_d 为重空穴基态到导带电子连续带的跃迁, 就有下列式子:

$$\Delta E_h = E_g^{GaAs} - E_d + h_1 + \Delta. \quad (4)$$

表1 不同温度下各跃迁能量的实验值及能带不连续量和能带台阶(单位: eV)

	275K	80K	11K
11HH	1.334	1.405	1.413
11LH	1.380	1.451	1.458
E_g^{GaAs}	1.433	1.507	1.513
E_c	1.402	1.469	1.479
E_v	1.414	1.488	1.497
ΔE_c	0.077	0.079	0.080
ΔE_h	0.048	0.049	0.048
ΔE_l	0.019	0.014	0.017
Q_0	0.38 ± 0.01	0.38 ± 0.01	0.38 ± 0.01

如果 E_d 是重空穴第一激发态到导带电子连续带的跃迁,则

$$\Delta E_h = E_g^{\text{GaAs}} - E_d + h_2 + \Delta. \quad (5)$$

用(4)和(5)式算出的 ΔE_h 分别与(2)式确定的 ΔE_h 比较表明, (5)式符合得好得多。

- [1] G. C. Osbourn, IEEE J Quantum Electronics, 22(1986), 1677.
 [2] J. Y. Marzin, M. N. Charasse, B. Sermage, Phys. Rev., B31(1985), 8298.
 [3] J. Menendez, A. Pinczuk, D. J. Werder, S. K. Sputz, R. C. Miller, D. L. Sivco, A. Y. Cho, Phys. Rev., B36(1987), 8165.
 [4] G. Ji, D. Huang, U. K. Ready, J. S. Henderson, R. Houdre, H. Morkoc, J. Appl. Phys., 62(1987), 3366.
 [5] 方晓明、沈学础、侯宏启、冯巍、周均铭, 半导体学报, 待发表。
 [6] G. Bastard, Phys. Rev., B25(1982), 7584.

CONFINED SUBBAND—CONTINUUM TRANSITIONS IN STRAINED LAYER $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As-GaAs}$ MULTIPLE QUANTUM WELLS

FANG XIAO-MING SHEN XIE-CHU

Laboratory of Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica, Shanghai, 200083

HOU HONG-QI FENG WEI ZHOU JUN-MING

Institute of Physics, Academia Sinica, Beijing, 100080

(Received 15 June 1989)

ABSTRACT

The influence of steady LED irradiation on the photocurrent spectra of the strained layer multiple quantum wells $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ (8nm)- GaAs (15nm) with 15 periods have been studied from 10 K to 300 K. The photocurrent peaks corresponding to various transitions decrease in different ways with the increase of LED irradiation intensity. By this means, the transitions from confined subband to continuum can be identified easily, and the conduction- and valence-band edge discontinuity has been determined directly from the experimental energy values of various transitions. Consequently, the band offset of heavyhole valence band is obtained as $Q_0 = 0.38 \pm 0.01$.

PACC: 7340L; 7865; 6855