

# GaInNAs/GaAs 量子阱结构基态光跃迁的能量\*

杨景海<sup>1,2,†</sup> 杨丽丽<sup>1,2</sup> 张永军<sup>1</sup> 刘文彦<sup>1</sup> 王丹丹<sup>1</sup> 郎集会<sup>1</sup> 赵庆祥<sup>3</sup>

(1 吉林师范大学凝聚态物理研究所, 四平 136000)

(2 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 激发态重点实验室, 长春 130033)

(3 查尔摩斯技术大学光电物理所, 哥德堡 S-41296, 瑞典)

**摘要:** 从理论和实验两个方面对 GaInNAs/GaAs 量子阱结构基态的光跃迁能量进行研究. 在理论计算过程中, 分别采用电子有效质量近似法和双能级排斥模型计算了 GaInNAs 合金的电子空穴分立能级的能量及其带隙能, 讨论了由应变引起的带隙变化量. 将理论计算结果与光致发光的实验结果进行比较, 两者符合得很好. 并简单分析了 N 的加入对 GaInNAs 合金带隙能产生的影响.

**关键词:** 量子阱; 光跃迁能量; 有效质量近似; 分子束外延

**PACC:** 7280E; 7855E; 3410

**中图分类号:** TN248

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2006)11-1945-05

## 1 引言

在 GaAs 衬底上生长的 GaInNAs 量子阱结构为直接带隙半导体材料, 在长波长(1.3 和 1.55 $\mu\text{m}$ )光通信系统中具有广阔的应用前景. 现已制备出发射波长为 1.3 $\mu\text{m}$  的 GaInNAs/GaAs 量子阱激光器, 有关 GaInNAs/GaAs 外延层和量子阱光致发光的机制研究也有相关报道<sup>[1~7]</sup>, 但是关于 GaInNAs 的有效质量和带隙能等基本性质的研究还很有限. 自 GaAs 和 GaInAs 材料中引入 N, N 原子替代晶格中 As 原子, 由于 N 和 As 原子的壳层电子结构有较大差别, 使得 GaAs 和 GaInAs 的带隙减小<sup>[3]</sup>. 这种带隙的明显变化是由局域 N 能级的窄带和扩展的  $\Gamma$  导带间的耦合引起的<sup>[8~11]</sup>. 最近, 蒙特卡罗计算结果<sup>[12]</sup>表明, N 对 InGaAs 带隙能量的影响要比对 GaNAs 的影响小. 尽管人们采用几种先进的理论对 N 在 GaInNAs 合金中的作用进行了很好的解释<sup>[8~20]</sup>, 但是在有效质量近似基础上建立的简单模型, 对于量子阱的结构设计、光跃迁能量及光增益的估算还是很有必要的.

本文从理论和实验两个方面对 GaInNAs/GaAs 量子阱的基态跃迁能量, 即最低电子和空穴子带间的光跃迁能量, 进行了详细的研究. 在计算中采用双能级排斥模型研究带隙能, 充分考虑应变对带隙能量的影响, 并分析 N 的加入对 GaInNAs 合金带隙能产生的影响.

## 2 光跃迁能量的理论计算

GaInNAs/GaAs 量子阱结构的发光主要是由束缚在量子阱中载流子的跃迁实现的, 因此我们在此仅计算 GaInNAs 量子阱中载流子的跃迁能量, 其形式如下:

$$\Delta E = h(c/\lambda_0) = E_g + \Delta E_g + E_n + E_{hh}(E_{lh}) \quad (1)$$

其中  $E_g$  为无应力 GaInNAs 的带隙能量;  $\Delta E_g$  为应变引起的重空穴、轻空穴带隙能量变化;  $E_n$  为 GaInNAs 导带内电子分立能级的能量;  $E_{hh}(E_{lh})$  为价带内空穴分立能级的能量, hh 和 lh 分别表示重空穴和轻空穴. 为了计算 GaInNAs 量子阱的基态跃迁能量, 必须对上述三种能量分别进行计算.

### 2.1 GaInNAs 的电子和空穴的分立能级能量

采用电子有效质量近似计算 GaInNAs/GaAs 量子阱电子和空穴分立能级的能量. 在 GaInNAs/GaAs 量子阱结构中, 电子受到如下势的作用:

$$V(z) = \begin{cases} 0, & |z| < L_z/2 \\ V_0, & |z| > L_z/2 \end{cases} \quad (2)$$

其中  $L_z$  为量子阱的厚度;  $V_0$  为势垒高度, 由价带带阶决定. 在本文中, GaInAs/GaAs 体系的价带带阶取值为 0.34, 而 GaInNAs/GaAs 的价带带阶取值为 0.2.

因而载流子的束缚能和波函数可以通过薛定谔

\* 国家重点基础研究发展计划资助项目(批准号:2003CD314702-02)

† 通信作者. Email: jhyang@jlnu.edu.cn

2006-04-18 收到, 2006-06-13 定稿

方程解出,即:

$$-\frac{\hbar^2}{2} \times \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{1}{m^*(z)} \times \frac{\partial f_n(z)}{\partial z} \right] + V(z) f_n(z) = E_n f_n(z) \quad (3)$$

利用波函数的连续性边界条件,可得到  $E_n$  的本征值方程:

$$\left( k \frac{L_z}{2} \right)^2 + \left( \sqrt{\frac{m_w}{m_b}} a \frac{L_z}{2} \right)^2 = \frac{2m_w V_0}{\hbar^2} \left( \frac{L_z}{2} \right)^2 \quad (4)$$

其中  $k = \sqrt{2m_w E_z}/\hbar$ ;  $a = \sqrt{2m_b(V_0 - E_z)}/\hbar$ , 对于奇函数解,  $a \frac{L_z}{2} = \frac{m_b}{m_w} k \frac{L_z}{2} \cot\left(k \frac{L_z}{2}\right)$ ; 对于偶函数解,  $a \frac{L_z}{2} = \frac{m_b}{m_w} k \frac{L_z}{2} \tan\left(k \frac{L_z}{2}\right)$ ;  $m_w$  和  $m_b$  分别为阱中电子和垒中电子的有效质量.(4)式可通过数值算法或作图法求解电子的能量值  $E_n$ , 同理可求解出空穴的能量值  $E_{hh}(E_{lh})$ .

对于 GaInNAs 体系来说,要获得(4)式的值必须先确定电子、重空穴或轻空穴的有效质量.无应变 GaInNAs 的电子有效质量可以通过对 GaNAs 和 InNAs 的电子有效质量运用线性内插法计算出来.

但是必须先运用一次内插法计算出 GaNAs 和 InNAs 的电子有效质量值. Masia 等人<sup>[21]</sup>的研究结果表明,当 N 的含量高于 0.1% 时, GaNAs 的电子有效质量达到饱和,其值为 0.13. Lindsay 等人<sup>[22]</sup>最近的计算结果还表明,在 N 含量增加至 5% 的过程中, GaNAs 的电子有效质量随着 N 含量的增加而线性增加,当 N 含量为 5% 时,其电子有效质量可达到 0.11. 因此,可以在 N 含量 0~5%, 电子有效质量 0.0667~0.11 之间使用线性内插法计算 GaNAs 的有效质量. 结果表明,当 N 含量在 7.3% 左右时,电子有效质量达到 0.13. 因而我们假设,当 N 含量高于 7.3% 时, GaNAs 电子有效质量恒定,其值为 0.13. InNAs 的值则可以利用 InAs 和 InN 的有效质量计算出来. InAs 和 InN 的电子有效质量见表 1<sup>[6~8,13,16~25]</sup>. 由此即可算出无应变 GaInNAs 的电子有效质量. 通过计算可知,  $\text{Ga}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{N}_{0.01}\text{As}_{0.99}$  体系的电子有效质量为 0.098, 该值与实验值(即 0.095<sup>[22]</sup>)符合得很好. 研究还表明,当电子有效质量在上述值附近变化  $\pm 5\%$  时,不会给计算结果带来明显的误差,可见这是一种非常合理的近似. 轻空穴和重空穴的有效质量则可用 Luttinger 参数  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  表示,即:

$$\begin{aligned} m_{hh}^* &= m^*/(\gamma_1 - 2\gamma_2) \\ m_{lh}^* &= m^*/(\gamma_1 + 2\gamma_2) \end{aligned} \quad (5)$$

## 2.2 带隙能量

为了计算量子阱结构的光跃迁能量,还必须计

算出外延层的带隙能. 然而迄今为止,对于 GaInNAs 体系的带隙能尚未建立起简单完善的关系模型. 虽然为了合理地描述相关物理学理论需要精密的计算<sup>[15]</sup>, 但仍然可以采用双能级推斥模型来定量地解释 N 含量对带隙能的影响<sup>[9,12,22~24]</sup>. 因此,我们采用双能级推斥模型研究 N 对 GaInNAs 合金带隙能的影响.

根据双能级推斥模型,带隙能  $E_g$  可表示为:

$$E_g = 0.5[(E_N + E_C) - \sqrt{(E_N - E_C)^2 + 4yV^2}] \quad (6)$$

其中  $E_C$  为非耦合导带能;  $E_N$  为 N 能级的能量;  $y$  是 N 的含量;  $V$  是 N 能级与导带间耦合的哈密顿算符的非对角项. 下列表达式给出了  $E_C$ ,  $E_N$  和  $V$  与 N, In 含量的关系<sup>[23,24]</sup>:

$$E_C = E_{\text{GaInAs}} - \alpha y \quad (7)$$

$$E_{\text{GaInAs}} = E_{\text{GaAs}} - 1.5x + 0.4x^2 \quad (8)$$

$$E_N = E_{\text{Ga}} + (E_{\text{In}} - E_{\text{Ga}})x - 0.65x \quad (9)$$

$$V = V_{\text{Ga}} + (V_{\text{In}} - V_{\text{Ga}})x \quad (10)$$

其中  $x$  为 In 的含量;  $E_{\text{GaInAs}}$  为无应变时 GaInAs 合金的带隙能. 当 N 含量较低时,  $\alpha = 0$ ,  $E_{\text{Ga}} = 1.65\text{eV}$ ,  $E_{\text{In}} = 1.9\text{eV}$ ,  $V_{\text{Ga}} = 2.4\text{eV}$ ,  $V_{\text{In}} = 1.75\text{eV}$ <sup>[24]</sup>. 理论推得 GaNAs 相对 N 含量的变化情况与实验数据<sup>[25]</sup>十分吻合. 因而可采用这种简单模型计算无应变 GaInNAs 的带隙能.

## 2.3 应变效应

在 GaAs 缓冲层上生长的 GaInNAs 合金存在双轴平面内应变和流体静力学应变. 因而还需要考虑应变效应对带隙能量的影响. 由于 GaAs 缓冲层和衬底要比 GaInNAs 层厚得多,所以仅有 GaInNAs 层发生了四方畸变,因而只引起了两种形式简单的带隙能量变化,一种是由双轴平面内应力导致的价态劈裂  $\zeta^{\text{sh}}$ , 另一种是由流体静力学应变导致的带隙能量的改变  $\zeta_{\text{hyd}}$ .

$$\zeta_{hh}^{\text{sh}} = b \frac{c_{11} + 2c_{12}}{c_{11}} \epsilon = \zeta_0 \quad (11)$$

$$\zeta_{lh}^{\text{sh}} = \frac{\Delta_{\text{so}} - \zeta_0}{2} - \frac{\Delta_0}{2} \sqrt{1 + \frac{2\zeta_0}{\Delta_{\text{so}}} + 9\left(\frac{\zeta_0}{\Delta_{\text{so}}}\right)^2} \quad (12)$$

$$\zeta_{\text{hyd}} = -2a \frac{c_{11} - c_{12}}{c_{11}} \epsilon \quad (13)$$

其中  $\epsilon$  为应变,其值为:

$$\epsilon = \frac{a_{\text{GaInNAs}} - a_{\text{GaAs}}}{a_{\text{GaAs}}} \quad (14)$$

此外,  $a$  为带隙的流体静力形变势;  $b$  为价带的切形变势;  $\Delta_{\text{so}}$  为自旋-轨道分裂参数;  $a_{\text{GaInNAs}}$  和  $a_{\text{GaAs}}$  分别为 GaInNAs 和 GaAs 的无应变晶格常数;  $c_{11}$  和  $c_{12}$  为倔强系数. GaInNAs 合金的参数可对二元化合物的相应参数采用线性内插获得,计算过程所用参数

值见表 1. 由此可知, 应变引起的重空穴、轻空穴带隙能量变化值为:

$$\Delta E_g = \zeta_{hh, lh}^{sh} + \zeta_{hyd} \quad (15)$$

表 1 闪锌矿型 GaAs, InAs, GaN 和 InN 的相关参数

Table 1 Material parameters used in the calculations for zinc-blende GaAs, InAs, GaN, and InN

Parameter	GaAs	InAs	GaN	InN
$a/\text{nm}$	0.565325	0.60583	0.450	0.498
$\Delta_{so}$	0.34	0.38	0.017	0.006
$m_c^*(m_0)$	0.067	0.026	0.15	0.12
$\gamma_1$	6.85	19.67	2.67	3.72
$\gamma_2$	2.10	8.37	0.75	1.25
$a_c/\text{eV}$	-7.17	-5.08	-2.2	-1.85
$a_v/\text{eV}$	1.16	-1.00	-5.2	-1.5
$b/\text{eV}$	-2.0	-1.8	-2.2	-1.2
$c_{11}/\text{GPa}$	1126	833	293	187
$c_{12}/\text{GPa}$	571	453	159	125

### 2.4 In, N 含量对跃迁能的影响

根据(1)~(15)式, GaInNAs/GaAs 量子阱的基态跃迁能量可以表示为:

$$E = E_n + E_{hh}(E_{lh}) + 0.5[(E_N + E_C) - \sqrt{(E_N - E_C)^2 + 4yV^2}] + \zeta_{hh, lh}^{sh} + \zeta_{hyd} \quad (16)$$

代入相关参数, 计算 GaInNAs/GaAs 量子阱基态光跃迁能量, 即为最低电子和空穴子带间的光跃迁能量.

图 1 给出的是宽为 7nm, In, N 含量不同(N 的含量分别为 0, 1%, 1.6%, 2% 和 3.8%)的  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}_y\text{As}_{1-y}/\text{GaAs}$  量子阱基态跃迁能量的计算结果. 量子阱材料的合金组分(即  $x$  和  $y$ )是通过高分辨 X 射线衍射的谱线与动力学衍射理论(Philips

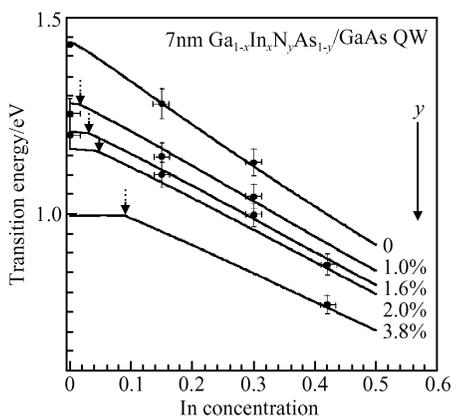


图 1 不同 In, N 含量的 7nm 宽  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}_y\text{As}_{1-y}/\text{GaAs}$  量子阱基态跃迁能量

Fig. 1 Calculated transition energies for a 7-nm-wide  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}_y\text{As}_{1-y}/\text{GaAs}$  QW for various N and In concentration

X'Pert Epitaxy 3.0) 模拟出来的峰进行对照来确定的. 由图可知, N 的引入对带隙能量产生两方面的影响. 第一, 当 In 的含量为零时, 跃迁具有轻空穴特性, 随着 In 含量的增加, 跃迁将从轻空穴特性转变成重空穴特性, 图中垂直箭头指向转变点. 第二, 随着 In 含量的增加,  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}_y\text{As}_{1-y}/\text{GaAs}$  量子阱的跃迁能量减小. 这意味着在 In 含量较高的量子阱结构中, N 对带隙的影响变小.

## 3 实验验证

### 3.1 样品制备及测试条件

在 450°C 下采用分子束外延法生长了一系列 7nm 宽的  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}_y\text{As}_{1-y}/\text{GaAs}$  单量子阱样品. 其结构如图 2 所示. 在量子阱中, N 含量( $y$ )的变化范围为 0~3.8% (误差大约为  $\pm 5\%$ ), In 含量( $x$ )的变化范围则为 0~40%. 表 2 给出的是各个样品中 N, In 的含量.

300nm GaAs
QW1 = 7nm $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}_y\text{As}_{1-y}$
200nm GaAs
QW2 = 7nm $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}_y\text{As}_{1-y}$
GaAs substrate + buffer

图 2  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}_y\text{As}_{1-y}/\text{GaAs}$  量子阱样品结构图

Fig. 2 Schematic picture of  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}_y\text{As}_{1-y}/\text{GaAs}$  QW structures

表 2 7nm 宽的  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}_y\text{As}_{1-y}/\text{GaAs}$  单量子阱样品

Table 2 Samples with 7nm-wide  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}_y\text{As}_{1-y}/\text{GaAs}$  QWs used in this investigation

Sample	QW1	QW2
Sample 1	$x = 0.15, y = 0.000$	$x = 0.15, y = 0.010$
Sample 2	$x = 0.00, y = 0.016$	$x = 0.15, y = 0.016$
Sample 3	$x = 0.30, y = 0.000$	$x = 0.30, y = 0.010$
Sample 4	$x = 0.00, y = 0.010$	$x = 0.30, y = 0.010$
Sample 5	$x = 0.00, y = 0.016$	$x = 0.30, y = 0.016$
Sample 6	$x = 0.42, y = 0.020$	$x = 0.42, y = 0.038$

在室温下测量样品的发光特性, 采用发射波长为 514.5nm 的 Ar 离子激光器作为发射源, 用 0.85m Spex 双光栅分光计分光, 并用液氮冷却的锗探头探测发光信号, 激发功率为 80mW.

### 3.2 结果与讨论

图 3 为室温下  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}_y\text{As}_{1-y}/\text{GaAs}$  单量子阱样品的 PL 谱图. 图 1 中的实心点是由 PL 光谱中推导出的基态光跃迁能的实验值. 由图 1 可见, N,

In 含量在较大范围内变化时,实验结果和计算结果仍符合得很好. 这表明,对于 GaInNAs/GaAs 体系来说,虽然随着实验值的增加,某些参数可能会调整得更好,但上文涉及到的参数选取和适当近似还是合理的.

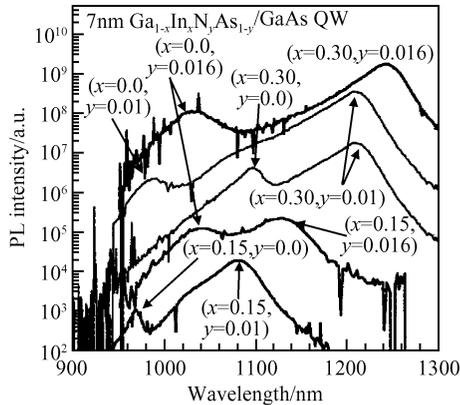


图3  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}_y\text{As}_{1-y}/\text{GaAs}$  单量子阱样品的室温 PL 谱图  
Fig. 3 PL spectra of different single  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}_y\text{As}_{1-y}/\text{GaAs}$  QWs measured at room temperature

## 4 结论

主要采用有效质量近似法计算了  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}_y\text{As}_{1-y}/\text{GaAs}$  量子阱的光跃迁能量,并采用光致发光测量法测定了具有不同 In, N 含量的量子阱的光跃迁情况. 将实验结果与理论结果相比较,二者符合得很好,并简单分析了 N 的加入对 GaInNAs 合金带隙能产生的影响.

## 参考文献

- [1] Livsits D A, Egorov A, Riechert H. 8 W continuous wave operation of InGaAsN lasers at 1.3  $\mu\text{m}$ . *Electron Lett*, 2000, 36(16): 1381
- [2] Jouhti T, Peng C S, Pavelescu E M, et al. Strain-compensated GaInNAs structures for 1.3  $\mu\text{m}$  lasers. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron*, 2002, 8(4): 787
- [3] Neugebauer J, Van de Walle C G. Electronic structure and phase stability of  $\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$  alloys. *Phys Rev B*, 1995, 51(15): 10568
- [4] Saito H, Makimoto T, Kobayashi N. Photoluminescence characteristics of nitrogen atomic-layer-doped GaAs grown by MOVPE. *J Cryst Growth*, 1997, 170(1): 372
- [5] Francoeur S, Nikishin S A, Jin C, et al. Excitons bound to nitrogen clusters in GaAsN. *Appl Phys Lett*, 1999, 75(11): 1538
- [6] Sun B Q, Jiang D S, Pan Z, et al. Influence of dual incorporation of In and N on the luminescence of GaInNAs/GaAs single quantum wells. *Appl Phys Lett*, 2000, 77(25): 4148
- [7] Xin H P, Kavanagh K L, Zhu Z Q, et al. Observation of quantum dot-like behavior of GaInNAs in GaInNAs/GaAs quantum wells. *Appl Phys Lett*, 1999, 74(16): 2337
- [8] Perkins J D, Mascarenhas A, Zhang Y, et al. Nitrogen-activated transitions, level repulsion, and band gap reduction in  $\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$  with  $x < 0.03$ . *Phys Rev Lett*, 1999, 82(16): 3312
- [9] Sham W, Walukiewicz W, Ager J W III, et al. Band anticrossing in GaInNAs alloys. *Phys Rev Lett*, 1999, 82(6): 1221
- [10] Lindsay A, O'Reilly E P. Theory of enhanced bandgap non-parabolicity in  $\text{Ga}_x\text{As}_{1-x}$  and related alloys. *Solid State Commun*, 1999, 112(8): 443
- [11] Perlin P, Wisniewski P, Skierbiszewski C, et al. Interband optical absorption in free standing layer of  $\text{Ga}_{0.96}\text{In}_{0.04}\text{As}_{0.99}\text{N}_{0.01}$ . *Appl Phys Lett*, 2000, 76(10): 1279
- [12] Kwiseon Kim, Alex Zunge. Spatial correlations in GaInAsN alloys and their effects on band-gap enhancement and electron localization. *Phys Rev Lett*, 2001, 86(12): 2001
- [13] Jones E D, Modine N A, Allerman A, et al. Band structure of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$  alloys and effects of pressure. *Phys Rev B*, 1999, 60(7): 4430
- [14] Mattila T, Wei S H, Zunger A. Localization and anticrossing of electron levels in  $\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$  alloys. *Phys Rev B*, 1999, 60(15): R11245
- [15] Kent P R, Zunger A. Evolution of III-V nitride alloy electronic structure: the localized to delocalized transition. *Phys Rev Lett*, 2001, 86(12): 2613
- [16] Buyanova-Chen W M, Pozina G, Bergman J P, et al. Mechanism for low-temperature photoluminescence in GaNAs/GaAs structures grown by molecular-beam epitaxy. *Appl Phys Lett*, 1999, 75(4): 501
- [17] Sun H D, Hetterich M, Dawso M D, et al. Optical investigations of GaInNAs/GaAs multi-quantum wells with low nitrogen content. *J Appl Phys*, 2002, 92(3): 1380
- [18] Mazzucato S, Potter R J, Erol A, et al. S-shaped behaviour of the temperature-dependent energy band gap in dilute nitrides. *Physica E*, 2003, 17: 242
- [19] Loke W K, Yoon S F, Wang S Z. Rapid thermal annealing of  $\text{Ga}_x\text{As}_{1-x}$  grown by radio-frequency plasma assisted molecular beam epitaxy and its effect on photoluminescence. *J Appl Phys*, 2002, 91(8): 4900
- [20] Pavelescu E M, Jouhti T, Dumitrescu M, et al. Growth-temperature-dependent (self-) annealing-induced blueshift of photoluminescence from 1.3  $\mu\text{m}$  GaInNAs/GaAs quantum wells. *Appl Phys Lett*, 2003, 83(8): 1497
- [21] Masia F, Polimeni A, von Högersthal B H G, et al. Early manifestation of localization effects in diluted Ga(AsN). *Appl Phys Lett*, 2003, 82(25): 4474
- [22] Lindsay A, O'Reilly E P. Unification of the band anticrossing and cluster-state models of dilute nitride semiconductor alloys. *Phys Rev Lett*, 2004, 93(19): 196402
- [23] Klar P J, Grüning H, Heimbrodt W. From N isoelectronic impurities to N-induced bands in the  $\text{Ga}_x\text{As}_{1-x}$  alloy. *Appl Phys Lett*, 2000, 76(23): 3439
- [24] Duboz J Y, Gupta J A, Wasilewski Z R, et al. Band-gap energy of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}_y\text{As}_{1-y}$  as a function of N content. *Phys Rev B*, 2002, 66(8): 085313
- [25] Gilet P, Grenouillet L, Duvaut P, et al. Growth and characterization of GaInNAs/GaAs multiquantum wells. *J Vac Sci Technol B*, 2001, 19(4): 1422

## Ground-State Transition Energy in GaInNAs/GaAs Quantum Well Structures\*

Yang Jinghai<sup>1,2,†</sup>, Yang Lili<sup>1,2</sup>, Zhang Yongjun<sup>1</sup>, Liu Wenyan<sup>1</sup>, Wang Dandan<sup>1</sup>,  
Lang Jihui<sup>1</sup>, and Zhao Qingxiang<sup>3</sup>

(1 *Institute of Condensed State Physics, Jilin Normal University, Siping 136000, China*)

(2 *Key Laboratory of Excited State Processes, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

(3 *Department of Physics, Chalmers University of Technology, Göteborg SE-41296, Sweden*)

**Abstract:** The optical transition energy in GaInNAs/GaAs QW structures is investigated from theoretical and experimental aspects. The discrete-level energy and the band-gap energy are calculated using the effective-mass approximation and two-level repulsion model, respectively. The changes in the band-gap energy due to strains are also discussed. The theoretical and experimental transition energies of GaInNAs/GaAs quantum well structures are compared, and they agree well. The effect of N on the transition energies of GaInNAs/GaAs quantum well structures is analyzed simply.

**Key words:** quantum well; optical transition energy; effective-mass approximation; molecular-beam epitaxy

**PACC:** 7280E; 7855E; 3410

**Article ID:** 0253-4177(2006)11-1945-05

---

\* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China(No.2003CD314702-02)

† Corresponding author. Email: jhyang@jlnu.edu.cn

Received 18 April 2006, revised manuscript received 13 June 2006

©2006 Chinese Institute of Electronics