

# $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ 应变量子阱中激子 跃迁能量随 In 组分的变化\*

王晓亮 孙殿照 孔梅影 侯 洵<sup>1</sup> 曾一平

(中国科学院半导体研究所 北京 100083)

(<sup>1</sup> 中国科学院西安光学精密机械研究所 西安 710068)

**摘要** 本文研究了  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$  应变多量子阱中激子跃迁能量随 In 组分的变化。用国产 GSMBE 设备生长了五个样品, 这五个样品的阱宽均为 5nm, 垒宽均为 20nm, 唯一的不同之处是阱层中的 In 组分不同, In 组分从 0.39 变化到 0.68。用 X 射线双晶衍射及计算机模拟确定出了各样品阱层中实际 In 组分。用光致发光谱(PL)、吸收谱(AS)、光伏谱(PV)确定出了样品中的激子跃迁能量。对量子阱中的激子跃迁能量随 In 组分的变化进行了理论计算。结果表明: 对给定阱宽的量子阱, 随着 In 组分的增大, 量子阱中 11H 和 11L 激子跃迁能量减小。11H 与 11L 激子吸收峰间距随 In 组分的变化而变化, 对 5nm 的量子阱, 当  $x = 0.42$  时,  $n = 1$  的重空穴量子化能级简并。当  $x < 0.42$  时, 11L 激子跃迁能量小于 11H 激子跃迁能量; 当  $x = 0.42$  时, 11L 激子跃迁能量与 11H 激子跃迁能量相等; 当  $x > 0.42$  时, 11L 激子跃迁能量大于 11H 激子跃迁能量。实验结果与理论计算结果符合得很好。

PACC: 6865, 7280E, 7855; EEACC: 0510D, 2520D, 2530B

## 1 引言

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$  材料系统在光电子器件领域和微电子器件领域具有重要应用, 利用该材料系统可以制备长波长光纤通信激光器<sup>[1,2]</sup>、高电子迁移率晶体管<sup>[3]</sup>、电光调制器及开关器件<sup>[4-7]</sup>以及探测器<sup>[8-11]</sup>等, 因此该材料系统受到了广泛重视。 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  的特点是既可以匹配地( $x = 0.53$ )生长在 InP 衬底上, 也可以正失配( $x > 0.53$ )或负失配( $x < 0.53$ )地生长在 InP 衬底上, 因此, 利用  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$  材料系统通过共格生长可以形成平面双轴压应变或平面双轴张应变量子阱超晶格材料, 这样, 不仅可以通过合金组分的变化和量子尺寸效应来调节材料和器件的性能<sup>[12,13]</sup>, 而且可以通过晶格失配引入的平面双轴应变来调节材料和器件的性能<sup>[12]</sup>。因此, 平面双轴应变的引入, 为应用能带工程设计能带结构、剪裁材料的光电特性增加了一个新的自由度。在对光电子材料进行分析研究或设计光电子器件时, 需

\* 国家“863”高技术资助项目

王晓亮 男, 1963 年出生, 博士后, 副研究员, 从事半导体微电子及光电子超薄异质结构材料生长、物理及器件研究  
孙殿照 男, 1942 年出生, 研究员, 从事半导体超薄微结构材料及器件生长及特性研究  
1997-04-15 收到, 1997-07-03 定稿

要知道  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$  应变量子阱的光学性质随  $\text{In}$  组分的变化 我们在国产 GSMBE 设备上, 生长了一系列具有不同  $\text{In}$  组分的  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$  应变量子阱超晶格材料, 利用 X 射线双晶衍射、光致发光谱、吸收谱和光伏谱对所生长的样品进行了分析研究, 确定出了量子阱中  $n=1$  轻、重空穴激子跃迁能量随  $\text{In}$  组分的变化规律

## 2 实验

所研究的  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$  应变多量子阱样品的结构如图 1 所示 为了研究应变对多量子阱 SMQW 的影响, 我们生长了五个具有图 1 所示结构的样品, 这五个样品除了 SMQW

InP Be 500nm
i-InP 200nm
SMQW 周期数= 20 阱宽= 5nm 垒宽= 20nm
i-InP 200nm
InP Si 200nm
N-InP Substrate

图 1  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$  应变多量子阱样品结构示意图

区阱层的  $\text{In}$  组分不同、因而应变不同外, 其它参数均相同 用国产 GSMBE 设备生长, III 族源用固态源, V 族源为气态源 固态  $\text{In}$  源和  $\text{Ga}$  源的纯度分别为 7N 和 8N, 气态源浓度为 100% 的高纯  $\text{AsH}_3$  和  $\text{PH}_3$ ,  $\text{AsH}_3$  和  $\text{PH}_3$  裂解炉温度为  $950^\circ\text{C}$  生长温度约为  $500^\circ\text{C}$ , 阱和垒的生长速率均为  $1.0\text{ML}/\text{s}$  生长速率用反射高能电子衍射 (RHEED) 测量 各层的生长时间由各层的厚度和生长速率决定 各层的生长均用计算机自动控制 首先在  $\text{N}^+$  型 (001)  $\text{InP}$  衬底上外延生长 200nm 的掺  $\text{SiN}^+$  型  $\text{InP}$  缓冲层, 接着生长 200nm 厚的不掺杂的  $i$  型  $\text{InP}$  层, 再生长 20 周期的  $\text{InP}$  (20nm)/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  (5nm) 不掺杂  $i$  型应变多量子阱 (SMQW) 区, 在 SMQW 的上面生长 200nm 的不掺杂的  $i$  型  $\text{InP}$  层, 顶层为 500nm 厚的掺  $\text{BeP}^+$   $\text{InP}$  这样, 就形成了 P-i-N 结构

光致发光测量系统包括激发光源、分光单色仪、光探测器、放大器和记录仪以及变温系统 实验中采用 Spectra Physics 公司的 SPEX 1403-0.85 $\mu\text{m}$  双光栅单色仪, 光探测器采用液氮冷却的 Ge 探测器, 锁相放大器用 EG&G 公司的 5206 双锁相放大器 用计算机进行数据采集和记录 激发光源用 He-Ne 激光器 (632.8nm), 激光器的出射功率为 1mW, 测试的狭缝宽度为  $200\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$ .

在进行吸收光谱测量时, 光源用 0.6m 的双单色仪 (HRD) 分光的碘钨灯光源, 用锗 P-i-N 光电二极管探测信号, 经锁相放大器放大后接收 样品装在冷指式的液氮低温恒温器内 样品的透过率 ( $I_1$ ) 用同一光学系统在未放样品时测量的光谱响应 ( $I_2$ ) 相除, 进行归一化处理 用计算机进行数据采集和记录

在进行光伏谱测试时, 样品装在 Air Product 低温机的样品架上, 由卤钨灯 (400W) 发出的光通过斩波器形成矩形脉冲光进入单色仪 (WDG-30), 从单色仪出来的具有一定频率的单色光照射到样品上, 产生光生电压 光生电压以电容耦合的方式引出, 通过静电计管放大后由 EG&G 5206 锁相放大器测出

## 3 实验结果和讨论

### 3.1 阱层中实际 $\text{In}$ 组分的确定

对生长的五个 P-i-N 结构样品进行了 X 射线双晶衍射测试分析<sup>[14]</sup>, 结果表明: (1) 尽

管 SMQW 只有 20 个周期,且 SMQW 上有 700nm 厚的 InP 盖层,在测试的角度范围内,每个样品均至少可以看到 14 个清晰的卫星峰,这说明 SMQW 的质量是很好的 (2) 利用公式  $2d(\sin\theta_1 - \sin\theta_2) = \pm(n_1 - n_2)\lambda$  可以计算出样品中 SMQW 的周期  $d$ , 其中  $\theta_1$  为第  $n_1$  级卫星峰的掠射角;  $\theta_2$  为第  $n_2$  级卫星峰的掠射角;  $\lambda$  为 X 射线波长 计算结果约为 25nm, 与设计值符合得很好 (3) X 射线双晶衍射测试结果表明,五个样品中一个样品(样品 C)处于匹配状态,两个样品(样品 D 和 E)处于平面双轴压应变状态,另外两个样品(样品 A 和 B)处于平面双轴张应变状态 为了确定阱层中的实际 In 组分,应用 X 射线双晶衍射的运动学模型<sup>[15,16]</sup>对五个样品的 X 射线双晶衍射测试曲线进行了计算机模拟<sup>[14]</sup>,由模拟得到的 A、B、C、D、E 五个样品的 In 组分分别为  $x = 0.39, 0.50, 0.53, 0.63, 0.68$

### 3.2 低温光致发光谱测试结果

在 10K 温度下,对 A、B、C、D、E 五个样品进行了低温光致发光谱测试,结果示于图 2 中,由图可知,与 A、B、C、D、E 五个样品谱峰相应的能量分别为 0.980eV、0.923eV、0.899eV、0.825eV 和 0.814eV,相应谱峰的半高宽分别为 8.1meV、7.9meV、9.7meV、10.3meV 和 14.4meV. 该谱峰属于量子阱中与  $n = 1$  能级相应的激子跃迁峰 从图中可以看出随着 In 组分的增大,量子阱中激子跃迁的波长增大(红移).

### 3.3 低温吸收谱测试

为了与上述低温光致发光谱测试结果进行对比,对 A、B、C、D、E 五个样品进行了 10K 吸收谱测试,测试结果如图 3 所示 从图中可以明显地看出 11H 激子吸收峰;随着 In 组分的增大,11H 激子吸收峰红移 另外,对 B、C、D、E 四个样品,还可以清晰地看到 11L 激子吸收

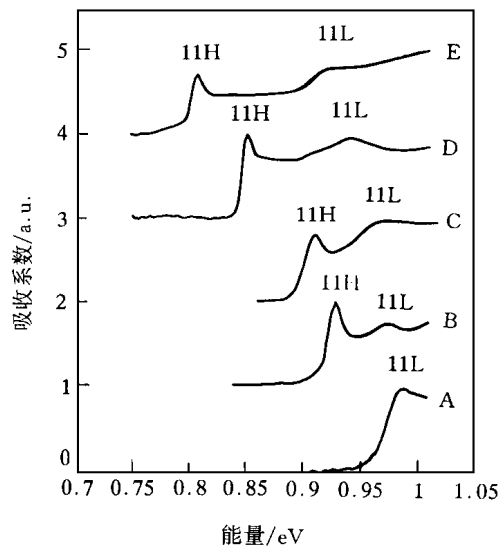
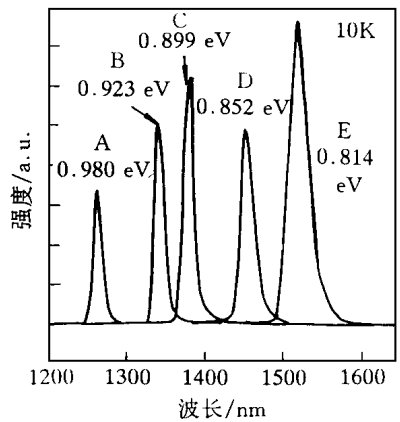


图 3 五个  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$  应变多量子阱样品在 10K 温度下的吸收谱

峰 由图 3 可见,随着 In 组分减小,11H 激子吸收峰与 11L 激子吸收峰之间的距离减小 对这一现象可作如下解释:平面双轴应变可以分解为一个流体静压应变和一个单轴应变两个分量,流体静压应变分量使材料的禁带宽度发生变化,单轴应变分量使轻重空穴带在价带顶的简并消除并使轻空穴带与自旋-轨道分裂带发生混合作用 平面双轴压应变所引起的轻、重空穴能级的分裂与量子尺寸效应所引起的轻、重空穴能级的分裂相反即平面双轴张应变使重空穴带下降,轻空穴带上升;量子尺寸效应使重空穴带上升轻空穴带下降 因此,对于给定阱宽的量子阱,

可以用平面双轴应变的大小(即用 In 组分  $x$ )来调节轻、重空穴带的间距从而达到调节 11H 与 11L 激子吸收峰间距的目的 图 3 所示的 A、B、C、D、E 五个样品的阱宽均约为 5nm, 当 In 组分  $x > 0.53$  时, 阱层处于平面双轴压缩状态, 随着 In 组分的减少, 因平面双轴压缩应变导致的轻、重空穴带的裂距减小, 因而在吸收谱上观察到 11H 激子吸收峰与 11L 激子吸收峰之间的距离减小 当  $x = 0.53$  时, 阱层处于零应变状态, 此时平面双轴应变对轻、重空穴带的裂距完全来源于量子尺寸效应 当  $x < 0.53$  时, 阱层处于平面双轴伸张状态, 平面双轴伸张应变所引起的轻、重空穴带的裂距将会抵消一部分因量子尺寸效应而引起的裂距, 结果使总裂距减小, 体现在吸收谱上就是随着组分  $x$  的减小 11H 激子吸收峰与 11L 激子吸收峰之间距离减小 可以预见, 当 In 组分小到某一值  $x_c$  时, 平面双轴伸张应变所引起的轻、重空穴带裂距将会完全抵消因量子尺寸效应而引起的轻、重空穴带裂距, 结果使量子阱中的轻、重空穴能级出现简并现象, 此时吸收将会增强, 在吸收谱上将会看到 11H 激子吸收峰与 11L 激子吸收峰相重合的现象 如进一步减少 In 组分, 使  $x < x_c$ , 此时因平面双轴伸张应变所导致的轻、重空穴带分裂将起主导作用, 结果使量子阱中的 11L 轻空穴能级高于 11H 重空穴能级, 表现在吸收谱上即是与 11L 相应的激子吸收峰位于低能侧, 而与 11H 相应的激子吸收峰位于高能侧

为了将实验结果与理论计算结果进行对比, 用形变势模型<sup>[17]</sup>对阱宽为 5nm 的  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$  SMQW 中的激子跃迁能量进行了理论计算,

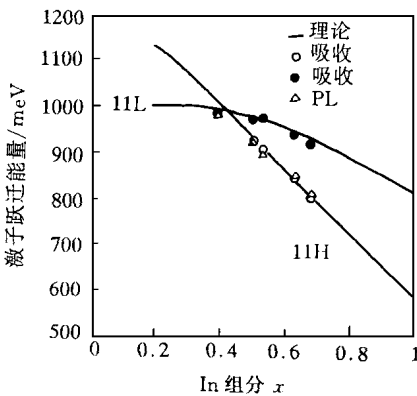


图 4  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$  应变多量子阱中激子跃迁能量的理论值与实验值的比较

图 4 给出了计算结果及理论值与实验值的比较 由图可见理论结果与实验结果符合得很好; 当  $x = 0.42$  时,  $n = 1$  重空穴子能级与  $n = 1$  轻空穴子能级简并 我们在国内首次研究了平面双轴应变对应变  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$  量子阱中激子跃迁能量的影响, 并首次从实验上观察到了  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$  量子阱中 11H 激子吸收峰与 11L 激子吸收峰之间距离随 In 组分(即平面双轴应变)而变化的现象

### 3.4 室温光伏谱测试结果

为了确定室温时  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$  量子阱中激子的跃迁能量, 对样品进行了室温光伏谱测试 光伏谱测试的原理是光生伏特效应在光照射的半导体区域内存在电场时, 光生载流子被电场分离, 若势垒两端开路时, 则在势垒边界两侧形成光生载流子的积累, 从而产生光生电压 光生电压的大小由下式给出:

$$V_{\text{op}}(\lambda) \sim [p(\lambda)/h\nu](1 - R)\eta\{1 - \exp[-\alpha(\lambda)W]\} \quad (1)$$

式中  $V_{\text{op}}(\lambda)$  为光生电压;  $p(\lambda)$  为波长为  $\lambda$  的光的入射光强度;  $R$  为样品前表面的表面反射率;  $\eta$  为样品的量子效率(即每吸收一个光子后能收集的电子-空穴对的个数);  $\alpha(\lambda)$  为吸收区的吸收系数;  $W$  为光子透入样品的深度 在实验中, 一般都保证  $p(\lambda)/\eta$  为常数 一般认为  $R$  和  $\eta$  是  $\lambda$  的缓变函数, 特别当电场较高时, 可取  $\eta$  恒为 1 这样光生电压

$$V_{\text{op}}(\lambda) \sim \{1 - \exp[-\alpha(\lambda)W]\} \quad (2)$$

若  $W$  较小, 则

$$\exp[-\alpha(\lambda)W] \approx 1 - \alpha(\lambda)W \quad (3)$$

故有

$$V_{\text{op}}(\lambda) \sim \alpha(\lambda) \quad (4)$$

可见, 光伏电压与吸收系数成正比, 也就是说, 在一定的条件下, 光伏信号与吸收系数随波长的变化具有相同的线型

对  $i$  区为应变多量子阱的  $\text{P-i-N}$  结构样品, 光伏信号来源于三个方面: (1) 光激发产生的空穴和电子以热发射的方式跨越多量子阱势垒, 分别到达样品的前后面, 产生光伏效应; (2) 势阱内的光生载流子隧穿过势垒, 到达样品的前后面产生光伏效应; (3) 光生载流子在势阱内由于位移效应生的光伏信号. 位移效应是指, 在势垒较厚时, 载流子隧穿过势垒的几率很小, 光激发产生的电子和空穴在  $\text{P-i-N}$  内电场的的作用下, 朝相反的方向运动, 但仍然被限制在势阱内, 结果在势阱两端面出现了正负电荷的积累. 由于我们生长的  $\text{P-i-N}$  结构样品的势垒较厚 (20nm), 又是在室温下测量, 因此光伏信号主要来源于 (1)、(3) 两种机制

图 5 给出了五个样品的室温光伏谱测试结果. 由图 5 可见, 除了样品 A 以外, 从其它四个样品的光伏谱上均可以看到清晰的激子吸收峰, 室温下可以清晰地看到激子吸收峰, 是样品具有较高质量的标志. 样品 A 的室温激子吸收峰不明显, 可能与较大张应变使外延层质量下降有关. 另外, 由图 5 可见, 随着  $\text{In}$  组分的增大, 激子吸收峰的位置向长波长 (低能) 方向移动

## 4 结论

本文研究了  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$  应变多量子阱中激子跃迁能量随  $\text{In}$  组分的变化.  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$  应变多量子阱样品用国产 GSMBE 设备生长, 阱宽为 5nm, 垒宽为 20nm, 周期数为 20,  $\text{In}$  组分从 0.39 变化到 0.68. 对样品进行了 X 射线双晶衍射测试、光致发光谱、吸收谱及光伏谱测试, 确定出了具有不同  $\text{In}$  组分的  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$  应变多量子阱中激子跃迁能量. 用形势变模型对量子阱中的激子跃迁能量进行了理论计算. 结果表明: 量子阱中的重空穴激子跃迁能量及轻空穴激子跃迁能量随着  $\text{In}$  组分的增大而减小. 1H 激子吸收峰与 1L 激子吸收峰的间距随  $\text{In}$  组分的变化而变化, 对 5nm 的量子阱, 当  $\text{In}$  组分  $x > 0.42$  时, 轻空穴激子跃迁能量大于重空穴激子跃迁能量, 且  $\text{In}$  组分越大, 二者差值越大; 当  $x = 0.42$  时, 轻空穴激子跃迁能量与重空穴激子跃迁能量相等; 当  $x < 0.42$  时, 轻空穴激子跃迁能量小于重空穴激子跃迁能量,  $x$  越小, 二者差值越大. 理论计算结果与实验结果符合得很好.

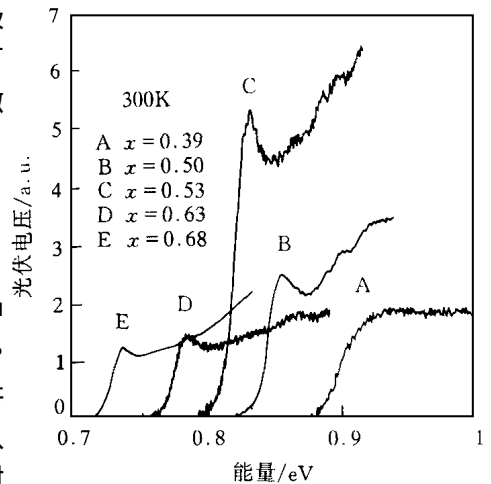


图 5 五个  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$  应变多量子阱样品在 300K 温度下的光伏谱

**致谢** 感谢林兰英院士的关怀和鼓励. 感谢半导体所徐仲英研究员及袁之良博士对样品进行了光致发光谱测试; 感谢半导体所江德生研究员及刘伟同志对样品进行了吸收谱和光伏谱测试.

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Ming C Wu, N. A. Ouson, D. Sivco *et al* , Appl Phys Lett , 1990, **56**: 221.  
 [ 2 ] H. Temkin, T. Tanbun-Ek and R. A. Logan, Appl Phys Lett , 1990, **56**: 1210.  
 [ 3 ] R. M. Kapre, A. Madhukar and S. Goha, Appl Phys Lett , 1991, **58**: 2255.  
 [ 4 ] K. W. Goossen, E. A. Caridi, T. Y. Chang *et al* , Appl Phys Lett , 1990, **56**: 715.  
 [ 5 ] D. Gershoni, R. A. Hamm, M. B. Panish *et al* , Appl Phys Lett , 1990, **56**: 1347.  
 [ 6 ] U. Koren, B. IMiller, T. L. Koch *et al* , Appl Phys Lett , 1987, **51**: 1132.  
 [ 7 ] N. Agrawal, D. Hoffmann, D. Franke *et al* , Appl Phys Lett , 1992, **61**: 249.  
 [ 8 ] H. Temkin *et al* , Appl Phys Lett , 1985, **47**: 394.  
 [ 9 ] J. Kovac *et al* , J. Cryst Growth, 1993, **126**: 151~ 155.  
 [ 10 ] H. Temkin *et al* , Appl Phys Lett , 1986, **49**: 859.  
 [ 11 ] S. D. Gunapala *et al* , Appl Phys Lett , 1989, **58**: 2024.  
 [ 12 ] 王晓亮, 孙殿照, 孔梅影, 等, 红外与毫米波学报, 1997, **6**: 1~ 5.  
 [ 13 ] Wang Xiaoliang, Sun Dianzhao, Kong Meiyang *et al* , J. Cryst Growth, 1996, **164**: 281~ 284.  
 [ 14 ] 王晓亮, 孙殿照, 孔梅影, 等, 半导体学报, 1997, **18**(7): 502~ 507.  
 [ 15 ] V. S. Speriosu and T. Vreeland, J. Appl Phys , 1984, **58**: 1591.  
 [ 16 ] V. S. Speriosu, J. Appl Phys , 1981, **52**(10): 6094~ 6103.  
 [ 17 ] D. Gershoni, H. Temkin, M. B. Panish *et al* , Phys Rev. , 1989, **B39**: 5531.

## Exciton Transition Energies in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ SMQWs as a Function of Indium Composition

Wang Xiaoliang, Sun Dianzhao, Kong Meiyang, Hou Xun<sup>1</sup>, Zeng Yiping

(*Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083*)

(*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068*)

Received 15 April 1997, revised manuscript received 3 July 1997

**Abstract** Exciton transition energies in the  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$  strained multiple quantum wells (SMQWs) as a function of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  quantum well indium composition are studied by using low temperature photoluminescence and absorption spectra as well as room temperature photovoltaic measurements. The experimental results are in good agreement with those calculated by using a deformation potential model. As indium composition increases, the exciton transition energies corresponding to 11H and 11L decrease and the separation between 11H and 11L absorption peaks vary. When  $x < 0.42$ , the 11H energy is larger than 11L energy for a given indium composition; when  $x = 0.42$ , the 11H energy is equal to the 11L energy; when  $x > 0.42$ , the 11L energy is larger than 11H energy.

**PACC:** 6865, 7280E, 7855; **EEACC:** 0510D, 2520D, 2530B