

# 渐变带隙结构在 III-V 族太阳能电池中的应用\*

彭 华 周之斌 崔容强 叶庆好 庞乾骏 陈鸣波 赵 亮

(上海交通大学太阳能研究所, 上海 200240)

**摘要:** 在分析半导体带隙的渐变结构理论的基础上, 研究了具有渐变带隙结构太阳能电池的普遍规律和特点, 采用 AMPS 软件结合相关试验参数对 III-V 族的  $Al_xGa_{1-x}As$  类太阳能电池中渐变带隙结构进行了计算模拟, 并与普通太阳能电池进行了对比分析. 一方面, 带宽的递增或递减构成的势垒可以形成附加电场, 帮助少子收集, 增加少子寿命; 另一方面, 渐变后的带隙会影响实际光谱的吸收效率, 使得总的载流子产额以及可利用部分发生变化. 总结出带隙的渐变结构对载流子实际产生、收集等情况有着多方面的调制作用.

**关键词:** 太阳能电池; 渐变带隙; 载流子产生; 载流子收集

**PACC:** 7280E; 9660; 4270Q

**中图分类号:** TK514 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2005)05-0958-07

## 1 引言

对某些 III-V 族化合物半导体合金(混晶), 其晶格常数和带宽(本文一律使用“带宽”一词来简写和指代“带隙宽度”和“禁带宽度”)一般近似随组份作线性变化, 因此可以生成与衬底材料晶格匹配良好, 同时具有渐变带隙结构的化合物, 如常见的三元化合物  $AlGaAs$ ,  $GaInP$  或四元化合物  $AlGaInP$ ,  $AlGaInAs$  等. 此种结构在实践中已经有相当程度上的应用, 例如利用混合晶体的禁带宽度随组份变化的特性制备发光或激光器件(如  $GaAs_{1-x}P_x$  发光二极管), 以及漂移场电池中利用带隙渐变产生的附加电场帮助载流子收集. 而在太阳能电池领域, 前人的工作<sup>[1-4]</sup>部分是纯理论的大致定性分析, 部分是在实验的基础上结合经验进行研究. 本文给出了具有渐变带隙太阳能电池的理论模型, 研究了渐变带隙太阳能电池的普遍规律和特点, 利用 AMPS 软件和相关试验参数对几类不同渐变带隙结构的  $Al_xGa_{1-x}As$  太阳能电池的特性进行了计算模拟, 获得了此类太阳能电池的一些重要规律和特点.

## 2 渐变带隙结构理论

### 2.1 Harrison 线性模型

对渐变带隙的研究最早起源于异质结两边材料的能带突变研究<sup>[5]</sup>, 例如  $AlGaAs/GaAs$  异质结, 在交界面上存在导带带阶  $E_c$  和价带带阶  $E_v$ , 而  $E_g = E_c + E_v$ . 当把  $GaAs$  看做是三元化合物  $Al_xGa_{1-x}As$  中  $x=0$  时, 那么  $E_v$  和  $E_c$  其实就是  $x$  取不同值时的  $Al_xGa_{1-x}As$  的导带和价带变化量. Harrison 模型认为  $E_v$  等于异质结两边材料的价带顶能量  $E_v$  之差, 而各个  $E_v$  可由紧束缚法所给出的下式来计算<sup>[6]</sup>:

$$E_v = \left( \frac{E_p^c + E_p^a}{2} \right) - \sqrt{\left( \frac{E_p^c - E_p^a}{2} \right)^2 + V_{xx}^2}$$

式中  $E_p^c$  和  $E_p^a$  分别是阳离子和阴离子的 p 态能量;  $V_{xx}^2$  是相邻原子 p 态间的矩阵元, 即有

$$V_{xx}^2 = 2.16\hbar^2 m_e^{-1} d^2$$

式中  $m_e$  是电子的质量;  $d$  是原子间耦合的距离;  $\hbar$  为 Dirac 常数.  $d$  可由晶格常数求出, 对多元化合物半导体, 还需要考虑不同原子在晶格位置的统计分布.

\*上海市科委重大攻关项目(批准号:03bz14014)资助

彭 华 男, 1979 年出生, 硕士研究生, 从事砷化镓高效薄膜太阳能电池研究.

周之斌 男, 副教授, 从事砷化镓高效薄膜太阳能电池、HIT 太阳能电池及 TCO 导电薄膜研究.

2004-04-26 收到, 2004-09-27 定稿

根据 Harrison 模型和修正 Harrison 的模型,并结合一些最新发布的试验结果,可以总结出一些化合物带宽随组份变化的公式.例如,对于  $Al_x Ga_{1-x} As$  情况

$$E_g \quad x < 0.45 \quad 1.424 + 1.247x \quad eV$$

$$E_g = 1.247x \quad eV$$

$$x > 0.45 \quad 1.9 + 0.125x + 0.143x^2 \quad eV$$

$$E_g = 0.476 + 0.125x + 0.143x^2 \quad eV$$

以 0.45 为转折点是因为  $x < 0.45$  时合金半导体材料是直接跃迁型禁带,  $x > 0.45$  时转变为间接跃迁型禁带.

根据 1974 年 Dingle 的研究确定<sup>[2]</sup>,  $E_c = (0.85 \pm 0.03) E_g$  及  $E_v = (0.15 \pm 0.03) E_g$  可以看出带隙的变化主要发生在导带.不过也有其他一些结果,如 Miller 的  $E_c = 0.57 E_g$ ,或近年来发表的一些新的试验数据如  $E_c = 0.67 E_g$ .但无论那些结果都可以看出, $Al_x Ga_{1-x} As$  的带宽在组份  $x$  变化的很大范围内,都可以线性的连续变化.

对  $(Al_x Ga_{1-x})_y In_{1-y} P$  的带隙大小,各文献不尽相同,有以下几种(单位为 eV):

- (1)  $E(x) = 1.91 + 0.61x$ ,  
EX(x) = 2.19 + 0.085x  
转折点  $x = 0.53$  (文献[7])
- (2)  $E(x) = 1.89 + 0.67x$  (文献[8])
- (3)  $E(x) = 1.895 + 1.22x$ ,  
EX(x) = 2.282 + 0.17x  
转折点  $x = 0.56$  (文献[9])

不过同样可以确定的是,其带宽也随着组分  $x$  的变化而线性变化.

Harrison 模型和以上  $Al_x Ga_{1-x} As$  和  $(Al_x Ga_{1-x})_y In_{1-y} P$  的特例证明了渐变带隙结构的理论基础,揭示了渐变带隙结构的理论规律,建立了此类材料在太阳能电池上应用的基础.

### 2.2 渐变带隙太阳电池理论模型

如图 1 所示,此渐变带隙模型在 p 区和 n 区都引入渐变梯度,假定以 p-n 结处为带宽值最低点.  $E_{gh}$  和  $E_{gl}$  分别为带宽变化的上下限,  $z_1$ 、 $z_{p-n}$ 、 $z_2$  等为带宽变化区间参数.

需要注意的是,此图只考虑导带与价带能级差即带宽  $E_g$  从  $E_{gl}$  变化到  $E_{gh}$ ,并没考虑  $E_g$  变化发生的具体位置在价带或是导带.

模型的计算,首先假设:(1)只考虑辐射复合电

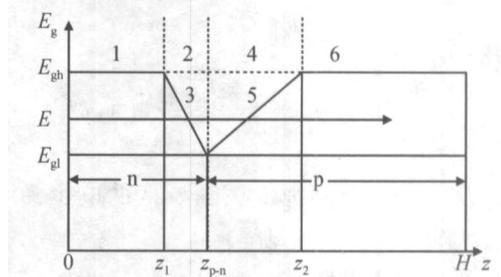


图 1 渐变带隙太阳电池的理论模型

Fig. 1 Theoretical model of Bandgap graded structure solar cell

流不考虑俄歇电流;(2)每个光子只激发一对电子空穴,不考虑个数超过两粒子以上的作用;(3)每对激发的电子空穴都被收集;(3)忽略串并联电阻影响.则有<sup>[2]</sup>:

$$J(V) = J_{ph} - J_R(V) \quad (1)$$

其中  $J(V)$  和  $V$  为电池的电流密度和电压;  $J_{ph}$  为光生电流;  $J_R(V)$  为辐射复合电流.对正入射<sup>[10]</sup>,

$$J_{ph} = q \int_{E_g} S(E) a(E) dE \quad (2)$$

其中  $q$  为电子电量;  $a(E)$  为吸收系数,将在后边讨论;  $S(E)$  为入射辐射光谱(单位光子数/平方米/电子伏特/秒),对于 AM0 光谱,  $S(E)$  可近似用  $T_s = 5759k$  的黑体辐射光谱替代<sup>[10,11]</sup>:

$$S(E) = \frac{2}{h^3 c^2} \times \frac{E^2 \sin^2(\phi_s)}{\exp(E/kT_s) - 1} \quad (3)$$

其中  $\phi_s$  为地球对太阳所张立体角的一半;  $h$  为普朗克常数;  $c$  为真空中光速.

辐射复合电流可写成如下形式:

$$J_R(V) = q \int_{E_g} B(E, V) a(E) dE \quad (4)$$

其中  $B(E, V)$  为电池的辐射光谱,定义为:

$$B(E, V) = \frac{2}{h^3 c^2} \times \frac{E^2 R(\cdot)}{\exp((E - qV)/kT_c) - 1} \quad (5)$$

其中  $T_c$  为电池温度;  $R(\cdot)$  表示再发射光子对复合电流的逃逸角限制,根据电池背面是否镀反射层分为一次通过型和两次反射型.

现在讨论  $a(E)$ , 其由下式积分决定:

$$a(E) = \int_0^H (E, z) \exp(-\int_0^z (E, z) dz) dz \quad (6)$$

其中的  $a(E, z)$  理论上普遍的表达式为

$$(E, z) = a_0 (E - E_g(z))^m \quad (7)$$

而

$$E_g(z) = \begin{cases} E_{gh} & \text{当 } 0 < z < z_1, z_2 < z < H \\ E_{gl} + D_n(Z_n - Z) & \text{当 } z_1 < z < z_n \\ E_{gl} + D_p(Z - Z_n) & \text{当 } z_n < z < z_2 \end{cases} \quad (8)$$

其中  $D_n$  和  $D_p$  分别为 n 区和 p 区的电位梯度(单位伏特/米);  $H$  为电池厚度.

计算过程中需要注意在图 2 所示的 1~6 个不同区域, (6) 式的  $a(E)$  有各自不同的形式, 将 (2) ~ (8) 式代入 (1) 式得到  $J(V)$  表达式求功率极值. 计算的部分结果如表 1 所示.

表 1 参数  $z_1 = 50\text{nm}$ ,  $z_{pn} = 100\text{nm}$ ,  $z_2 = 500\text{nm}$ ,  $H = 600\text{nm}$ , AM0 1SUN 条件下的计算结果

Table 1 Calculated results under AM0 1SUN with parameters set as  $z_1 = 50\text{nm}$ ,  $z_{pn} = 100\text{nm}$ ,  $z_2 = 500\text{nm}$ ,  $H = 600\text{nm}$

	$E_{gl}$ / eV	$E_{gh}$ / eV	$J_{sc}$ / (mA · cm <sup>-2</sup> )	$V_{oc}$ / V	FF / %	Eff / %
1 (GaAs)	1.42	1.42	38.250	1.161	89.46	29.74
2	1.12	1.42	42.954	0.946	87.63	26.21
3	1.29	1.50	38.258	1.096	89.05	27.49
4	1.42	1.92	29.415	1.230	89.93	23.95
5	1.35	2.18	24.061	1.177	89.66	18.69

由表 1 可以总结如下规律:

较低的带宽下限  $E_{gl}$  (平均带宽低) 带来较高的电流密度并同时降低开路电压, 较高的带宽上限  $E_{gh}$  (平均带宽高) 带来较高的开路电压和填充因子并同时降低短路电流.

这些结果不难理解. 能带下限  $E_{gl}$  减小显然会增加光谱响应, 并增加  $E_{gl} < E < E_{gh}$  的光子吸收率, 增加了电流密度; 而高的能带上限  $E_{gh}$  增加高能光子吸收, 增加开路电压.

### 3 软件模拟太阳电池的渐变带隙机构

#### 3.1 决定太阳电池效率的因素

决定太阳电池效率的理论因素很多, 除了本文论及的带宽因素, 还有各外延层厚度、外延层界面情况、俄歇电流的产生等因素.

在晶格匹配的条件下外延层生长易于控制; 厚度方面结合材料吸收系数要保证充分吸收光子能量并小于少数扩散长度等, 既要从理论上考虑, 也要从实践中改进.

界面的影响对太阳电池尤其是 III-V 族化合物电池相当重要, 如果界面控制不好, 会在外延层中产生大量晶体缺陷, 在电池中起着复合中心和旁路的作用, 从而导致表观质量和材料质量明显变差, 显著降低电池性能.

实际情况中, 一般用减小电池厚度来抑止俄歇电流, 但是显然这样易于导致电池对光吸收的不完全和表面复合损失影响加大, 定量的分析<sup>[6]</sup> 可知俄歇复合率  $U(x) \propto \exp(-E_g(x)/V_T)$ , 由此推测渐变带宽电池的一大优点为抑止并局域化了俄歇电流, 将其局限于模型中最低的  $E_g(x)$  附近, 即模型中的 pn 结区域, 因此不必单靠减小厚度来降低俄歇电流. 有计算结果表明, 渐变带宽结构的电池理论上在考虑俄歇电流后可以超过普通电池<sup>[6]</sup>.

本文在综合考虑了其他因素下以带宽作为主要矛盾来加以处理, 采用实际试验中切实可行的结区厚度, 较小的渐变范围相当程度上避免了外延层厚度、界面情况方面的问题, 将其降为次要矛盾.

#### 3.2 模型与参数设置

可以说, 带隙渐变结构是调节载流子产生和收集两种机制的杠杆, 从这方面着手来优化提高太阳电池效率, 是将渐变带隙结构引入太阳电池的主要目的. 由于在之前的理论模型中并没有显露附加电场的收集作用, 故接下来用软件来具体研究和深化渐变模型.

III-V 族化合物  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , GaInP 类是广泛应用在异质结面太阳电池和叠层电池的顶电池材料. 以  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  来说明, 首先  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-\text{GaAs}$  的晶格失配常数  $< 0.04\%$ , 易于在 GaAs 或 Ge 衬底上生长; 其次, 从理论上来说, 材料禁带宽度的提高一方面提高了太阳电池开路电压  $V_{oc}$ , 另一方面减小了短路电流  $I_{sc}$ , 综合起来禁带宽度在 1.5eV 左右的材料制成太阳电池可获得最高的效率, 而依据前面的  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  计算公式, 在  $x$  较小时, 其禁带宽度接近 1.5eV ( $x = 0.08$  时  $E_g = 1.523\text{eV}$ ). 故此我们用软件模拟技术比较了非渐变的  $\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}$  同渐变带隙的  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x$  从 0.18 至 0.08 以及 0.08 至 0, 相应的  $E_g$  从 1.648 至 1.524eV 以及 1.524 至 1.424eV) 电池的一些特性.

我们应用美国宾州大学的 AMPS (analysis of microelectronic and photonic structures) 模拟软件进行研究, 其理论方法是结合各自相关的两个边界

条件求解 Poisson 方程和自由空穴、自由电子连续性方程这三个耦合的非线性方程组;计算编程中应用了有限差和牛顿-拉普森方法.

计算中,我们用 p 区渐变的模型(递增和递减)来模拟研究渐变带隙结构的特性,渐变带隙结构构建在 pn 结区的受光面,即激发区时的情况.在 n 区构建渐变带隙结构的情况,也有类似的规律.

如图 2 所示,此模型为一个 p 区渐变的 p-n 型太阳能电池,由于原 AMPS 并没有包含渐变带隙模式,所以在模拟计算中将渐变区域视为以 x 每变化 0.01μm 的薄层堆叠而成,电池各项参数均由实际

可行的方案<sup>[1]</sup>而决定,如表 2 所示.

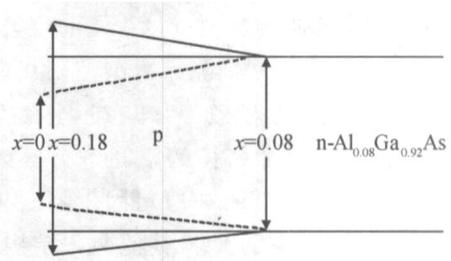


图 2 渐变带隙结构模型

Fig. 2 Bandgap graded model sketch

表 2 实际模型参数

Table 2 Practical parameters of bandgap graded model

厚度/μm	掺杂浓度/cm <sup>-3</sup>	介电常数	禁带宽度/eV	有效态密度/cm <sup>-3</sup>	迁移率/(cm <sup>2</sup> ·V <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )
p 区:0.25	p 区:NA=3×10 <sup>18</sup>	11.0	1.648~1.524(递减)	NC=3.8×10 <sup>19</sup>	电子:5~8×10 <sup>3</sup>
n 区:2.5	n 区:ND=3×10 <sup>17</sup>		1.424~1.524(递增)		

电子亲和能 从 4.00eV 开始变化,组分 x 变化使得 Ec 和 Ev 都变化,x 每变化 0.01μm, Eg (= Ec + Ev)变化 1.247x=0.01247eV, 约变化 Eg/2=0.005eV. AM1.5 光谱的吸收范围限定于波长 0.90μm 至 0.32μm,相应的光子能量 1.3776 至 3.8745eV.

### 3.3 模拟结果

图 3~7 显示出模拟的结果.

图 3 中给出的三条曲线分别代表了图 2 的三种模型即带宽递减(点条线)、递增(条线)和不变(直线)的模型,可以看出,由带宽 Eg、电子亲和能及软件内在机理(Poisson、连续性方程)所决定的带隙渐变,主要局限于 p 区导带.这并不难理解,因为在 p 区掺杂浓度 NA 不变的前提下,费米能级要保持水平连续,必定使得价带底也处于水平状态.

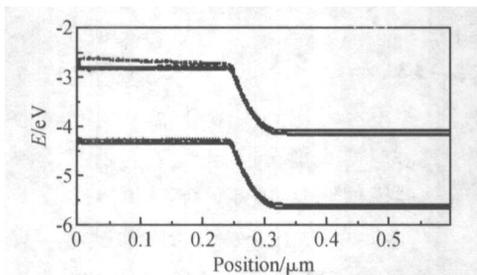


图 3 三种模型能带图

Fig. 3 Thermodynamic equilibrium diagram of three bandgap graded models

图 4 和图 5 两图(两图中递增和非渐变模型两曲线基本重合),分别给出了带隙渐变对载流子的寿命影响的结果.对电子来说,寿命由高到低为非渐变带隙型、带隙递增型、带隙递减型,但并没有明显的

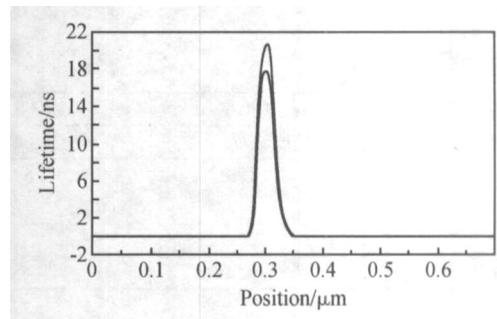


图 4 电子寿命曲线图

Fig. 4 Diagram of electron lifetime for three bandgap graded models

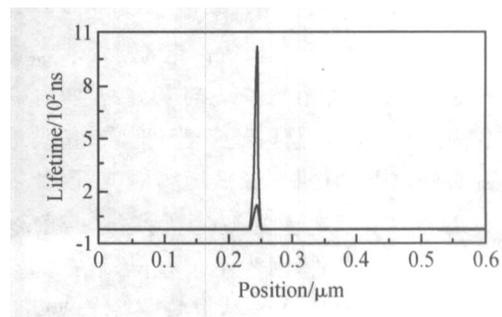


图 5 空穴寿命曲线图

Fig. 5 Diagram of hole lifetime for three bandgap graded models

变化;而对空穴寿命来说,带隙递减型结构所表现的寿命在 p-n 结区(0.25 $\mu\text{m}$  附近)远大于另外两种结构,这充分说明了附加电场对 n 区少子的收集作用.

然而图 6 显示,尽管带隙递减型结构在电池迎光面有较高的载流子产生效率,却在起主要作用的 p-n 结空间电荷区(三种结构的空电荷区因其掺杂浓度一定几乎不变,并未如所想因带隙变化有明显延长),即 0.25 $\mu\text{m}$  附近低于其他两种结构,因此图 5 中所示的 0.25 $\mu\text{m}$  附近空穴寿命的显著提升,最终未能带来预期的改善效果.由图 5 和图 6 表明了此递增模型的两个互相制约的方面,附加电场在利于高能光子吸收、增加 p-n 结区少子寿命的同时带宽的构造却使得光谱吸收效率减小,因其增加的高能光子远离空间电荷区未被充分利用,而处在空间电荷区的产额却减少,使得总的光生载流子产额减少.而增加空间电荷区的长度并不在本文讨论之列,因本模拟已经按照实际可行的方案进行参数设计,为了客观可行不可任意夸张改变掺杂浓度等条件.

模拟效率结果见表 3(渐变范围均在 p 区).

表 3 模拟结果

Table 3 Simulation result

	$\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}$	$\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As} \sim \text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}$	$\text{Al}_{0.00}\text{Ga}_{1.00}\text{As} \sim \text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}$
$E_g/\text{eV}$	1.52376	1.64846 ~ 1.52376(递减)	1.424 ~ 1.52376(递增)
$J_{sc}/(\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2})$	26.194	21.792	26.444
$V_{OC}/\text{V}$	0.961	0.964	0.961
FF/ %	87.5	87.6	87.5
Eff/ %	22.044	18.408	22.245

## 4 分析讨论

表 3 的模拟结果反映出,渐变带隙电池的效率有可能超过普通非渐变带隙结构电池,另外带宽递增至非渐变 n 区时,有稍高一些的电流密度,开路电压基本不变;带宽递减至非渐变 n 区时,有稍高的开路电压和填充因子,但明显降低短路电流,因此效率的变化主要是由短路电流的变化所致.这与前述理论模型的结果是吻合的,因为不难看出,表 1 的数据中若让  $\tau_{p-n} = \tau_2$ ,理论计算的结果规律不会变化,而此时模型即完全等同于软件模拟的图 2 模型.

当把渐变区域构建在 n 区时,有相对应一致的规律,所不同的是 n 区的递增、递减与 p 区的作用相

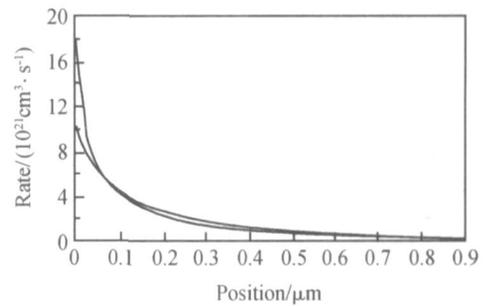


图 6 总光生载流子产额

Fig. 6 Generation diagram of three bandgap graded models

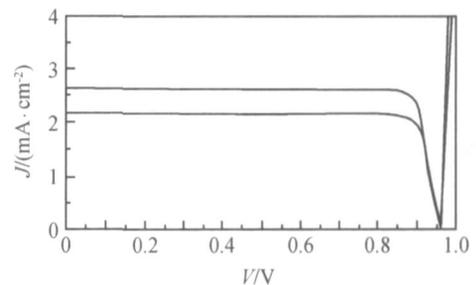


图 7 光照时特性曲线图

Fig. 7 Light  $I$ - $V$  diagram of three bandgap graded models

反,因为 n 区电子为少子,同时电子迁移率大于空穴,效率略微上升.

然而理论模型的计算还反映出渐变带宽的电池效率无法超过普通非渐变电池,软件模拟却显示有可能超过(即  $\text{Al}_{0.00}\text{Ga}_{1.00}\text{As}$ (即  $\text{GaAs}$ ) 渐变至  $\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}$  的模型),这是因为理论模型有相当多的假定,并没有考虑到少子寿命、内建电场收集效率等等因素,使得只能分析出效率上限和反映大致规律,而软件模拟则从更为实际的角度综合考虑载流子产生与收集的作用.另外,带隙递减型尽管极大地增强了少子收集能力使其寿命增加,但是效率却最低,这表明所处光谱范围内,总光通量一定、空间电荷区并无显著变化的前提下,产生少子占主导地位,表面附近载流子产生的增加导致空间电荷区产

生的减少,少子寿命的单纯增加无法弥补载流子产额减少带来的损失(而效率最高的递增模型正与此相反,表面附近载流子产生及少子寿命与非渐变结构无明显区别的同时空间电荷区产生略微增加)。

由此可以分析出,实际的模型中影响效率的主要因素为渐变带隙在太阳能电池中的构造区域和幅度,以及对应吸收的光谱范围和光通量,决定光生载流子的产额和产生区间并影响渐变带隙收集作用的效果。

不难推断最理想的带隙渐变不应该是线性渐变,而应该是有选择的阶梯型渐变,类似叠层太阳能电池的微型化。为了提高太阳能电池的效率,带隙渐变结构作为调节载流子产生和收集两种机制的杠杆,关键在于调整层面数、厚度、掺杂等使得材料最大程度吸收光谱能量产生光生载流子的同时,利用带隙的渐变结构增加少子收集能力。局限性在于构造带隙渐变实际是通过很多台阶构成,对复合中心和缺陷过于敏感,对于实际生长时各层表面的工艺要求也比较苛刻。将其拓展出去的叠层太阳能电池,在合理利用各主要光谱段的同时,层面的个数也减少,因此其效率容易提高。

实际实验中更要考虑工艺技术的决定性作用,这一点可由文献[1]所进行的实验表明,其参数与表二相同,其中提到同质结  $\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}$  电池效率为 17%,未做优化时渐变带隙电池  $\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}$  ( $x$  从 0.08 ~ 0.30) 效率仅有 14.5%,然而在优化了气源(MOVPE 工艺),改进材料质量,减少了厚度和渐变范围后,效率可以达到 19.5%,已经超过性能良好的普通电池。

## 5 总结

结合理论基础,采用 AMPS 软件结合相关试验参数建立 / 族的  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  类太阳能电池中渐变带隙结构模型,对其电子寿命、空穴寿命、总光生载流子产额等参数进行了模拟分析,得出带隙的渐变结构对载流子实际产生、收集等情况有着多方面

的调制作用的结论,确定渐变带隙在太阳能电池中的构造区域和幅度,以及对应吸收的光谱范围和光通量为影响太阳能电池效率的主导因素。在进一步结合实验条件下,太阳能电池的渐变带隙结构有一定的应用前景。

## 参考文献

- [ 1 ] Timmons M L, Venkatasubramanian R, Colpitts T S, et al. Graded-band-gap AlGaAs solar cells for AlGaAs-Ge cascade cells. IEEE PV Specialist Conference, 1990
- [ 2 ] Rafat N H, Habib S E D. The limiting efficiency of band gap graded solar cells. Solar Energy Materials & Solar Cells, 1998, 55:341
- [ 3 ] Araujo G L. Limits to efficiency of single and multiple band gap solar cells. Physical Limitations to Photovoltaic Energy Conversion, 1990:106
- [ 4 ] Kumar K P, Dasgupta A. An analytical model for conduction and valence band edge profiles of bandgap graded and displaced heterojunctions. Solid-State Electronics, 1998, 42(10): 1779
- [ 5 ] Sun Lianliang, Li Shushen, Zhang Rong. New progress in physics of semiconductor. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(10):1115 (in Chinese) [孙连亮, 李树深, 张荣. 半导体物理研究新进展. 半导体学报, 2003, 24(10):1115]
- [ 6 ] Xie Mengxian, Liu Nuo. Compound semiconductor and device. Chengdu: Electronic Technology University Press, 2001 (in Chinese) [谢孟贤, 刘诺. 化合物半导体材料与器件. 成都: 电子科技大学出版社, 2001]
- [ 7 ] Stringfellow G B, Craford M G. High brightness light emitting diode-semiconductors and semimetals Volume 48, Academic Press, San Diego, California, USA, 1997
- [ 8 ] Kaneko Y, Kishino K. Refractive indices measurement of  $(\text{GaInP})_m/(\text{AlInP})_n$  quasi-quaternaries and GaInP/AlInP multiple quantum wells. J Appl Phys, 1994, 76(3):1809
- [ 9 ] Zhang X H, Chua S J, Fan W J. Band offsets at GaInP/AlGaInP(001) heterostructures lattice matched to GaAs. Appl Phys Lett, 1998, 73:1098
- [ 10 ] Fowles G R. Introduction to modern optics. Dover Publications, 1975
- [ 11 ] Parrott J E. Choice of an equivalent black body solar temperature. Sol Energy, 1993, 51(3):195

## Research on $\lambda$ -Bandgap Graded Solar Cells \*

Peng Hua , Zhou Zhibin , Cui Rongqiang , Ye Qinghao , Pang Qianjun , Chen Mingbo , and Zhao Liang

(*Institute of Solar Energy, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China*)

**Abstract :** This paper presents a theoretical analysis for solar cells with a graded bandgap structure. The impacts of graded bandgap structures on the performances of  $\lambda$  /  $\mu$  compound  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  solar cells are simulated using AMPS model developed at Penn State University with a set of practical parameters. Investigation and comparison for several different graded bandgap solar cells are carried out ,and the modulation effects of graded bandgap on the generation and collection of minority carriers are demonstrated.

**Key words :** solar cell ; bandgap graded ; generation aided ; collection aided

**PACC :** 7280E ; 9660 ; 4270Q

**Article ID :** 0253-4177(2005)05-0958-07

---

\* Project supported by Key Program of Shanghai Science and Technology Ministry(No. 03bz14014)

Peng Hua male ,was born in 1979 ,graduate student. He is now engaged in research on high efficiency GaAs film solar cells.

Zhou Zhibin male ,associate professor. He is now engaged in research on high efficiency GaAs film solar cells ,HIT solar cells ,and TCO films.

Received 26 April 2004 ,revised manuscript received 27 September 2004

© 2005 Chinese Institute of Electronics