

# a-Si(n)/c-Si(p) 异质结太阳能电池薄膜硅背场的 模拟优化<sup>\*</sup>

赵 雷<sup>†</sup> 周春兰 李海玲 刁宏伟 王文静

(中国科学院电工研究所太阳能电池技术研究室, 北京 100080)

(2007 年 9 月 4 日收到, 2007 年 10 月 31 日收到修改稿)

采用 AFORS-HET 数值模拟软件, 对不同带隙的薄膜硅材料在 a-Si(n)/c-Si(p) 异质结太阳能电池上的背场效果进行了模拟, 分析了影响背场效果的原因, 得到了薄膜硅背场在 a-Si(n)/c-Si(p) 异质结太阳能电池上的适用条件为薄膜硅材料是带隙 1.6 eV, 硼掺杂浓度在  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  以上的微晶硅材料, 其最佳厚度在 5 nm 左右. 这种背场从工艺上易于实现, 并且, 与常用的 Al 扩散背场相比, 在相同的掺杂浓度下, 电池效率可以大大提高.

关键词: 薄膜硅, 背场, 硅异质结太阳能电池

PACC: 7340L, 8630J

## 1. 引 言

1994 年, 日本 SANYO 公司采用织构化的 n 型 CZ 单晶硅衬底(c-Si(n))作吸收材料, 通过 PECVD 在其上低温淀积 p 型非晶硅(a-Si(p))发射极, 发明了效率 > 20% 的硅异质结太阳能电池<sup>[1]</sup>. 由于这种电池在吸收区和发射极之间插入了一层很薄的本征非晶硅层来钝化异质结的界面, 因此称为 HIT (heterojunction with intrinsic thin-layer) 电池. 与传统的通过扩散制备 pn 结的晶硅太阳能电池相比, 这种硅异质结太阳能电池具有显著的优点<sup>[2,3]</sup>, 这种电池可以同时实现 pn 结和优异的表面钝化, 并且所有工艺可在低温 (< 200°C) 下完成, 既减少了能耗, 又能避免硅片在高温处理过程中可能产生的性能退化. 因此, 硅异质结太阳能电池迅速成为了国际上的研究热点<sup>[2-6]</sup>.

背场是用来提高太阳能电池效率的有效手段. 所谓背场指的是可对光生少子产生势垒效果的区域, 从而减少光生少子在背表面的复合. 这个势垒不但可以提高光电流, 还可以在一定程度上提高光电压<sup>[7]</sup>. 背场的一种实现方法是利用具有合适功函数的金属与衬底直接接触, 靠肖特基势垒在半导体中

所引起的能带弯曲起到背场效果. SANYO 公司最初在 HIT 上采用的就是这种背场<sup>[1]</sup>. 但这种结构对接触金属的功函数有严格要求, 并且金属半导体接触界面也不太好处理. 金属接触背场在太阳能电池上并不适用. 另外的方法是靠一层与吸收区掺杂类型相同, 但掺杂浓度更高的掺杂层来实现. 在传统硅太阳能电池中, 针对 p 型硅衬底, 常用的是 Al 扩散背场或者 B 扩散背场, 即在硅衬底背面通过 Al 扩散或者 B 扩散, 形成 p<sup>+</sup> 掺杂层, 其中前者是更加产业化的技术<sup>[8]</sup>. 而 SANYO 公司采用重掺的 n 型非晶硅层作为 HIT 电池的背场, 从而保证了背场结构同样可采用低温工艺实现, 使得单晶硅片免于在高温下性能退化. 并且, 由于非晶硅类材料一般用 PECVD 方法淀积制备, 掺杂和淀积是同时进行的, 容易实现层内的均匀掺杂, 也有利于将背场控制在最小厚度, 节省材料<sup>[1]</sup>.

尽管 SANYO 发展的 HIT 电池采用的是 n 型衬底, 但传统的硅太阳能电池更多的是以 p 型硅衬底作为光吸收区. 根据市场的需要, 国际上更多的研究机构将研究重点集中在了 p 型硅衬底上<sup>[9-11]</sup>. 多数研究者认为, 由于在能带匹配上, 非晶硅和单晶硅之间的价带失配远大于导带失配, 使得在 p 型衬底上采用非晶硅背场结构并不能得到像 SANYO 那样在 n

<sup>\*</sup> 国家高技术研究发展计划(863)批准号 2006AA05Z405 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: zhaolei@mail.iee.ac.cn

型衬底上得到的效果<sup>[2,12]</sup>。所以,在 p 型硅衬底上进行的很多硅异质结太阳能电池的研究工作都采用 Al 扩散背场结构,这仍然需要高温烧结工艺才能实现<sup>[13-15]</sup>。只有少数研究采用了非晶硅背场结构,所得最好结果也只与采用 Al 扩散背场的结果相当<sup>[2,16]</sup>。近来,有几个研究组采用重掺的微晶硅层作背场也获得了比较好的效果<sup>[3,10]</sup>。Rostan 等<sup>[17]</sup>将微晶硅背场应用在传统的磷扩散发射结硅太阳能电池上,在 0.99 cm<sup>2</sup> 结构的 p 型 FZ 硅衬底上得到了 21% 的转换效率。但是最近,美国 NREL 研究组对非晶硅背场 HIT 电池进行了研究,结果,在 1 cm<sup>2</sup> 结构的 p 型 FZ 硅衬底上得到了 18.2% 的转换效率<sup>[18]</sup>,这似乎又表明非晶硅背场存在的问题并不像通常认识的那样严重。显然,由于上述薄膜硅材料可以在低温下制备所带来的诸多好处,无论是非晶硅背场还是微晶硅背场,只要能够获得高的转换效率,就都要比 Al 背场具有优势。因此,比较确定到底什么样的薄膜硅材料最适合在 p 型硅衬底上用作背场就具有了重要意义。但是,由于薄膜硅材料是一类随制备工艺结构变化很大的材料,从实验上提供完备的数据需要大量工作。并且,由于受实际制备条件的影响,各研究组之间已有的有限结果也只具有一定的可比性,正如上述,有时甚至不太一致。因此,有必要从理论上对各种薄膜硅背场结构的效果与 Al 背场的效果进行比较分析,并对效果最好的背场结构进行具体优化,以为实验提供必要的参考。

a-Si/c-Si 异质结太阳能电池的基本结构是发射区/单晶硅基区/背场区,太阳光从发射区前面入射,进入单晶硅基区后被吸收,光生电子(空穴)和空穴(电子)靠扩散输运到前面 pn 结区和背面高低结区,在结区空间电场的作用下分别向发射区和背场区漂移。在实际制作过程中,需要发射区尽可能具有高的电导率,低的光吸收,在保证 pn 结性能的情况下发射区尽可能薄,从而使光尽可能多的进入到单晶硅基区中,并在那里被吸收;对背场而言,希望利用的是高低结区对光生少子的背反作用,而这种作用主要取决于两边材料的能带匹配和掺杂浓度。尽管薄膜硅结构变化,其光电特性,如缺陷态密度、迁移率等也会变化,但由于在异质结太阳能电池上用作背场时,薄膜硅并不起光吸收的作用,所需的材料厚度也很小,模拟结果表明这些性能的变化只对太阳能电池性能有较弱的影响。影响异质结太阳能电池性能的最主要因素还是单晶硅基区的光电性质和前后两个

结区的能带结构。

因此,本文决定采用 AFORS-HET 模拟软件,选取薄膜硅材料的带隙和掺杂浓度作为可变参数,来理论模拟薄膜硅背场结构变化对 a-Si(n)/c-Si(p) 异质结太阳能电池性能的影响,以优化背场结构。AFORS-HET 软件是德国 Hahn-Meitner 研究所针对异质结电池专门研发的模拟软件,可以数值模拟各种结构因素对太阳能电池性能的影响。已有很多工作都证明了该软件模拟结果的可靠性<sup>[19-21]</sup>。

## 2. AFORS-HET 物理模型与模拟结构

### 2.1. AFORS-HET 物理模型

AFORS-HET 模拟中求解如下半导体稳态方程:

$$\frac{\partial D}{\partial x} = + q(p - n + \rho + N_D - N_A), \quad (1)$$

$$\frac{\partial J_n}{\partial x} = - q(G - R_n), \quad (2)$$

$$\frac{\partial J_p}{\partial x} = + q(G - R_p), \quad (3)$$

其中,  $D$  是电位移矢量,  $q$  是单位电荷,  $p$  和  $n$  分别是空穴和电子密度,  $\rho$  是带间净陷阱电荷,  $N_A$  和  $N_D$  分别是受主和施主浓度,  $G$  是光生载流子产生速率,  $R_n$  和  $R_p$  分别是电子和空穴的复合速率。复合模型采用 Auger 复合,直接带间复合和 Shockley-Read-Hall 复合,采用 Boltzmann 统计来计算电子和空穴的浓度。

求解中选用电压控制边界条件,将前接触( $x = 0$ )的电势固定为 0,边界条件为

$$\varphi(0) = 0, \quad (4)$$

$$J_n(0) = + q \cdot S_n^t(n(0) - n_{eq}(0)), \quad (5)$$

$$J_p(0) = - q \cdot S_p^t(p(0) - p_{eq}(0)). \quad (6)$$

背接触( $x = w$ )的电势等于所施加的电压  $V$ ,边界条件为

$$\varphi(w) = \phi_f - \phi_b + V, \quad (7)$$

$$J_n(w) = - q \cdot S_n^t(n(w) - n_{eq}(w)), \quad (8)$$

$$J_p(w) = + q \cdot S_p^t(p(w) - p_{eq}(w)), \quad (9)$$

其中,  $\phi_f$  和  $\phi_b$  分别为前接触和背接触金属的功函数,  $S$  是所对应的载流子在接触面上的复合速率。

利用 AFORS-HET 求解上述半导体方程,可以对电池的 IV, IQE, SPV, CV 等多种性能进行数值模拟,更具体的原理和模型可以在文献 [19, 20] 中找到。

### 2.2. 模拟电池结构

所模拟的太阳电池结构如图 1 所示,为 a-Si(n)/c-Si(p)/pm-Si(p<sup>+</sup>) 其中 a-Si(n)为 n 型非晶硅层,c-Si(p)为 p 型晶体硅衬底,pm-Si(p<sup>+</sup>)为 p<sup>+</sup> 薄膜硅背场. 模拟时各层所采用的一些结构参数在表 1 中列出. 这些结构参数中除了可变参数外,均取自 AFORS-HET 软件的默认值,包括如下缺陷态分布的选取. 取晶体硅无带尾态,体内氧空位缺陷密度为  $1.9 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ ,对应能量位置在带隙内离价带顶 0.94 eV 处. 非晶硅具有 Urbach 带尾,导带带尾特征能量为 0.035 eV,价带带尾特征能量为 0.068 eV,总态密度均为  $7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ;带间定域缺陷态按双 Guass 分布,其中,对 a-Si(n),取类施主缺陷态密度为  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,高斯峰峰值能量(离价带顶的能量)为 0.616 eV,峰值半宽为 0.22 eV,类受主缺陷态密度为  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,高斯峰峰值能量为 0.716 eV,峰值半宽为 0.22 eV;对 a-Si(p),取类施主缺陷态密度为  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,高斯峰峰值能量为 1.1 eV,峰值半宽为 0.22 eV,类受主缺陷态密度为  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,高斯峰峰值能量为 1.2 eV,峰值半宽为 0.22 eV. 在实际的太阳电池中,在各层材料之间存在界面缺陷态,这会影响太阳电池的性能,应尽量减少和避免. 已有研究结果表明,将界面态密度控制在  $10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$  以下,就基本对硅异质结太阳电池的性能没有影响<sup>[21]</sup>. 模拟过程中忽略界面态的影响,取无界面态的理想情况. 模拟光照条件为 AM1.5, 100 mW/cm<sup>2</sup>,并假定太阳电池表面的反射率为 0.1,背面发射率为 1. 前后电极均为欧姆接触,取电子和空穴在前后接触面的表面复合速率均为  $1 \times 10^7 \text{ cm/s}$ .

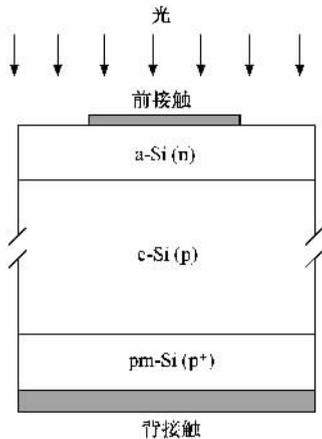


图 1 模拟太阳电池结构示意图

表 1 模拟中所取 a-Si(n)/c-Si(p)/pm-Si(p<sup>+</sup>) 太阳电池主要结构参数

结构参数	c-Si(p)	a-Si(n)	a-Si(p <sup>+</sup> )
层厚 /nm	$3 \times 10^5$	5	5
介电常数	11.9	11.9	11.9
电子亲和势 /eV	4.05	3.9	3.9
带隙 /eV	1.12	1.74	1.74
光学带隙 /eV	1.12	1.74	1.74
有效导带密度 /cm <sup>-3</sup>	$2.8 \times 10^{19}$	$1 \times 10^{20}$	$1 \times 10^{20}$
有效价带密度 /cm <sup>-3</sup>	$1.04 \times 10^{19}$	$1 \times 10^{20}$	$1 \times 10^{20}$
电子迁移率 /cm <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>	1041	5	5
空穴迁移率 /cm <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>	412	1	1
受主掺杂浓度 /cm <sup>-3</sup>	$1.5 \times 10^{16}$	0	可变
施主掺杂浓度 /cm <sup>-3</sup>	0	$2.5 \times 10^{19}$	0
电子热速度 /cm·s <sup>-1</sup>	$1 \times 10^7$	$1 \times 10^7$	$1 \times 10^7$
空穴热速度 /cm·s <sup>-1</sup>	$1 \times 10^7$	$1 \times 10^7$	$1 \times 10^7$
层密度 /g·cm <sup>-3</sup>	2.328	2.328	2.328
电子俄歇复合系数 /cm <sup>6</sup> s <sup>-1</sup>	$2.2 \times 10^{-31}$	0	0
空穴俄歇复合系数 /cm <sup>6</sup> s <sup>-1</sup>	$9.9 \times 10^{-32}$	0	0
带间复合系数 /cm <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	0	0	0

### 3. 结果分析与讨论

#### 3.1. 非晶硅背场

先取 pm-Si(p<sup>+</sup>)背场就是 a-Si(p<sup>+</sup>)背场,采用表 1 中所给出的结构参数,模拟 a-Si(p<sup>+</sup>)掺杂浓度  $N_A$  变化对电池性能的影响. 如图 2 所示,随着掺杂浓度的提高,电池的短路电流基本不变,开路电压和填充因子都有逐渐提高,电池效率随之增大. 这与 c-Si(p)/a-Si(p<sup>+</sup>)背场的能带结构有关. 如图 3 中所示,根据表 1 中所给出的电子亲和势和带隙的大小,

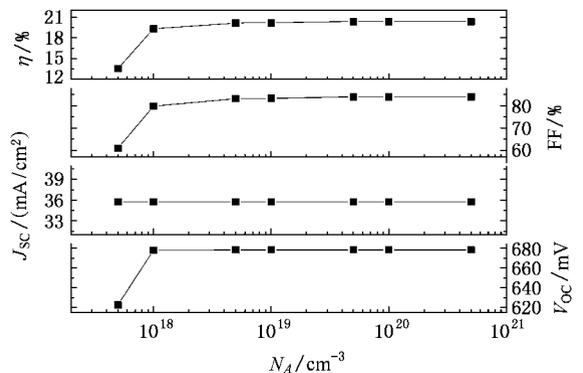


图 2 非晶硅背场 a-Si(p<sup>+</sup>) 掺杂浓度对太阳电池性能的影响

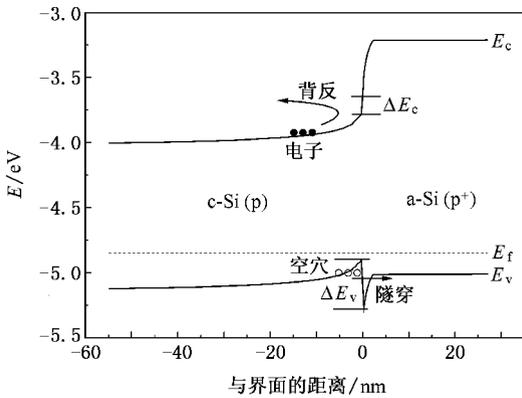


图3 c-Si(p)a-Si(p<sup>+</sup>)背场的能带结构

可以算出 c-Si(p)与 a-Si(p<sup>+</sup>)之间的能带失配主要发生在价带之间,价带失配  $\Delta E_v$  与导带失配  $\Delta E_c$  之间的比率大约等于 3:1. 这也与文献 [22] 中所给出的实验结果一致.  $\Delta E_c$  有利于形成少子(电子)的背场,而  $\Delta E_v$  却给多子(空穴)的输运形成势垒,从而给多子从 c-Si(p) 渡越到 a-Si(p<sup>+</sup>) 中造成障碍. 这也是一直以来认为 a-Si(p<sup>+</sup>) 不适合用作异质结太阳能电池背场的主要原因<sup>[2,12]</sup>. 模拟结果中,电池的短路电流基本不变,说明此时的  $\Delta E_c$  在所模拟的 a-Si 掺杂浓度范围内已经能形成有利的少子背场. 但在  $N_A$  较低时填充因子较低,说明  $\Delta E_v$  的负面影响较为明显. 这种  $\Delta E_v$  势垒对多子(空穴)输运的阻碍可以通过提高  $N_A$  来减小,从而提高转换效率. 图中的结果表明,要得到相对较大的转换效率,背场的掺杂浓度需要达到  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  以上. 但是在非晶硅中掺入高浓度的硼并不容易,而微晶硅中由于晶体相的存在提高了掺入硼的可能性. 实际上,微晶硅背场也主要是因此而提出的<sup>[10]</sup>.

### 3.2. 薄膜硅背场

上面的分析表明,影响非晶硅背场的主要原因是非晶硅与晶体硅之间的价带失配  $\Delta E_v$  过大.  $\Delta E_v$  越小,  $\Delta E_c$  越大,背场效果越好. 这可以通过改变背场材料所具有的带隙宽度( $E_g$ )来实现. 薄膜硅沉积工艺的发展已经可以制备具有不同带隙的薄膜硅材料,它们的形态不同,带隙宽度就不同. 一般的,纳米晶硅带隙较大,非晶硅次之,微晶硅较小. 对不同带隙的薄膜硅材料来讲,其与晶体硅接触时  $\Delta E_v$  与  $\Delta E_c$  之间的比率大致不变,要使  $\Delta E_v$  变小,需要减小  $E_g$ ,相应的  $\Delta E_c$  也会变小,这或许会影响少子背

场的效果. 所以,应该存在一个合适的带隙条件,使得  $\Delta E_v$  和  $\Delta E_c$  的影响达到一个最佳的折衷效果.

基于此,选取薄膜硅材料的带隙和掺杂浓度作为可变参数,来模拟薄膜硅背场效果的变化. 模拟过程中取  $\Delta E_v$  与  $\Delta E_c$  之间的比率为 3:1 不变,带隙  $E_g$  的变化范围为 1.2—1.8 eV,以尽可能覆盖从非晶硅到微晶硅等各种形态的薄膜硅材料. 薄膜硅结构变化导致带隙变化的同时,其光电特性,如缺陷态密度、迁移率等也会变化,有必要首先检测这些光电特性变化所能带来的影响. 但对应于每个带隙值的这些特性参数的具体数值并不能精确给出. 为此,我们选取两个极端的例子,针对带隙为 1.2 eV (在所模拟的范围内,此时薄膜硅材料具有偏离非晶硅性能的最大可能),掺杂浓度为  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  (此浓度既不是太高,又能保证提供与背电极的欧姆接触,是实际电池制作中优选的)的薄膜硅背场,其光电参数分别选用前面所给出的 a-Si(p<sup>+</sup>) 参数和 c-Si 参数,来模拟所对应的异质结太阳能电池的性能. 结果,采用非晶硅参数时,  $V_{oc} = 644.4 \text{ mV}$ ,  $J_{sc} = 33.93 \text{ mA/cm}^2$ ,  $FF = 82.69\%$ ,  $\eta = 18.08\%$ ; 采用晶体硅参数时,  $V_{oc} = 648.4 \text{ mV}$ ,  $J_{sc} = 34.19 \text{ mA/cm}^2$ ,  $FF = 82.46\%$ ,  $\eta = 18.28\%$ . 这样的模拟结果表明,薄膜硅背场上上述光电性能的变化只对异质结太阳能电池的性能有较小影响. 因此,在下面的模拟过程中,对变带隙的薄膜硅材料的其它结构参数,可取的,我们选用上述 a-Si(p<sup>+</sup>) 的参数进行近似.

模拟结果如图 4 中所示. 由于在掺杂浓度一定时,带隙是唯一变化的参数,所以,所对应的电池性能的变化都是因  $E_g$  的变化,即  $\Delta E_c$  和  $\Delta E_v$  的变化而产生的. 从图 4 中的结果可以看出,在薄膜硅带隙较小,比如等于 1.2 eV 时,由于  $\Delta E_c$  小,较好的背场效果只能在很高的掺杂浓度下才能实现. 随着带隙的变大,  $\Delta E_c$  变大,少子背场效果体现的逐渐明显,短路电流逐渐增大并趋于恒定,尽管  $\Delta E_v$  也在变大,其阻碍多子输运的负面影响此时可以靠掺杂得到较好补偿,二者的综合效果使最终的电池性能逐渐提高. 这种效果在带隙大约为 1.6 eV 时大致达到最佳. 之后,  $\Delta E_c$  再变大,背场效果已经恒定,不能再进一步改善,但越来越大的  $\Delta E_v$  所带来的负面影响却越来越明显. 多子输运受到很大阻碍,电池填充因子下降很多,电池效率变差.

### 3.3. 各种背场结构效果比较

图 5 中进一步给出模拟的扩散背场,金属接触

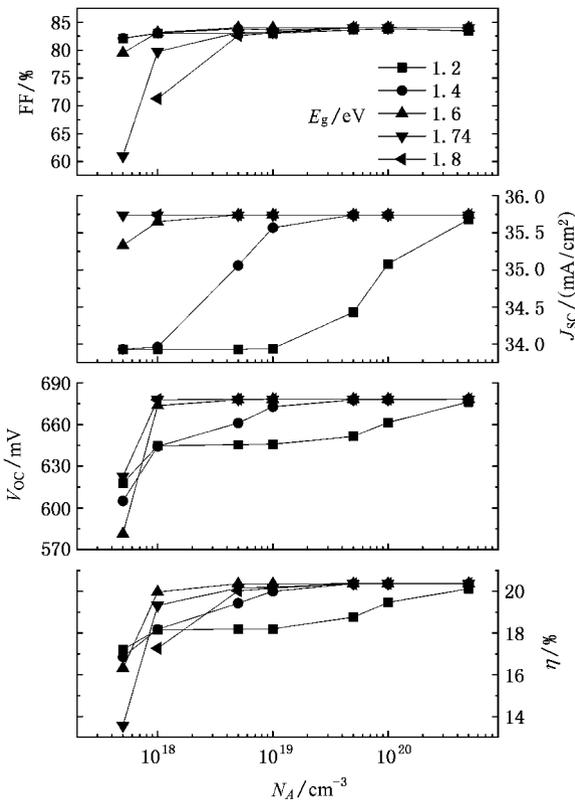


图 4 薄膜硅带隙对薄膜硅背场效果的影响

背场与上述非晶硅背场和最佳的带隙为 1.6 eV 的薄膜硅背场之间的效果比较。从中可以看出,对金属接触背场,要获得高的电池效率,所采用的金属功函数需要在 5.2 eV 以上。而薄膜硅背场与扩散背场相比,在掺杂浓度低时,由于  $\Delta E_v$  负面效应的影响,扩散背场能够得到更高的效率。但随着掺杂浓度的提高,采用薄膜硅背场的优势就逐渐体现出来,所得到的电池效率高出很多。模拟结果表明,对带隙为 1.6 eV 的薄膜硅背场,掺杂浓度达到  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  的量

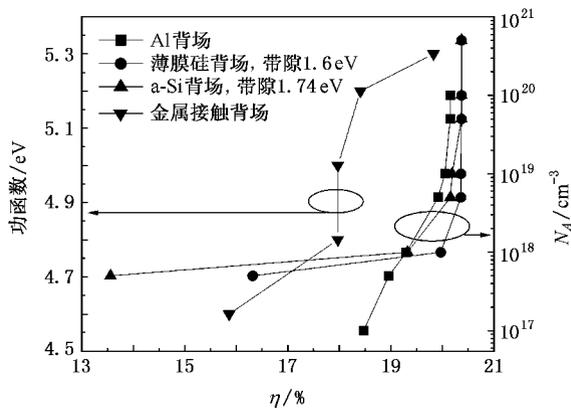


图 5 不同背场性能对比

级,电池效率就可以达到 20%。而对带隙是 1.74 eV 的非晶硅背场,要得到 20% 以上的电池效率,掺杂浓度需要达到  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  以上。根据研究经验,这种带隙 1.6 eV 的薄膜硅材料通常应该是晶相比在 20% 左右的微晶硅材料<sup>[23]</sup>。从工艺的角度讲,微晶硅薄膜制备的难点通常在于其生长速率很低,但这在硅异质结太阳能电池制备中不是问题,因为所需要的微晶硅背场厚度很小。相反,微晶硅中结晶相的存在更有利于硼掺杂原子往薄膜硅结构中的进入,与非晶硅相比,更易于实现所需要的掺杂浓度。所以,可以确定,带隙 1.6 eV 的微晶薄膜硅材料是在 a-Si(n)/c-Si(p) 异质结太阳能电池上用作背场的最合适的材料。

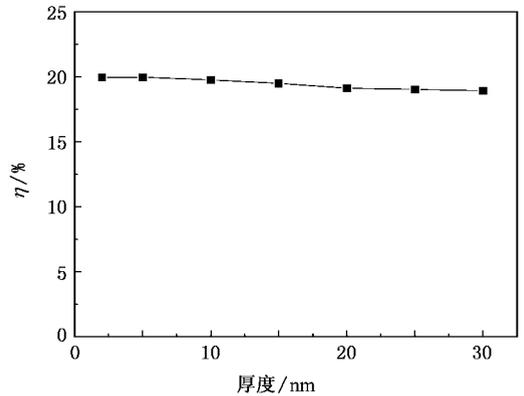


图 6 带隙 1.6 eV, 掺杂浓度  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  的微晶硅背场厚度对太阳能电池效率的影响

图 6 进一步模拟给出这种微晶硅背场厚度对所述硅异质结太阳能电池效率的影响。厚度过小(比如 2 nm),影响结区质量,但过大时,因电池串联电阻增大,填充因子降低,因而电池效率下降。厚度在 5 nm 左右时电池效率最高。但从图中的结果可以看出,厚度增大导致效率降低的趋势并不太明显。所以,可以认为,微晶硅层厚度不是影响背场效果的决定因素,因而,可以根据工艺需要将厚度适当增厚。这个模拟结果,也从另一个侧面说明除带隙外,材料其他性能的变化对电池性能影响不大,因为厚度变大增大了载流子的输运路径,这与厚度不变,材料性能变差具有相似的效果。

### 4. 结 论

针对 a-Si(n)/c-Si(p) 异质结太阳能电池,采用 AFORS-HET 模拟软件,选取薄膜硅材料的带隙和掺

杂浓度作为可变参数,从理论上对各种薄膜硅背场结构的效果与 Al 背场的效果进行了比较分析,结果表明:

1. 在掺杂浓度低时,扩散背场能够得到更高的效率,但随着掺杂浓度的提高,采用薄膜硅背场的电池效率更高.各种薄膜硅背场的效果因其带隙不同而又有差异.与 c-Si( $p$ )之间的  $\Delta E_c$  起到少子背场的作用,但  $\Delta E_v$  的存在会对多子运输造成阻碍.具有最优背场效果的薄膜硅材料具有折衷的带隙大小.

2. a-Si( $p^+$ )用作背场时, a-Si( $p^+$ )与 c-Si( $p$ )之

间的导带失配  $\Delta E_c$  可以起到好的少子背场作用,但二者之间大的价带失配  $\Delta E_v$  影响电池填充因子,难以得到高的电池效率.要获得相对较高的效率, a-Si( $p^+$ )中的掺杂浓度需要达到  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

3. 模拟表明,最适合作背场的薄膜硅材料是带隙 1.6 eV 的微晶硅材料,掺杂浓度达到  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  的量级以上即可,最佳厚度在 5 nm 左右,但微晶硅层厚度不是影响背场效果的决定因素,可以根据工艺需要将厚度适当增厚.

- [ 1 ] Sawada T, Terada N, Tsuge S, Baba T, Takahama T, Wakisaka K, Tsuda S, Nakano S 1994 *Proceedings of the First WCPEC Conference*, Hawaii 1219
- [ 2 ] Maydell K V, Conrad E, Schmidt M 2006 *Prog. Photonolt: Res. Appl.* **14** 289
- [ 3 ] Voz C, Muñoz D, Fonrodona M, Martin I, Puigdollers J, Alcubilla R, Escarre J, Bertomeu J, Andreu J 2006 *Thin Solid Films* **511—512** 415
- [ 4 ] Tucci M, Noce M della, Bobeico E, Roca F, Cesare G de, Palma F 2004 *Thin Solid Films* **451-452** 355
- [ 5 ] Xu Y, Hu Z H, Diao H W, Cai Y, Zhang S B, Zeng X B, Hao H Y, Liao X B, Fortunato E, Martins R 2006 *J. Non-Cryst. Solids* **352** 1972
- [ 6 ] Maydell K V, Korte L, Laades A, Stangl R, Conrad E, Lange F, Schmidt M 2006 *J. Non-Cryst. Solids* **352** 1958
- [ 7 ] Zhao F X, Wei Y Z 1985 *Solar Cell and Its Application* ( Beijing: National Defense Industry Press ) p81 ( in Chinese ) [ 赵富鑫、魏彦章 1985 太阳能电池及其应用 ( 北京:国防工业出版社 ) p81 ]
- [ 8 ] Kim L, Dhungel S K, Gangopadhyay U, Yoo J, Seok C W, Yi J 2006 *Thin Solid Films* **511-512** 228
- [ 9 ] Tucci M, Salurso E, Roca F, Palma F 2002 *Thin Solid Films* **403-404** 307
- [ 10 ] Goldbach H D, Bink A, Schropp R E I 2006 *J. Non-Cryst. Solids* **352** 1872
- [ 11 ] Veschetti Y, Muller J C, Damon-Lacoste Cabarrocas J R, Gudovskikh A S, Kleider J P, Ribeyron P J, Rolland E 2006 *Thin Solid Films* **511-512** 543
- [ 12 ] Wolf Stefaan De, Beaucarne Guy 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 022104
- [ 13 ] Oka Y W, Seong T Y, Kima D, Kim S K, Lee J C, Yoon K H, Song J 2007 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **91** 1366
- [ 14 ] Heinz-Christoph N, Manuela F, Wolfgang F, Maximilian S, Eugenia B, Francesco R, Luca S, Mario T 2006 *Mater. Sci. Eng. B* **134** 263
- [ 15 ] Tucci M, de Cesare G 2004 *J. Non-Cryst. Solids* **338-340** 663
- [ 16 ] Maydell K v, Schmidt M, Korte L, Laades A, Conrad E, Stangl R, Scherff M, Fuhs W 2005 *Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Lake Buena Vista, Florida, Piscataway, NJ 1225
- [ 17 ] Rostan P J, Rau U, Nguyen V X, Kirchartz T, Schubert M B, Werner J H 2006 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **90** 1345
- [ 18 ] Wang Q, Page M R, Iwaniczko E, Xu Y Q, Roybal L, Bauer R, Levi D, Yan Y F, Meier D, Wang T H, Branz H M 2007 *ISES Solar World Congress 2007 Beijing, China* **III** 1144
- [ 19 ] Stangl R, Froitzheim A, Schmidt M, Fuhs W 2003 *Proceedings of the 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Osaka, Japan **2** 1005
- [ 20 ] Froitzheim A, Stangl R, Elstner L, Schmidt M, Fuhs W 2002 *Conference record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, New Orleans, Louisiana, Piscataway, NJ 1238
- [ 21 ] Gudovskikh A S, Kleider J P, Damon-Lacoste J, Cabarrocas P R I, Veschetti Y, Muller J C, Ribeyron P J, Rolland E 2006 *Thin Solid Films* **511-512** 385
- [ 22 ] Schmidt M, Schoepke A, Korte L, Milch O, Fuhs W 2004 *J. Non-cryst. Solids* **338-340** 211
- [ 23 ] Hao H Y, Kong G L, Zeng X B, Xu Y, Diao H W, Liao X B 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3370 ( in Chinese ) [ 郝会颖、孔光临、曾湘波、许颖、刁宏伟、廖显伯 2005 物理学报 **54** 3370 ]

# Optimizing polymorphous silicon back surface field of a-Si(n)/c-Si(p) heterojunction solar cells by simulation<sup>\*</sup>

Zhao Lei<sup>†</sup> Zhou Chun-Lan Li Hai-Ling Diao Hong-Wei Wang Wen-Jing

(*Laboratory of Solar Cell Technology, Institute of Electrical Engineering, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

(Received 4 September 2007; revised manuscript received 31 October 2007)

## Abstract

Back surface field (BSF) effect of polymorphous silicon with different band gaps on a-Si(n)/c-Si(p) heterojunction solar cell was simulated and analyzed by utilizing AFORS-HET software. It was predicted that the polymorphous silicon capable of producing the optimal BSF effect is the microcrystalline silicon with band gap of 1.6 eV, the doped concentration of  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  and the thickness about 5 nm. Such microcrystalline silicon BSF is easy to realize in practice. It makes the efficiency of solar cell much higher than that using the conventional Al BSF with the same doping concentration.

**Keywords** : polymorphous silicon, back surface field, silicon heterojunction solar cell

**PACC** : 7340L, 8630J

<sup>\*</sup> Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA05Z405).

<sup>†</sup> E-mail : zhaolei@mail.iee.ac.cn