



新型SINP硅蓝紫光电池的研究

何波^{①*}, 马忠权^①, 徐静^②, 赵磊^①, 张楠生^①, 李凤^①, 沈玲^①, 沈成^①,
周呈悦^①, 于征汕^③, 殷宴庭^③

① 上海大学理学院物理系, 上海 200444;

② 武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室, 武汉 430070;

③ 上海索朗太阳能科技有限公司, 上海 201206

* E-mail: laserhebo@shu.edu.cn

收稿日期: 2009-03-19; 接受日期: 2009-07-13

国家自然科学基金项目(批准号: 60876045)、上海市重点学科建设项目(批准号: S30105)、上海市教委创新基金项目(批准号: 08YZ12)和 SHU-SOEN's PV 联合实验室基金项目(批准号: SS-E0700601)资助

摘要 本研究中, 采用以下主要步骤: 先在 p-型 Si 的绒面上, 进行磷扩散形成同质 p-n 结, 再低温热氧化生长超薄 SiO₂ 层, 然后利用射频磁控溅射沉积 ITO 减反射/收集电极膜, 成功制备了一种新型 ITO/SiO₂/np 晶硅 SINP 结构蓝紫光电池. 通过 X-光衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)、紫外-可见光透射谱(UV-VIS), 以及霍尔效应(Hall effect)测量方法, 表征了高质量 ITO 薄膜的微结构、光学与电学特性. 并重点对 SINP 结构光电池的光谱响应和 I-V 特性, 进行了详细地计算和分析. 结果表明, 具有蓝紫光以及其它可见光波段的光谱响应和光电转换的增强效果, 是该器件的主要特征. 其较高的短路电流密度, 适合于发展成为新型结构的硅基太阳能电池.

关键词

ITO 薄膜

SINP 光电池

I-V 特性

光谱响应

在着力提高硅基半导体的光电(或光伏)效应中, 蓝紫光增强型硅光伏器件在太阳电池、光度、色度及光学精密测量等方面都有重要的应用^[1]. 太阳光谱峰值波长为 480 nm, 增强硅光电池的蓝紫光响应将可显著提升太阳能电池的短路电流及光电转换效率. 由于晶硅对短波长光的吸收系数很大, 平均透入深度小; 并且光生载流子的产生率随光进入器件表面的距离呈指数式衰减, 大多数光生载流子产生在硅的表面附近. 而用传统扩散方法^[2]制作的 n⁺p 结硅光电池, 发射区近表面存在一高磷浓度的“死层”^[3], 该区域晶格畸变大, 位错密度高, 严重影响了短波长光生载流子的收集效率, 造成常规晶硅光电池蓝紫光响应的迅速下降.

为了不再增加电池制造工艺的复杂性, 同时又

能有效地提高硅光电池 400~600 nm 蓝紫光波段的量子效率. 根据半导体能带工程, 我们设计并研制出晶硅 pn 结与宽带隙 ITO 透明导电薄膜相结合的一种新型 SINP 异质面光电池(SINP 是 semiconductor/insulator/np 结构的缩写). 在器件的制备工艺中, 我们采用了浅 pn 结、铝背场、超薄 SiO₂ 钝化层及 ITO 透明导电薄膜等先进技术. 其中, 浅结减少了普通光电池发射区由于重掺杂带来的影响, 如禁带宽度收缩效应, 重掺杂后 Auger 复合及近表面高浓度磷固溶区“死层”的影响等, 以提高蓝紫光响应. 采用低温热氧化技术生长的超薄 SiO₂ 层不仅有效地钝化硅表面, 饱和硅表面悬挂键, 降低表面复合中心浓度, 减小表面复合速率(高表面复合速率是制约光伏器件短波响应的另一重要因素); 而且作为缓冲层, 减小 ITO 与

晶硅的晶格失配,降低 ITO 薄膜的内应力.同时允许载流子(电子)在如此之薄的 SiO_2 层中,通过隧道效应,实现电输运,收集光生载流子.超薄 SiO_2 层对载流子电子和空穴的传输阻碍各不相同.由量子力学,对电子隧道系数为 $e^{-d\chi_n^{1/2}}$,而对空穴隧道系数为 $e^{-d\chi_p^{1/2}}$.如图 1 所示,超薄 SiO_2 层对电子势垒高度为 $\chi_n=3.1\text{ eV}$,而对空穴势垒高度为 $\chi_p=3.8\text{ eV}$.所以,可以单向抑制空穴的传输,又因为其超薄(厚度仅为 $15\sim 20\text{ \AA}$)结构,对光生载流子电子基本无阻碍作用,从而达到减小器件反向暗电流、改善光伏特性的目的.

ITO 材料是重掺杂并宽带隙半导体,带隙宽度约 3.9 eV ,采用射频磁控溅射的方法把高透光率(可见光波段 $T > 95\%$),高电导率($\rho \approx 9 \times 10^{-5}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$)的 ITO 薄膜沉积在光电池正面,成为窄带隙晶硅的异质面光学窗口.同时,该薄膜材料还具有表面减反射膜的功能,对于增强硅太阳电池的光谱响应,尤其在短波长范围,有着良好的透光性能.另外,它不仅密封超薄 SiO_2 层,提高电池稳定性;而且兼作大面积收集电极,克服浅结所带来较大的方块电阻的弊端.在光电池的背表面建立一个掺杂区,形成铝背表面场高低结,对 p 区少子有阻挡和反射作用.这样,一方面使背表面的复合作用减少,同时还可以将射向背表面的光反射回来,增加长波光的吸收路程,提高 $p\text{-}n$ 结对光生载流子的收集效率,从而提高光电池的长波响应.

1 实验

选用 p 型、晶向为(100)、电阻率为 $2\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ 、厚度约 $220\text{ }\mu\text{m}$ 的硅单晶片为衬底.经常规化学清洗及制绒后,用 POCl_3 液态源热扩散形成 n 区(本文采用不

同热扩散工艺制作两块新型 SINP 光电池,其中一块是发射区方块电阻 $10\text{ }\Omega/\square$,结深 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的(深结)常规^[2] SINP 光电池;另一块为发射区方块电阻 $37\text{ }\Omega/\square$,结深 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 的(浅结)SINP 硅蓝紫光电池).去除正面的磷硅玻璃(腐蚀溶液为 $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}=1:10$);然后在硅片背面蒸 Al;将硅片在 $400\sim 500^\circ\text{C}$, $\text{N}_2:\text{O}_2=4:1$ 条件下热氧化 $15\sim 30\text{ min}$ 生长一层 $15\sim 20\text{ \AA}$ 超薄 SiO_2 层,背面 Al 合金化同时进行.继而射频磁控溅射高透光率、高导电率的 ITO 减反射/收集电极膜(ITO 薄膜也被沉积在玻璃上以研究其光学与电学特性),通过金属掩模版直流磁控溅射 Cu 栅指电极.器件面积为 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$.新型 SINP 光电池能带及器件结构如图 1 和 2 所示.

2 结果和讨论

2.1 ITO 薄膜微结构、光学及电学性能

图 3 是玻璃衬底射频磁控溅射 ITO 薄膜 XRD 衍射谱图,查 PDF 卡,可知为体心立方锰铁矿结构.主衍射峰位置在 30.23° 对应 ITO(222)晶面的衍射峰,

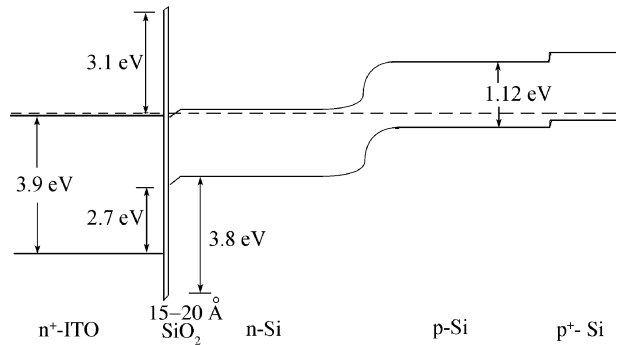


图 1 新型 SINP 光电池能带结构图

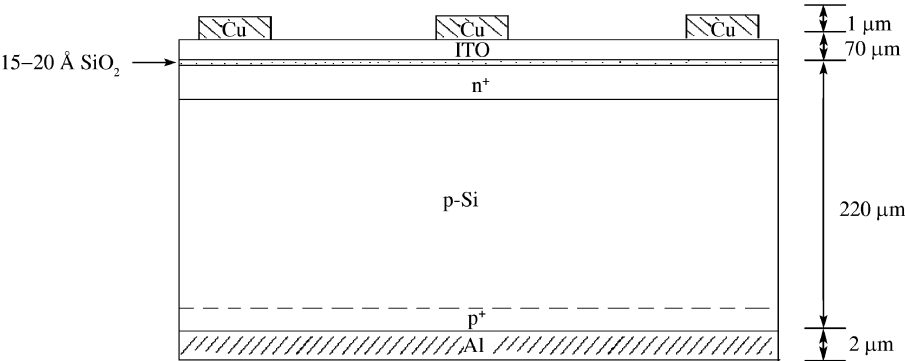


图 2 新型 SINP 光电池器件结构图

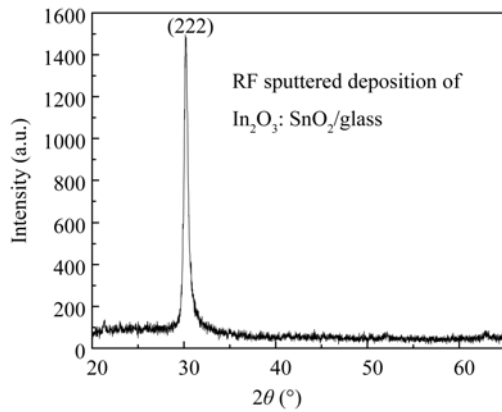


图3 玻璃衬底上 ITO 薄膜 XRD 谱

并且谱峰尖锐,说明该薄膜结晶度好,沿(222)晶面择优取向生长。

由谢乐公式:

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta}, \quad (1)$$

其中 D 是晶粒尺寸; λ 是 X 线波长(1.54056 Å); β 是衍射半高宽; θ 是衍射峰对应的衍射角. 计算得到的 ITO 薄膜平均晶粒尺寸为 14.3 nm. 玻璃衬底 ITO 薄膜 SEM 照片如图 4 所示, 由图 4 明显可见, 射频磁控溅射沉积的 ITO 薄膜致密性好, 结晶度高, 晶粒尺寸约为 10~20 nm.

为了研究 ITO 薄膜的光吸收系数和光学禁带宽度, 玻璃衬底 ITO 薄膜透射谱如图 5 所示, ITO 薄膜厚约 70 nm, 在 400~800 nm 可见光波段, 薄膜平均透射率约为 92%. 光吸收系数 α 与光学透射率的关系^[4]:

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \frac{1}{T}, \quad (2)$$

其中 d 是 ITO 薄膜的厚度. 对直接带隙半导体, 吸收系数 α 和光子频率 ν 的关系为

$$(\alpha h\nu)^2 = A(E_g - h\nu). \quad (3)$$

利用(3)式画出 $(\alpha h\nu)^2$ 与 $h\nu$ 关系图(图 5 中插图), 应得到一直线^[5], 将此直线外推至 $\alpha=0$ 可得到 E_g 值. 这样, 由长波边附近的本征吸收谱便可方便地确定 ITO 薄膜光学禁带宽度为 3.9 eV.

根据增透膜设计原理, 对于单层膜系而言,

$$\text{折射率: } n = \sqrt{n_0 n_s} \quad (n_0 \text{ 空气的折射率}); \quad (4)$$

$$\text{光学膜厚: } nd = \frac{\lambda}{4}. \quad (5)$$

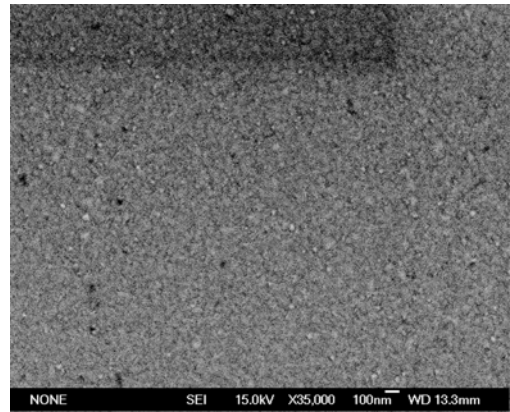


图4 玻璃衬底上 ITO 薄膜 SEM 照片

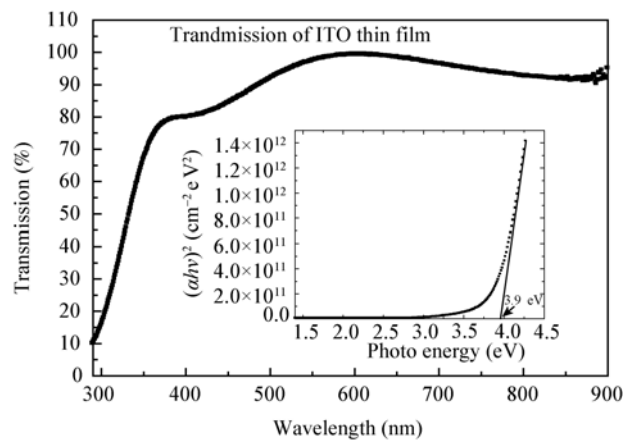


图5 ITO 薄膜透射谱

由(4)式可知, 因为基体晶硅折射率 $n_s=3.42$, ITO 薄膜折射率 $n=1.85$ 为最佳匹配的折射率. 由(5)式可知, 薄膜厚度为 65 nm 时, 对太阳光谱峰值波长(480 nm)可获得最佳增透减反射效果. 实验结果图 6 表明, 在可见光范围内 ITO 薄膜(折射率 1.8~1.9)在绒面晶硅上减反射效果完全可以与工业生产中 PECVD 制备的 Si_3N_4 膜相媲美. 而在 300~500 nm 紫外至蓝光区域, ITO 薄膜在绒面晶硅上减反射效果明显优于 Si_3N_4 薄膜, 这说明 ITO 增透膜可以有效地减小短波长光子的反射损失, 更合适作蓝紫光电池的减反射膜.

Accent HL5500pc 霍尔效应系统测量结果表明, ITO 薄膜具有优异的电学性能, 载流子浓度高达 $3.46 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$, 方块电阻及电阻率高达 $13.46 \Omega/\square$ 及 $9.42 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$, 载流子迁移率为 $19.1 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{S}$.

2.2 I-V特性分析

新型蓝紫光及常规 SINP 光电池暗电流密度 $J-V$

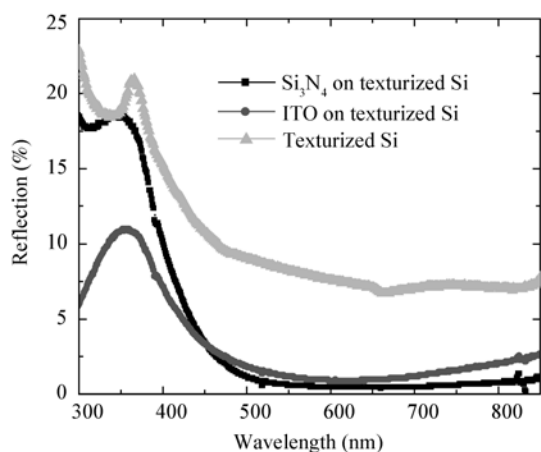


图6 反射率和入射波长的关系

曲线呈现典型整流特性, 如图 7 和 8 所示. 二极管动态电阻(也称微分电阻)定义^[6]为 $R_D = (dI/dV)^{-1}$, 它随电压的变化曲线可以形象地反映暗电流机制^[7]. 图 9 为 SINP 蓝紫光电池动态电阻随电压变化(R_D - V)曲线, 在正向偏压大于 0.25 V 时串联电阻将对欧姆损耗起主要贡献. 在零偏附近(0.2~ -0.2 V)是由扩散电流和产生一复合电流共同作用, 这时器件处于导通与截止的临界点, 电流变化剧烈, 电阻随反偏急剧增加. 当反向偏压从 -0.2~ -0.5 V 时, 主要由表面漏电流影响着器件的阻抗变化, 它的出现严重地压制(“削平”)了反偏电阻的上升, 使微分电阻 R_D - V 曲线在该偏压范围变化比较平坦. 隧道电流则使动态电阻 R_D 在较大反向偏压($V < -1$ V)存在一定的下降.

正向偏压时, SINP 蓝紫光电池 $\ln J$ - V 变化曲线如

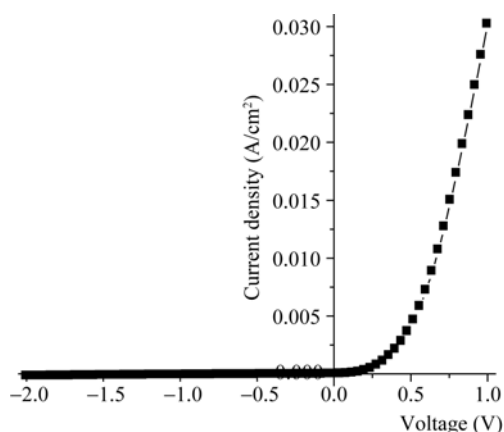
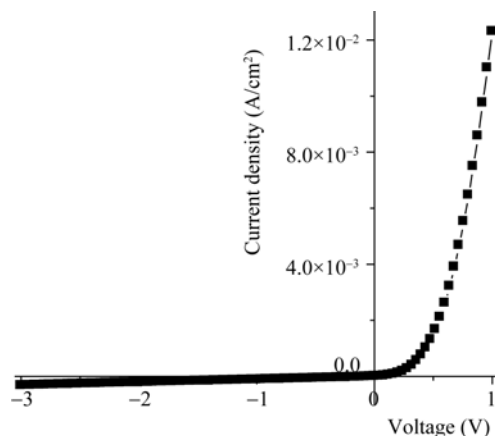
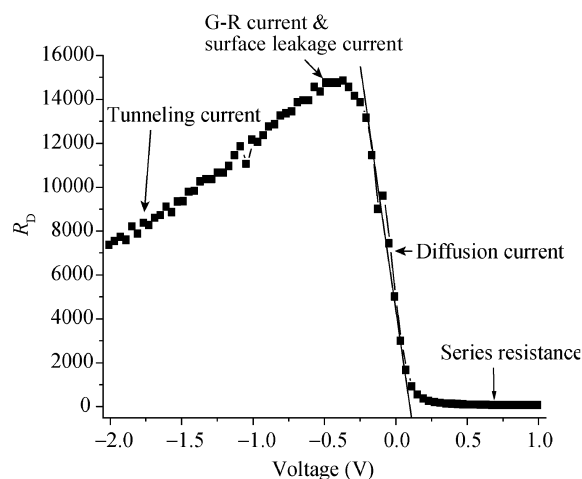
图7 无光照 SINP 蓝紫光电池 J - V 曲线图8 无光照常规 SINP 光电池 J - V 曲线图9 SINP 蓝紫光电池动态电阻随电压变化(R_D - V)曲线

图 10 所示, 在低正向电压区域($\frac{3k_B T}{q} < 0.2V$) 电流曲线趋于直线, 这可以用标准二极管方程^[8]来表示:

$J = J_0 (e^{\frac{qV}{nk_B T}} - 1)$. 其中 q 电子电荷数; k_B 玻尔兹曼常数; V 外加电压; n 二极管理想因子, 由下式给出:

$$n = \frac{q}{k_B T} \left[\frac{dV}{d \ln J} \right]. \quad (6)$$

J_0 饱和电流密度是当 $V=0$ 时, $\ln J$ 的值. 新型 SINP 蓝紫光电池理想因子由图 10 $\ln J$ - V 曲线, 正向小偏压 ($V < 0.2$ V) 直线的斜率通过(6)式计算确定 $n = 1.84$; 反向饱和电流密度 $J_0 = 5.58 \times 10^{-6}$ A/cm². 用相同的计算方法, 由图 11 可知, 常规 SINP 光电池二极管理想因子及反向饱和电流密度分别为 2.21 和 4.2×10^{-6} A/cm².

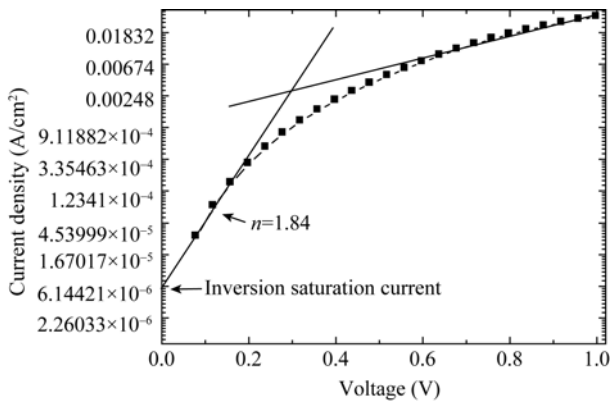


图 10 与图 7 相应的 SINT 蓝紫光电池电流密度随正向偏压变化曲线, 电流密度采用对数坐标

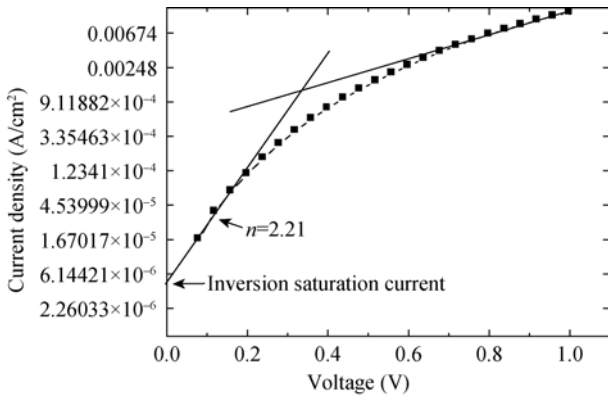


图 11 与图 8 相应的常规 SINT 光电池电流密度正向偏压变化曲线, 电流密度采用对数坐标

结果表明正向电流中复合电流占主导. SINT 蓝紫光电池理想因子 $n=1.84$ 小于常规 SINT 光电池 ($n=2.21$); 并且在 1 V 时, 根据图 7 和 8, SINT 蓝紫光电池 I_F/I_R 的比值 (I_F 和 I_R 分别是正向及反向电流) 为 324.7 远高于常规 SINT 光电池的整流比 $I_F/I_R=98.4$, 由此可确定 SINT 蓝紫光电池整流特性及暗电流机制明显优于常规 SINT 光电池.

在弱白光(入射光功率密度 6.3 mW/cm^2)照射下, 两种 SINT 光电池都已显示出明显的光电转换特性, 如图 12~14 所示. 在相同光照条件下, SINT 蓝紫光电池短路电流密度 ($3.08 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$) 远高于深结常规 SINT 光电池短路电流密度 ($2.23 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$).

2.3 光谱响应分析

图 15~17 为蓝紫光及常规 SINT 光电池内量子效率(IQE), 外量子效率(EQE)及响应率对比图. 在可见

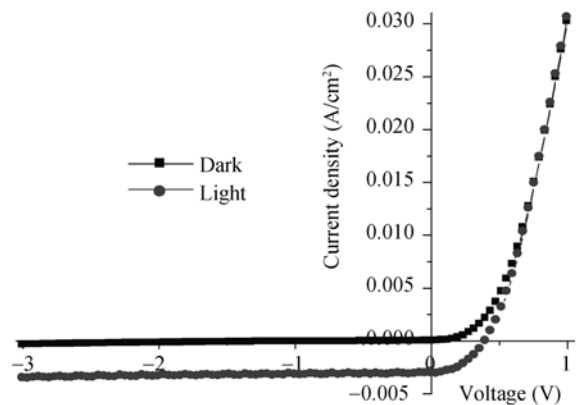


图 12 SINT 蓝紫光电池无光照及在弱白光(入射光功率密度 6.3 mW/cm^2)照射下 J - V 曲线图

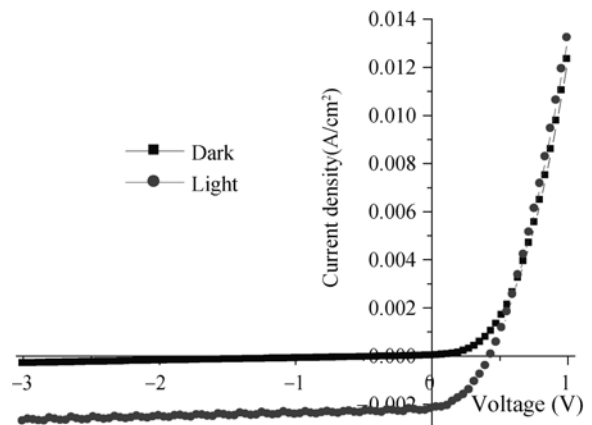


图 13 常规 SINT 光电池无光照及在弱白光(入射光功率密度 6.3 mW/cm^2)照射下 J - V 曲线图

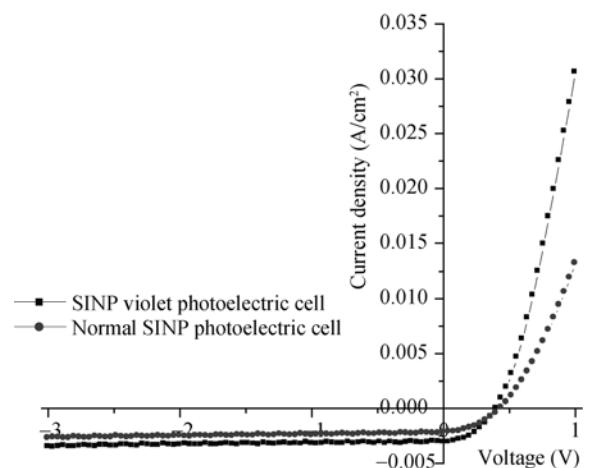


图 14 蓝紫光及常规 SINT 光电池在相同弱白光(入射光功率密度 6.3 mW/cm^2)照射下 J - V 曲线图对比图

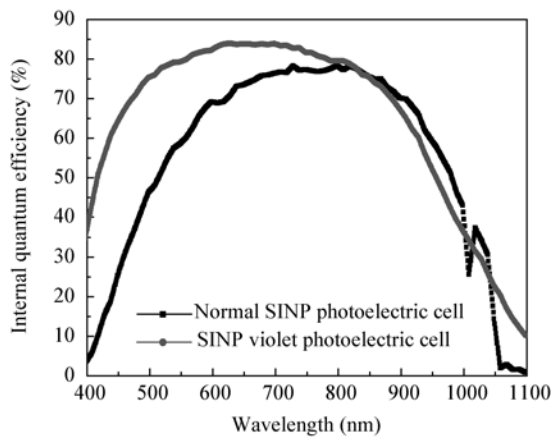


图 15 蓝紫光及常规 SINP 光电池内量子效率对比图

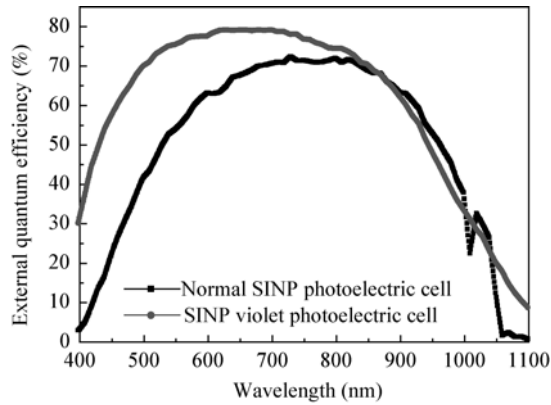


图 16 蓝紫光及常规 SINP 光电池外量子效率对比图

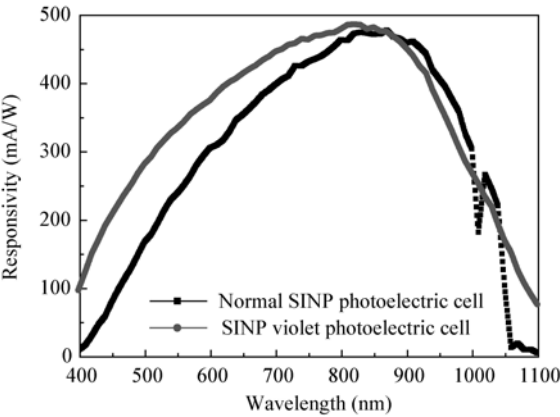


图 17 蓝紫光及常规 SINP 光电池响应率对比图

表 1 SINP 蓝紫光电池内量子效率(光谱响应)计算参数

区域	各区宽度	扩散系数	少子寿命	扩散长度	表面复合速率
n 发射区	$W_e=0.4 \mu\text{m}$ (结深)	$D_e=5 \text{ cm}^2/\text{s}$	$\tau_e=2 \times 10^{-11} \text{ s}$	$L_e=0.1 \mu\text{m}$	$S_e=1 \times 10^7 \text{ cm/s}$
空间电荷区	$W_{scr}=0.5 \mu\text{m}$				
p 基区	$W_b=220 \mu\text{m}$	$D_b=30 \text{ cm}^2/\text{s}$	$\tau_b=8 \times 10^{-7} \text{ s}$	$L_b=50 \mu\text{m}$	$S_b=1 \times 10^7 \text{ cm/s}$

光波段, 两种 SINP 光电池内、外量子效率高达 70%至 85%. 在蓝紫光及其它可见光波段, 浅结 SINP 蓝紫光电池内、外量子效率都较深结常规 SINP 光电池有非常显著地提高. 例如, 在 500 nm 波长, SINP 蓝紫光电池外量子效率(EQE)及响应率分别是 70%及 285 mA/W; 而常规 SINP 光电池外量子效率(EQE)及响应率则分别为 42%及 167 mA/W. SINP 蓝紫光电池在 800 nm 波长, 峰值响应率为 487 mA/W; 而常规 SINP 光电池峰值在 860 nm, 响应率则为 471 mA/W.

这是因为浅结降低发射区近表面杂质浓度, 减小“死层”. 并且耗尽区接近表面, 有助于短波长光子的收集,因而蓝紫光灵敏度较高. 光电池 pn 结的结构如图 18 所示, 并由表 1 中的参数对新型 SINP 光电池内量子效率(光谱响应)进行计算拟和.

对 n^+p 结光电池, n^+ 发射区内量子效率表达式为^[9]

$$\eta_e = \frac{\alpha L_e}{(\alpha L_e)^2 - 1} \left[\frac{S_e + \alpha L_e - \left(S_e \coth \frac{W_e}{L_e} + \sinh \frac{W_e}{L_e} \right) e^{-\alpha W_e}}{S_e \sinh \frac{W_e}{L_e} + \coth \frac{W_e}{L_e}} - \alpha L_e e^{-\alpha W_e} \right] \\ = \frac{0.1\alpha}{(0.1\alpha)^2 - 1} \left[\frac{20 + 0.1\alpha - 573.3e^{-0.4\alpha}}{573.3} - 0.1\alpha e^{-0.4\alpha} \right], \quad (7)$$

其中 $S_e = \frac{s_e \cdot L_e}{D_e} = 20$.

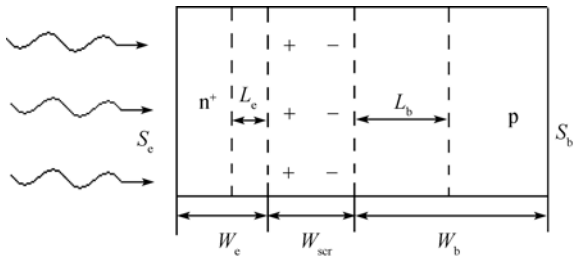


图 18 光电池 pn 结的结构示意图

耗尽区内量子效率表达式为

$$\eta_{scr} = e^{-\alpha \cdot W_e} (1 - e^{-\alpha \cdot W_{scr}}) = e^{-0.4\alpha} (1 - e^{-0.5\alpha}). \tag{8}$$

p 基区内量子效率表达式为

$$\eta_b = \frac{\alpha L_b}{(\alpha L_b)^2 - 1} e^{-\alpha(W_e + W_{scr})} \left[\frac{S_b \coth \frac{W_b}{L_b} + \sinh \frac{W_b}{L_b} + (\alpha L_b - S_b) e^{-\alpha \cdot W_b}}{S_b \sinh \frac{W_b}{L_b} + \coth \frac{W_b}{L_b}} \right]$$

$$= \frac{50\alpha}{(50\alpha)^2 - 1} e^{-0.9\alpha}$$

$$\left[50\alpha - \frac{67897 + (50\alpha - 1666)e^{-220\alpha}}{67880} \right], \tag{9}$$

其中 $S_b = \frac{s_b \cdot L_b}{D_b} = 1666$.

光照情况下 pn 结型光伏器件总的量子效率为

$$\eta_{total} = \eta_e + \eta_{scr} + \eta_b. \tag{10}$$

把晶硅光吸收系数 α 与波长 λ 的关系代入(7)~(10)式进行计算, 结果如图 19 所示, 计算的内置量子效率(IQE)与实测值相比拟. 用相同的计算方法及表 2, 常规 SINP 光电池光谱响应计算及实测值如图 20 所示.

计算结果表明新型 SINP 光电池内置量子效率主要由基区及耗尽区提供. 新型 SINP 蓝紫光电池在蓝紫光及其它可见光波段的高量子效率及响应率得益于浅结以及高导电率、对蓝紫光具有良好减反射效果的 ITO 薄膜的应用与结合. 把 pn 结尽量做到靠近表面, “死层”可以基本消除, 为提高短波长辐射的响应提供了重要条件^[10]. 另外, 由于 pn 结的结浅, 能够扩散到 pn 结处的光生载流子比例增大, 相对损失减小; 而且由于基区和势垒区与发射区相比, 可贡献的光生电流的百分比较大的缘故. 上述这些正是用浅结并结合 ITO 减反射/收集电极膜技术制作新型 SINP

蓝紫光电池的基本出发点.

2.4 光电转换效率

对所制新型 SINP 光电池在 AM1.5 100 mW/cm², 25℃条件下进行测试(图 21~24 所示), 蓝紫光及常规 SINP 光电池开路电压 V_{OC} 分别为 570 及 550 mV, 短路电流密度 J_{SC} 高达 49.73 及 41.43 mA/cm², 光电转换效率 η 则为 13.66% 及 11.06%.

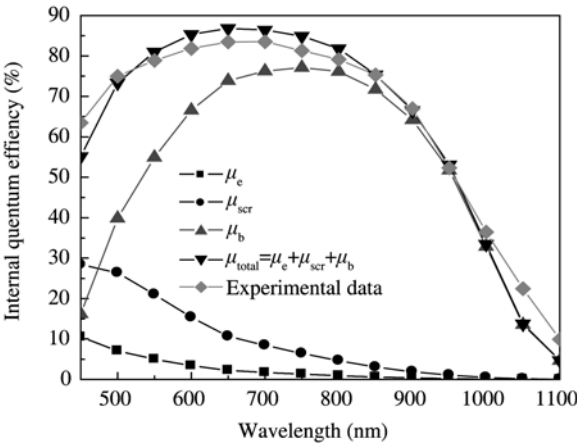


图 19 SINP 蓝紫光电池内置量子效率计算及实测值

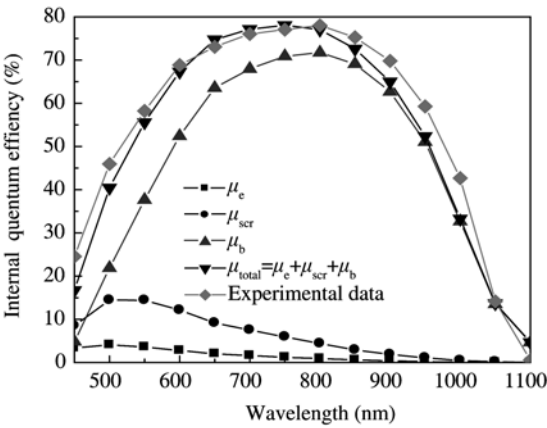


图 20 常规 SINP 光电池内置量子效率计算及实测值

表 2 (深结)常规 SINP 光电池内置量子效率(光谱响应)计算参数

区域	各区宽度	扩散系数	少子寿命	扩散长度	表面复合速率
n 发射区	$W_e = 1 \mu\text{m}$ (结深)	$D_e = 5 \text{ cm}^2/\text{s}$	$\tau_e = 2 \times 10^{-11} \text{ s}$	$L_e = 0.1 \mu\text{m}$	$S_e = 1 \times 10^7 \text{ cm/s}$
空间电荷区	$W_{scr} = 0.5 \mu\text{m}$				
p 基区	$W_b = 220 \mu\text{m}$	$D_b = 30 \text{ cm}^2/\text{s}$	$\tau_b = 8 \times 10^{-7} \text{ s}$	$L_b = 50 \mu\text{m}$	$S_b = 1 \times 10^7 \text{ cm/s}$

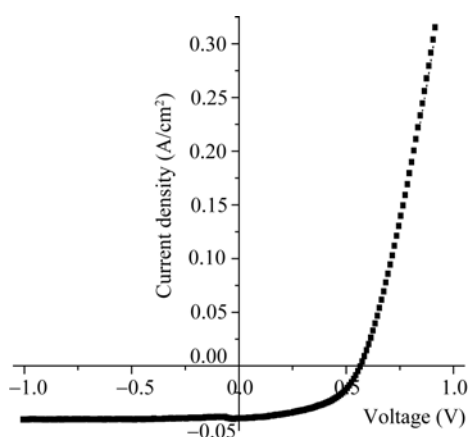


图 21 新型 SINP 蓝紫光电池 AM1.5 100 mW/cm² 光照下 J - V 曲线

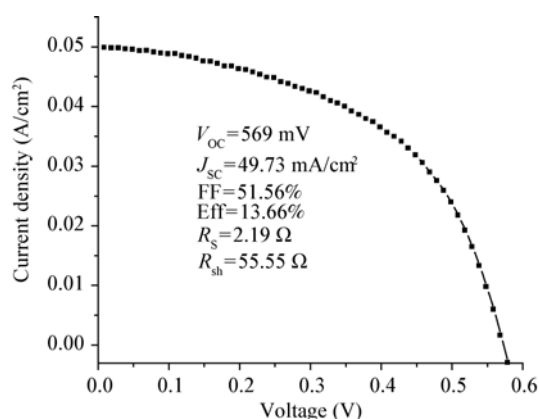


图 23 与图 21 相对应的 AM1.5 光照下 SINP 蓝紫光电池转换效率 J - V 曲线

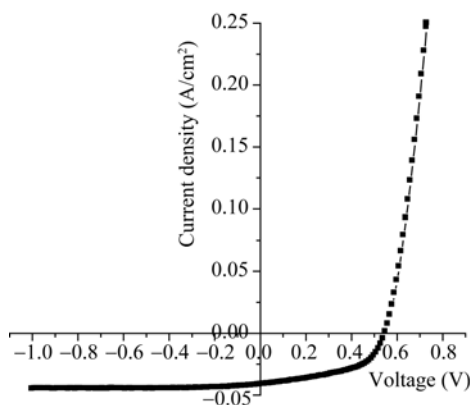


图 22 常规 SINP 光电池 AM1.5 100 mW/cm² 光照下 J - V 曲线

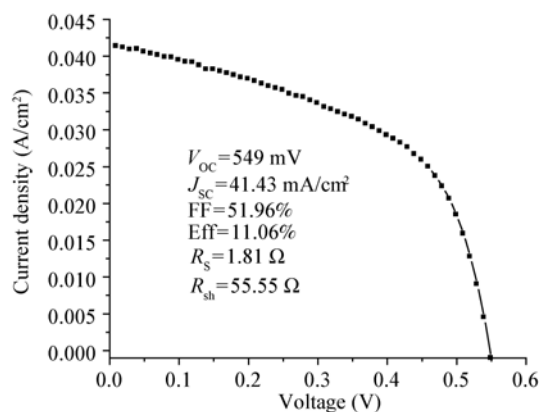


图 24 与图 22 相对应的 AM1.5 光照下常规 SINP 光电池转换效率 J - V 曲线

在太阳电池体内, 电流方向一般是垂直于电池表面的, 如图 25 所示. 为了经部分覆盖电池顶部的电极引出电流, 电流就必须横向流过电池的发射区顶层. 根据这种电流模型, 电流在顶层中的横向流动要引起功率损耗. 图 26 为新型 SINP 光电池顶层电流传输模型. 例如, 对浅结 SINP 蓝紫光电池, 发射区方块电阻 $R_{\square}=37 \Omega/\square$, 结深 $0.4 \mu\text{m}$, 发射区薄层电阻率 $\rho=R_{\square} \cdot d=1.48 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$. 而射频磁控溅射高结晶度 ITO 薄膜电学性能优异, $R_{\square}=13.46 \Omega/\square$, 载流子浓度 $n=3.46 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$, 电阻率 $\rho=9.42 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$, 载流子迁移率 $\mu=19.1 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{S}$. SINP 电池结构中, 高电导率的 ITO 薄膜与 n 发射区并联(如图 26 所示); 并且其电阻率远小于 n 发射区薄层电阻率, 所以光生电流可以横向流过高载流子迁移率的 ITO 薄膜. 配合顶上优化间距的 Cu 栅指电极, 从而有效地

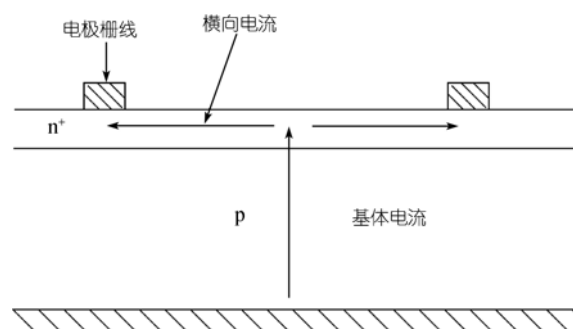


图 25 常规 pn 结太阳电池发射区顶层电流传输模型

避免或减小发射区横向电阻引起的功率损耗. 常规 pn 结太阳电池, 横向电阻引起的功率损耗^[11] $p=\frac{R_{\square} s^2 J_{\text{mp}}}{12 V_{\text{mp}}}=4\%$. 新型 SINP 蓝紫光电池 $\frac{1}{R_{\square}}=\frac{1}{R_{\square \text{发射区}}}$

$$+\frac{1}{R_{\square\text{ITO}}}\Rightarrow R_{\square}=9.86\ \Omega/\square, J_{\text{mp}}=34.6\ \text{mA}/\text{cm}^2, V_{\text{mp}}=$$

420 mV, 栅指间距 $s=1.4\ \text{mm}$, 横向电阻影响而引起的功率损耗:

$$p=\frac{R_{\square}s^2J_{\text{mp}}}{12V_{\text{mp}}}=0.13\%. \quad (11)$$

以上计算结果可知, 使用 ITO 大面积收集电极膜的 SINP 光电池, 可极大地降低发射区横向电阻引起的功率损耗. 并且因为 n 发射区中高磷掺杂浓度, 载流子寿命低, 严重影响光电流收集几率; SINP 电池结构中, 光电流可以通过高结晶度, 高电导率的 ITO 薄膜横向输运, 有效地避免了 n 发射区中横向输运的复合, 所以新型 SINP 蓝紫光电池短路电流密度高达 $J_{\text{SC}}=49.73\ \text{mA}/\text{cm}^2$, 而且其外量子效率 EQE 在蓝紫光及其它可见光波段也明显高于常规 SINP 光电池 $J_{\text{SC}}=41.43\ \text{mA}/\text{cm}^2$. 这是 SINP 结构光电池的一大特

点与优点.

新型 SINP 光电池结构中, 由于 R_{sh} 与 R_{ITO} 并联(如图 27 所示), 所以其等效并联电阻减小, $R_{\text{sh}}=55.55\ \Omega$. 并联电阻不影响短路电流, 但对开路电压和填充因子 FF 都有影响, 对 SINP 蓝紫光电池, $V_{\text{OC}}=570\ \text{mV}$, $\text{FF}=51.56\%$.

3 结论

用热扩散磷形成浅结、低温热氧化生长超薄 SiO_2 层及射频磁控溅射 ITO 减反射/收集电极膜, 在 $2\ \Omega\cdot\text{cm}$ 的晶硅衬底上成功制备了高量子效率的蓝紫光增强型 SINP 光电池. 磁控溅射沉积的 ITO 薄膜结晶度高, 并且具有高紫外—可见光透过率及优异的电学性能. 室温下 $\pm 1\ \text{V}$ 时, SINP 蓝紫光电池整流比为 324.7, 二极管理想因子 $n=1.84$, $\text{AM1.5}\ 100\ \text{mW}/\text{cm}^2$ 光照下, 光电转换效率 $\eta=13.66\%$. 由于在 SINP 结构中, 光电

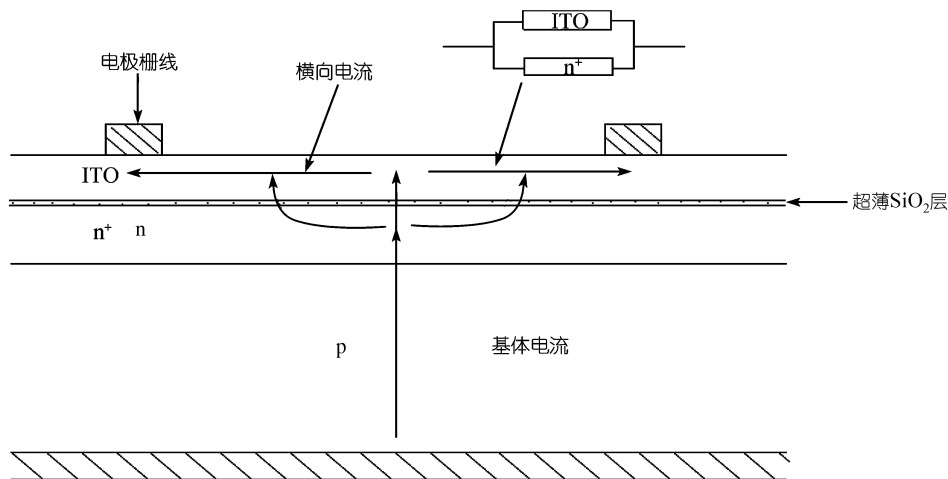


图 26 新型 SINP 光电池发射区顶层电流传输模型

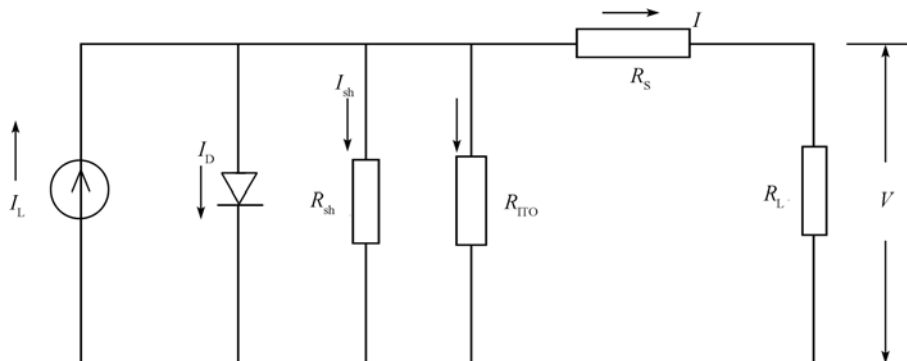


图 27 新型 SINP 光电池等效电路图

流可以通过高结晶度、高载流子迁移率的 ITO 薄膜横向输运, 避免了高磷浓度 n 发射区中横向输运的复合, 降低了发射区横向电阻影响引起的功率损耗, 新型 SINP 蓝紫光电池短路电流密度高达 $J_{sc}=49.73 \text{ mA/cm}^2$, 显示出良好的电学及光伏特性. 在 500 nm 波长, 蓝紫光增强型 SINP 光电池外量子效率及响应率高达 70% 及 285 mA/W; 在 800 nm 波长, 峰值响应率为 487 mA/W.

器件光谱响应拟和计算结果表明新型 SINP 蓝紫光电池的高量子效率得益于浅结以及高导电率、对蓝紫光具有良好减反射效果的 ITO 薄膜的应用与结合. 通过进一步提高 SiO_2 的质量, 对于改良这一结构器件的开路电压与填充因子非常重要. 新型 ITO/ SiO_2 /np 晶硅 SINP 结构蓝紫光电池具有许多独特的优点, 有一定的发展前途, 并有推广应用之美景.

参考文献

- 1 Canfield L R, Kerner J, Korde R. Silicon photodiodes optimized for the EUV and soft xray regions. SPIE, 1990, 1344: 372—377
- 2 田等先, 龚全宝, 张幼平, 等. 半导体光电器件. 北京: 机械工业出版社, 1982. 146
- 3 Fu X S, Yao S Y, Xu J T, et al. Study on high signal-to-noise ratio (SNR) silicon p-n junction photodetector. Optica Applicata, 2006, 36: 421—428
- 4 Selmi M, Chaabouni F, Abaab M, et al. Studies on the properties of sputter-deposited Al-doped ZnO films. Superlattice Microst, 2008, 44: 268—275
- 5 顾祖毅, 田立林, 富力文. 半导体物理学. 北京: 电子工业出版社, 1995. 282
- 6 Chen X D, Ling C C, Fung S, et al. Beling current transport studies of ZnO/p-Si heterostructures grown by plasma immersion ion implantation and deposition. Appl Phys Lett, 2006, 88: 132104
- 7 何波, 徐静, 马忠权, 等. 离子束刻蚀 HgCdTe 环孔 pn 结 I-V, RD-V 特性的研究(上). 红外, 2009, 30(1): 1—7
- 8 Mridha S, Dutta M, Basak D. Photoresponse of n-ZnO/p-Si heterojunction towards ultraviolet/visible lights: Thickness dependent behavior. J Mater Sci: Mater Electr, 2008, 20: 376—379
- 9 施敏, 伍国钰. 半导体器件物理. 西安: 西安交通大学出版社, 2008. 547—549
- 10 艾斌, 沈辉, 班群, 等. 外延晶体硅薄膜太阳能电池的量子效率和特性研究. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2005, 34: 1300—1312
- 11 格林. 太阳能电池工作原理、工艺和系统的应用. 北京: 电子工业出版社, 1987. 140