

doi:10.3788/gzxb20134207.0782

聚光内球面太阳能电池

徐毅, 宋兆丽, 徐政, 贯丛, 刘国松, 姜义

(长春工程学院, 长春 130013)

摘要:为提高阳光利用率和光电转换率,研究了聚光内球面太阳能电池的主要性能,设计了聚光内球面太阳能电池的结构.通过菲涅耳聚光镜将太阳光聚光后射入内表面制备了多晶硅光伏电池的球腔内,在内球面上实现了聚光光伏效应.利用腔内光子气体模型分析计算了内球面上的光照强度,提出硅光电池上的最佳光强概念,计算了在内球面多晶硅电池半导体层厚 $10\ \mu\text{m}$ 时最佳聚光倍数为 18、层厚 $5\ \mu\text{m}$ 时最佳聚光倍数为 9.应用有限元分析法讨论了聚光内球面太阳能电池系统的温度,在 AM1.5, 8 倍聚光条件下,光伏电池最高温度 $353.15\ \text{K}$,处于正常工作范围.采用主动风冷或水冷方法提高对流换热系数可大大降低光伏电池温度,稳定工作效率.通过分析硅光电池效率制约因素,设计了内球面光伏电池的优化结构,填充因子可达 0.85,阳光辐射功率为 $800\ \text{mW}/\text{cm}^2$ 时,聚光内球面太阳能电池效率将超过 33%.

关键词:聚光光伏;腔内光强;内球面光伏电池;硅光电池效率;多晶黑硅

中图分类号:TK51

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)07-0782-5

Condenser Inside Spherical Solar Cell

XU Yi, SONG Zhao-li, XU Zheng, GUAN Cong, LIU Guo-song, JIANG Yi

(Changchun Institute of Technology, Changchun 130013, China)

Abstract: In order to raise utilization ratio of sunlight and photoelectric conversion rate, the inner spherical focusing solar cell structure and the main performance are designed and studied. A Fresnel condenser is used to focus the sun's light onto the inner surface of a ball cavity which is prepared with polycrystalline silicon photovoltaic cells, implementing concentrating photovoltaic effect on the sphere. By using Inner cavity photon gas model, the light intensity in the inner sphere is analyzed and calculated, the concept of optimum light intensity on the silicon photocell is put forward, and the best condenser multiples for a spherical semiconductor polysilicon batteries of 18 and 9 with the layer thicknesses of $10\ \mu\text{m}$ and $5\ \mu\text{m}$ are calculated. Finite element analysis method is applied to discuss the inside sphere temperature of the solar system. Under the condition of the AM 1.5, 8 times concentration, photovoltaic cells' maximum temperature is $353.15\ \text{K}$, in the normal scope of work. Active air cooling or water cooling method can greatly increase the convective heat transfer coefficient and decrease the temperature of the photovoltaic cells, and stabilize the work efficiency. By analyzing the constraints of the efficiency of the silicon photocell, the optimize structure of the inner spherical photovoltaic cells is designed; the fill factor can achieve 0.85, and the efficiency of the solar cells inside the spherical condenser can be more than 33% when the sunlight radiation power is $800\ \text{mW}/\text{cm}^2$.

Key words: Concentrated Photo Voltaic (CPV); Inner chamber light intensity; Inside spherical photovoltaic cells; Silicon photocell efficiency; Polycrystalline black silicon

0 引言

提高太阳能电池的光电转换率,降低其制造成

本,始终是光伏电池技术进步的基本问题.通过聚光方法,使太阳能工作在几倍乃至几十倍的光强条件下,可提高单位面积太阳能电池的输出功率^[1-3],降

基金项目:吉林省科技发展计划项目(No. 20100573)资助

第一作者:徐毅(1961-),男,教授,主要研究方向为聚光光伏及太阳能综合利用. Email:lx2011223@qq.com

收稿日期:2013-01-29;录用日期:2013-04-03

低光伏发电成本. 聚光光伏系统与常规平板太阳能电池组件相比,发电量提高 40%,组件降低成本 40%,系统的发电成本可降低 60%以上^[4-6]. 目前国内外聚光光伏电池或系统均属聚光单次照射型,本文所设计发明的聚光内球面太阳能电池,试图通过同时优化光照和电池结构达到提高效率 and 降低成本的目的,与现有聚光电池相比,不但具有同样的聚光光伏效应,而且能够更多更好地封闭住入射光,光利用率更高、光电效应更强、光电转换效率更高. 在最佳光照强度和采用微观纳米结构制备内球面多晶硅光伏电池条件下,电池效率超过 33%.

1 聚光内球面太阳能电池结构

聚光内球面太阳能电池主要由菲涅尔聚光透镜和内球面半导体光伏电池构成,如图 1. 阳光经菲涅尔透镜聚光后射入玻璃球形空腔内,玻璃球形空腔内表面通过溅射、化学气相沉积以及原子沉降等技术制成如图 2 所示膜层结构的半导体光伏电池^[7]. 其输出引线可制作在通光孔处. 在阳光照射下,该结构产生光伏效应输出电能形成太阳能电池单元,将该单元电池按需要串、并联后,安装在太阳跟踪器上,便构成新型太阳能聚光光伏组件.

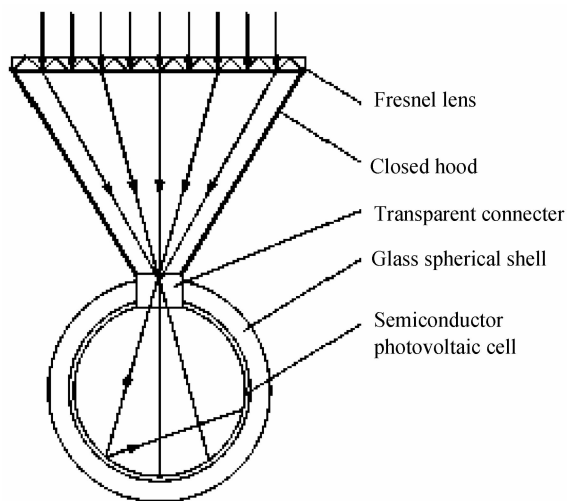


图 1 聚光内球面太阳能电池结构

Fig. 1 Structure diagram of condensation inside spherical solar cell

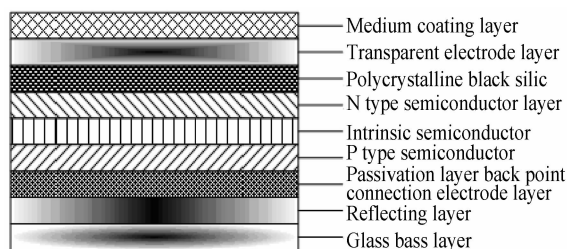


图 2 内球面多晶硅光伏电池结构

Fig. 2 Structure diagram of inside spherical polysilicon solar cell

内球面半导体光伏层可选择多种半导体材料,如非晶硅、微晶硅、多晶硅、碲化镉、铜铟硒化物等. 其半导体层厚仅需几十 μm 甚至数 μm ,因此,可较硅晶圆切片太阳能电池半导体层(厚度 350~450 μm)减少原材料用量 80~90%,大大降低电池成本. 基于目前技术,本文倾向于采用等离子增强化学气相沉积技术方法(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)制备 P 型多晶硅薄膜内球面光伏电池.

令菲涅尔透镜聚光面积 N 倍于玻璃球腔内表面积,当汇聚光射入球腔后,内球面光伏电池将受到比普通日照高出数倍的光强照射,产生聚光光伏效应提高光电转化率. 同时由于入射光只能在腔内反射,最终被光伏电池吸收,所以该系统与普通一次照射型平板光伏电池相比,不但光子利用率高,而且可以完全省略减反射层工艺. 与现有菲涅尔聚光电池相比,也具有光子利用率高和排除聚光光斑光强不均所引起的光电池热岛效应的优点.

内球面半导体电池的 pn 结与常规切片硅光电电池 pn 结相比,不但面积增大而且边界减少,这可使内球面半导体电池光电流增大转换效率提高,而且还减少了边界 pn 结的消耗影响.

2 内球面光伏电池上的光照强度

2.1 内球面光强

进入封闭球腔内的阳光可视为一腔内光子气体系统,光子气体在球内表面上所形成的辐射通量密度即辐射光强 I_0 为^[8]

$$I_0 = J_u = \frac{1}{4} C \frac{U}{V} = \frac{1}{4} u C \quad (1)$$

式中 U 为光子气体系统内能, C 为真空光速, V 为球腔体积, u 为内能密度. 设腔内为 N 个同频率($\bar{\nu}$)的光子组成,则

$$u = \frac{U}{V} = \frac{\sum_{i=1}^N \epsilon_i}{V} = \frac{N h \bar{\nu}}{V} = n h \bar{\nu} \quad (2)$$

$$I_0 = \frac{1}{4} n h \bar{\nu} C \quad (3)$$

式(3)表明内球面上的光照强度与光子数密度 n 及光子能量 $\epsilon = h\nu$ 成正比. 只要入射球腔内的光子数目成倍增加,内球面光伏电池上的光照强度也成倍增加. 这便是腔内表面光伏电池具有聚光光伏效应的依据. 从能量守恒既光通量守恒原理分析,单位时间入射进球腔内的光子,单位时间内必到达球腔内表面. 所以球内表面所获光强应至少等于菲涅尔透镜所实现的 N 倍聚光光强. 被内球面光伏电池反射出来的光子,将成为下一时刻光照强度的补充,

持续产生光伏效应,大大提高系统光子利用率,这就是内反射增光效应.

2.2 最佳光强

最佳光强是指能使半导体光伏电池达到最大光电转换效率所需要的光照强度.一个能量大于禁带宽度的光子,只能在一个硅原子上激发出一对电子空穴对,对光电转换效率来说有效电子空穴对越多越好,所以最佳状态是构成半导体光伏电池的所有硅原子都能被光子激发产生电子空穴对.所以最佳光强应使照射在硅半导体光伏电池上的有效光子数等于硅半导体原子个数.

设内球面多晶硅光伏电池硅半导体层厚 $h_0 = 10 \mu\text{m}$, 面积 $S_0 = 1 \text{ m}^2$. 取多晶硅材料密度 $\rho_0 = 2.33 \text{ g/cm}^3$, 硅元素原子当量 $l_0 = 28.085$, 则 1 m^2 内球面光伏电池的硅原子总数为

$$\phi_0 = \frac{h_0 S_0 \rho_0}{l_0} = 4.99 \times 10^{22} \quad (4)$$

在 AM1.5 条件下,阳光辐射功率为 1000 w/m^2 , 按阳光平均波长 $\bar{\lambda} = 550 \text{ nm}$ 计算辐射光子数, 则单位时间 1 m^2 面积所获光子数为 G_0 .

$$G_0 = \frac{1000}{h\nu} = \frac{1000 \bar{\lambda}}{hC} = 2.76 \times 10^{21} \quad (5)$$

$\phi_0/G_0 \approx 18$, 这说明普通阳光强度下, $10 \mu\text{m}$ 厚多晶硅光伏电池单位面积所获阳光光子数仅为所需光子数的 $1/18$, 此时最佳光照强度所要求的菲涅耳透镜的最佳聚光倍数 $N = 18$. 考虑到高倍聚光所导致的高温效应, 可以再做薄硅半导体层厚度, 如果硅半导体层厚度仅为 $5 \mu\text{m}$, 则聚光倍数可取 9 倍.

2.3 内球面光伏电池温度

聚光条件下, 内球面光伏电池也存在升温问题, 现予以讨论.

决定光伏电池升温特性的热平衡方程为

$$Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}} = MC\Delta T \quad (6)$$

Q_{in} 为光伏电池系统从阳光中吸收的热量.

$$Q_{\text{in}} = P_{\text{in}} N (1 - R - \eta_e) \Delta t \quad (7)$$

式中 P_{in} 为阳光辐射功率, N 为聚光倍数, R 为菲涅耳透镜反射率, η_e 为电池光电转换率, Δt 为光照时间.

Q_{out} 为光伏电池系统的散发热量, 即

$$Q_{\text{out}} = W_{\text{out}} \Delta t \quad (8)$$

W_{out} 为散热功率, M 为光伏电池质量, C 为光伏电池比热, ΔT 为温度增量, 光伏电池的升温速率 V_T 为

$$V_T = \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{P_{\text{in}} N (1 - R - \eta_e) - W_{\text{out}}}{MC} \quad (9)$$

式(9)说明, 在保持最佳光照强度前提下, 降低升温

的有效途径是增加光电转换率和散热功率.

系统达到热平衡时, $V_T = 0, \Delta T = 0, Q_{\text{in}} = Q_{\text{out}}$.

针对光伏电池系统升温过程, 应用有限元分析软件(ANSYS)分析光伏电池温度场, 得到如下结果:

1) 在 AM1.5 (阳光强度 1000 W/m^2) 8 倍聚光条件下, 取 $R = 0.1, \eta_e = 0.15$, 光伏电池热物理参数按单晶硅电池相应参数选取, 散热取自然风冷方式, 气压 101.33 KPa , 气温 300 K , 风速 4 m/s , 对流换热系数 $5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. ANSYS 瞬间分析模式求得, 光伏电池 2000 s 后达到热平衡状态, 最高温度 353.13 K , 处于正常工作的温度范围.

2) 继续利用 ANSYS 模式分析, 提高对流换热系数, 可大大有效降低光伏电池温度. 因此主动风冷或水冷是有效方法^[9].

3 内球面光伏电池的结构优化

实现最佳光照强度, 只满足了提高内球面光伏电池工作效率的外因条件, 而电池效率提高的最终达成, 还需要进一步优化半导体光伏电池的自身结构, 包括硅半导体层表面结构、内部结构、pn 结结构以及电极结构等. 结构优化设计的出发点和最终目的始终围绕效率提高, 而转换效率问题应从有效光子射入硅中, 产生电子-空穴对, 这些电子与空穴漂移到 pn 结附近, 在 pn 结自建电场作用下运动到各自相对边缘, 在结边缘积累后形成扩散电流的角度来分析. 决定转换效率的主要因素有半导体禁带宽度、光子寿命、复合速率、pn 结结构等.

光伏电池转换效率可表示为

$$E_p = \frac{J_{\text{sc}} V_{\text{oc}} FF}{P_{\text{in}}} \quad (10)$$

式中 E_p 为转换效率; J_{sc} 为短路电流密度; V_{oc} 为开路电压; FF 为填充因子; P_{in} 为辐照功率.

3.1 短路电流密度

短路电流密度 J_{sc} 也就是光电流密度, 即

$$J_{\text{sc}} = qF(1-R)f\eta_e \quad (11)$$

式中, F 是进入硅中高于电离能量的光子数, R 是硅层表面的光反射率, f 是进入硅光子能产生的电子-空穴的有效部分, η_e 是硅电池中载流子的收集效率.

聚光内球面的最佳照射强度下, 可使 F 达到最大; 事实上 J_{sc} 与 F 成线性关系, 已有实验测得 8 倍聚光条件下, 硅光电池 1 cm^2 上的短路电流密度 J_{sc} 可达 405 mA . 而 V_{oc} 与 F 的增加按对数关系增加; 硅层表面及其内部的微观纳米结构设计如表面黑硅结构^[11]. 倒金字塔结构^[12]; 内部光陷结构、掺杂结构、量子点^[13]、量子线结构可大大增强光吸收, 由于

硅层中所形成的微观纳米结构,改变了硅材料的能带结构、使光生载流子的产生、分离、输运和收集过程产生了新的机制^[14-17].在普通硅中,每个光子只会导致一个电子被释放到电流中,而在微纳结构中如黑硅中,每个光子能导致二个或多个电子进入电流,于是光电流可增加十倍百倍,这便是光电子增益效益.降低 R 值,使 $1-R > 0.95$,使 f 获得较高值.高 η_e 的获得目前主要通过选用高载流子寿命材料和建立背面场.

3.2 开路电压 V_{oc}

光生电子和空穴的复合速率愈小,开路电压 V_{oc} 就愈高,使硅层厚度小于载流子的扩散长度可有效降低电子、空穴复合;采用 PIN (P type semiconductor intrinsic semiconductor N type semiconductor layer-PIN) 结构,用载流子补偿方法形成本征层,使内建电场与光吸收区重合,促使电子-空穴对分离.

可以利用刘邦武等提出的多晶黑硅制备方法^[18]在内球面多晶硅膜层上制备黑硅.刘邦武等利用等离子体浸没离子注入技术,在多晶硅基片上制备了黑硅材料,扫描电镜结构表明该黑硅呈现多孔组织,孔径 300 nm,可见光波段光吸收率高于 94%,平均少数载流子寿命 5.68 μ s.发现工作气体 SF_6 和 O_2 流量比对黑硅组织性能影响最大,当其为 2.80 时制备的黑硅组织性能最好,也可以用飞秒激光辐照化学辅助刻蚀方法制备多晶黑硅.对于普通硅,太阳光谱中波长大于 1 100 nm 的红外光子是不能激发电子-空穴对的无效光,但含硫的黑硅或掺杂其它元素的微纳硅可形成中间带系.有效吸收近红外光实现上转换作用^[19],参与光电转换,使占阳光总能量 1/3 的红外光产生光伏效应,从而大幅提高光电效率.由于红外光的光电转换减轻了聚光电池的光热效应,十分有利于电池降温.可以肯定 1 cm^2 微纳米结构硅光电池的开路电压 V_{oc} ,将超过普通硅光电池所能达到的实验值 780 mV.

3.3 填充因子 FF

理论上填充因子仅是开路电压 V_{oc} 的函数,其关系式为

$$FF = \frac{U_{oc} - \ln(0.72 + U_{oc})}{1 + U_{oc}} \quad (12)$$

式中 $U_{oc} = \frac{qV_{oc}}{\gamma KT}$,其中 γ 是理想因子,它与实际电路中的串联电阻 R_s 和并联电阻 R_{sh} 有密切关系. R_s 希望值越小越好, R_{sh} 则越大越好.

串联电阻 R_s 主要由电极与半导体材料的接触电阻,半导体材料体电阻,电极导体电阻和金属导体

电阻等组成.串联电阻越小,填充因子越大.并联电阻 R_{sh} 主要由电池表面污浊和半导体晶体缺陷引起的漏泄电流所对应的 pn 结漏泄电阻和电池边缘的漏泄电阻组成,一般为几千欧姆,其通过的电流远小于光电流,故可以忽略不计.

点接触电极技术可有效减小串联电阻,一种方法可采用飞秒脉冲激光对钝化层进行点剥离,然后沉积金属电极,并在接触点用飞秒脉冲激光退火,使金属电极与硅形成良好的欧姆接触.也可以在钝化层上直接沉积金属电极,再用飞秒激光进行局部点退火,使金属穿过钝化层与硅形成合金,得到良好欧姆接触的点接触电极.实验表明,点电极工艺可使填充因子大于 0.85.

4 结论

综上所述,依据现有硅基电池实验数据,在 AM1.5,8 倍聚光条件下,面积 1 cm^2 时, V_{oc} 可达 780 mV, J_{sc} 可达 405 mA,聚光内球面太阳能电池, FF 可达 0.85,取 $P_{in} = 800 \text{ mW/cm}^2$,则聚光内球面太阳能电池效率将超过 33%.

参考文献

- [1] HUANG Guo-hua, SHI Yu-chuan, YANG Hong, *et al.* The performance of conventional crystalline silicon solar cells with low concentrator[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2006, **27**(1): 19-22.
黄国华,施玉川,杨宏,等.常规太阳能电池聚光特性实验[J].太阳能学报,2006,**27**(1):19-22.
- [2] WANG Tao, SAI Xiao-feng, LI Xiao-ting, *et al.* A new concentrators system with linefocus fresnel lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(5): 625-627.
汪韬,赛小锋,李晓婷,等.新型菲涅耳线聚焦聚光太阳能电池组件研究[J].光子学报,2003,**32**(5):625-627.
- [3] WANG Tao, LI Xiao-ting, LI Bao-xia, *et al.* Characteristic analyses of solar cell with new Line-focus fresnel prism[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9): 1138-1141.
汪韬,李晓婷,李宝霞,等.新型菲涅耳线聚焦聚光太阳能电池组件特性分析[J].光子学报,2003,**32**(9):1138-1141.
- [4] WANG Yi-ping, LI Wen-bo, ZHU Li, *et al.* Research progress of concentrator photovoltaic cells and systems[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2011, **32**(3): 433-438.
王一平,李文波,朱丽,等.聚光光伏电池及系统的研究现状[J].太阳能学报,2011,**32**(3):433-438.
- [5] YUAN Jin-she. Applications of conventional Silicon cells with solar booster[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2003, **24**(2): 253-256.
苑进社.常规单晶硅太阳能电池在低倍聚光条件下应用研究[J].太阳能学报,2003,**24**(2):253-256.
- [6] MATSUSHIMA T, SETAKA T. Seiichi muroyama concentrating solar module with horizontal[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2003, **075**: 603-612.
- [7] LI Wei-gang, XU Ying, LI Xu-dong, *et al.* A Study on the factors affecting the efficiency of polycrystalline silicon thin film solar cell[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2001, **37**(4): 511-513.
李维刚,许颖,励旭东,等.多晶硅薄膜太阳能电池效率影响因素

- 的研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2001, **37**(4): 511-513.
- [8] 汪志成. 热力学统计物理[M]. 北京: 高等教育出版社. 2008. 12:308-312.
- [9] WANG Si-cheng. Review trend of solar photovoltaic technology[J]. *Inter National Power*, 2006, (4): 21-23.
- [10] XU Yong-Feng, LI Ming, WANG Liu-Ling, *et al.* The effect of concentrated light intensity on output performance of solar cell arrays[J]. *Acta Physica sinica*, 2009, **58**(11): 8067-8076.
徐永峰, 李明, 王六玲, 等. 聚光光强对光伏电池阵列输出性能的影响[J]. 物理学报, 2009, **58**(11): 8067-8076.
- [11] JIANG Jing, WU Zhi-ming, WANG Tao, *et al.* A new revolutionary material-black Silico [J]. *Materials Review*, 2010, **24**(4): 122-126.
姜晶, 吴志明, 王涛, 等. 革命性的新材料-黑硅[J]. 材料导报, 2010, **24**(4): 122-126.
- [12] TIAN Jia-tong, FENG Shi-meng, WANG Kun-Xia, *et al.* Formance process of pyramids on single crystal Si surface[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(10): 1505-1508.
田嘉彤, 冯仕猛, 王坤霞, 等. 单晶硅表面金字塔生长过程的实验研究 [J]. 光子学报. 2011, **40**(10): 1505-1508.
- [13] GUO H X, ZHAO X P, GUO H L. Preparation of porous SiO₂/Ni/TiO₂ multicoated microsp-heres responsive to electric and magnetic fields[J]. *Langmuir*, 2003, **19**: 9799-9803.
- [14] LI Xiu-jie, HAN Pei-de, YANG Yi-bao, *et al.* Reflector of solar cells based on photonic crystal heterostructures [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(10): 1786-1789.
李秀杰, 韩培德, 杨毅彪, 等. 基于光子晶体异质结的高效太阳能电池反射器研究[J]. 光子学报. 2010, **39**(10): 1786-1789.
- [15] HUA Yin-qun, SUN Hai-feng, LIU Hai-xia, *et al.* Synthesis and photovoltaic pr-operties of ZnO/Si nanostructure solar cell[J]. *Materials Review*, 2012, **26**(12): 13-15.
花银群, 孙海峰, 刘海霞, 等. Si基 ZnO 纳米结构太阳能电池光伏性能研究 [J]材料导报. 2012, **26**(12): 13-15.
- [16] SHANG Shi-guang, ZHAO Ling, HE Yong-ning, *et al.* Research on fabrication and proper-ties of Al-doped Zinc oxide based on silicon heterojunction solar cells[J]. *Journal of S-synthetic Crystals*, 2010, **39**(6): 1499-1503.
商世广, 赵玲, 贺永宁, 等. 硅基铝掺杂氧化锌异质结太阳能电池的制备与性能研究[J]. 人工晶体学报, 2010, **39**(6): 1499-1503.
- [17] WEI Hao-ming, CHEN Ling, GONG Hai-bong, *et al.* Influnce of zno nanorods morphology on the photovoltaic properties of ZnO/Cu₂O heterostructural solar cells [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2012, **27**(8): 833-837.
魏浩铭, 陈令, 巩海波, 等. 氧化锌纳米棒形貌对 ZnO/Cu₂O 异质结太阳能电池光伏性能的影响[J]. 无机材料学报, 2012, **27**(8): 833-837.
- [18] LIU Bang-wu, XIA Yang, LIU Jie, *et al.* Fabrication and characterization of black polycrystalline silicon[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2011, **33**(5): 619-622.
刘邦武, 夏洋, 刘杰, 等. 多晶黑硅的制备及组织性能[J]. 北京科技大学学报, 2011, **33**(5): 619-622.
- [19] ZUMETA I, ESPINOSA R, AYLLO J A. Comparative study of nanoery-stalline TiO₂ photoelectrodes based on characteristics of nanopowder used [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2003, **6**(1): 15-20.